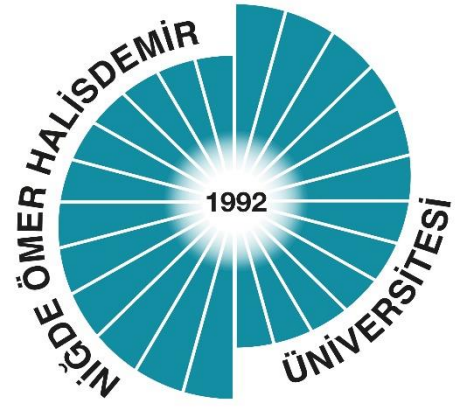


MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ 2020



TEMMUZ 2020

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>

DergiPark
AKADEMİK
ev sahipliğinde

Editör

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK

mgokcek@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Editör Yardımcıları

Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ

mkorkanc@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL

heyucel@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir DOKUZ

adokuz@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Editör Kurulu (Alan Editörleri)

Prof. Dr. Fehiman ÇİNER

fciner@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Süreyya MERİÇ PAGANO

smeric@nku.edu.tr
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ, ÇORLU MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

osivrikaya@ktu.edu.tr
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Hakan ERDEM

herdem@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Saffet AYASUN

saffetayasun@gazi.edu.tr
GAZİ ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Metin YILDIRIM

metin.yildirim@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, GIDA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Zeliha YILDIRIM

zeliha.yildirim@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, GIDA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Yonca YÜCEER

yoncayuceer@comu.edu.tr
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, GIDA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN

ekaydogan@erciyes.edu.tr
ERÇİYES ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Prof. Dr. Murat BARUT

muratbarut27@yahoo.com
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

bora.timurkutluk@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Doç. Dr. Ali Özgün OK

ozgunok@hacettepe.edu.tr
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Doç. Dr. Kutalmış GÜMÜŞ

kgumus@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, HARİTA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Doç. Dr. Aydın YEŞİLDİREK

aydiny@yildiz.edu.tr
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, MAKİNE FAKÜLTESİ, MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Doç. Dr. Talha EKMEKYAPAR

ekmekyapar@gantep.edu.tr
GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Doç. Dr. Serkan ÇAYIRLI

scayirli@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, MADEN MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇİFLİKLİ

muratc@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem ŞAŞ

hatice.sas@sabanciuniv.edu.tr
SABANCI ÜNİVERSİTESİ

Mizanpaj Editörleri

Arş. Gör. Kıvanç KARACAN

kivanckaracan@ohu.edu.tr
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Arş. Gör. Alper ECEMİŞ

ecemisalper@gmail.com
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



ÖN EĞİTİMLİ EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI DESTEKLİ GÖRÜNTÜ SAHTECİLİK TESPİTİ YÖNTEMİ

Ertuğrul GÜL^{1,*}, Serkan ÖZTÜRK²

^{1,2} Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Niğde Türkiye

ÖZET

İnternet ve bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile görüntü sahteciliği tespiti önem kazanmıştır. Ayrıca, görüntü iyileştirme uygulamalarında kullanılan tekniklerin iyi başarımlar göstermesi için görüntülere uygulanan saldırı çeşitlerinin ve bölgelerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, görüntülere uygulanan saldırı çeşitlerini ve saldırı bölgelerini tespit etmek için ön eğitilmiş AlexNet ve GoogLeNet evrişimli sinir ağları destekli görüntü sahtecilik tespiti yöntemi önerilmiştir. Öncelikle; MICC-F2000 veri kümesinde bulunan görüntüler kullanılarak orijinal ve saldırılmış görüntülerin olduğu görüntü sahteciliği tespiti veri kümesi oluşturulmuştur. Saldırılmış görüntüleri elde etmek için Gauss bulanıklaştırma, medyan filtreleme, Gauss gürültü ekleme, Poisson gürültü ekleme ve keskinleştirme saldırıları kullanılmıştır. Daha sonra, ön eğitilmiş AlexNet ve GoogLeNet ağlarının tam bağlantılı katmanları deneysel veri kümesindeki altı veri sınıfı için yeni tam bağlantılı katmanlar ile değiştirilmiştir. Oluşturulan AlexNet ve GoogLeNet destekli ağlar hazırlanan görüntü sahteciliği tespiti veri kümesi ile eğitilerek test edilmiştir. Farklı hiperparametre değerleri için ağların başarımları ölçülmüştür. AlexNet destekli ağlarda en yüksek başarımlar %99,48'lik doğruluk oranı ile elde edilirken, GoogLeNet destekli ağlarda ise en yüksek başarımlar %99,92'lik doğruluk oranı ile elde edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen AlexNet ve GoogLeNet destekli sahtecilik tespiti yönteminin CoMoFoD veri kümesinden alınan görüntüler üzerindeki saldırıları tespit edebilme başarısı gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin başarılı bir şekilde görüntü sahteciliği tespiti için kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Evrişimli sinir ağı, Sahtecilik tespiti, Transfer öğrenme, AlexNet, GoogLeNet

PRE-TRAINED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK BASED IMAGE TAMPER DETECTION METHOD

ABSTRACT

With the development of internet and the computer technologies, image forgery detection has become important issue. In addition, in order to obtain successful performance in image enhancement techniques, the types and regions of the attacks applied to the images must be determined correctly. In this study, in order to detect the types and regions of the attacks applied to the images, pre-trained AlexNet and GoogLeNet convolutional neural networks-based forgery detection method has been proposed. Firstly, image forgery detection dataset containing the original and the attacked images has been created using the images in the MICC-F2000 dataset. Gaussian blurring, median filtering, Gaussian noise adding, Poisson noise adding and sharpening attacks have been used to obtain the attacked images. Then, the fully connected layers of the pre-trained AlexNet and GoogLeNet networks have been replaced with the new fully connected layers for the six classes of the created image forgery detection dataset. The modified AlexNet and GoogLeNet based networks have been trained and tested with the created image forgery detection dataset. The networks performances have been evaluated for different hyper parameter values. While the highest accuracy rate of 99.48% has been achieved in AlexNet supported networks, the highest accuracy rate of 99.92% has been achieved in GoogLeNet supported networks. Also, the proposed AlexNet and GoogLeNet-based forgery detection method has been tested on the images from CoMoFoD dataset. Experimental results show that the proposed method can be used successfully for the image forgery detection.

Keywords: Convolutional neural network, Tamper detection, Transfer learning, AlexNet, GoogLeNet

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ertugrugul@erciyes.edu.tr

Geliş / Received: 04.12.2019 Kabul / Accepted: 14.05.2020 doi: 10.28948/ngmuh.654519

1. GİRİŞ

Son yıllarda, sayısal görüntü düzenleme araçları gibi bilgisayar teknolojilerinin hızla gelişmesi, görüntü üzerinde yapılan sahtecilik işlemlerini oldukça kolaylaştırmıştır. Bu sebeple, internet üzerindeki kurcalanmış görüntülerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum araştırmacıları görüntü sahteciliği tespiti konusuna yöneltmektedir.

Literatürde görüntü sahteciliği tespiti üzerine yapılan çalışmalar genellikle aktif ve pasif yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [1]. Görüntü damgalama [2,3,4] ve dijital imza [5] gibi aktif görüntü sahtecilik tespiti yöntemlerinde görüntünün veya depolama alanının içerisine ek bir bilgi gizlenmektedir. Ancak bu işlemin görüntünün elektronik bir ortama kaydedilmesinden önce gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden internet üzerinden rastgele elde edilen görüntülerin orijinalliğinin denetlenmesinde aktif yöntemler yetersiz kalmaktadır. Kopyala-yapıştır [6,7] ve ekleme [8] gibi pasif görüntü sahteciliği tespiti yöntemlerinde ise herhangi bir ek bilgiye ihtiyaç duyulmaksızın görüntü özellikleri çıkartılarak sahtecilik tespiti yapılmaktadır.

Son yıllarda, derin öğrenmenin bilgisayar görü ve örüntü tanıma gibi alanlardaki başarısı, araştırmacıları derin öğrenmeyi pasif görüntü sahtecilik tespiti konusu üzerinde kullanmaya yönlendirmiştir [9]. Evrişimli Sinir Ağı (ESA) görüntü sahtecilik tespiti uygulamalarında kullanılan derin öğrenme yöntemlerinin başında gelmektedir. ESA, üç renk kanalında piksel yoğunlukları içeren üç adet iki boyutlu diziden oluşan renkli görüntü gibi çoklu diziler halinde gelen verileri işlemek üzere tasarlanmış yapılardır. ESA yerel bağlantılar, paylaşılan ağırlıklar, ortaklama ve birçok katmanın kullanımı olmak üzere doğal işaretlerin özelliklerinden yararlanan dört temel fikirden oluşmaktadır [10].

Literatürde, ESA mimarisini kullanan birçok görüntü sahteciliği tespiti yöntemi bulunmaktadır. Chen ve arkadaşları [11], küçük boyutlu ve sıkıştırılmış görüntü bloklarında medyan filtrelemeyi tespit etmek için ESA tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem kullanarak yapılan testlerde, özellikle kesme ve yapıştırma sahteciliği tespitinde önemli başarımlar iyileştirmeleri sağlandığını belirtmişlerdir. Bayer ve Stamm [12] sahtecilik tespiti özelliklerini eğitim verilerinden otomatik olarak öğrenebilen yeni bir ESA mimarisi önermişlerdir. Bu mimari, önceden seçilmiş özelliklere veya herhangi bir ön işleme gerek duymadan birden fazla sahtecilik çeşidini tespit etmeyi otomatik olarak öğrenebilmektedir. Ayrıca, Bayar ve Stamm [13] yeniden örnekleme algılamasını yeniden sıkıştırılmış görüntülerde gerçekleştirebilen yeni bir ESA mimarisi önermişlerdir. Rao ve Ni [14] ekleme ve kopyala-yapıştır saldırılarını tespit etmek için ESA tabanlı görüntü sahtecilik tespiti yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde ağırlık katmanındaki ağırlıklar mekânsal zengin modelden (SRM-Spatial Rich Model) alınmaktadır. Amerini ve arkadaşları [15] tek ve çift JPEG sıkıştırma saldırılarını tespit etmek için ESA tabanlı yöntemler önermişlerdir. Çalışmalarında görüntü uzayı, frekans uzayı ve çoklu uzay tabanlı olmak üzere üç çeşit yöntem bulunmaktadır. Wang ve Zhang [16] tek ve çift sıkıştırılmış alanları sınıflandırmak için ESA yapısını kullanan bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemin çift sıkıştırılmış bölgelerin tespitinde, özellikle ilk sıkıştırma kalite faktörünün ikincisinden daha yüksek olduğu durumlarda, daha iyi olduğunu öne sürmüşlerdir. Bunk ve arkadaşları [17] görüntü manipülasyonlarının tespit edilmesi ve yerlerinin belirlenmesi için yeniden örnekleme özellikleri ve derin öğrenmenin kombinasyonuna dayalı iki yöntem geliştirmişlerdir. Bondi ve arkadaşları [18] farklı kamera modellerinin görüntülerde bıraktığı karakteristik izleri kullanarak görüntü sahtecilik tespiti ve lokalizasyonu yapan ESA mimarisi tabanlı bir algoritma önermişlerdir.

Bu çalışmada ön eğitilmiş ESA mimarilerinde transfer öğrenme ile görüntü sahtecilik tespiti gerçekleştirilmektedir. Transfer öğrenme belirli bir görev için eğitilmiş ağırlık, yeni bir görev ve veri kümesi ile baştan eğitilme işlemidir [19]. Çalışmada, transfer öğrenme için AlexNet ve GoogLeNet ön eğitilmiş ESA'ları kullanılmıştır. AlexNet [20] 2012 yılında yayınlanan 1,2 milyon yüksek çözünürlüklü görüntü ile eğitilmiş, 1000 farklı sınıfta sınıflandırma yapabilen bir ağırdır. GoogLeNet [21] ise 22 katmanlı bir yapıya sahip yüksek doğruluk oranı ile sınıflandırma yapabilen bir ESA'dır. Bu çalışmanın temel katkısı AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA mimarisi oluşturup transfer öğrenme ile görüntü sahtecilik tespiti gerçekleştirmektir. Öncelikle, saldırılmış görüntülerin ve orijinal görüntülerin olduğu veri kümesi oluşturulmuştur. Saldırılmış görüntüler; Gauss bulanıklaştırma, medyan filtreleme, Gauss gürültü ekleme, Poisson gürültü ekleme ve keskinleştirme saldırıları kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında, AlexNet ve GoogLeNet ön eğitilmiş ağırlıklarının tam bağımlı katmanları saldırı tespiti için düzenlenmiştir. Bu iki ön eğitilmiş ağırlık destekli ESA mimarileri, oluşturduğumuz veri kümesi kullanılarak yeniden eğitilmiştir. Eğitilen ağların deneysel sonuçları, bu ağların görüntü sahtecilik tespitindeki başarımlarının yüksek olduğunu göstermiştir. Özellikle görüntü iyileştirme uygulamalarında kullanılan tekniklerin iyi başarımlarını göstermesi için görüntülere uygulanan saldırı çeşitlerinin ve bölgelerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi önem arz etmektedir. Bu yüzden transfer öğrenme kullanılarak geliştirilen ağlar farklı boyutlardaki görüntülerde sahtecilik çeşidini ve sahtecilik bölgelerini tespit etmek için sistemleştirilmiştir. Genellikle sınıflandırma ve nesne tanıma gibi uygulamalarda kullanılan bu ön eğitilmiş ağırlıkların ağırlıklarının yapılan deneyler sonucunda görüntü sahtecilik tespiti için de iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi organize edilmektedir: Bölüm 2, ESA mimarilerinden olan AlexNet ve GoogLeNet hakkında genel bilgileri anlatmaktadır. Önerilen yöntem Bölüm 3'te anlatılmaktadır. Bölüm 4'te deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Sonuç ve tartışma Bölüm 5'te açıklanmaktadır.

2. EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI (ESA)

ESA çeşitli bilgisayar görme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir derin öğrenme yaklaşımıdır [22]. Genellikle ESA mimarileri evrişim katmanı, ortaklama katmanı ve tam bağlantılı katman olmak üzere üç tip katmandan oluşmaktadır. ESA mimarilerini oluşturan bu katmanların birbirinden farklı görevleri ve özellikleri bulunmaktadır [23]. Evrişim katmanında, giriş görüntüsüne bir evrişim filtresi uygulanarak aktivasyon haritası çıkartılmaktadır. Ortaklama katmanında, küçük aktivasyon haritaları oluşturmak için bağımsız olarak her bir aktivasyon haritasının üzerinde çalışan bir aşağı örnekleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Tam bağlantılı katmanda ise evrişim katmanları tarafından çıkarılan ve katmanları birleştirerek aşağı örneklenen özellikler üzerinde doğrusal işlemler gerçekleştirilmektedir [24]. ESA uygulamalarından birisi olan transfer öğrenimi ön eğitilmiş ESA mimarilerine yeni bir görev yüklemek için ağı yeniden eğitilmesi işlemidir. Transfer öğrenme kullanmanın temel amacı, yeterli büyüklükte eğitim kümeleri mevcut olmayan görüntü sınıflandırma problemlerinde ESA mimarilerinin kullanılmasını sağlamaktır [25]. Araştırmalar, taban ve hedef veri kümelerinin birbirinden çok farklı olduğu durumlarda bile transfer öğrenme kullanımının ESA ağırlıklarının rastgele başlatılmasına göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir [26]. Farklı mimari yapılarla sahip ve transfer öğrenme uygulamalarında kullanılan birçok ESA tabanlı yöntem bulunmaktadır. Transfer öğrenme uygulamalarında kullanılan en yaygın ESA mimarileri AlexNet ve GoogLeNet ağıdır.

AlexNet [20] Krizhevsky ve arkadaşları tarafından 2012 yılında önerilen, ImageNet Large-Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) veri kümesindeki 1000 farklı sınıfı bulunan kabaca 1,2 milyon görüntü ile eğitilmiş bir ESA mimarisidir. AlexNet mimarisi yaklaşık 650.000 nöron ve 60 milyon parametreye sahiptir [27]. Bu mimari beş adet evrişim katmanı, iki adet normalleştirme katmanını, üç adet maksimum ortaklama katmanını, üç adet tam bağlantılı katmanı ve çıkışta softmax aktivasyonu olan doğrusal bir katmanı içermektedir. AlexNet ağı $227 \times 227 \times 3$ boyutlardaki bir görüntüyü girdi olarak aldıktan sonra, tekrarlamalı bir şekilde evrişim ve ortaklama işlemlerini uygulayıp, sonuçları tam bağlantılı katmanlara iletmektedir [23].

GoogLeNet [21] Szegedy ve arkadaşları tarafından 2014 yılında önerilen ILSVRC 2014'ün galibi olan 22 katmanlı bir yapıya sahip ESA mimarisidir. GoogLeNet, AlexNet'e göre daha derin bir yapıya sahiptir [23]. GoogLeNet dokuz adet başlangıç modülü, iki adet evrişim katmanı, boyut küçültme için bir adet evrişim katmanı, iki adet normalleştirme katmanı, dört adet maksimum ortaklama katmanı, bir adet ortalama ortaklama katmanı, bir adet tam bağlantılı katman ve çıkışta softmax aktivasyonu olan doğrusal bir katmanını içermektedir [27]. GoogLeNet ağı $224 \times 224 \times 3$ boyutundaki görüntüleri girdi olarak alıp işlemektedir.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM

Bu çalışmada görüntüler üzerinde yapılan sahteciliklerin tespit ve lokalize edilmesi için ESA mimarileri üzerinde transfer öğrenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ön eğitilmiş AlexNet ve GoogLeNet mimarileri modifiye edilip transfer öğrenme uygulanarak sahtecilik tespiti görevini gerçekleştirmek üzere yeniden eğitilmiştir. Oluşturulan AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA mimarileri kullanılarak farklı boyutlardaki görüntüler üzerinde yapılan sahteciliklerin tespiti ve lokalize edilmesi işlemleri sistemleştirilmiştir.

3.1. Transfer Öğrenme

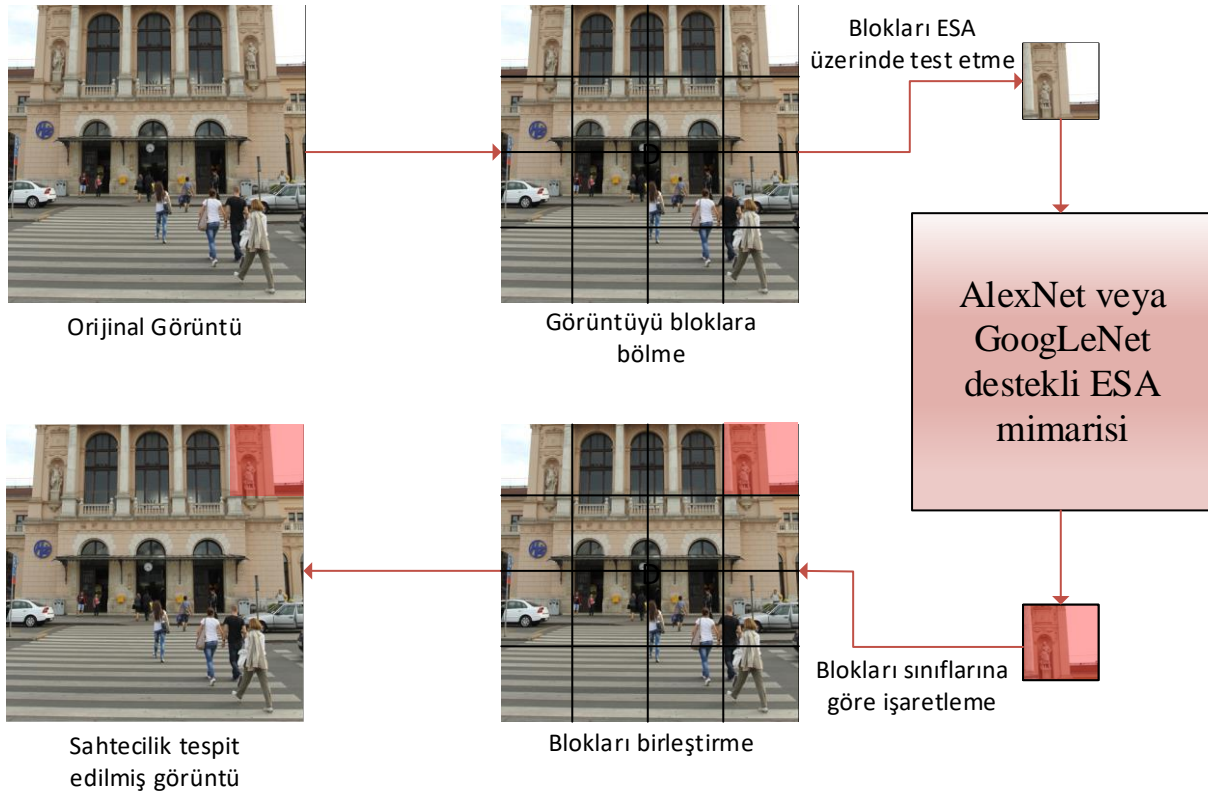
Transfer öğrenme belirli bir görev için eğitilmiş ağı, yeni bir görevi gerçekleştirmesi için bir veri kümesi ile yeniden eğitilme işlemidir. Bu çalışmada, Gauss bulanıklaştırma, medyan filtreleme, Gauss gürültü ekleme, Poisson gürültü ekleme, keskinleştirme saldırılarının ve orijinal görüntülerin olduğu bir veri kümesi hazırlanmıştır. Veri kümesinin hazırlanma süreci çalışmanın deneysel kurulum bölümünde ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır. Transfer öğrenme işlemi gerçekleştirmek için öncelikle AlexNet ve GoogLeNet ağlarının tüm katmaları kopyalanarak hedef ağlarımız oluşturulmuştur. Daha sonra, 1000 sınıf için tasarlanmış son tam bağlantılı katmanlar veri kümemizdeki 6 sınıf için yeni üç tam bağlantılı katman ile değiştirilmiştir. Böylece, AlexNet ve GoogLeNet mimarileri görüntüler üzerinde yapılan Gauss bulanıklaştırma, medyan filtreleme, Gauss gürültü ekleme, Poisson gürültü ekleme ve keskinleştirme sahteciliklerinin tespit ve lokalize edilmesi görevine uyarlanmıştır. Oluşturulan bu ağlar görüntüler üzerinde saldırı tespiti görevi için, yeni oluşturulmuş veri kümesi ile eğitilip test edilmiştir.

3.2. Sahtecilik Tespiti Sistemi

Önerilen sistemde, sahtecilik tespiti yapılacak görüntü öncelikle kullanılan ESA mimarilerine göre bloklara ayrılmaktadır. Görüntü, AlexNet destekli ESA mimarisi için $227 \times 227 \times 3$ boyutlarında, GoogLeNet destekli ESA mimarisi için $224 \times 224 \times 3$ boyutlarında bloklara ayrılmaktadır. Blok boyutu seçimi AlexNet ve GoogLeNet ESA mimarilerinin giriş olarak aldığı görüntü boyutlarına göre belirlenmiştir. Daha sonra her bir blok AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA mimarileri ile sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma ESA eğitiminde kullanılan sınıflara göre gerçekleştirilmektedir. Son olarak sistem bu sınıflandırılmış blokları

yeniden bir araya getirmektedir. Önerilen sahtecilik tespiti sisteminin ana işlevini AlexNet veya GoogLeNet destekli ESA mimarileri oluşturmaktadır. Bu yüzden ESA'ların eğitimi sırasında elde edilen başarı çok önemlidir. Hata payının çok düşük olması istenmektedir. Önerilen sahtecilik tespiti sistemi; görüntünün hazırlanması, saldırı bölgesi ve türünün tespiti, saldırı bölgesi ve türünün gösterilmesi olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Önerilen sistemin blok diyagramını Şekil 1'de gösterilmektedir. Sistemin temel adımları aşağıdaki gibidir:

- 1- **Görüntünün hazırlanması:** Görüntüler kullanılan ESA mimarisine göre bloklara ayrılır (AlexNet destekli ESA mimarisi için $227 \times 227 \times 3$ boyutlarında, GoogLeNet destekli ESA mimarisi için $224 \times 224 \times 3$ boyutlarında).
- 2- **Saldırı bölgesi ve türünün tespiti:** Bloklara ayrılmış görüntü parçaları AlexNet veya GoogLeNet destekli ESA mimarileri üzerinde test edilerek sınıflandırılır.
- 3- **Saldırı bölgesi ve türünün gösterilmesi:** Saldırı yapılmış olarak tespit edilen bölgeler saldırı türü ile işaretlenir ve parçalara ayrılmış bloklar birleştirilir.



Şekil 1. AlexNet veya GoogLeNet destekli ESA mimarisi tabanlı sahtecilik tespiti yöntemi

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Deneysel Kurulum

Ön eğitilmiş AlexNet ve GoogLeNet ağlarına transfer öğrenme ile görüntüler üzerinde sahtecilik tespiti görevi verilebilmesi için ilk önce orijinal ve manipüle edilmiş görüntülerden oluşan deneysel veri kümesi oluşturulmuştur. Veri kümesinin oluşturulması için MICC-F2000 [28] veri kümesinde bulunan üzerinde herhangi bir değiştirilme ya da oynama yapılmamış 1300 adet işlenmemiş renkli (RGB) görüntü alınmıştır. AlexNet ağlarını eğitmek için $227 \times 227 \times 3$ boyutlarında görüntü blokları orijinal görüntüler kullanılarak oluşturulmuştur. Benzer şekilde GoogLeNet ağlarını eğitmek için $224 \times 224 \times 3$ boyutlarında görüntü blokları da orijinal görüntülerden elde edilmiştir. Toplamda her bir ağ için kullanılmak üzere 70200 adet görüntü bloğu oluşturulmuştur. Bu görüntülerden, 60000 tanesi eğitim, 10200 tanesi ise test görüntüsü olarak rastgele seçilmiştir. Son olarak,

ÖN EĞİTİMLİ EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI DESTEKLİ GÖRÜNTÜ SAHTECİLİK TESPİTİ YÖNTEMİ

eğitim ve test görüntülerine aşağıda ifade edilen 5 farklı saldırı tipi uygulanarak manipülasyona uğramış görüntüler elde edilmiştir:

- 5×5 pencere boyutu ve “1.1” standart sapma değeri ile Gauss bulanıklaştırma
- 5×5 pencere boyutu ile medyan filtreleme
- “0.01” varyans değeri ile Gauss gürültü ekleme
- Poisson gürültü ekleme
- 5×5 pencere boyutu ile keskinleştirme

Sonuç olarak, saldırı uygulanmış görüntüler dahil toplamda her bir ağın eğitimi için 360000, testi için ise 61200 görüntü elde edilmiştir.

4.2. Deneysel Sonuçlar

AlexNet ve GoogLeNet ön eğitilmiş ağlarının transfer eğitimi ile görüntü sahtecilik tespiti üzerindeki başarımlarını ölçmek için MICC-F2000 veri kümesi kullanarak içerisinde Gauss bulanıklaştırma, medyan filtreleme, Gauss gürültü ekleme, Poisson gürültü ekleme, keskinleştirme saldırılarının ve orijinal görüntülerin bulunduğu veri kümesi oluşturulmuştur. Oluşturulan eğitim veri kümesi ile eğitilen ağlar test veri kümesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Problem karşısında en başarılı sonuçları veren ağları bulmak için farklı hiperparametreler kullanılarak ağlar eğitilmiştir. İlk öğrenme oranının 0,001’den büyük olduğu durumlarda ağların başarılı sonuçlar vermediği yapılan ön çalışmalarda görülmüştür. Bu yüzden ilk öğrenme oranı 0,001 ve 0,0001 olarak seçilmiştir. Maksimum iterasyonun 10 olduğu durumlarda, 16, 32 ve 64 olarak ayarlanan mini yığın büyüklüğü (minibatchsize, mbs) değerlerindeki AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA ağlarının eğitim ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maksimum iterasyonun 5, ilk öğrenme oranının 0,001 seçildiği durumlarda da eğitim ve test işlemleri yapılmıştır. Eğitilen ağların test sonuçlarındaki başarıları Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır [29].

$$\text{Doğruluk oranı} = \frac{\text{Doğru tahmin sayısı}}{\text{Toplam örnek sayısı}} \quad (1)$$

Eğitilen ağların doğruluk oranları, eğitim ve test süreleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Tablo 1’de görüldüğü üzere, farklı mini yığın büyüklüğü değerlerinde eğitilen ağların doğruluk oranında GoogLeNet destekli ESA %99,92 oranında başarı elde ederek AlexNet destekli ESA’dan daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca GoogLeNet destekli ESA’ların eğitim sürelerinin AlexNet destekli ESA’lardan daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Test sürelerindeki başarı ise değişiklik göstermektedir.

Tablo 1. AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA mimarilerinin test sonuçlarındaki doğruluk oranları

Hiperparametre		AlexNet			GoogLeNet			
Maksimum iterasyon	İlk öğrenme oranı	Mini yığın büyüklüğü	Doğruluk oranı	Eğitim süresi (saniye)	Test süresi (saniye)	Doğruluk oranı	Eğitim süresi (saniye)	Test süresi (saniye)
10	0,001	16	%94,89	44419	273,87	%99,88	43513	267,13
		32	%99,48	44163	253,83	%99,91	43763	258,09
		64	%98,76	43465	251,41	%99,92	42536	256,82
	0,0001	16	%98,80	44505	258,37	%80,39	44277	255,16
		32	%99,46	44168	253,11	%79,66	43005	260,05
		64	%99,35	43627	255,30	%82,32	43419	258,16
5	0,001	16	%98,23	22911	249,53	%74,60	22452	260,21
		32	%99,28	23556	249,96	%72,68	22284	257,78
		64	%98,46	22486	250,83	%79,35	22020	257,17

En iyi başarımlar elde edilen ağlar incelendiğinde, AlexNet destekli ESA’nın test görüntülerinin tamamının %0,52’lik kısmını, GoogLeNet destekli ESA’nın ise %0,08’lik kısmını hatalı bir şekilde sınıflandırdığı gözükmektedir. Ayrıca en başarılı GoogLeNet destekli ESA’nın eğitim süresi AlexNet destekli ESA’dan daha düşüktür. Ancak GoogLeNet destekli ESA’nın test süresi daha yüksektir. Tablo 2’de en başarılı AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA’ların sınıflar içerisindeki doğruluk oranları gösterilmektedir. AlexNet destekli ESA %99,94’lik doğruluk oranı ile en yüksek başarıyı Gauss gürültü eklenmiş görüntüleri sınıflandırmakta göstermiştir. GoogLeNet destekli ESA ise Gauss gürültü ekleme, medyan filtreleme, Gauss bulanıklaştırma, Poisson gürültü ekleme saldırıları uygulanmış görüntüleri %100’lük başarıyla ile tamamen doğru sınıflandırmıştır. GoogLeNet destekli ESA tüm sınıflarda AlexNet destekli ESA’dan daha iyi sonuç vermiştir.

Tablo 2. En başarılı ağların test sonuçlarının sınıflara göre doğruluk oranları

Sınıflar	AlexNet destekli ESA'nın doğruluk oranı	GoogLeNet destekli ESA'nın doğruluk oranı
Orijinal görüntü	%99,64	%99,97
Gauss bulanıklaştırma	%99,47	%100
Medyan filtreleme	%99,44	%100
Gauss gürültü ekleme	%99,94	%100
Poisson gürültü ekleme	%99,65	%100
Keskinleştirme	%98,73	%99,56
Toplam doğruluk oranı	%99,48	%99,92

Şekil 2'de AlexNet destekli ESA'nın karışıklık matrisi gösterilmektedir. Bu matris incelendiğinde keskinleştirme saldırısı sınıfının en düşük başarıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bu sınıf içerisinde hatalı olarak sınıflandırılan görüntülerin %97,67'si orijinal olarak sınıflandırılmıştır. AlexNet destekli ESA için en yüksek başarı Gauss gürültü sınıfında elde edilmiştir. Bu sınıfta yalnızca 6 görüntü hatalı olarak sınıflandırılmıştır.

Gerçek Sınıf	Tahmin Edilen Sınıf					
	Gauss bulanıklaştırma	Gauss gürültü ekleme	Medyan filtreleme	Orijinal	Poisson gürültü ekleme	Keskinleştirme
Gauss bulanıklaştırma	10146		54			
Gauss gürültü ekleme		10194			6	
Medyan filtreleme			10143	54	3	
Orijinal			8	10164	27	1
Poisson gürültü ekleme		2	1	32	10165	
Keskinleştirme				126	3	10071

Şekil 2. AlexNet destekli ESA'nın karışıklık matrisi

Şekil 3'te gösterilen GoogLeNet destekli ESA'nın karışıklık matrisi incelendiğinde sadece orijinal ve keskinleştirme saldırısı görüntüleri sınıflandırılırken hataların olduğu gözükmemektedir. Orijinal görüntüler sınıfında yalnızca 3 görüntü yanlış sınıflandırılırken keskinleştirme saldırısı sınıfından 44 görüntü yanlış sınıflandırılmıştır.

Gerçek Sınıf	Tahmin Edilen Sınıf					
	Gauss bulanıklaştırma	Gauss gürültü ekleme	Medyan filtreleme	Orijinal	Poisson gürültü ekleme	Keskinleştirme
Gauss bulanıklaştırma	10200					
Gauss gürültü ekleme		10200				
Medyan filtreleme			10200			
Orijinal				10197		3
Poisson gürültü ekleme					10200	
Keskinleştirme		1		43		10156

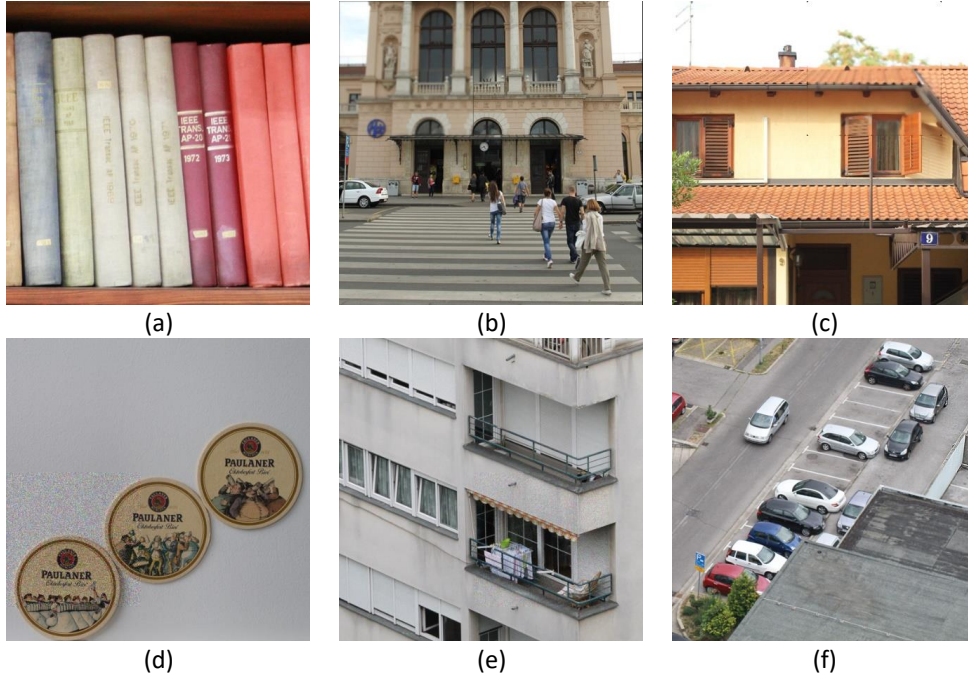
Şekil 3. GoogLeNet destekli ESA'nın karışıklık matrisi

ÖN EĞİTİMLİ EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI DESTEKLİ GÖRÜNTÜ SAHTECİLİK TESPİTİ YÖNTEMİ

Önerilen AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA tabanlı sahtecilik tespiti sistemlerinin başarımlarını değerlendirmek için Şekil 4’ de gösterilen CoMoFoD [30] veri tabanından alınmış orijinal görüntüler kullanılmıştır. Bu görüntülerin farklı bölgelerine Gauss bulanıklaştırma, medyan filtreleme, Gauss gürültü ekleme, Poisson gürültü ekleme ve keskinleştirme saldırıları uygulanarak Şekil 5’teki kurcalanmış görüntüler elde edilmiştir.



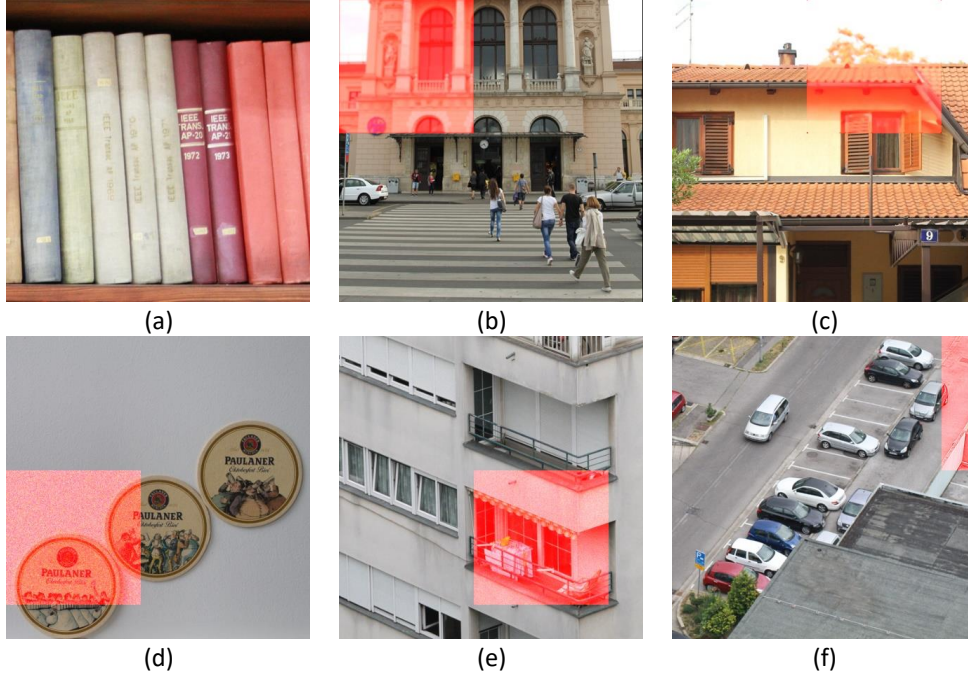
Şekil 4. Önerilen AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA tabanlı sahtecilik tespiti sistemlerinin başarımlarının değerlendirilmesi için kullanılan orijinal görüntüler



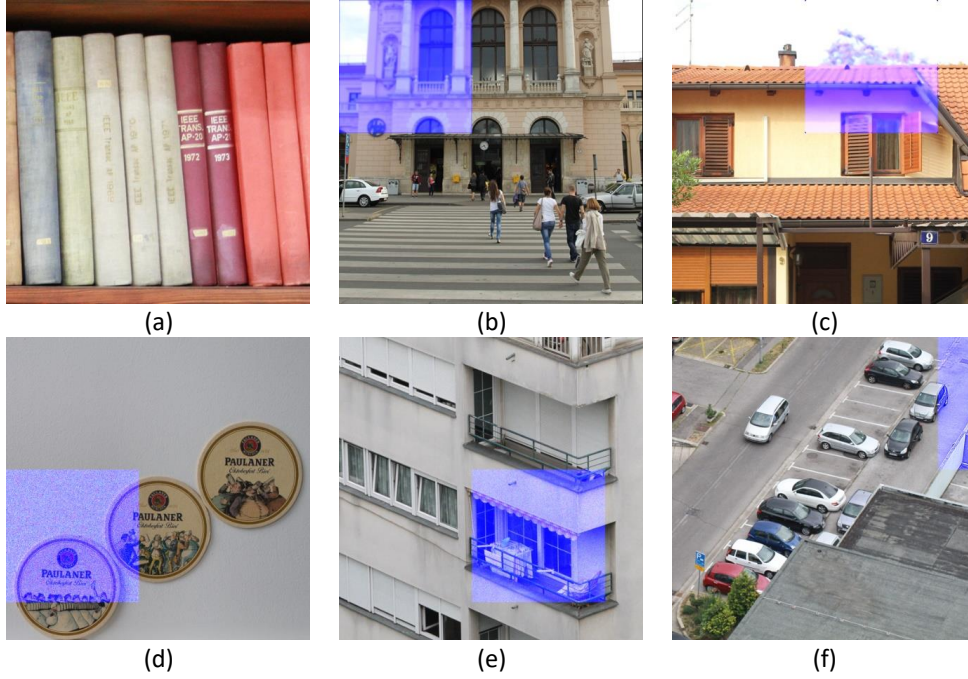
Şekil 5. Görüntülerin farklı bölgelerine farklı saldırıların uygulanması: a) orijinal, b) Gauss bulanıklaştırma, c) medyan filtreleme, d) Gauss gürültü ekleme, e) Poisson gürültü ekleme, f) keskinleştirme

E. Gül, S. Öztürk

Şekil 5'te gösterilen görüntülerdeki kurcalanmış bölgeler önerilen AlexNet ve GoogLeNet destekli ESA tabanlı sahtecilik tespiti sistemleri kullanılarak işaretlenmiştir. Şekil 6'da AlexNet destekli ESA, Şekil 7'de ise GoogLeNet destekli ESA tabanlı sahtecilik tespiti sistemi kullanılarak işaretlenmiş görüntüler gösterilmektedir. Şekillerdeki işaretlenmiş görüntüler incelendiğinde, kurcalanan bölgelerinin başarılı bir şekilde tespit edildiği görülmektedir.



Şekil 6. AlexNet destekli ESA kullanılarak sahtecilik bölgelerinin tespiti: a) orijinal, b) Gauss bulanıklaştırma, c) medyan filtreleme, d) Gauss gürültü ekleme, e) Poisson gürültü ekleme, f) keskinleştirme



Şekil 7. GoogLeNet destekli ESA kullanılarak sahtecilik bölgelerinin tespiti: a) orijinal, b) Gauss bulanıklaştırma, c) medyan filtreleme, d) Gauss gürültü ekleme, e) Poisson gürültü ekleme, f) keskinleştirme

ÖN EĞİTİMLİ EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI DESTEKLİ GÖRÜNTÜ SAHTECİLİK TESPİTİ YÖNTEMİ

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada görüntüler üzerinde sahtecilik tespitinin gerçekleştirilmesi için ön eğitilmiş AlexNet ve GoogLeNet mimarilerinde transfer öğrenme gerçekleştirilmiştir. Bu ön eğitilmiş ESA mimarilerine sahtecilik tespiti görevi verilebilmesi için orijinal ve 5 farklı saldırı uygulanmış görüntülerden oluşturulan veri kümesi hazırlanmıştır. Hazırlanan eğitim veri kümesi ile yeniden eğitilen ağların test veri kümesi kullanılarak başarımları gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda AlexNet destekli ESA %99,48'lik bir başarı elde ederken, GoogLeNet destekli ESA ise %99,92'lik bir başarı elde etmiştir. GoogLeNet destekli ESA her bir saldırı türünde AlexNet destekli ESA'dan daha başarılı sınıflandırma yapmıştır. Önerilen sahtecilik tespiti sisteminin başarımını değerlendirmek için büyük boyutlardaki görüntüler üzerinde farklı bölgelere ağırlık eğitiminde kullanılan saldırı türleri ile müdahaleler yapılmıştır. Bu müdahale edilmiş görüntülerdeki müdahale edilmiş tüm bölgelerin tespiti önerilen AlexNet destekli ESA ve GoogLeNet destekli ESA tabanlı sahtecilik tespiti sistemleri kullanılarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, AlexNet ve GoogLeNet evrişimli sinir ağları yerine VGGNet [31] ve ResNet [32] gibi farklı mimarilerin kullanılması düşünülebilir. Bununla birlikte, önerilen yöntemin başarısı farklı saldırı türlerini içeren veri kümeleri kullanılarak değerlendirilebilir. Ayrıca önerilen yöntem daha küçük boyutlardaki görüntü bloklarında saldırı tespiti yapması için geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] N. B. A. Warif, A. W. A. Wahab, M. Y. I. Idris, R. Ramli, R. Salleh, S. Shamshirband, and K. K. R. Choo, "Copy-move forgery detection: Survey, challenges and future directions", *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 75, pp. 259-278, 2016.
- [2] W. Ding, W. Yan and D. Qi, "Digital image watermarking based on Discrete Wavelet Transform", *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 129-139, 2002.
- [3] X. Wu, "A new technique for digital image watermarking", *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 843-848, 2005.
- [4] E. Gul and S. Ozturk, "A novel hash function based fragile watermarking method for image integrity.", *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 13, pp. 17701-17718, 2019.
- [5] H. Zhang, C. Yang and X. Quan, "Image authentication based on digital signature and semi-fragile watermarking", *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 752-759, 2004.
- [6] M. Alkawaz, G. Sulong, T. Saba and A. Rehman, "Detection of copy-move image forgery based on Discrete Cosine Transform", *Neural Computing and Applications*, vol. 30, no. 1, pp. 183-192, 2018.
- [7] Y. Liu, Q. Guan and X. Zhao, "Copy-move forgery detection based on convolutional kernel network", *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, no. 14, pp. 18269-18293, 2018.
- [8] J. Han, T. Park, Y. Moon and I. Eom, "Quantization-based Markov feature extraction method for image splicing detection", *Machine Vision and Applications*, vol. 29, no. 3, pp. 543-552, 2018.
- [9] D. Cozzolino, G. Poggi and L. Verdoliva, "Recasting Residual-based Local Descriptors as convolutional neural networks", In Proc. 5th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security-IHMMSec '17, 2017, pp. 159-164.
- [10] Y. LeCun, Y. Bengio and G. Hinton, "Deep learning", *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.
- [11] J. Chen, X. Kang, Y. Liu and Z. J. Wang, "Median filtering forensics based on convolutional neural networks", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 1849-1853, 2015.
- [12] B. Bayar and M. C. Stamm, "A Deep learning approach to universal image manipulation detection using a new convolutional layer", In Proc. 4th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security-IH&MMSec '16, 2016, pp. 5-10.
- [13] B. Bayar and M. C. Stamm, "On the robustness of constrained convolutional neural networks to JPEG post-compression for image resampling detection", In Proc. 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2017, pp. 2152-2156.
- [14] Y. Rao and J. Ni, "A deep learning approach to detection of splicing and copy-move forgeries in images", In Proc. 2016 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS), 2016, pp. 1-6.
- [15] I. Amerini, T. Uricchio, L. Ballan and R. Caldelli, "Localization of JPEG double compression through multi-domain convolutional neural networks", In Proc. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2017, pp. 1865-1871.
- [16] Q. Wang and R. Zhang, "Double JPEG compression forensics based on a convolutional neural network", *EURASIP Journal on Information Security*, vol. 2016, no. 1, 2016.

- [17] Bunk, J.; Bappy, J.H.; Mohammed, T.M.; Nataraj, L.; Flenner, A.; Manjunath, B.; Chandrasekaran, S.; Roy-Chowdhury A.K. and Peterson, L. "Detection and localization of image forgeries using resampling features and deep learning", In Proc. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2017, pp. 1881-1889.
- [18] L. Bondi, S. Lameri, D. Güera, P. Bestagini, E. J. Delp and S. Tubaro, "Tampering detection and localization through clustering of camera-based CNN features", In Proc. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2017, pp. 1855-1864.
- [19] D. C. Cireşan, U. Meier and J. Schmidhuber, "Transfer learning for Latin and Chinese characters with deep neural networks", In Proc. The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2012, pp. 1-6.
- [20] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks", In Proc. Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012), 2012, pp. 1097-1105.
- [21] Andrew Rabinovich C Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke and A. Rabinovich, "Going deeper with convolutions", In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015, pp. 1-9
- [22] B. Zou, Y. Guo, Q. He, P. Ouyang, K. Liu and Z. Chen, "3D Filtering by block matching and convolutional neural network for image denoising", *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 33, no. 4, pp. 838-848, 2018.
- [23] Y. Guo, Y. Liu, A. Oerlemans, S. Lao, S. Wu and M. Lew, "Deep learning for visual understanding: A review", *Neurocomputing*, vol. 187, pp. 27-48, 2016.
- [24] E. A. Hadhrami, M. A. Mufti, B. Taha and N. Werghi, "Transfer learning with convolutional neural networks for moving target classification with micro-Doppler radar spectrograms", In Proc. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), 2018, pp. 148-154.
- [25] M. A. Mufti, E. A. Hadhrami, B. Taha and N. Werghi, "Automatic target recognition in SAR images: Comparison between pre-trained CNNs in a transfer learning based approach", In Proc. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), 2018, pp. 160-164.
- [26] J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, and H. Lipson, "How transferable are features in deep neural networks?", In Proc. Advances in Neural Information Processing Systems 27 (NIPS 2014), 2014, pp. 3320-3328.
- [27] M. Mehdipour Ghazi, B. Yanikoglu and E. Aptoula, "Plant identification using deep neural networks via optimization of transfer learning parameters", *Neurocomputing*, vol. 235, pp. 228-235, 2017.
- [28] I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. Del Bimbo and G. Serra, "A SIFT-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 6, no. 3, pp. 1099-1110, 2011.
- [29] T. Ozcan and A. Basturk, "Transfer learning-based convolutional neural networks with heuristic optimization for hand gesture recognition.", *Neural Computing and Applications*, vol. 31, no. 12, pp. 8955-8970, 2019.
- [30] D. Tralic, I. Zupancic, S. Grgic, and M. Grgic, "CoMoFoD-New database for copy-move forgery detection", In Proc. Electronics in Marine ELMAR-2013, 2013, pp. 49-54.
- [31] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition.", CoRR, abs/1409.1556, 2014.
- [32] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition.", CoRR, abs/1512.03385, 2015.





RSESLIBKNN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ KULLANILARAK PARKİNSON HASTALIĞININ TANISI

İlknur BÜTÜNER¹ , Burak KAPLAN² , Kemal ADEM^{3,*} 

^{1,2,3} Aksaray Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

ÖZET

Parkinson hastalığı, insanların yaşam kalitesini etkileyen nörolojik bir hastalıktır. Parkinson hastalığı merkezi sinir sistemini olumsuz etkileyen bir hastalıktır. Hastaların ölümüne yol açabilmektedir. Bu nedenle, Parkinson hastalığının erken tespiti son derece önemlidir. Parkinson hastalığına ait belirtiler, potansiyel olarak gelişmiş makine öğrenme tekniklerine dayanan bilgisayar destekli tanı sistemleri ile tespit edilebilir. Bu çalışmada Parkinson hastalığı tanısı için kNN, RseslibKnn ve A1DE makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmanın amacı Parkinson hastalığı veri kümesi üzerinde makine öğrenmesi yöntemlerinin başarı oranlarının karşılaştırılarak en uygun karar destek sisteminin sunulmasıdır. Veri kümesi olarak 'UC Irvine Machine Learning Repository' veri tabanından elde edilen, 252 örnekten ve 753 öznitelikten oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Literatür üzerinde farklı çalışmalar da incelenip karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar farklı çapraz geçerlilikler üzerinden yapılmış olup bunların ortalaması başarı sonucu olarak verilmiştir. Çalışma sonucunda, parkinson hastalığı veri kümesi kNN, RseslibKnn ve A1DE makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılmış ve daha sonra eğitim ve test sonuçları doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri temel alınarak değerlendirilmiştir. Farklı çapraz geçerlilik değerleri ile ele alınan tüm yöntemler incelendiğinde en yüksek başarı sonucu %97,61 doğruluk oranı ortalaması ile RseslibKnn yöntemi vermiştir. Değerlendirme sonucunda RseslibKnn makine öğrenmesi yönteminin Parkinson hastalığının tespiti ile ilgili karar destek sistemleri üzerine önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, Parkinson hastalığı, RseslibKnn, A1DE, kNN

DIAGNOSIS OF PARKINSON'S DISEASE USING RSESLIBKNN MACHINE LEARNING METHOD

ABSTRACT

Parkinson's disease is a neurological disease that affects the quality of life of people. Parkinson's disease is a disease that negatively affects the central nervous system. It can lead to death of patients. Therefore, early detection of Parkinson's disease is extremely important. Symptoms of Parkinson's disease can be detected with computer-assisted diagnostic systems based on potentially advanced machine learning techniques. In this study, kNN, RseslibKnn and A1DE machine learning methods were used for the diagnosis of Parkinson's disease. The aim of the study was to compare the success rates of the machine learning methods on the Parkinson's disease dataset and to present the most appropriate decision support system. The data set was composed of 252 samples and 753 attributes from the 'UC Irvine Machine Learning Repository' database. Different studies on the literature are also examined and compared. Experimental studies were conducted on different cross-validations and the average of these studies was given as a result of success. At the end of the study, the Parkinson's disease data set was classified with kNN, RseslibKnn and A1DE machine learning methods and then the training and test results were evaluated based on accuracy, sensitivity and specificity values. When all the methods examined with different cross validity values were examined, RseslibKnn method gave the highest success result with an average of %97,61 accuracy rate. As a result of the evaluation, the recommendations of the RseslibKnn machine learning method on decision support systems for the detection of Parkinson's disease were made.

Keywords: Machine learning, Diagnosis of Parkinson's, RseslibKnn, A1DE, kNN

1. GİRİŞ

Parkinson Hastalığı (PH), hastaların yaşam kalitelerini etkisi altına alan ve Alzheimer hastalığından sonra en yaygın nörolojik hastalıktan biridir [1]. Anatomik olarak omuriliği beyne bağlayan bir köprü olan “beyin sapı” bölgesinde bulunan, gri cevher çekirdeklerinin hasar görmesi sonrasında, bedensel hareketlerin kontrolünü sağlayan dopamin hormonu salgılayan hücrelerin yapılarının bozulup normal fonksiyonlarını yapamayacak hale gelmesi ile birlikte ortaya çıkar [2]. Yapısı bozulan hücrelerin neden hasara uğradığı henüz belirlenememiştir. Parkinson Hastalığına ait belirtiler dopamin salgılayan bu hücrelerin %60 ile %80’inin kaybolması sonucu ortaya çıkmaktadır [2]. Genellikle Parkinson hastalığı 50 ve 60’lı yaşlarda ortaya çıkmaya başlar. Yaklaşık 10-20 yıllık bir süreçte hastalıkta belirgin ilerlemeler görülmektedir. Daha öncesi bir süreçte hastalığın tanımlanması oldukça zordur [3]. PH tanısındaki temel zorluk, hastaların, dopamin hormonlarının beyindeki bir yerden bir yere taşınmasından sorumlu olan dopaminerjik nöronlarının yarısından fazlası hasara uğrayana kadar tipik motor semptomların görülmemesidir [4]. Parkinson hastalığının en çok görülen belirtilerinden birisi titreme ve sertliktir. Dinlenirken ellerin birden titremesi ve semptom sertlik olarak adlandırılan kaslardaki sertlik bu hastalığın belirtilerindedir. Hastalığın diğer belirtileri ise hareketlerin yavaşlığı, konuşma işlevinin bozukluğu, zayıf ses, değişken konuşma hızı ve kısa konuşma ile ilgili olan problemlerdir. Hastalığın erken teşhisi hastanın yaşam kalitesini artırır. Vücudun dopamin seviyesini arttırmak için takviye olarak kullanılan levodopa ilacı hastalığın ilk evrelerinde kullanılır. Hastalık ilerlediğinde ilacın yan etkileri de artmaktadır. İlaç artık etkisini kaybettiğinde hastalığın tedavisi için cerrahi bir müdahale gerekmektedir [5]. Parkinson hastalığının sayısının artmasıyla hastalığın teşhis edilmesindeki bu zorlu süreç teknolojinin gelişmesiyle ve yeni makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılmasıyla daha kolay hale gelmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri ile Parkinson hastalığının tespiti üzerine yapılan çalışmalar literatürde karşımıza çıkmaktadır.

Literatür taramasında Parkinson hastalığının teşhisi ve sınıflandırılması ile ilgili makine öğrenmesi yöntemleri kullanan 4 farklı çalışma incelenmiştir. Bu çalışmaların ilkinde ‘UC Irvine Machine Learning Repository’ (UCI)’den alınan 195 adet ses kaydından oluşan veri seti üzerinde Bayes Net, Naive Bayes, Multilayer Perceptron, SMO, J48 makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak Weka yazılım platformu aracılığı ile analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda Parkinson Hastalığının teşhisinde elde edilen doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri incelenerek karşılaştırılmıştır. Doğruluk, duyarlılık ve özgüllük ile en başarılı sonucu elde ettiği görülmektedir [5]. İkinci çalışmada Matlab yazılım platformunda yapılmış olup Cvpartition fonksiyonu kullanılarak verilerin %80 i eğitim ve %20 si test için kullanılmıştır. Naive Bayes, kNN, Diskriminant Analiz, Lojistik Regresyon Analizi ve SVM makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Parkinson Hastalığının teşhisinde doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri göz önüne alınarak yapılan analizin sonucunda kNN makine öğrenmesi tekniğinin %96,97 doğruluk ile en başarılı sonucu elde ettiği görülmektedir [6].

Parkinson hastalığının erken ortaya çıkan semptomları arasında titreme, sertlik ve vokal bozukluğu (disfoni) bulunur. Sonuç olarak, konuşma göstergeleri, disfonik bulgulara dayanan Parkinson hastalığının tanımlanmasında önemlidir. Disfoni semptomlarına dayalı Parkinson hastalığı tanısı için makine öğrenimi temelli tekniklerin performansının değerlendirildiği Matlab programı üzerinde yapılan “Disfoni önlemlerine göre Parkinson hastalığının teşhisinde makine öğrenme yöntemlerinin performansı” adlı üçüncü çalışma incelenmiş olup, 22 adet ses bozukluğu ölçümü ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada SVM, k-NN, RBFNN, NB, LDA, RT ve MDC makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. En başarılı sonucu %92 doğruluk oranı ile SVM makine öğrenmesi tekniğinin vermiş olduğu görülmektedir [7].

Sağlıklı kişiler ve Parkinson hastalığı hastaları arasındaki el hareketi ve kas koordinasyonundaki farklılıkları üzerinde yapılan “Parkinson hastalığında basit çizim hareketlerinin makine öğrenimine dayalı sınıflandırılması” adlı dördüncü çalışma incelenmiştir. Veri setinde 20 sağlıklı birey 24 Parkinson hastası ele alınmıştır. Çalışma weka üzerinde yapılmış olup, Naive Bayes, AdaBoost (J48), Log. Regression, J48, SVM ve Random Forest makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Naive Bayes makine öğrenmesi yönteminin %90,90 doğruluk oranı ile en yüksek değeri verdiği görülmektedir [8].

Bu çalışmada Parkinson hastalığı üzerine ‘UC Irvine Machine Learning Repository’ (UCI)’den alınan 252 kayıt ve 753 öznitelige sahip olan veri kümesi üzerinde kNN, RseslibKnn ve A1DE makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak Parkinson hastalığının teşhisinde en doğru sonucun elde edilmesi amaçlanmıştır. Literatür araştırmasında yapılan çalışmalarda göz önüne alındığında çalışmamızda kullanılan RseslibKnn makine öğrenmesi yöntemi %97,61 başarı oranı ile en yüksek sonucu vermektedir. İlgili veri kümesinde RseslibKnn ve A1DE makine öğrenmesi yöntemleri ilk defa uygulanmıştır. En başarılı sonucu veren makine öğrenmesi tekniğinin karar destek sistemi olarak kullanılması önerilmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada hastalıklı ve sağlıklı bireylerin toplamından oluşan 252 kayıt ve 753 öznitelige sahip ‘UC Irvine Machine Learning Repository’ (UCI) veri tabanından alınan veri kümesi kullanılmıştır [9]. Veri kümesi ile ilgili sayısal bilgiler Tablo 1’de verilmektedir.

RSESLIBKNN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ KULLANILARAK PARKİNSON HASTALIĞININ TANISI

Tablo 1. Çalışmaya katılan bireyler ile ilgili sayısal bilgiler

Hasta Bireyler		Sağlıklı Bireyler		Toplam Kayıt
Kadın	81	Kadın	41	252
Erkek	107	Erkek	23	
Toplam	188	Toplam	64	
Hasta Bireyler Yaş Grubu		Sağlıklı Bireyler Yaş Grubu		
33 – 87		41 - 82		

Tablo 1’de görüldüğü gibi, hasta bireylerin sayısı sağlıklı bireylere göre daha fazladır. Bu durum çalışmada kullanılan yöntemlerin duyarlılık değerlerinin özgüllük değerlerine göre daha yüksek çıkabilmesi sonucunu ortaya koymaktadır. Çalışmada belirtilen 753 özneliğin makine öğrenmesi modellerine giriş olarak verilmesi ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilerek kişinin Parkinson hastası olup olmadığı hakkında karar verilmektedir.

2.1. kNN (k En Yakın Komşuluk)

kNN sınıflandırmasında, en yakın komşulara göre sınıflandırma yapılır. En yakın komşular için k değeri değişebilir. k, bilinmeyen bir olayın nasıl sınıflandırılacağına karar vermek için; kaç değer, komşu olarak değerlendirileceğini belirler. Bilinmeyen bir örnek verildiğinde, en yakın bir komşu sınıflandırıcı, bilinmeyen numuneye en yakın olan k eğitim numuneleri için desen uzayını arar. En yakın komşu hesaplanmasında Öklid, Minkowski ve Manhattan uzaklık ölçütleri kullanılmaktadır [10]. Bilinmeyen örnek, en yakın komşuları arasında en yaygın sınıfa atanır. k = 1 olduğunda, bilinmeyen örneğe desen alanında kendisine en yakın olan eğitim örneğinin sınıfı atanır. En yakın komşu sınıflandırıcıya sahip bir test örneğini sınıflandırmak için geçen süre, sınıflandırıcıda tutulan eğitim örneği sayısı ile doğrusal olarak artar. Büyük bir depolama gereksinimi vardır. Ayrıca, farklı özellikler farklı kapsamlar için sonucu etkilediğinde de kötü performans gösterir. kNN sınıflandırma algoritmasının performansını etkileyebilecek parametre kullanılacak en yakın komşu sayısıdır. Varsayılan olarak en yakın bir komşu kullanılmaktadır [11].

2.2. RseslibKnn

RseslibKnn makine öğrenmesi yöntemi, parametrik olmayan tembel sınıflandırma ve tahminleme yöntemidir. Veri büyüklüğü, optimal k değerini öğrenme ve belirleme, yetenekleri kontrol etme, en uygun çekirdek fonksiyonunu belirleme, yoğunluk temelli metrik ve bunun gibi bazı özellikleri tanımlar. Sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirirken temel kNN yönteminden farklı olarak en yakın komşu sayısını ve mesafe ölçütlerini otomatik olarak bulabilen bir algoritma yapısına sahiptir. Sınıflandırıcı, iki arama budama kriterine sahip bir metrik ağacı kullanarak en yakın komşu aramasını uygular. Uygulanan arama yöntemi sınıflandırıcının çok büyük veri kümeleri için çalışmasını sağlar [12], [13].

Algoritma önce mesafelerin ağırlıklı toplamına dayalı bir mesafe ölçütünü hesaplar ve daha sonra bir indekisleme ağacı oluşturur. Ağırlıklar üç farklı yöntem kullanılarak hesaplanabilir: mesafe tabanlı yöntem, doğruluk tabanlı yöntem ve algılayıcı tabanlı yöntem. Sınıflandırma, sette en yakın komşuları bulmak ve karar için oy vermek suretiyle yapılır. RseslibKnn, görüntü sınıflandırmasında kullanılan son teknoloji tekniklerin bir temsili, ek olarak geliştirilen kNN modelidir [14].

2.3. A1de

Ortalama bir bağımlılık tahmincisi olan A1DE (Averaged N Dependence Estimators) artarak öğrenmeyi destekleyen bir sınıflandırma tekniğidir. Naive Bayes’in bütün küçük alanlarının ortalamasını hesaplayarak Naive Bayes’ten daha başarılı sınıflandırma performansı sağlar. Sabit yapıya sahip basit modelleri tanımlar. Performansların iyileştirilmesi yüksek hesaplama maliyetlerine neden olmaktadır. Bu algoritma öğrenmede hassas bir şekilde sınıflandırma yaparken hesaplama açısından da daha verimlidir [15]. Üst düzey olasılıkları daha fazla genellemek için A1DE kullanmak mümkündür.

$$p(Y = y | X = x) = \sum_{s \in S^n} p(Y = y, x_s) \prod_{i=1}^D p(X_i = x_i | Y_i = y_i, x_s) \binom{D}{n} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de S^n kümenin n büyüklüğündeki tüm alt kümelerini gösterir $\{1, \dots, D\}$. A1DE algoritması tüm sınıflandırıcıların tahminlerini bir araya getirerek tahminin elde edildiği bağımlılık sınıflandırıcıları grubunu öğrenerek çalışır. n, bağımlılık tahmin edicisi, bir öznelilik olma olasılığı, sınıf değişkeni ve en çok n diğer öznelilik koşulunu anlatır. A1DE algoritmasında, n

özniteliklerinin diğer tüm özniteliklere ebeveyn olarak ayarlandığı n özelliklerinin her birleşimi için bir n-bağımlılık sınıflandırıcısı oluşturulur.

Bu çalışmada, AnDE algoritması ailesinden A1DE algoritması kullanılmaktadır. Zaman karmaşıklıklarının yüksek olması nedeniyle, $n > 2$ olduğunda A1DE algoritması nadiren kullanılmaktadır. A1DE için hem eğitim hem de test aşamaları için alan karmaşıklığı $O(|Y| \binom{D}{n+1} v^{n+1})$ değerlerine eşittir; burada n ebeveynlerin sayısıdır (sınıf hariç). Eğitim aşaması için zaman karmaşıklığı $O(N \binom{D}{n+1})$ ve tek bir örneği sınıflandırmak için test aşaması ise $O(|Y|D \binom{D}{n})$ 'dir [16].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmadaki makine öğrenmesi yöntemleri WEKA yazılım platformu üzerinde çalıştırılmıştır. Analizler için Intel Core i7-4510U işlemciye sahip, 8 GB DDR3 belleğe sahip olan bir bilgisayar kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılan parametreler deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiş ve RseslibKnn yönteminde $k=1$ ve Öklid uzaklık ölçütü, kNN yönteminde $kNN = 1$, batch_size = 100, A1DE yönteminde Frekans Limiti = 1, Ondalık Basamak Numarası = 2 olarak tercih edilmiştir. Sonuçların objektif olarak değerlendirilmesi için veri kümesinde Karar Ağacı, Rasgele Orman, SVM gibi temel makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm analizler sonunda içinden en yüksek başarı oranını veren 15 farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılarak 10 fold değeri üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış olup sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin değerlendirilmesinde doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri incelenmiştir.

Tablo 2. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin 10 fold’da Duyarlılık, Özgüllük ve Doğruluk analizi değerleri

Sınıflandırma	Çapraz Geçerlilik	Duyarlılık	Özgüllük	Doğruluk
SMO	10	0,93	0,64	%85,44
SIMPLE LOGISTIC	10	0,93	0,64	%85,31
kNN	10	0,97	0,89	%95,23
MLP CLASSIFIER	10	0,88	0,69	%83,46
LDA	10	0,78	0,69	%75,52
RANDOM COMMITTEE	10	0,95	0,69	%88,49
SYS FOR	10	0,95	0,65	%87,69
FT	10	0,89	0,67	%83,59
J48 CONSOLIDATED	10	0,84	0,70	%80,82
SPEGASOS	10	0,86	0,66	%80,82
RSESLIBKNN	10	0,99	0,96	%98,28
A1DE	10	0,82	0,78	%81,08
DI4JMLP CLASSIFIER	10	0,82	0,70	%78,70
CLASSIFICATION VIA REGRESSION	10	0,91	0,64	%83,99
BAYES NET	10	0,78	0,71	%76,19

Tablo 2’de 15 farklı makine öğrenmesi yöntemleri ile elde edilen değerler detaylı bir şekilde verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi en başarılı makine öğrenmesi yöntemleri kNN, RseslibKnn ve A1DE’dir. Sonuçların objektif olarak değerlendirilmesi için bu yöntemler ayrıca 5 ve 7 fold değerleri üzerinde de analiz edilmiştir. 3 farklı çapraz geçerlilik ile elde edilen başarı oranlarının ortalaması Tablo 3’te görüldüğü gibi modellerin başarı oranı olarak sunulmuştur.

RSESLIBKNN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ KULLANILARAK PARKİNSON HASTALIĞININ TANISI

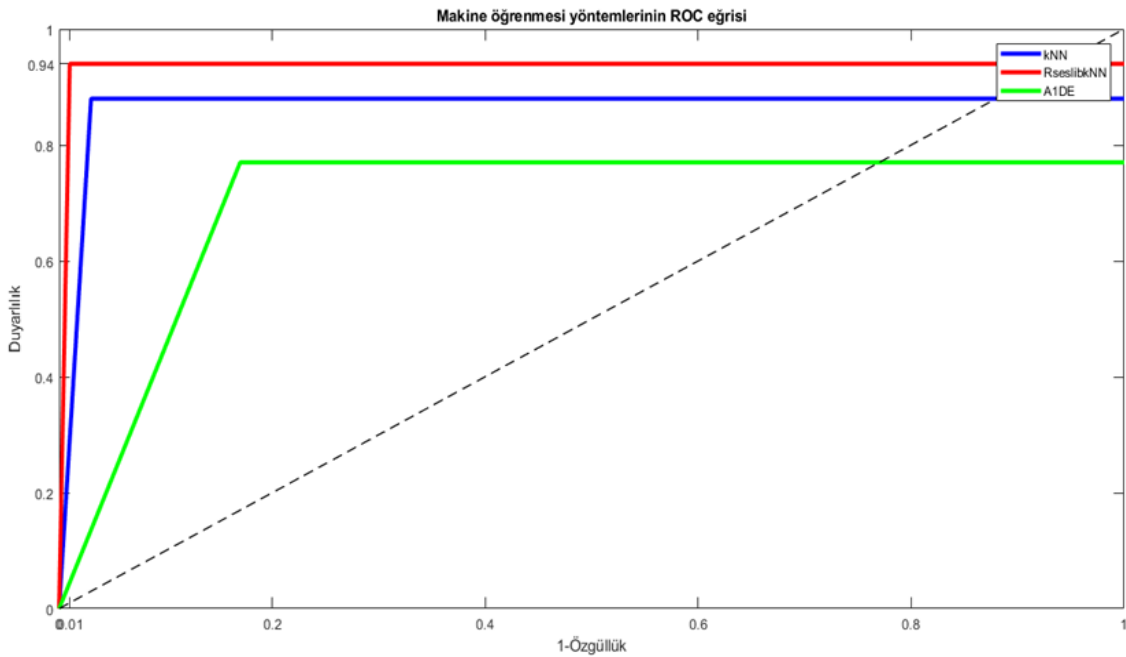
Tablo 3. En başarılı makine öğrenmesi yöntemlerinin farklı foldlarda Duyarlılık, Özgüllük ve Doğruluk analizi değerleri

Sınıflandırma Yöntemi	Çapraz Geçerlilik	Duyarlılık	Özgüllük	Doğruluk	Kappa	F-Ölçüm
kNN	5	0,97	0,89	%94,57	0,8561	0,946
	7	0,97	0,87	%94,31	0,8481	0,943
	10	0,97	0,89	%95,23	0,873	0,952
	Ortalama	0,97	0,88	%94,70	0,8590	0,947
RseslibKnn	5	0,98	0,95	%97,35	0,9302	0,974
	7	0,99	0,92	%97,22	0,9255	0,972
	10	0,99	0,96	%98,28	0,9544	0,983
	Ortalama	0,99	0,94	%97,61	0,9367	0,976
A1DE	5	0,83	0,74	%80,55	0,5267	0,812
	7	0,83	0,78	%81,74	0,5578	0,824
	10	0,82	0,78	%81,08	0,5453	0,818
	Ortalama	0,83	0,77	%81,12	0,5432	0,818

Tablo 3'te üç farklı yöntem ve üç ayrı fold değerinden ortaya çıkan veriler aşağıdaki gibidir;

- 5 fold çapraz geçerlilik sonuçlarına göre kNN, RseslibKnn ve A1DE yöntemlerini değerlendirdiğimizde, en yüksek doğruluk oranını veren yöntem %97,35 ile RseslibKnn, ardından %94,57 ile kNN ve son sırada ise %80,55 ile A1DE'dir.
- 7 fold çapraz geçerlilik sonuçlarına göre kNN, RseslibKnn ve A1DE yöntemlerini değerlendirdiğimizde, en yüksek doğruluk oranını veren yöntem %97,22 ile RseslibKnn, ardından %94,31 ile kNN ve son sırada ise %81,74 ile A1DE'dir.
- 10 fold çapraz geçerlilik sonuçlarına göre kNN, RseslibKnn ve A1DE yöntemlerini değerlendirdiğimizde, en yüksek doğruluk oranını veren yöntem %98,28 ile RseslibKnn, ardından %95,23 ile kNN ve son sırada ise %81,08 ile A1DE'dir. Tüm bu veriler doğrultusunda 10 fold tüm yöntemler için en yüksek doğruluk değerlerini sağlamaktadır.

En başarılı üç makine öğrenmesi yönteminin uygulanması sonucu elde edilen ROC eğrisi Şekil 1'deki gibidir.

**Şekil 1.** Makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanması sonucu elde edilen ROC eğrisi

Şekil 1'deki ROC eğrisi incelendiğinde her bir yöntem için uygulanan 5, 7 ve 10 fold ile elde edilen değerlendirme ölçütlerinin ortalaması temel alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda en yüksek başarı oranı %97,61 doğruluk değeri ile RseslibKnn yöntemi, ardından %94,70 doğruluk değeri ile kNN yöntemi ve son olarak %81,12 doğruluk değeri ile A1DE yöntemi vermektedir. Önerdiğimiz çalışmanın literatürdeki çalışmalarla karşılaştırması Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Literatürde aynı konulardaki farklı çalışmalara ait veri setlerinin karşılaştırılması

Yazarlar	Örnek Sayısı	Öznitelik Sayısı	Kullanılan Yöntemler	Sayısal Parametreler			
				Duyarlılık	Özgüllük	Doğruluk	F-Ölçüm
Badem, 2019 [17]	252	753	kNN	0,91	0,92	%91,83	84,24
Karacı, 2019 [18]	240	44	Topluluk Sınıflandırıcı	-	0,84	%82,00	82
Sakar ve ark., 2013 [19]	1040	26	SVM	0,85	0,90	%85,00	-
Bizal, 2014 [6]	195	22	kNN	-	-	%96,97	97,06
Bu çalışma	252	753	kNN	0,97	0,88	%94,70	94,7
			RseslibKnn	0,99	0,94	%97,61	97,6
			A1DE	0,83	0,77	%81,12	81,8

Tablo 4'te görüldüğü gibi, çalışmada kullanılan RseslibKnn yönteminin literatürde yapılan çalışmalara göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan üç farklı yöntemin eğitim aşamasının zaman performansları ele alındığında, en hızlı sonucu veren yöntem 0.3 saniye ile kNN, ardından 1.71 saniye ile A1DE ve son olarak da 34.84 saniye ile RseslibKnn'dir.

4. SONUÇ

Parkinson hastalığı, dopamin hormonu salgılayan hücrelerin yapılarının bozulup normal fonksiyonlarını yapamayacak hale gelmesi ile birlikte ortaya çıkar. Hastaların yaşam kalitelerini etkisi altına alır ve Alzheimer hastalığından sonra ikinci en çok yaygın olarak görülen nörolojik bir hastalıktır. Yaygın olarak görülmesi nedeniyle bu çalışmada Parkinson hastalığı veri kümesi üzerinde makine öğrenmesi yöntemleri uygulanarak başarı oranları karşılaştırılmış ve en başarılı yöntem karar destek sistemi olarak sunulmuştur. Çalışmada Parkinson hastalığı veri kümesine makine öğrenmesi yöntemi olarak kNN, RseslibKnn ve A1DE yöntemleri uygulanmıştır. RseslibKnn makine öğrenmesi yönteminin ilgili veri kümesi üzerinde ilk defa uygulanması ile %97,61 doğruluk oranı elde edilerek literatürün üzerinde bir başarı oranı yakalanmıştır. Zaman performansı bakımından ise kNN ve A1DE yönteminin RseslibKnn'e göre daha iyi olduğu görülmüştür. RseslibKnn algoritmasının zaman performansının kötü olması eğitim aşamasında çok fazla örnek üzerinde karar vermesinden kaynaklanmaktadır. Algoritmanın test aşamasında sadece bir örnek üzerinde karar vermesi nedeni ile bu durum göz ardı edilebilir. Bu nedenle çalışmada önerilen model sağlık karar destek sistemlerinde alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu çalışmada öznitelik seçme algoritmaları kullanılmamış, yalnızca sınıflandırma algoritmaları denenmiştir. Gelecek çalışmalarda veri kümesine özellik seçme algoritmasının uygulanması ile birlikte farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılması ile başarı oranının artırılması düşünülmektedir. Bu işlem ancak veri setinin güncellenmesi ve hastalık için önemli özniteliklerin seçilmesi ile yapılabilir. Daha önemli öznitelikler seçilerek farklı algoritmaların denenmesi ile başarı oranı yükseltilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ö. Eskidere, "A Comparison of Feature Selection Methods for Diagnosis of Parkinson's Disease From Vocal Measurements", *Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 30, pp. 402-403, 2012.
- [2] E. Akbayır, M. Şen, U. Ay, S. Şenyer, E. Tüzün ve C. İ. Küçükakal, "Parkinson Hastalığının Etiyopatogenezi", *Deneyisel Tıp Dergisi*, vol. 7, no. 13, pp. 3, 2017.
- [3] F. Özyiğit, S. C. Kabay ve Ö. Arık, "Rational Drug Use And Parkinson Disease", *Journal Of Contemporary Medicine*, vol. 6, no. 2, pp. 105, 2016.
- [4] E. Taşdemir, "Parkinson Hastalığında Nöroinflamasyonun Rolü", *SDÜ Tıp Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 3, pp. 348, 2019.

RSESLIBKNN MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ KULLANILARAK PARKİNSON HASTALIĞININ TANISI

- [5] D. Narmadha, D. Marudhadevi ve B. Santhi, “Parkinson’s Disease Detection Using Soft Computing Techniques”, *World Applied Sciences Journal*, vol. 29, no. 16, pp. 29-89, 2014.
- [6] Ö. Bizal, “Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Parkinson Hastalığının Belirlenmesi”, 2014.
- [7] S. Lahmiri, D. A. Dawson ve A. Shmuel, “Performance of machine learning methods in diagnosing Parkinson’s disease based on dysphonia measures”, *Biomedical Engineering Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 29-39, 2018.
- [8] C. Kotsavasiloglou, N. Kostikis, D. Hristu-Varsakelis ve M. Arnaoutoglouc, “Machine learning-based classification of simple drawing movements in Parkinson’s disease”, *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 31, pp. 174-180, 2017.
- [9] C. O. Sakar, G. Serbes, A. Gunduz, H. C. Tunc, H. Nizam, B. E. Sakar, M. Tutuncu, T. Aydin, M. E. Isenkul ve H. Apaydin “A comparative analysis of speech signal processing algorithms for Parkinson’s disease classification and the use of the tunable Q-factor wavelet transform”, *Applied Soft Computing*, vol. 74, pp. 74, 2019.
- [10] S. A. Dudani, “The distance-weighted k-nearest-neighbor rule”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 6, no. 4, pp. 325-327, 1976.
- [11] V. Chaurasia ve S. Pal, “A Novel Approach for Breast Cancer Detection using Data Mining Techniques”, *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [12] A. Wojna, R. Latkowski ve L. Kowalski, *RSESLIB User Guide*. pp. 45-58, 2019.
- [13] A. Wojna, *Analogy-Based Reasoning In Classifier Construction*, Warsaw: Banacha, 2005.
- [14] R. Jankovi, “Machine Learning Models for Cultural Heritage Image Classification: Comparison Based on Attribute Selection”, *Information*, vol. 11, no. 12, pp. 5-6 2019.
- [15] S. O. M. Kamel, H. M. Harb, N. Hegazi, A. S. Tag El Dein ve H. M. Abd El Kader, “A Novel Ensemble Learner Algorithm for Anomaly Based Detection in Intrusion Prevention System”, *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol. 3, no. 12, pp. 24, 2015.
- [16] S. Picek, A. Heuser ve S. Guilley, “Template attack versus Bayes classifier”, *Journal of Cryptographic Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 345-346, 2017.
- [17] H. Badem, “Parkinson Hastalığının Ses Sinyalleri Üzerinden Makine Öğrenmesi Teknikleri İle Tanımlanması”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp.630-637, 2019.
- [18] A. Karacı, “Detection Of Parkinson's Disease With Hybrid Ensemble Classifier”, 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, Türkiye, 2019.
- [19] B. E. Sakar, M.E. İsenkul, C.O. Sakar, A. Sertbaş, F. Gürgen, S. Delil, H. Apaydin ve O. Kurşun, “Collection and Analysis of a Parkinson Speech Dataset With Multiple Types Of Sound Recordings”, *IEEE Journal Of Biomedical and Health Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 828-834, 2013.





EVRIŞİMLİ SİNİR AĞI TABANLI DERİNLİK HARİTASI İYİLEŞTİRME

Alper EMLEK^{1,*} , Murat PEKER² 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

ÖZET

Bir ortamın derinlik bilgisi üç boyutlu yeniden oluşturma, otonom sistemler gibi derinlik bilgisine ihtiyaç duyulan birçok uygulamada yoğun olarak kullanılmaktadır. Stereo görüntü çiftleri kullanılarak derinlik bilgisi elde edilmesi, uzun yıllardır öne çıkan çalışma konuları arasında yer almaktadır. Son yıllarda derin öğrenme alanındaki gelişmeler, stereo görüntüler kullanılarak derinlik elde edilmesi alanında yapılan çalışmaları da etkilemiştir. Son dönemde, derin öğrenme tabanlı stereo eşleştirme alanındaki çalışmalar daha çok derinlik (eşitsizlik) haritalarının elde edilmesi ve düzeltilmesi alanında yoğunlaşmaktadır. Derin öğrenme tabanlı derinlik haritası düzeltme işlemlerinde eşleşme maliyetleri üzerinden yapılan düzeltme işlemleri daha başarılı sonuçlar üretilmesini sağlamıştır. Fakat eşleşme maliyetlerine doğrudan ulaşmak her zaman mümkün olmamaktadır. ZED ve Intel RealSense gibi hazır sistemler tarafından üretilen derinlik haritaları son kullanıcıya sunulmaktadır. Çalışmada sadece sol görüntü ve derinlik haritası aracılığıyla düzeltme işlemi yapan bir ağ yapısı önerilmiştir. Önerilen ağ, KITTI 2012 ve KITTI 2015 veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda olarak giriş derinlik haritalarının doğruluğunun artırılması için önerilen ağ yapısının kullanılabilceği nicel ve nitel sonuçlar ile gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Stereo eşleşme, Derinlik haritası, Derinlik haritası düzeltme, Evrişimli sinir ağları

IMPROVING DEPTH MAP BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

ABSTRACT

Depth information of an environment is used extensively in many applications that require depth information such as three-dimensional (3D) reconstruction and autonomous systems. Obtaining depth information using stereo image pairs is one of the prominent study topics for many years. In recent years, developments in the field of deep learning have also affected the studies in the field of obtaining depth using stereo images. These studies mostly focus on obtaining and correcting depth (disparity) maps. In deep learning based depth map correction, correction operations over matching costs have enabled more successful results. However, it is not always possible to get matching costs directly. Disparity maps produced by some of the existing systems are provided to the end-user. In this study, a network structure that corrects only one image and disparity map are proposed. The proposed network has been tested on KITTI 2012 and KITTI 2015 datasets. As a result, it is shown with quantitative and qualitative results that the proposed network structure can be used to increase the accuracy of the entrance depth maps.

Keywords: Stereo matching, Depth map, Depth map correction, Convolutional neural networks

1. GİRİŞ

Stereo eşleştirme, bilgisayarla görme alanında uzun zamandır çalışılan önemli konular arasında yer almaktadır. Stereo eşleştirme, aynı yatay düzlem üzerinde hizalanmış kamera çiftinden alınan görüntüler arasında eşleşen piksellerin tespit edilmesi problemi olarak ifade edilebilir. Yatay düzlemde yer alan kameralardan alınan görüntüler sol ve sağ görüntü olarak ifade edilmektedir. Sol görüntüde yer alan her bir piksele karşılık gelen ve sağ görüntüde yer alan bir piksel olduğu kabul edilmektedir. Eşleşen her piksel çifti için derinlik bilgisi, eşleşen piksellerin yer aldıkları görüntülerdeki konumları arası yatay uzaklık kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen yatay uzaklık, derinlik (eşitsizlik) değeri olarak isimlendirilir ve d ile gösterilir. Böylece, sol görüntüde (x, y) konumunda yer alan pikselle eşleştirilen pikselin sağ görüntüdeki konumu $(x - d, y)$ ifadesi ile hesaplanabilir. Burada x ve y sırasıyla görüntünün yatay ve dikey eksenini üzerinde yer alan piksel konumlarını belirtmektedir. Eşleştirilen pikselin üç boyutlu (3B) düzlemdeki derinlik değeri (z) ise Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: alperemlek@ohu.edu.tr

Geliş / Recieved: 25.03.2020 Kabul / Accepted: 08.07.2020 doi: 10.28948/ngumuh.709159

A. Emlek, M. Peker

$$z = f\left(\frac{B}{d}\right) \quad (1)$$

Eşitlik 1'deki terimlerden z ilgili pikselin 3B düzlemdeki derinlik değerini, f sağ ve sol kameralarının odak uzaklığını ve B terimi ise iki kamera merkezi arasındaki mesafeyi temsil etmektedir.

Bir sahnenin derinlik bilgisinin elde edilmesi, sahnenin yeniden modellenmesi, nesnelerin üç boyutlu yeniden oluşturması, robotik ve otonom sürüş gibi birçok gerçek dünya uygulaması için hayati önem taşımaktadır. Tek bir görüntüden derinlik bilgisi tahmin etme veya aktif algılayıcılar kullanarak derinlik hesaplama konusundaki ilerlemelere rağmen, stereo görüntü eşleştirme kullanılması verimlilik ve geniş uygulanabilirlik gibi avantajları nedeniyle derinlik tahmini için hala en etkili stratejilerden biri olmaya devam etmektedir. Fakat yapılan onlarca yıllık araştırmaya rağmen, görüntü çifti üzerinden derinlik tahmin etmek için ortaya atılan yöntemler hala bazı sorunlar içermektedir. Stereo eşleştirme işleminin içerdiği sorunlar arasında en önemlileri; nesnelere örtüşme (Occlusion), geniş doku içermeyen alanlar ve görüntüde tekrarlayan desenlerdir.

Son yıllarda derin evrişimli sinir ağları (Deep Convolutional Neural Networks - DCNN) makine öğrenmesi ve makine görmesi alanında oldukça popüler bir çalışma konusu haline gelmiştir. Derin evrişimli sinir ağları güçlü temsil kabiliyetleri nedeniyle, stereo eşleştirme probleminde başarıyı artırmak için kullanılmaktadır ve geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde bir iyileştirme sağlamaktadır. Stereo eşleştirme alanındaki evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks - CNN) tabanlı geliştirilen ilk çalışmada Zbontar ve LeCun [1], stereo görüntülerdeki piksellerin benzerlikleri bir siyam CNN kullanılarak karşılaştırılmış ve pikseller arası benzerlik puanı elde edilmiştir. Ardından, elde edilen benzerlik puanları ile eşleşme maliyetleri hesaplanmıştır. Stereo eşleştirme alanındaki evrişimli sinir ağı tabanlı çalışmalarda sadece eşleşme maliyetlerinin hesaplanması [1,2] için değil, ayrıca, maliyetlerin toplamı, derinlik haritası hesaplama ve derinlik haritası düzeltme gibi diğer amaçlar doğrultusunda da CNN yapıları sorunsuz bir şekilde entegre edilmiştir[3-5]. Ayrıca, geliştirilen yöntemlerin yanı sıra uçtan uca öğrenme ile doğrudan derinlik haritası elde etmeye yönelik ve hesaplama verimliliğini veya eşleşme doğruluğunu artırmak için çeşitli yöntemler ve ağ yapıları da önerilmiştir [13,16,17].

Çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak sadece sol görüntü ve elde edilmiş bir derinlik haritasının kullanılması ile derinlik haritasında yer alan bilgilerin iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda CNN tabanlı bir ağ yapısı önerilmiştir. Önerilen ağ yapısı stereo kameralardan elde edilen görüntülerden sol kameraya ait olan görüntü ile literatürde yapılmış bir çalışma olan Content-CNN [2] ağından elde edilen derinlik haritasını giriş olarak kabul etmektedir. Önerilen yapı ile sadece iki giriş bilgisi kullanılarak derinlik haritasında yer alan hatalı bölgelerde düzeltmeler ve derinlik bilgisinde iyileştirmeler elde edilmektedir. Önerilen ağ yapısı, derinlik bilgisinin elde edilebildiği ve derinlik haritasının iyileştirilmeye ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılabilir şekilde basit ve uygulanabilir bir yapıdadır.

Bölüm 2'de literatürde önde gelen çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3'te derinlik haritası düzeltmek için önerilen ağ yapısının detayları verilmiştir. Bölüm 4'te deneysel sonuçlar ardından Bölüm 5'te ise elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Stereo görüntüden derinlik bilgisi elde edilmesi için kullanılan yöntemler geleneksel ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar olarak iki grup altında incelenmektedir.

2.1. Geleneksel Yöntemler

Geleneksel stereo eşleştirme algoritmaları tipik olarak, eşleşme maliyeti hesabı, maliyetlerin toplamı, derinlik haritasının hesaplanması/eniyilenmesi ve derinlik haritası düzeltme işlemi olmak üzere dört adımdan oluşmaktadır [9]. Aşamaların ilkinde tüm piksellerin eşleşme maliyetleri tüm olası derinlik değerleri için hesaplanmaktadır. Eşleştirme maliyetleri hesaplanırken mutlak farklılıkların toplamı, kare farkların toplamı, normalleştirilmiş çapraz ilinti, Census dönüşümü ve bu yöntemlerin birleştirilmiş halleri kullanılmaktadır. İkinci adım olarak, maliyetlerin toplamı adımında bir destek penceresi içindeki komşu piksellerin eşleştirme maliyetleri toplanmaktadır. Destek penceresinin oluşturulması ile ilgili birçok yöntem vardır. Destek penceresinin oluşturulması ile ilgili yöntemlerden bazıları: sabit pencereler [9], kenar bilgilerinden elde edilen uyarlamalı pencereler [10] ve ağırlıklı pencerelerdir [11]. Üçüncü adımda, yerel yöntemler minimum eşleştirme maliyetiyle eşitsizliği seçmek için kazanan hepsini alır (Winner-Take-All, WTA) yöntemini kullanır. Küresel yöntemler ise en uygun derinlik haritasını elde etmek için veri ve yumuşatma terimlerinden oluşan bir enerji fonksiyonunu eniyilemeyi amaçlamaktadırlar. Eniyileme işlemi için genellikle inanç yayılımı [12] ve grafik kesimi (GraphCut) [13] gibi algoritmalar kullanılmaktadır. En son adımda ise derinlik haritalarındaki yanlış noktaların tespit edilmesi ve yanlış eşleşen piksellerin doğru derinlik bilgileri ile doldurulması amaçlanmaktadır. Derinlik haritasının düzeltilme adımında piksellerin komşu piksellerle olan ilişkileri [11] veya süper-piksel/bölütleme gibi pikselleri gruplayan yöntemler vasıtasıyla elde edilen grup bilgilere bakarak düzeltme [13] işlemi yapılmaktadır.

EVRIŞİMLİ SİNİR AĞI TABANLI DERİNLİK HARİTASI İYİLEŞTİRME

Geleneksel yöntemlerin avantajları hızlı çalışmaları, eğitime ihtiyaç duymamaları ve kolay uyarlanabilir olmalarıdır. Fakat geleneksel yöntemler daha önce de bahsedilen nesnelere arası örtüşme, geniş dokusuz alanlar ve görüntüde tekrarlayan desenler gibi stereo görüntülerde oluşabilecek hataların önüne geçmekte yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, derin öğrenme tabanlı yöntemler, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlar için daha çok kullanılmaya başlanmıştır.

2.2. Derin Öğrenme Tabanlı Yöntemler

Son zamanlarda derin öğrenme kavramı görüntü işleme alanında yaygın olarak çalışılan ve kullanılan bir problem çözme aracı olarak ön plana çıkmaktadır. Literatüre stereo eşleştirme yöntemlerine CNN tabanlı birçok farklı yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemler genellikle üç ana başlık altında toplanmaktadır; eşleştirme maliyetlerinin hesaplaması, aykırı noktaların tespiti ile derinlik haritasının düzeltilmesi ve uçtan-uca öğrenme ile derinlik haritası elde etmedir.

Derin öğrenme tabanlı geliştirilen ilk çalışmada Zbontar ve LeCun [1], stereo görüntülerdeki piksellerin benzerliklerini bir siyam CNN kullanılarak karşılaştırmış ve pikseller arası benzerlik puanı elde edilmiştir. Ardından, elde edilen benzerlik puanı ile eşleşme maliyetleri hesaplanmıştır. [1] çalışmasında, karşılaştırılacak giriş görüntüleri 9×9 veya 11×11 gibi küçük görüntü parçaları olarak ağına girişine uygulanmaktadır. Luo vd. [2] tarafından önerilen Content-CNN ağ yapısında ise girişlerin birine sol görüntüden alınan parça verilirken diğer giriş ise sağ görüntüden alınan arama uzayı boyunca bütün muhtemel olasılıkları içeren görüntü kümesi giriş olarak verilmiştir. Çıkışta tek bir eşleştirme için benzerlik sonucu elde etmek yerine bütün muhtemel sonuçlar için eşleşme maliyeti değeri elde edilmiştir. Content-CNN ağ mimarisinde giriş görüntülerini sıralı evrişim işleminden geçirdikten sonra benzerlikleri hesaplama için ilinti işleminden faydalanmıştır. Brandao vd. [14] ise çalışmada, Luo vd. [2] tarafından geliştirilen çalışmaya çok benzer bir ağ mimarisi önermişlerdir. Fakat çalışmalarında iki büyük farkı vardır. Bunlardan ilki, ilinti işleminden önce uygulanan havuzlama işlemi sırasında kaybolan detayların ters- evrişim işlemi ile telafi edilmesidir. İkinci olarak ise ilinti öğrenme problemini büyük ölçüde basitleştiren bir öznetelik birleştirme yöntemi ile çıkarılan özelliklerin kalitesinin daha iyi değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. Eşleştirme maliyetlerinin hesaplaması amacıyla önerilen ağ mimarileri sadece maliyet hesabı yaptıkları için derinlik haritası elde etme işleminde geleneksel stereo eşleştirme algoritmalarından faydalanmıştır.

Aykırı değer tespiti ve fark haritası düzeltme işlemleri için kullanılacak güven değeri olarak adlandırılan bir ölçüt Poggi ve Mattocchia [3] tarafından elde edilmiştir. [3] çalışmasında ağına giriş olarak derinlik haritasından alınan 9×9 boyutundaki parçaları kullanmıştır. Giriş görüntüsüne uygulanan evrişim işlemi sonunda tam bağlı (fully connected - FC) katmanların çıkışları her bir derinlik değeri için güven değerini belirtmektedir. Ayrıca, Poggi ve Mattocchia [4] çalışmasında, [3] çalışmasından farklı olarak evrişim işlemlerinin sonunda yer alan tam bağlı katmanlar yerine daha fazla evrişim işlemi eklenmiştir. Tam bağlı katman yerine eklenen evrişim katmanları ile daha yüksek doğrulukta güven değerleri elde edilmiştir.

Seki ve Pollefeys [5] çalışmasında da derinlik haritası düzeltmek için güven değerleri hesaplanmıştır. [5] çalışmasında önerilen ağına girişlerinde hem sol hem de sağ kameradan elde edilen derinlik değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, derinlik haritalarını doğrudan kullanmak yerine bir ön işleme tabii tuttukten sonra ağa giriş olarak vermişlerdir. Bu çalışmada elde edilen güven değerleri aykırı değer tespiti ve derinlik haritalarının düzeltilmesi işleminde kullanılmıştır. Güven değerleri ile tespit edilen yanlış eşleştirilen pikseller sonraki adımlarda doğru piksel değerleri ile düzeltilmeye çalışılmaktadır.

Cheng vd. [15], doğrudan derinlik haritası veya stereo giriş görüntülerini kullanarak düzeltme işlemi yapmak yerine eşleşme maliyeti yığınlarını da dikkate almışlardır. Bu çalışmada, eşleşme maliyeti yığınları ve başlangıç derinlik haritasının elde edilmesi için Mayer vd. [6] tarafından önerilen DispNet ağından faydalanılmıştır. Çalışmada, güven değeri ve eğitim haritası üreten iki farklı ağ yapısı önerilmiştir. Elde edilen güven değerleri ve eğitim haritası ile birlikte maliyet yığınlarından elde edilen derinlik haritası kullanılarak küresel eniyileme yöntemi ile derinlik haritası elde edilmiştir.

Kim vd. [16] çalışmasında ise güven değeri elde etmek için doğrudan derinlik haritası kullanılması yerine ham eşleştirme maliyetleri kullanılmıştır. Ham eşleştirme maliyeti MC-CNN ağından [1] elde edilmiştir. LAF-Net [17] ağı ise eşleşme maliyetlerini, derinlik haritasını ve referans sol görüntüyü giriş olarak kabul etmiştir ve eşleşme maliyetlerini ve derinlik haritasını MC-CNN'den [1] elde edilmiştir.

Mayer vd. [6] çalışmasında, DispNet olarak adlandırılan ilk uçtan-uca öğrenme yapısı önerilmiştir. Sadece ağ girişine uygulanan sağ ve sol görüntü kullanılarak ağ çıkışında doğrudan derinlik haritası üretilmektedir. Bu çalışmada, kodlayıcı-kod çözücü (coder-encoder) tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır.

Pang vd. [7] çalışmasında, DispNet [6] çalışması geliştirilerek iki aşamadan oluşan Cascade Residual Learning (CRL) ağ mimarisi önerilmiştir. CRL ağı iki aşamadan oluşmaktadır ve ilk aşamada DispNet ağ mimarisi kullanılmıştır. İkinci aşamada ise DispResNet ağı bulunmaktadır ve birinci aşamada üretilen derinlik haritasının düzeltilmesi için kum saati (hourglass) ağ yapısı ile çok ölçekli bir düzeltme işlemi yapılmaktadır.

Chang ve Chen [8] çalışmasında, içerik bilgisini daha iyi aktarabilmek amacıyla uzamsal piramit havuzu kullanılmıştır. Uzamsal piramit havuzu sayesinde farklı boyutlardan küresel içerik bilgisi çıkarılarak maliyet yığınları oluşturmuştur. Maliyet yığınları, yığınlanmış kum saati (stacked hourglass) ağ yapısından geçirilerek derinlik haritası elde edilmiştir.

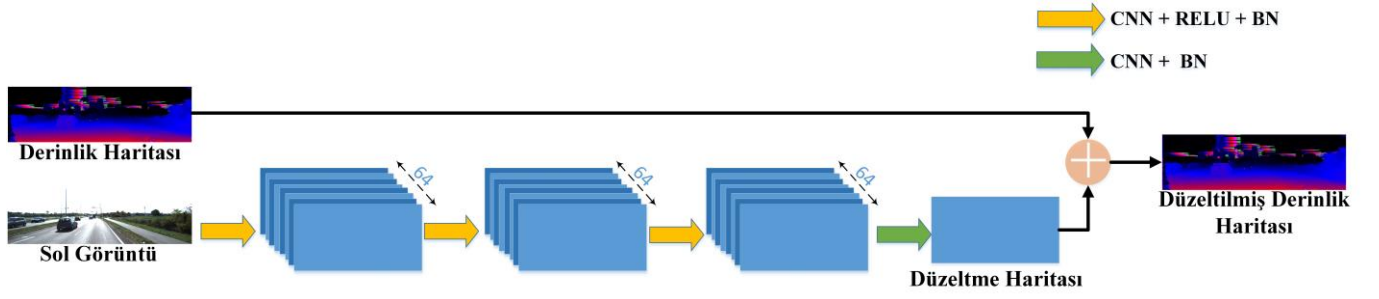
Son zamanlarda yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak derin öğrenme tabanlı yöntemlere yönelmektedir. Derin öğrenme tabanlı yöntemlerde de geleneksel yöntemlerle ile iç içe olan ağ yapıları mevcuttur. Fakat genel yönelim stereo eşleşme işlemlerinde yer

A. Emlek, M. Peker

alan bütün adımların derin öğrenme ile gerçekleştirilmesi yönündedir. Derin öğrenme ile gerçekleştirilen ağ yapılarında da başarıyı artırmak için ağ yapıları büyüyerek devam etmektedir. Bu bağlamda, yapılan çalışma ile literatürde yer alan çalışmaların aksine daha az işlem yükü gerektiren ve başarıyı artırmak için mevcut yöntemler ile birlikte kullanılması da mümkün olan bir ağ yapısı önerilmiştir.

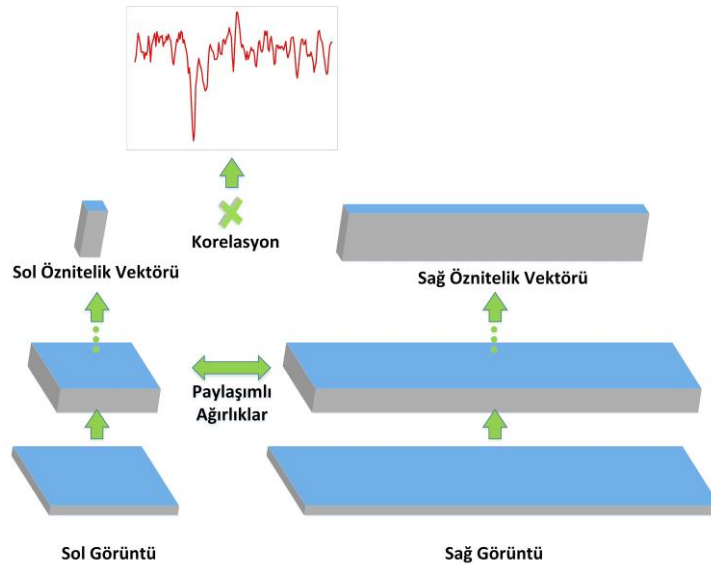
3. YÖNTEM

Önerilen ağ yapısında derinlik haritalarının iyileştirilmesi amacıyla, stereo görüntüler ve derinlik haritalarının giriş olarak kullanıldığı çok katmanlı CNN ağ yapısı önerilmiştir. Literatürdeki çalışmalar, derinlik haritalarının düzeltilmesi için eşleşme maliyetlerinin kullanılmasına dayalı yöntemlerin daha başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Sadece stereo görüntü ve derinlik haritası kullanmak, eşleşme maliyeti hacimlerinin hesaplayan yöntemler ile karşılaştırıldığında işlem yükü bakımından oldukça düşük seviyede kalmaktadır. Fakat eşleşme maliyetlerine ulaşmak her zaman mümkün olmamakla birlikte bazı hazır sistemler doğrudan stereo görüntüleri ve derinlik haritasını son kullanıcıya sunmaktadırlar. Fakat hazır derinlik haritalarında da hatalar mevcuttur. Çalışma kapsamında önerilen ağ yapısı ile hazır sağlanan derinlik haritası ve sol kameraya ait görüntü kullanılarak giriş derinlik haritasının düzeltilmesi amaçlanmıştır. Önerilen ağ yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Önerilen ağ yapısı

Ağın derinlik haritası girişinde, Content-CNN [2] ağından alınan ham eşleşme maliyetlerine kazanan-hepsini-alır (Winner-Take-All, WTA) yöntemi uygulanarak elde edilen derinlik haritaları kullanılmaktadır. Content-CNN ağı giriş olarak aldığı stereo görüntülerden sol görüntü üzerindeki her bir piksel için eşleşme maliyeti üretmektedir. Eşleşme maliyetleri siyam ağ yapısı kullanılarak elde edilmektedir. Siyam ağlardan ilkinde sol görüntüden alınan 9×9 'luk parça verilirken diğer ağ girişine ise sağ görüntüden alınan arama uzayı boyunca bütün muhtemel olasılıkları içeren görüntü kümesi giriş olarak verilmiştir. Siyam ağın



Şekil 2. Content-CNN ağ yapısı

EVİRİŞİMLİ SİNİR AĞI TABANLI DERİNLİK HARİTASI İYİLEŞTİRME

çıkışında elde edilen sol ve sağ öznitelik vektörlerine ilinti işlemi uygulanarak, verilen giriş için arama uzayı boyunca eşleşme maliyetleri elde edilmiş olur. Content-CNN ağ yapısı ise Şekil 2’de verilmiştir.

Elde edilen eşleşme maliyetleri üzerinden Eşitlik 2’de verilen kazanan-hepsini-alır yöntemi uygulanarak ağıma giriş olarak vereceğimiz derinlik haritası elde edilmektedir.

$$d_p = \operatorname{argmin} C_{\text{Content_CNN}}(p, d) \quad d \in [0, d_{\max}] \quad (2)$$

Eşitlik 2’de yer alan $C_{\text{Content_CNN}}$, Content-CNN ağından sol görüntüdeki her p pikseli için 0 ile maksimum derinlik (d_{\max}) aralığı için elde edilen eşleşme maliyetlerini, d ise derinlik değerini temsil etmektedir.

Önerilen ağ yapısına giriş olarak uygulanan sol görüntü üzerinde sıralı evrişim işlemleri uygulanmıştır. Her bir katmanın sonunda yığın normalizasyonu uygulanarak ağı daha kolay ve iyi eğitilebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca son katman hariç her bir evrişim katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. evrişim işlemlerinde filtre boyutu 5×5 , öznitelik haritası boyutu ise 64 seçilmiştir. Son katmanda öznitelik haritasının boyutu bir olarak belirlenmiştir ve katmanın sonunda düzeltme haritası elde edilmiştir. En son adımda ise sıralı evrişim katmanları sonucundan elde edilen düzeltme haritası ve başlangıç derinlik haritası birleştirilerek nihai derinlik haritası elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen ağı mimarisi uygulanabilirlik açısından oldukça basit ve sığdır (shallow).

Bu çalışmada, CNN katman sayısının başarımlar üzerindeki etkisi farklı boyutlarda derinlik değeri kullanılarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda üç farklı CNN katman sayısı için ağ eğitimi gerçekleştirilmiştir. CNN katmanların sayısı üç, dört ve beş olarak değiştirilerek en uygun ağ yapısı belirlenmiştir. Parametreler belirlenirken, CNN Katman sayısı ve öznitelik harita boyutları küçük tutularak gelecekteki çalışmalarda yapının uçtan-uca (end-to-end) bir ağ yapısında kullanılması ve gerçek zamanlı çalışabilmesi durumunda daha uygulanabilir olmasını sağlamaktır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında önerilen ağ yapısı PyTorch çerçevesi (framework) kullanılarak geliştirilmiştir. Eğitim ve test işlemleri için Nvidia 2080Ti ekran kartı kullanılmıştır. Eğitim ve test işlemleri için KITTI 2012 [18] ve KITTI 2015 [19] veri kümeleri kullanılmıştır. KITTI 2012 ve KITTI 2015 veri kümeleri otonom sürüş uygulamalarında kullanılabilecek düzeltilmiş dış mekân görüntülerinden oluşmaktadır. Veri kümelerinde sırayla 194 ve 200 adet düzeltilmiş görüntü bulunmaktadır. Veri kümelerinde yer alan her bir stereo görüntü için lazer tarayıcılarla toplanmış doğru kabul edilen derinlik bilgileri verilmiştir. Çalışmada, veri setindeki görüntülerin %10’u doğrulama, %10’u test için ayrılmıştır. Geriye kalan %80’i ise ağların eğitiminde kullanılmıştır.

Eğitim aşamasında ağı giriş olarak sol görüntü ve derinlik haritası olmak üzere iki görüntü verilmektedir. Sol görüntü veri kümesinden derinlik değeri düzeltililecek görüntüyü temsil etmektedir. Diğer giriş olan derinlik haritası ise Content-CNN ağından elde edilen düzelecek görüntüyü temsil etmektedir. Eğitim parametrelerinin başlangıç değerlerinin belirlenmesinde Xavier yöntemi kullanılmıştır. Yitim fonksiyonu (loss function) olarak ise Eşitlik 3’de verilen $L1$ fonksiyonu kullanılmıştır. Yitim fonksiyonunu en aza indirmek için ADAM yöntemi kullanılmıştır. Eğitim parametreleri sırayla; öğrenme oranı 0.001, beta değerleri 0.9, 0.999 olarak seçilmiştir. Ağı eğitimi için 100 çevrim gerçekleştirilmiştir.

$$\text{hata} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (|Y_{\text{gerçek}} - Y_{\text{tahmin}}|) \quad (3)$$

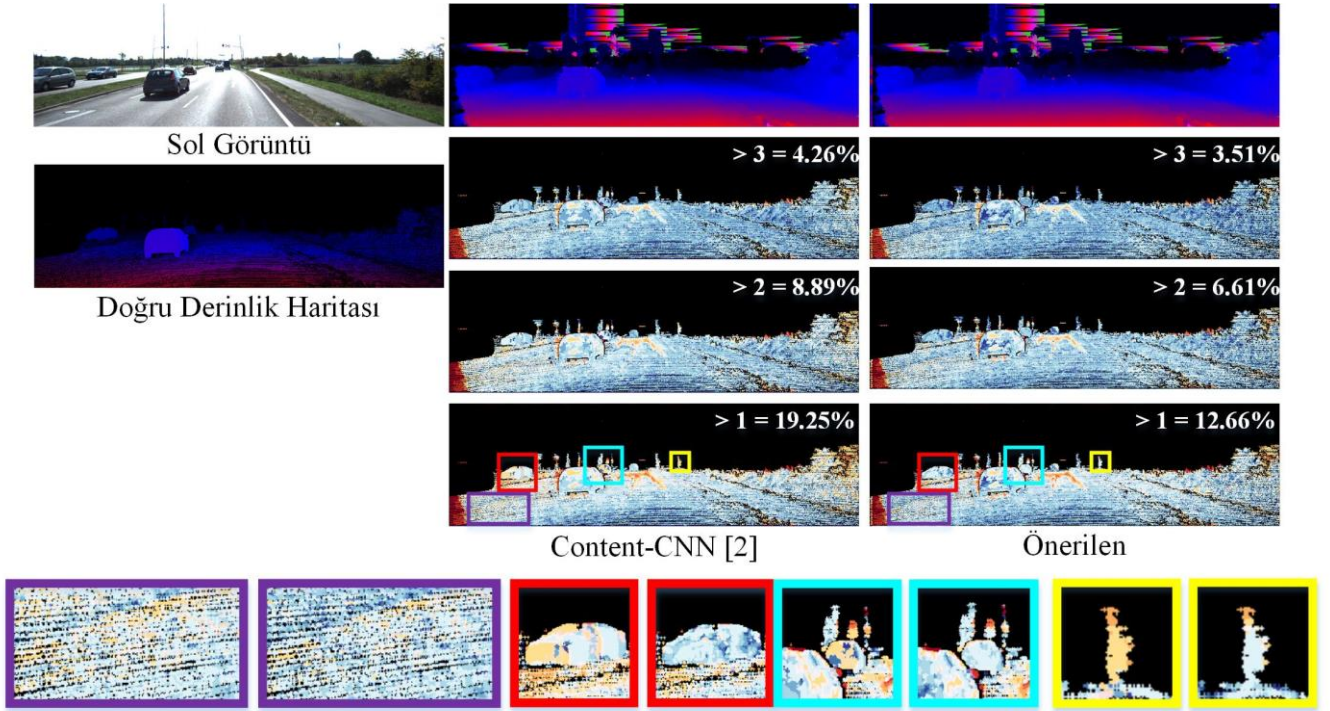
Önerilen ağ yapısında, CNN katmanlarının derinliğine göre başarımların etkisini test etmek için farklı sayıda CNN katmanı eğitilerek test edilmiştir. CNN katman sayıları değiştirilerek elde edilen 3 piksel hata oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’de yer alan ifadelerden Content-CNN [2] kullandığımız referans derinlik haritası elde etme yöntemini temsil etmektedir. Önerilen olarak verilen yöntemler çalışma kapsamında oluşturulan ağ yapılarını ifade etmektedir. Parantez içerisindeki rakamlar ise CNN katman sayısını göstermektedir. Veri kümeleri ayrı ayrı (KITTI 2012 ve KITTI 2015) ve birleştirilerek (KITTI 2012 + KITTI 2015) kullanılmıştır. Yöntemler tarafından üretilen derinlik haritaları referans derinlik haritaları ile karşılaştırılmış ve üç piksele kadar olan farklar doğru eşleştirme olarak kabul edilmiştir. Tabloda verilen değerler doğru eşleştirmelerin toplam piksel sayısına oranını belirtmektedir. Tablo 1’den de kolaylıkla görüldüğü gibi nitel değerlendirmeler sonucunda her bir CNN katmanı sayısında referans derinlik haritasının iyileştirildiği gösterilmektedir. CNN katman sayısındaki artış genellikle elde edilen derinlik haritasındaki hatanın düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Önerilen yapı özellikle KITTI 2015 veri kümesinde Content-CNN tarafından elde edilen sonuçları iyileştirmede başarılı olmuştur. Ayrıca Tablo 1’de çalışma süresi analizleri de verilmiştir. Önerilen ağ yapılarının çalışma sürelerinin Content-CNN ile kıyaslandığı zaman oldukça düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Buradan da görülebileceği gibi önerilen ağı sığ yapısı sayesinde diğer yöntemler ile birlikte kullanılması da mümkün olacaktır.

Tablo 1. Önerilen ağ yapısının farklı CNN katman sayıları için 3 piksel hata oranları

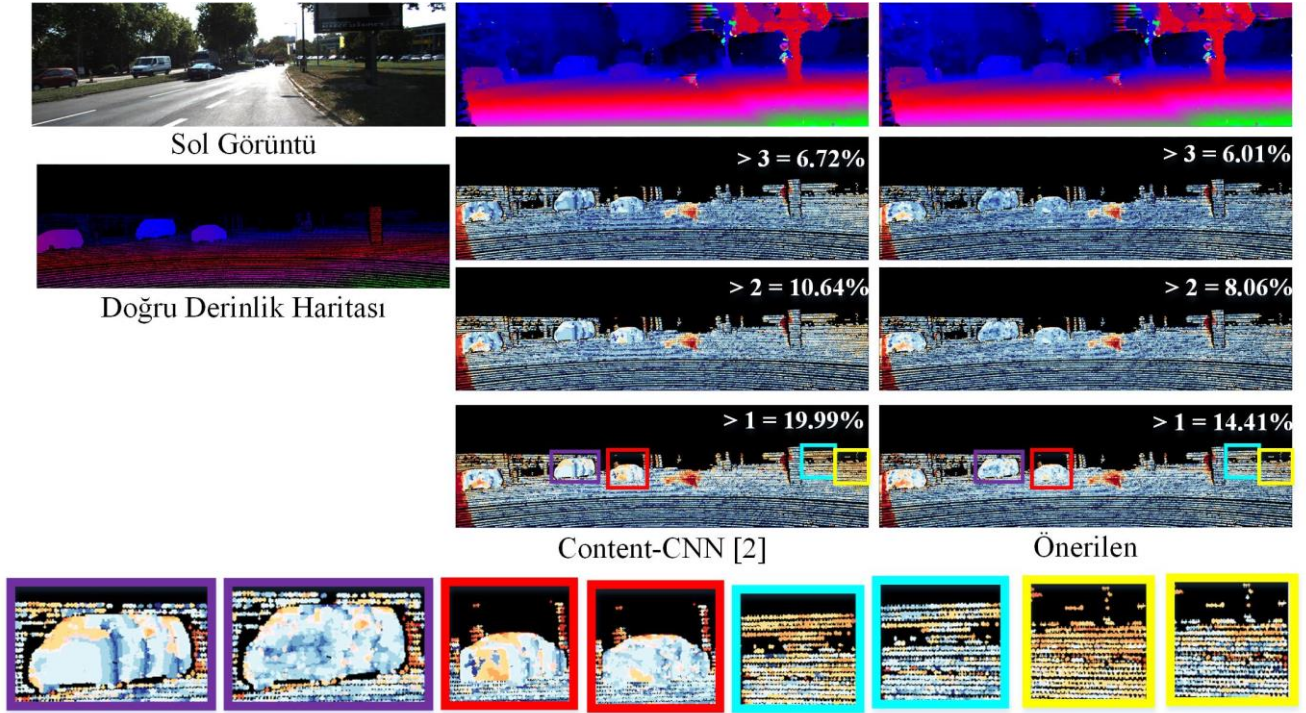
Yöntem	Veri Kümelerinde Oluşan Hatalar (%)			Çalışma Süresi (s)
	KITTI 2012	KITTI 2015	KITTI 2012 + KITTI 2015	
Content-CNN [2]	8,93	6,23	7,73	0.14
Önerilen (3)	8,88	5.94	7,57	1.39×10^{-3}
Önerilen (4)	8,83	5,89	7,54	2.08×10^{-3}
Önerilen (5)	8,83	5.87	7,52	2.73×10^{-3}

Nitel başarımın yanında, görüntü üzerinden yapılan nicel karşılaştırmalar da uygulama esnasında karşılaşılabilecek durumları analiz edebilmek için önem arz etmektedir. Şekil 3 ve Şekil 4'te, önerilen ve referans yöntemden elde edilen derinlik haritaları ile 1, 2 ve 3 piksel hataları incelenmiştir. Görsellerde ilk sütunda sol giriş görüntüsü ve doğru derinlik haritası verilmiştir. İkinci ve üçüncü sütünün ilk satırlarında ise Content-CNN ağı ile ve Önerilen (4) ile elde edilmiş derinlik haritaları verilmiştir. İkinci, üçüncü ve dördüncü satırlarda verilen görseller ise bir, iki ve üç piksel hata haritalarını temsil etmektedir. Örnek olarak bir piksel için elde edilen derinlik değerinin doğru kabul edilebilmesi için, referans derinlik değeri ile yöntemlerden elde edilen değer arasındaki farkın bire eşit veya az olması gerekmektedir. Şekil 3'te piksel hataları görselleştirilirken kullanılan renkler hatanın büyüklüğünü ifade etmektedir. Soğuk renkler hatanın az olduğunu (Koyu mavi en az hata), sıcak renkler (koyu kırmızı en çok hata) ise hatanın çok olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 3. Yöntemlerden elde edilen derinlik haritaları (ikinci ve üçüncü kolonda yer alan ilk satır), ve piksel hataları (ikinci ve üçüncü kolonda yer alan iki, üç ve dördüncü satırlar). En alt satırda piksel hatalarının büyütülmüş görüntüleri (sol taraftaki görüntüler Content-CNN [2] ve sağ taraftaki görüntüler ise önerilen yönteme ait piksel hatalarıdır).

EVRIŞİMLİ SİNİR AĞI TABANLI DERİNLİK HARİTASI İYİLEŞTİRME



Şekil 4. Yöntemlerden elde edilen derinlik haritaları (ikinci ve üçüncü kolonda yer alan ilk satır), ve piksel hataları (ikinci ve üçüncü kolonda yer alan iki, üç ve dördüncü satırlar). En altta satırda piksel hatalarının büyütülmüş görüntüleri (sol taraftaki görüntüler Content-CNN [2] ve sağ taraftaki görüntüler ise önerilen yönteme ait piksel hatalarıdır.)

Şekil 3 ve Şekil 4'te, önerilen yöntem ile elde edilen derinlik haritalarında yer alan 3-piksel ve 2-piksel hataları incelendiğinde, derinlik haritalarında çok belirgin bir biçimde iyileştirme sağlandığı görülmektedir. En altta verilen 1-piksel hataları da benzer şekilde nesne köşeleri ve desen içermeyen bölgelerde iyileştirmeler elde edildiğini net bir şekilde göstermektedir. Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü üzere önerilen ağ yapısı ağaç, araba gibi nesnelerin hem kenar hem de yüzey alanlarında gözle görülür bir düzeltme sağlamaktadır. Bu düzeltmeler özellikle 3B bölütleme ve 3B nesne tanımlama gibi süreklilik ve kenar bilgilerinin hassasiyetine ihtiyaç duyan uygulamalar için büyük bir avantaj sağlayacaktır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, derinlik haritalarının iyileştirilmesi amacıyla sadece sol kamera görüntüsü ve derinlik haritasının giriş olarak kullanıldığı bir ağ yapısı önerilmiştir. Önerilen ağ yapısında, sol görüntüden elde edilen öznelikler derinlik haritasının iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Nitel ve nicel sonuçlar incelendiğinde önerilen ağ ile çok ağır bir işlem yükü eklenmeden literatürde yer alan bir yöntemin derinlik haritasının iyileştirildiği gösterilmiştir. İşlem yükünün az olmasının temel sebebi önerilen ağ yapısının sığ (shallow) ve kolay uygulanabilir yapıda olmasıdır. Bu sayede, literatürde derinlik haritasının elde edilebildiği yöntemlere yardımcı olarak kullanılabilir. Ayrıca, mevcut stereo görüntü tabanlı derinlik bilgisini kullanan sistemler içerisinde performansı arttırmak için doğrudan kullanılabilir bir yöntem önerilmiştir. Böylece, stereo görüntülerin kullanıldığı ve derinlik bilgisine ihtiyaç duyulan uygulamaların da başarımı artırılmış olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi "MMT 2019/7-BAGEP" nolu proje ile desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. Žbontar and Y. LeCun, "Computing the stereo matching cost with a convolutional neural network", In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015, pp. 1592-1599.
- [2] W. Luo, A. G. Schwing, and R. Urtasun, "Efficient deep learning for stereo matching", In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016, pp. 5695-5703.
- [3] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms", *International Journal of Computer Vision*, vol 47, pp. 7-42, 2002.
- [4] A. Emlek, M. Peker and K. F. Dilaver, "Variable window size for stereo image matching based on edge information," In Proc. International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium, 2017, pp. 1-4.
- [5] A. Emlek, M. Peker and M. K. Yalçın, "Improving the cost-volume based local stereo matching algorithm," In Proc. Signal Processing and Communications Applications Conference, 2018, pp. 1-4.
- [6] J. Sun, N. N. Zheng and H. Y. Shum, "Stereo matching using belief propagation", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, no. 7, pp. 787-800, 2003.
- [7] L. Hong and G. Chen, "Segment-based stereo matching using graph cuts", In Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, pp. 74-81.
- [8] P. Brandao, E. Mazomenos and D. Stoyanov, "Widening siamese architectures for stereo matching", *Pattern Recognition Letters*, vol. 120, pp. 75-81, 2018.
- [9] M. Poggi and S. Mattoccia, "Learning from scratch a confidence measure", In Proc. British Machine Vision Conference, 2016, pp. 46.1-46.13.
- [10] M. Poggi and S. Mattoccia, "Learning to predict stereo reliability enforcing local consistency of confidence maps", In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017, pp. 4541-4550.
- [11] A. Seki and M. Pollefeys, "Patch based confidence prediction for dense disparity map", In Proc. British Machine Vision Conference, 2016, pp. 23.1-23.13.
- [12] F. Cheng, X. He, and H. Zhang, "Learning to refine depth for robust stereo estimation", *Pattern Recognition*, vol. 74, pp. 122-133, 2018.
- [13] N. Mayer, E. Ilg, P. Hausser, P. Fischer, D. Cremers, A. Dosovitskiy and T. Brox, "A large dataset to train convolutional networks for disparity, optical flow, and scene flow estimation", In Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, 2016, pp. 4040-4048.
- [14] S. Kim, D. Min, S. Kim and K. Sohn, "Unified confidence estimation networks for robust stereo matching", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, no. 3, pp. 1299-1313, 2019.
- [15] S. Kim, S. Kim, D. Min and K. Sohn, "LAF-Net: Locally Adaptive Fusion Networks for stereo confidence estimation", In Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, 2019, pp. 205-214.
- [16] J. Pang, W. Sun, J. S. Ren, C. Yang and Q. Yan, "Cascade residual learning: a two-stage convolutional neural network for stereo matching", In Proc. International Conference on Computer Vision Workshops, 2017, pp. 878-886.
- [17] J. Chang and Y. Chen, "Pyramid stereo matching network", In Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018, pp. 5410-5418.
- [18] A. Geiger, P. Lenz and R. Urtasun, "Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite", In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012, pp. 3354-3361.
- [19] M. Menze and A. Geiger, "Object scene flow for autonomous vehicles", In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015, pp. 3061-3070.





SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

Fuat ÖZYONAR^{1,*} 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

ÖZET

Flotasyon prosesi madencilik endüstrisinde mineral zenginleştirmede uygulanan yerçekimi kuvveti yardımıyla gerçekleşen bir ayırma (yüzdürme) işlemidir. Son yıllarda su ve atıksu arıtımında yaygın olarak kirleticilerin ayırımında kullanılmaktadır. Flotasyon prosesleri üretilen kabarcık metoduna göre isimlendirilir. Dağılmış-hava flotasyonu, çözünmüş-hava flotasyonu ve son yıllarda elektrokimyasal arıtma proseslerinden biri olan elektroflotasyon (Ef) prosesi örnek flotasyon prosesleri olarak verilebilir. Bu çalışmada literatür araştırması yapılarak, Ef prosesinin ağır metal, organik ve inorganik kirleticilerin, yağ ve ürünlerinin, boyar maddelerin, deterjanların, vb. kirleticilerin su ve atıksudan gideriminde uygulanması ile elde edilen sonuçlara odaklanılmıştır. Bu çalışmaların sonuçlarına göre; Ef prosesinin sağladığı bazı avantajlar sayesinde su ve atıksu arıtımında ve suyun geri kazanımında tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektroflotasyon, Flotasyon, Ayırma, Su ve atıksu arıtımı.

ELECTROFLotation PROCESS IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT

ABSTRACT

The flotation process is a gravitational separation (flotation) process applied at mineral processing in mine industries. In recent years, water and wastewater treatment is widely used in the separation of pollutants. Flotation processes are named according to the bubble method produced. Dispersed-air flotation, dissolved-air flotation and electroflotation (Ef) process, which is one of the electrochemical treatment processes in recent years, can be given as sample flotation processes. In this study, literature research was conducted and the results obtained by applying Ef process in the removal of heavy metal, organic and inorganic pollutants, oil and products, dyes, detergents, etc. from water and wastewater were focused on. In the results of these studies, some advantages of electroflotation process have provided satisfactory results in water and wastewater treatment or water recovery.

Keywords: Electroflotation, Flotation, Separation, Water and wastewater treatment.

1. GİRİŞ

Flotasyon (yüzdürme) bir sıvı fazdan katı ve sıvı partikülleri ayırmak için kullanılan bir işlemdir. Flotasyon prosesi özellikle madencilik ve sanayi hammadde ilişkisinde dünya ekonomisine önemli katkılarda bulunmaktadır. Flotasyon prosesinde ayırma işlemi sıvıda oluşturulan gaz kabarcıkları ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca eklenen surfaktanlar ile sulu çözeltiden giderilmek ya da ayrılmak istenen maddeler gaz kabarcıkları vasıtasıyla sudan ayrılmaktadır. Bu gaz kabarcıklarına yapışan ve yüzdürme kuvveti artan parçacıklar içindeki sıvıdan daha ağır olsalar da su yüzeyine çıkabilirler. Böylelikle sıvı fazdan kolaylıkla ayrılabilirler [1, 2, 3, 4].

Bugün dünya genelinde birçok endüstride flotasyon prosesleri kullanılmaktadır. Örneğin madencilikte metal kazanımında, su ve atıksu arıtımında ve atıksuyun geri kullanımı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanılan flotasyon yöntemlerine alternatif olarak son yıllarda su ve atıksu arıtımında yaygın bir araştırma konusu olan elektrokimyasal proseslerden biri olan elektroflotasyon (Ef) prosesi göze çarpmaktadır. Bu süreçte sıvı içerisinde oluşturulan gaz kabarcıkları suyun elektrolizi ile oluşturulmaktadır. Ef yöntemi gaz, sıvı ve katı kirleticilerin buldukları yerlerde uygulanabilmekte ve çeşitli türde endüstriyel üniterlerden oluşan kirleticilerin minerilazasyonunda, arıtımında ve uzaklaştırılmasında yeni bir proses olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin sağladığı bazı avantajlar şu şekilde sıralanabilir; ana reaktif maddesinin elektron olması, elektrokimyasal işlemler neticesinde yeni ürünlerin oluşması ve/veya ortamdaki kirleticilerin giderilmesi veya zararsız hale dönüşmesini sağlayarak çevrenin dengesinin bozulmasını engellemektedir. Elektrokimyasal işlemler yüksek elektron verimi ile nitelendirildiğinden ve kimyasalların eklenmesi genellikle gerekli olmadığından, kimyasal olarak bu işlem yeşil kimya olarak sınıflandırılmıştır [1].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fozyonar@cumhuriyet.edu.tr
 Geliş / Received: 29.11.2019 Kabul / Accepted: 19.05.2020 doi: 10.28948/ngmuh.653062

Yeşil kimya kriterlerinin başında, kimyasal madde eklenmemesi, yüksek atom verimi, işlem basitliği, mevcut malzemelerin uygulanması ve çevresel kabulü gelmektedir [1].

Ef prosesi genel olarak yalnız başına değil de diğer elektrokimyasal prosesle birlikte kullanılmaktadır. Katot ve anot elektrotlarından açığa çıkan gaz kabarcıklarının (H_2 , O_2) kirleticileri adsorbe ederek yüzeye çıkarması ile kirleticinin ortamdan ayrılması esasına dayanan bir prosestir. Elektrokoagülasyon (EC) prosesi süresince gerçekleşen ve flotasyon (yüzdürme) metodu olarak anılmaktadır. Elektroflotasyon prosesinde flotasyon gereği olarak eklenmesi gereken gaz, elektroliz sonucu belli bir ölçüde suyun indirgenmesi ile gerçekleşmektedir [3, 4].

Ef yönteminin endüstriyel uygulamalarda çok fazla kullanım alanı olmamasına rağmen literatürde çok çeşitli atıksu ve suyun arıtımında, hatta maden zenginleştirmede uygulanan laboratuvar ölçekli çalışmalara rastlanmaktadır. Bu prosesin geliştirilmesi ve büyük ölçekli kullanımının uygun hale getirilmesi için konuyla ilgili daha çok araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu kapsamda, çalışma dâhilinde, Ef yönteminin mekanizması, uygulandığı atıksu tip ve özellikleri ayrıntılı bir biçimde değerlendirilerek, prosesin avantaj ve dezavantajları irdelenip; ileride konu ile ilgili yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından önemli bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

1.1 Elektroflotasyon Prosesinin Mekanizması

Ef prosesi suyun elektroliz ile üretilen oksijen ve hidrojen gaz kabarcıklarının sudan ayrılması ile atıksudaki kirleticilerin ayrılmasını sağlayabilir. Şekil 1'de Ef prosesinin mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. İnert elektrot malzemesi kullanılarak kirlenmemiş bir suyun elektrolizinde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşebilir [2, 3, 4, 5, 6];

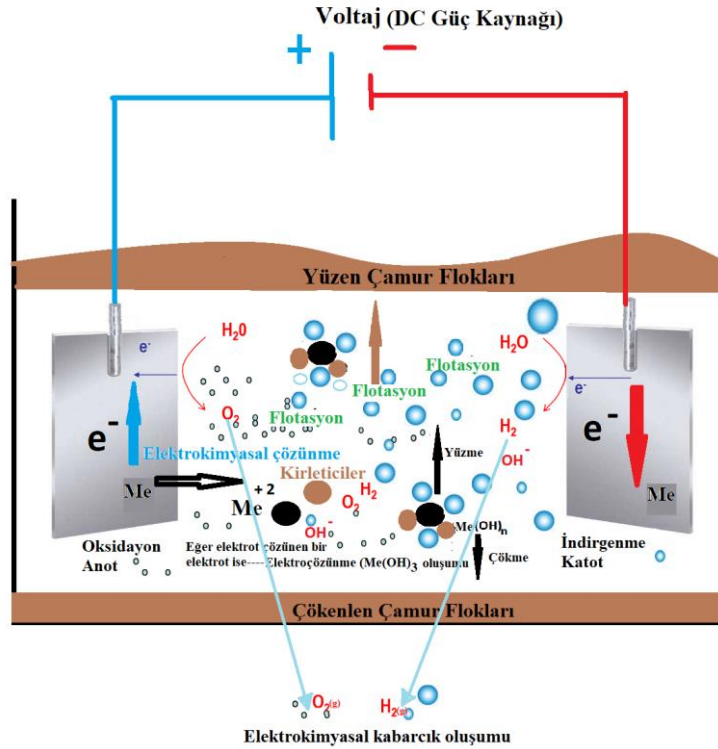
Katotta;



Anotta;



Genel Redoks Reaksiyon;

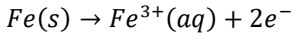
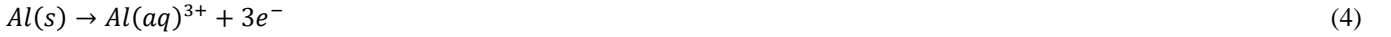
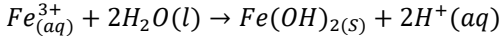


Şekil 1. Elektroflotasyon prosesinin mekanizması ve şematik görünüşü.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

Eğer su içerisinde çeşitli safsızlıklar varsa kimyasal reaksiyon sonucu başka gazlar oluşabilir. Örneğin su içerisinde klor (Cl) varlığında anotta klor gazı (Cl₂) kabarcıkları oluşabilir. Ef'da kabarcıklar, elektroliz ile genellikle atıksuyun kendi iletkenliği ya da gerekli görüldüğü durumlarda ise yardımcı bir elektrolit katkısı ile üretilirler. Elektrotlarda üretilen kabarcıklar çok küçük ve üniformdurlar. Buna ilaveten çok yavaş bir şekilde yükselirler [2, 3, 7]. Küçük olan kabarcıkların askıda kalma kabiliyetlerinin büyük olanlara göre daha düşük olması nedeniyle, bunların yüzeye doğru hareketleri büyük kabarcıklara göre daha yavaştır. Bu olgu, onların yağ damlacıkları vb. maddelerle çarpışma ihtimallerini artırır [3]. Su ve atıksuda çözünmemiş halde bulunan maddelerin ortamdan uzaklaştırılması için; çökeltme, koagülasyon/flokülasyon (pıhtılaştırma/yumaklaştırma) gibi proseslerden biri flotasyondan önce uygulanmalıdır.

Elektrot olarak çözünen bir metal kullanıldığında demir ve alüminyum gibi suda metal hidroksit flokları oluşabilir. Bu da kirleticilerin gideriminde oldukça yararlı olan Me(OH)₃ floklarıdır [4, 5, 6].

Anotta:**Katotta:****Genel Redoks Reaksiyon;**

Ef prosesinde hedef, kirletici küçük partiküllere sahip süspansiyonlar ve yağ emülsiyonlarıdır. Ef işleminde, taneciklerin yükü ve kararlılığı, dengeyi etkileyen önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu amaçla Ef uygulanmasında önce, emülsiyonlar ve benzeri kirleticilerin kararlı yapılarının bozulması ve sistemin kararlı halden uzaklaştırılması verim açısından son derece önemlidir [1, 2, 3].

Elektrolitik olarak üretilmiş kabarcıkların yüklerinin ve boyutlarının elektrot türünden etkilendiği bilinmektedir. Maksimum flotasyon hızına, kabarcık ve partiküllerin zeta potansiyelleri, zıt işarete sahip olduğu zaman erişilebilmektedir [3, 4, 5]. Kabarcık boyutunu etkileyen parametreler arasında ortamın pH değeri, akım yoğunluğu, sıcaklık, elektrot malzemesi ve elektrot bağlantı tipi gibi pek çok faktörün etkisi olmasına rağmen bunlar arasında en etkili olanlar elektrot malzemesi ve ortamın pH'ıdır. [2, 3, 4, 5]. Alkali şartlarda ve katottan küçük kabarcıklar, asidik çözeltilerde ise anottan gaz oluşumları gerçekleşmektedir. Kabarcık yoğunluğunun artması kabarcıkların çarpışma, toplanma ve uzaklaşma olasılığını artırır. Ayrıca küçük kabarcıklar, daha yüksek yüzey/hacim oranına sahip olmaları nedeniyle, kabarcık ve kirletici parçacıkları arasında daha büyük bir toplam yüzey etkileşimi meydana getirir [2, 3].

Kimyasal arıtma yöntemi olarak iyi bir alternatif olan Ef prosesinde, kabarcık boyutu ve miktarı uygulanan elektrik potansiyeli/akım değiştirilerek kolaylıkla yapılabilir. Atıksuya pıhtılaştırıcı ve yumaklaştırıcı kimyasalların eklenmesini içeren kimyasal prosesler, hem pahalı hem de geri kazanılamayan çamur üretmektedir. Buna karşılık elektrokimyasal yöntemlerin çoğu ve Ef prosesi kimyasal madde eklemesi gerekmeden uygulanabilen çevreci arıtma proseslerindedir.

1.2. Elektroflotasyon Prosesine Etki Eden Parametreler**1.2.1 Elektrot materyali**

Elektrokimyasal arıtmanın türünü ve verimini belirleyen en önemli parametre elektrot türüdür. Elektrokimyasal arıtmada olduğu gibi elektroflotasyonda da performans ve istenilen verim, kullanılan elektrot malzemesine bağlıdır. Anotta kullanılan elektrotlar genel olarak inert ve aktif olarak iki kategoride ele alınabilir. İnert elektrotlar oksijen oluştururken, aktif elektrotlar ise elektroliz ile çözünürler ve bu elektrotların oksijen kabarcıkları oluşturma potansiyelleri düşüktür [4, 5]. Metal, karbon, grafit malzemeler ve metallerin oksitleri gibi iletken metal bileşikleri ve yarı iletkenler ile metaller içerisinde platin ve altın, hem bazik hem de asidik çözeltilere uygulanabilir özelliklere sahiptir [6, 7]. Platin, titanyum, platin-iridyum, titanyum-taltanyum, titanyum-kalayoksit vb. elektrotlar; korozyona karşı dirençli homojen fizikokimyasal özellikler göstermelerine rağmen, pahalı olmaları, bu tür elektrotların kullanımını sınırlamaktadır [8, 9].

Son yıllarda inert elektrotlar, genellikle çeşitli metallerin üzerlerine kaplanarak çeşitli türlerde üretilmektedir. Bu elektrotlar çoğunlukla titanyum üzerine kaplanmaktadır. Titanyum üzerine kaplanan metaller; Pb, Sb, Zr, Sn, Ta ve Ru gibi metal oksit türleri olabilir [8]. Bu elektrotlar ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalarda; yağlı atıksuların arıtmada PbO₂-Ti elektrotlar [10],

F. Özyonar

radyoaktif atıksuların arıtımında RuO₂-Ti elektrotlar [9], seramik üretim tesisi atıksularının arıtımında Ti-TiO₂ elektrotlar [11], sızıntı suyunun arıtımında Ti-RuO₂ elektrotlar kullanılmıştır [12].

Elektrokimyasal arıtmada aktif yani çözünen elektrotlar olarak, en yaygın Al ve Fe elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlar elektroliz sonucu çözünerek çözeltiye Al³⁺ ve Fe²⁺, Fe³⁺ iyonları bırakmaktadır. Bu iyonlar suda elektroliz sonucu oluşan hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünebilir Al(OH)₃, Fe(OH)₂ ve Fe(OH)₃ gibi metal hidroksit formları oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon anında oluşan metal hidroksit partiküllerinin adsorbsiyon özellikleri çok yüksektir. Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu koagülasyonu gerçekleştiren koagülant maddeler (Fe ve Al gibi), atıksularda bulunan askıda ve kolloid maddeleri, diğer kirleticileri ve suda çözünmüş iyonları (anyon-kasyon) kendilerine doğru çekerek metal hidroksit floklarına hapsederler. Oluşan metal hidroksit flokları çökelmekte veya Ef ile oluşan gaz kabarcıkları yardımıyla su yüzeyine taşınmaktadır. Bu yöntemle, tekstil atıksuları [13, 14], mezbahane atıksuları [5, 15], evsel atıksular [16], metal kesim atıksuları [17], çamaşırhane atıksuları [18], metal giderimi (Cd, Cr, Cu Mn, Pb, Zn gibi.) [19, 20, 21, 22] kolloid ve süspansiyon partikül giderimi [23, 24], yağ ve gres giderimi [25] ile ilgili çalışmalarda yüksek kirletici giderme verimleri elde edilmiştir.

1.2.2 Akım yoğunluğu

Ef prosesinde akım yoğunluğu, reaksiyon oranının kontrolünde önemli sistem parametrelerinden birisidir. Ef prosesinde akım yoğunluğu doğrudan kontrol edilebilir tek işletme parametresidir [26, 27, 28, 29]. Akım yoğunluğu elektrokimyasal proseslerde koagülant dozajını, kabarcık üretim hızını, flok boyutu ve büyüklüğünü belirler. Bunlar elektrokimyasal proseslerin arıtma verimliliğini belirleyen etkilere [27].

Faraday yasasına göre, Eşitlik 7’de verildiği gibi elektrotlardan açığa çıkan gazın (H₂ ve O₂) veya metal iyonun (Al veya Fe gibi aktif metal) kütlesi C_m (g); uygulanan elektrik akımı I (A) ve elektroliz süresi t (sn veya sa) ile doğru orantılıdır. Burada M_w elektrotun molekül ağırlığı (g/mol), z transfer edilen elektron sayısı, F Faraday sabitidir (96500 C/mol) ve θ arıtılan su/atıksu miktarıdır (m³).

$$C_m = \frac{I \times t \times M_w}{z \times F \times \theta} \quad (7)$$

Sonuç olarak, uygulanan akım/akım yoğunluğu çözelti içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları kontrol eder. Elektrotların çözünme hızı, kabarcık oluşum miktarı ve büyüklüğü gibi parametreler akım yoğunluğuna bağlıdır. Bununla birlikte sürenin ve akım miktarının artması, enerji tüketimini orantılı olarak artırır [30, 31]. Bazı araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda, Ef prosesiyle kabarcık boyutunun akım yoğunluğu ile arttığını rapor etmişlerdir. Ancak bazı çalışmalarda [32, 33] ise akım yoğunluğunun artmasıyla küçük kabarcıkların birbirleriyle birleşerek kendilerinden daha büyük kabarcıklara dönüştüğü ifade edilmiştir. Bu da kabarcık yüzey alanını azalttığı için verim düşüşüne neden olmaktadır. Dolayısıyla, deneysel çalışma ile bir optimum akım yoğunluğuna bağlı olarak kabarcık boyutu verim ilişkisi kurulmalıdır [34].

Genel olarak elektrokimyasal proseslerde olduğu gibi Ef prosesinde de doğru akım kullanılır [35, 9]. Ancak doğru akımın kullanılması, elektrotların yüzeyinde zamanla oksit katmanların, kirleticilerin ve elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan bazı maddelerin (özellikle katot) birikmesine yol açmakta ve bu da anodik ve katodik elektrot yüzeyinde bir izolasyonun oluşmasına sebep olmaktadır. Bu olaydan dolayı elektrotlar pasif hale gelerek, elektroflotasyonun ve diğer elektrokimyasal proseslerin gerçekleşmesini sınırlar. Alternatif akımın kullanımı veya bir anot-katod değiştirici ile kutup değiştirmek pasifizasyonu sınırlayıp ortadan kaldırabilir [36, 37].

1.2.3 Başlangıç pH değeri

Çözeltinin pH’ı elektrokimyasal proseslerde önemli bir rol oynamaktadır. pH değeri; Ef prosesinde oluşan kabarcık formunu ve boyutunu etkiler. Ayrıca harcanan elektrot kullanıldığında oluşan metal hidroksit türleri de pH ile değişiklik gösterir. Araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda, aynı elektrot malzemesi kullanılarak oluşturulan gaz kabarcıklarının, asidik koşullarla karşılaştırıldığında nötr ve bazik koşullarda daha küçük H₂ gaz kabarcıkları oluşturduğu gözlemlenmiştir [32, 33, 38]. Bu sebeplerden dolayı, Ef prosesinde oluşan H₂ ve O₂ kabarcıklarının büyüklüğü ve formu, optimum işletme koşullarının belirlenmesinde önemli rol oynayacağı için, genel bir pH değeri değil de su ve atıksu için uygun performans verimini sunan, çözelti pH değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

1.2.4 Elektriksel iletkenlik

Çözeltinin elektriksel iletkenliği, EF prosesi üzerine etkisi olan diğer bir parametredir. Elektriksel iletkenlik, atık suyun iyonik gücü ile ilgilidir ve Ef işleminin enerji tüketimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [14, 34, 38]. Destekleyici elektrolit, çözeltinin iletkenliğini artırarak direnç düşüşüne sebep olur ve elektrik tüketimini azaltır. Elektrik enerjisi harcaması (C_{enerji}); aşağıdaki denklemde verildiği gibi uygulanan elektrik voltajına, akıma ve zamana bağımlı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik. 8).

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

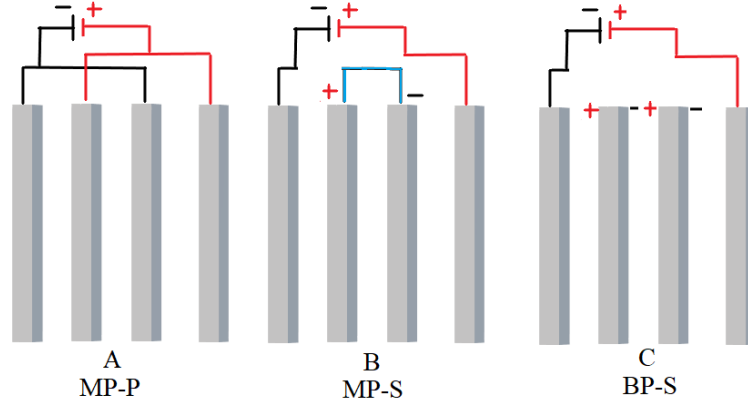
$$C_{enerji} = \frac{V \times I \times t_{ec}}{\vartheta} \quad (8)$$

Burada; V uygulanan voltaj, t_{ec} işletme süresi (sn veya sa), I akım (A) ve ϑ reaktördeki arıtılan su miktarıdır (m^3).

Bazı araştırmacılar, kullanılan destek elektrotlarının, elektrot yüzeyinde aşınmalara veya pasifizasyona neden olduğunu raporlamışlardır. Özellikle Cl anyonlu bir destek elektrotu kullanıldığında, elektrot yüzeyinde korozif özelliğinden dolayı bir aşınma meydana gelirken, enerji tüketimi daha düşük olmaktadır [38, 39, 40]. Ayrıca oluşan Cl_2 gazı organik kirletici ve dezenfektan özelliği göstermektedir. SO_4 anyonlu elektrolitler ise elektrot yüzeyinde belirli bir derişimden sonra birikimlere sebebiyet vererek pasifizasyona sebep olur [41]. Bu nedenle Ef prosesinde, enerji verimliliği ve elektrot performansı göz önüne alınarak, optimum elektriksel iletkenlik, çeşitli elektrolitler kullanılarak sağlanmalıdır.

1.2.5 Elektrot bağlantı türü

Ef prosesinde bağlantı türü sadece arıtma verimliliğini değil aynı zamanda enerji tüketim maliyetini de etkilemektedir. Elektrokimyasal proseslerde kullanılan en tipik bağlantı türleri; monopolar paralel (MP-P), monopolar seri (MP-S) ve bipolar seri (BP-S) bağlantı türleridir [42, 43]. Bu elektrot bağlantı düzenlemelerinin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Elektroflotasyon hücrelerinde elektrot bağlantı türleri. (A) Monopolar paralel (B) Monopolar Seri ve (C) Bipolar Seri.

Monopolar elektrot düzenlemesinde, elektrotların her biri, elektrokimyasal hücredeki elektrik polaritesine bağlı olarak anot veya katot olarak çalışır. Şekil 2'den görüldüğü gibi her bir anot elektrot, monopolar paralel bağlantıda doğrudan anotta bağlanır, katotta hücreler de aynı şekilde doğrudan bağlanır. Monopolar seri bağlantıda ise iç elektrotlar dahili olarak birbirine bağlanırken, dışta kalanlar ise doğrudan anot ve katot elektrotuna bağlanır. Bipolar elektrot bağlantı türünde ise, monopolar olan dış elektrotlar dışında iç elektrotların her biri, önündeki elektrotun yüküne bağlı olarak yüklenir ve elektrot taraflarının her birinde farklı polarite gösterir. Bipolar bağlantı genellikle seri türde bağlanır. Bir seri bağlı elektrot düzenlemesi, aynı akımın tüm elektrotlar arasında dağıtılacağından dolayı devreyi tamamlamak için yüksek potansiyel farkına ihtiyaç duyacaktır. Dolayısıyla enerji gereksinimi artacaktır. Paralel bağlantıda ise elektrik akımı her bir elektrot arasında bölünmüştür. Bu da enerji tüketimi açısından bir avantaja neden olur. Bazı araştırmacılar da, elektrot bağlantı türünün elektrokimyasal arıtmada etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, MP-P bağlantı türünde diğer bağlantı türlerine göre yüksek giderme verimi ve düşük enerji tüketimi elde etmişlerdir [44, 45].

1.2.6 Elektrotlar arası mesafe

Elektrotlar arası mesafenin, anot ile katot arasında, direnç üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Ancak bu mesafe çok kısa olursa; koagülasyon, flotasyon ve çökme mekanizmalarını olumsuz yönde etkileyerek arıtım veriminin düşmesine sebep olur. Bu verim düşüşü, yüksek elektrostatik etkilenmeden dolayı, küçük parçacıkların çarpışmasını engelleyerek pıhtılaşma ile flok oluşumunu ve oluşan flokların çökmesini etkilemektedir [42]. Ayrıca çok fazla mesafe olması da flok oluşumunu azaltmaktadır. Dolayısıyla, en uygun mesafenin, flok oluşumu ve verim açısından bulunması gerekir [46, 47].

1.2.7 İşletme maliyetinin hesaplanması

Elektrokimyasal proseslerde işletme maliyeti, enerji harcamını ve elektrot harcamını dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Enerji ve elektrot maliyetleri elektrofotasyon (Ef), elektrokoagülasyon (EC) ve elektrooksidasyon (EO) prosesleri için ayrı ayrı hesaplanabilir. Elektrot maliyeti, sadece elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan demir ve alüminyum elektrotlar için, yani harcanan elektrotlar için hesaplanabilir. İşletme maliyeti $\$/m^3$ arıtılmış atıksu olarak hesaplanmıştır [5, 15].

$$\text{İşletme maliyet EC, Ef veya EO} = A \times C_{\text{enerji}} + B \times C_{\text{elektrot}}$$

Burada C_{enerji} ; m^3 arıtılan atıksu başına harcanan kWh elektrik enerjisi ve C_{elektrot} ; m^3 arıtılan atıksu başına harcanan elektrot miktarıdır. A ve B; piyasadaki birim fiyat elektrik enerjisi veya elektrot değeridir. Enerji ve elektrot harcamaları, m^3 arıtılan atıksu başına aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır [15].

$$C_{\text{enerji}} = \frac{V \times I \times t_{ec}}{\vartheta} \quad (9)$$

$$C_{\text{elektrot}} = \frac{I \times t_{ec} \times M_w}{z \times F \times \vartheta} \quad (10)$$

Burada V; uygulanan voltaj, t_{ec} ; işletme süresi (saniye veya saat), I; akım (A), ϑ ; reaktördeki arıtılan su miktarı (m^3), F; Faraday sabiti (96485 C/mol), M_w ; Fe (56 g/mol) veya alüminyumun (27 g/mol) molekül ağırlığı ve z; elektron transfer katsayısıdır (Fe:2, Al: 3).

2. SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ UYGULAMALARI

2.1 Yağlı Atıksuların Arıtımı

Yağlı atıksuların arıtılmasında Ef prosesi tek kullanıldığı gibi çözülmüş ve askıda katı kirleticileri de gidermek için diğer proseslerle birlikte kullanılmaktadır. Esfandiyari ve diğ. [48], yaptıkları çalışmada, zeytinyağı atıksularının arıtımında RuO_2/Ti , Al-SS elektrotlarını kullanarak, pH 4, akım yoğunluğu $40 A/m^2$, 1 g/L NaCl ve 30 dk elektroliz süresinde, KOİ %96, BOİ % 93,6, polifenol % 94,4, renk % 91,4, bulanıklık % 88,7, askıda katı % 97 ve yağ-gres % 97,1 değerinde giderme verimleri elde etmişlerdir. Yapılan diğer bir çalışmada, ham petrol tesisi atıksuların Ef prosesiyle arıtılmasında, Al elektrotlarının kullanıldığı kesikli işletilen bir reaktörde, 5V-0,4 A, 30 dk elektroliz süresinde ve pH: 4,72 koşullarında % 90 yağ-gres giderme verimi elde edilmiştir [49]. Carmona ve diğ. [50], yaptıkları çalışmada, sudan yağlı emülsiyonları gidermek için sürekli koşullarda Al elektrotları kullanarak, Ef prosesiyle $300 A/m^2$ akım yoğunluğunda %99 yağ giderme verimi elde etmişlerdir. Alam ve diğ. [33], anot olarak Ti- IrO_2 , katot olarak paslanmaz çeliğin kullanıldığı kesikli Ef reaktöründe, $150 A/m^2$ akım yoğunluğunda %90 yağ giderimi sağlamışlardır. Yağlı atıksuların, Ef, EC ve Ef/EC prosesleriyle arıtımında, kirletici giderme ve proses işletme koşulları aşağıdaki Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yağlı suların arıtımında Ef, EC ve Ef/EC prosesiyle kirletici giderimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi (yağ-gres)	Referans
Yağ rafinerisi	Al-Al	2-35 mA/cm ² , 1,2-1,7 V, kesikli reaktörde	%60,0-99,5	[51]
Restoran Atıksuyu	Fe-Al	0,2-0,6 mA/cm ² , 1,3-15,5 V, sürekli reaktörde	%95,0-99,0	[52]
Sentetik Yağlı atıksu	SS -SS	6-14 mA/cm ² , kesikli reaktörde, 30-120 dk,	%99,0	[53]
Sızıntı Suyu	Ti/ RuO_2 -SS	10-40 V, sürekli reaktörde, 120 dk	%90,2	[54]
Sızıntı Suyu	Al-Al	0,0496 mA/cm ² , 60 dk, kesikli reaktörde	%95,0	[55]

* SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

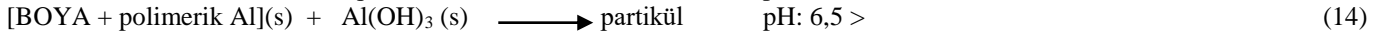
2.2 Renkli ve Tekstil Atıksularının Arıtımı

Özellikle tekstil endüstrisinden kaynaklanan renkli atıksular, miktar ve kirletici konsantrasyonu açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Endüstriyel atıksuların %15-20'lik kısmını tekstil atıksuları oluşturmaktadır. Dünya genelinde, yaklaşık olarak her

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

yıl 1 milyon tona tekstil boyar maddesi kullanılmaktadır [56]. Ef prosesi, renkli atıksuların arıtımında EC prosesiyle birlikte yaygın olarak kullanıldığı literatür araştırmalarında görülmüştür. Özellikle oluşan metal floklarının, reaktör yüzeyine H₂ ve O₂ gazları ile taşınımının, arıtma verimini yararlı bir şekilde arttırdığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Ef prosesi ile genel olarak, demir ve alüminyum elektrotları kullanılarak tekstil atıksuyu ya da sentetik boyar maddelerin giderimi yapılmıştır. Ögütveren ve diğ. [57], yaptığı çalışmada 4 dk gibi kısa bir sürede %100 boya giderme verimi elde etmişlerdir. Benzer bir çalışmada, Zaroual ve diğ. [58], demir elektrotları kullanarak kesikli bir reaktörde, 3 dk'lık elektroliz süresinde %100 renk ve %84 KOİ (Kimyasal oksijen ihtiyacı) giderme verimi elde etmişlerdir. Kobyay ve diğ. [59], yapmış oldukları çalışmada, reaktif tekstil boyar maddelerinin alüminyum elektrotları ile giderimini araştırmışlar ve akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri, boyar madde konsantrasyonu, arıtma süresi ve işletme maliyeti gibi parametreleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda oluşan polimerik metalhidroksit türlerinin, çökeltme ve flotasyon yardımıyla boyar madde giderimini sağladığını ifade etmişlerdir. Özellikle Ibanez ve diğ. [60], çalışmalarında, katotta oluşan H₂ gaz kabarcığının, kirletici maddeyi daha kolay konsantre edebileceği, toplayabileceği ve sudan uzaklaştırabileceğini ifade etmişlerdir. Fan ve diğ. [61], yaptıkları çalışmada; sürekli şartlarda (1-5 L/sa), 25-150 V bipolar bağlantı türünde ve grafit plaka elektrotlarının kullanıldığı Ef prosesinde, % 90- 95 arasında boya giderme verimi elde etmişlerdir.

Araştırmalarda İki ana mekanizmanın oluştuğu ifade edilmektedir. 6,5'ten yüksek pH değerlerinde genel olarak adsorpsiyon mekanizmasının ve 6,5 'ten düşük pH değerlerinde ise çökeltmenin olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [59, 62, 63].

ÇökeltmeAdsorpsiyon

Bu koşullar altında negatif yüklü boya molekülleri nötrale olurken, agregaların pozitif yüklenmesi, oluşan polimerik boya ve monomerik boya partiküllerinin Al(OH)₃ floklarına adsorpsiyonuna katkıda bulunur. Farklı boyar maddelerinin giderimi ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıdaki Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Ef prosesiyle renk ve boya gideriminde kirletici giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Metaryali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Boya (Eriochrome Black)	Al	7 V, pH 2-7, NaCl 2 g/L, 55 dk, Kesikli reaktörde	%98.5	[64]
Boya (Asidik Red ve Basic Violet)	Al	5 V, 1 A, 50 ml/dk, AC 5 V, 1 A, 30 ml/dk, AC	% 95,0 % 99,0	[65]
Boya (Asidik Red 14)	Al-SS	40 mA/cm ² , pH 7, Ec 3.600 µS/cm, 20 dk.	% 99,0	[66]
Boya (Yellow Sirius K-CF)	Al	7 V, pH 3, 60 dk, NaCl 1 g/L	%95,0	[67]
Boya (Red Nylosan)	Al-Fe	100 A/m ² , 15 l/sa, 2,54 mS/cm, 35 dk	%90,0	[68]

* SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.3 Ağır Metal ve Metalik Olmayan İnorganik Türlerin Su ve Atıksulardan Giderimi

Ağır metallerin oldukça toksik, mutajenik ve kanserojen özelliğe sahip kirleticiler olduğu ifade edilmektedir [69]. Ağır metal kirliliği her geçen gün etkisini artıran, buldukları ortamda biyolojik parçalanmaya uğramayan ve besin zincirinde biyolojik birikime katılan kirleticilerdir. Ağır metal kirliliğine sebep olan metal kaplama, maden zenginleştirme, batarya ve diğer endüstrilerin sayılarının veya kapasitelerinin artması bu kirliliğin artışına sebep olmaktadır. Ağır metallerin su ortamlarından uzaklaştırılması için yeni arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi bu kirliliğin önlenmesinde oldukça önemli konulardandır.

Ef/EC prosesleri ağır metal içeren atıksuların/suların arıtımında uygulanmış ve araştırmacılar başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Vasudevan ve diğ. [70], yaptıkları çalışmada Al elektrotlar kullanarak kadmiyum giderimini artırmışlardır. MP-P bağlantı tipinde, pH 7, 2 A/m² akım yoğunluğunda, 20 mg/l Cd⁺² derişiminde 120 dk elektroliz süresinde %97,5 giderme verimi elde etmişlerdir. Kamaraj ve Vasudevan [71], sulu çözeltilerden stronsiyum ve sezyum giderimini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, farklı elektrot türleri ile giderme verimlerini araştırmışlardır. Çalışmada 5 mg/L sezyum derişimlerinde Mg-Zn, Al-Zn, Zn-Zn, Fe-Zn elektrot kullanarak sırasıyla %96.8, 92.4, 90.6, 90.0 giderim verim değerleri elde edilmiştir. Bu verimleri MP-P bağlantı türünde, pH 6.8, ve 0.8 A/m² ve 80 dk elektroliz süresinde çalışma yürütülmüştür. Stronsiyum giderim verimleri ise

aynı şartlarda %97.0, 95.2, 91.4 ve 89.6 olarak bulunmuştur. Escobar ve diğ. [72], yürüttükleri çalışmada sentetik olarak hazırlanan kirlenmiş sularda bakır giderimi, çelik elektrotlar kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada 6 dk elektroliz süresinde 54 A/m² de, %80 Cu giderme verimi elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada, sentetik atıksudan çinko giderimi araştırılmış, platinyum ve çelik elektrotlarının kullanıldığı, sürekli bir reaktörde 2-12 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 30-60 dk elektroliz süre aralığında %96 çinko giderimi sağlanmıştır [73]. Aşağıda verilen Tablo 3'te diğer araştırmacılar tarafından yapılan Ef, EC ve Ef/EC prosesleri ile yapılmış ağır metal giderim çalışmaları sunulmuştur.

Tablo 3. Ef, EC ve Ef/EC prosesiyle ağır metal gideriminde kirlenici giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirlenici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Maden Atık suyu (Antimon)	Al-Al	22 mA/cm ² , pH 2, BP-S, 60 dk,	%96,5	[74]
Sentetik (Arsenik ³ 0.05 mg/L)	Fe-Fe	28 mA/cm ² , pH 6.5, MP-P, 60 dk,	%74,5	[75]
Yeraltı suyu (Arsenik ⁵)	Fe-Fe	3 mA/cm ² , pH 7,22, BP-S, 0,5 dk	%92,3	[76]
Elektro kaplama atıksuyu (Krom ³)	Fe-Fe		%100	
	Al-Al	10 mA/cm ² , pH 3, MP-P, 60 dk.	%99,8	[77]
	Al-Fe		%100	
Batarya Endüstrisi atıksuyu (Çinko) (Kurşun)	Fe-Fe		%96,5	
	SS-SS	6 mA/cm ² , pH 2,8, MP-S, 40 dk.	%92,6	[78]
	Fe-Fe		%97,4	
	SS-SS		%91,4	
Sentetik (Amonyum, 50 mg/L)	Al-SS	16,7 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 60 dk.	%99,0	[79]
Sentetik sulu çözeltilerden Siyanür 300mg/L (CN)	Fe-Fe		%87,0	
	Fe-Al	15 mA/cm ² , pH 11,5, MP-P, 20 dk	%93,0	[80]
	Al-Al		%35,0	
	Al-Fe		%32,0	
İçme suyu (Florür) 392 mg/L	Al-Al	17,1 mA/cm ² , pH 5, MP-P, 30 dk	%98,0	[81]
	Al-Fe		%60,0	
	Fe-Fe		%52,0	
	Al-Gr		%50,0	
	Al-Al	25 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 60 dk	%45,0	[82]
	Fe-Gr		%35,0	
Sentetik sulu çözeltilerden (Nitrat 100mg/L)	Fe-Al		%36,0	
	Gr-Al		%18,0	
	Gr-Fe		%16,0	
	Al-SS	16,7 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 60 dk	%99,0	[83]
Sentetik sulu çözeltilerden (Sülfür 100 mg/L)	Fe-Fe	32 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 15 dk	%99,0	[84]
(Sülfür 100 mg/L)			%85,0	
(Sülfat 100 mg/L)			%71,3	

*Gr: Grafit, * SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.4. Organik Türlerin Su ve Atıksulardan Giderimi

Organik kirleniciler; toksik, kanserojenik ve mutajenik özelliklerinin yapılan çalışmalarla ifade edilmesiyle, Dünya Sağlık Örgütü tarafından oldukça zararlı kirleniciler sınıflandırılmasına girerek rapor edilmiştir. Bu kirlenicilerin alıcı ortamlara

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

verilmeden uygun arıtma yöntemleri ile arıtılması gerekmektedir [85]. Elektrokimyasal arıtma prosesleri ile organik kirleticilerin giderilmesinde yüksek verim elde edildiği bazı araştırmacıların çalışmalarında rapor edilmiştir. Bu kirleticiler; aromatik birleşikler, pestisitler, humik maddeler, boyalar, fenolik birleşikler, ilaç etken ve kişisel bakım ürünleri gibi organik içerikli maddelerdir.

Can ve Bayramoğlu. [86], yaptıkları çalışmada, benzokinon gideriminde Al-SS elektrotlar kullanarak optimum çalışma şartlarında; pH 7.5, 2 mA/cm², MP-P bağlantı türünde ve 20 dk elektroliz süresinde %90 giderme verimi elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada, karışık fenolik birleşiklerin (3,4,5-trimetoksibenzoik, 4-hidroksibenzoik, gallik, protokateşik, trans-sinamik ve veratrik asitler (her birinden 100 mg/L)) giderimi için Al-Al, Cu-Cu, Fe-Fe, Pb-Pb ve Zn-Zn gibi farklı elektrotların etkisini araştırmak için aynı işletme koşullarında; pH 3, akım yoğunluğu 11,9 mA/cm², elektroliz süresi 80 dk ve 1,5 g/L NaCl destek elektroliti ile sırasıyla; % 24,4, 12,0, 40,8, 23,7 ve 30 KOİ giderme verimleri elde edilmiştir [87]. Doğal organik maddelerin giderimi ile ilgili yapılan çalışmalarda da elektrokimyasal arıtma proseslerinin kullanıldığı görülmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda suların iletkenliğinin düşük olması, zaman geçtikçe verim düşüşüne neden olduğu ifade edilmektedir [88, 89, 90]. Tablo 4'te Ef/EC prosesleri ile organik kirleticilerin giderim çalışmaları özet olarak verilmiştir.

Tablo 4. Ef/EC prosesiyle organik madde gideriminde kirletici giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Sulu çözeltilerden Naftalin sülfat 200 mg/L	SS-SS Al-SS Fe-SS Al-Al Fe-Fe	29 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 1000 mg/L NaCl, 150 dk	%98,0 Naftalin Sülfat %66,0 KOİ %39,0 TOK %100 MP-S %100 MP-S %15,4 MP-S %10,8 MP-S	[91]
Sulu çözeltilerden 4-Nitrophenol 20 mg/L	Al-Fe Fe-Gr Gr-SS SS-Fe SS-SS SS-Gr	10 mA/cm ² , pH 9,300 mg/L NaCl, 10 dk	%16,3 MP-S %98,9 MP-S %74,4 MP-P %99,2 MP-P %99,6 MP-P %99,2 MP-P	[92]
Doğal Organik Madde (NOM:5.5 mgC/L)	Fe-Pt	1 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 15 dk	%70,9	[93]
Doğal Organik Madde (NOM:15 mgC/L)	Al-SS Fe-SS	1.4 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 12 dk	%79,0	[94]
Salisilik Asit (100 mg/L)	Al-Al	5 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 10 dk, hava miktarı 2L/dk, 1000µs/cm.	%95,1	[95]
Sulu çözeltilerden Polyvinyl alcohol (100 mg/L)	Fe-Al Fe-Fe Al-Al Al-Fe	10 V, pH 6,5, MP-P, 100 mg/L NaCl, 120 dk.	%75,0 %53,0 %40,0 %31,0	[96]
Sulu çözeltilerden 4-Chlorophenoxyacetic acid (4-CPA) (200 mg/L)	Fe-Gr	10.0 mA/cm ² , pH 3, MP-P, 40 dk, 0,05M Na ₂ SO ₄ (peroksikoagulyasyon).	%100	[97]

*Gr: Grafit, * SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.5 Gerçek Değişik Endüstriyel Atıksuların Arıtımı

Gerçekte atıksu arıtma proseslerinin asıl amacı gerçek atıksulara bu sistemlerin uygulanmasında elde edilen verimlerdir. Bu amaçla arıtma proseslerinin gerçek amacı atıksu arıtımından elde ettikleri verimdir. Elektrokimyasal arıtma prosesleri ile gerçek atıksu çıkışlarına uygulanmasında değişik türdeki atıksular için oldukça tatmin edici neticeler alınmıştır. Tablo 5'te farklı atıksular için yapılmış Ef/EC çalışmaları özetlenmiştir.

Tablo 5. Ef/EC prosesiyle gerçek atıksuların arıtımında giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Tekstil atıksuyu	Al-Ti	30 mA/cm ² , 30 dk	%94,0 KOİ %92,0 TKM %98,0 Renk %70,0 Toksitide	[98]
Biyodizel Atıksu	Al-Gr	20,8 mA/cm ² , pH 6,1, MP-P, 23,5 dk	%55,4 KOİ	[99]
Sigara Endüstri Atıksuları	Fe-Fe	10,9 mA/cm ² , pH 8,1, MP-P, 30 dk	%56,0 KOİ	[100]
Oto yıkama Atıksuyu	SS-SS	2,0 mA/cm ² , pH 6,4, MP-P, 100 dk	%97,0 KOİ	[101]
Kağıt endüstrisi atıksuyu	Al-SS	10 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 30 dk, 400 mg/L NaCl	%89,0 KOİ %84,0 Renk	[102]
Deniz ürünleri Geridevir Atıksuyu	Ti/IrO ² - SnO ² - Sb ₂ O ₅	25 mA/cm ² , pH 7,45, MP-P, 40 dk,	%91 NH ₄ -N %92 NO ₂ -N %75 KOİ %100 AKM	[103]
Deri Atıksuyu	Al-Fe Fe-Al Ti-Ti Gr-Gr	46 mA/cm ² , pH 7,09, MP-P, 5 dk	%52,0 KOİ %52,0 KOİ %31,0 KOİ %12,0 KOİ	[104]
Haddene Atıksuları	Gr-Gr	2,75 mA/cm ² , pH 7,5, MP-P, 19 dk	%70,0 Yağ-gres	[105]
Sızıntı atıksuyu	Fe-Ti	40 V, pH 8, MP-P, 90 dk	%86,9 KOİ %90,2 Yağ-Gres %88,7 TKM %93,7 Bulanıklık	[106]
Hastane Atıksuları	Fe-Fe Fe-Al Al-Al	12,2 mA/cm ² , pH 6,8, MP-P, 75 dk	%100 KOİ %95,0 KOİ %90,0 KOİ	[107]
Zeytinyağı üretim Atıksuyu	Zn-SS	25 mA/cm ² , pH 3,2, MP-P, 40 dk	%20,9 KOİ	[108]
Boya üretim Atıksuyu	Fe-Fe Al-Al	35 mA/cm ² , pH 7,0, MP-P, 15 dk	%93,0 KOİ %94,0 KOİ	[109]
Patates Cipsi Üretim Atıksuyu	Al-Al	20,0 mA/cm ² , pH 5,0, MP-P, 40 dk	%60,0 KOİ	[110]
Restoran Atıksuyu	Fe-Fe Al-Al	8,0 mA/cm ² , pH 6,6, BP-S, 20 dk	%95,0 KOİ %97,0 KOİ	[111]
Mezbahane Atıksuyu	Al-Al Fe-Fe	10,0 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 20 dk 10,0 mA/cm ² , pH 4, MP-P, 20 dk	%78,3 KOİ %76,7 KOİ	[15]
Yoğurt Üretim Atıksuyu	Fe-Fe	30,0 mA/cm ² , pH 4,53, MP-P, 90 dk, 0,75g/l katyonik polimer, 0,2 M NaSO ₄ .	%84,0 KOİ	[112]

*Gr: Grafit, * SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik, TKM: Toplam Katı Madde, AKM: Aksıda Katı Madde.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

3. SONUÇLAR

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, Ef ve EC metotlarının tekil ve birlikte kullanıldığı çalışmalarda, farklı sentetik ve gerçek atıksuların arıtımında başarılı kirletici giderme verimlerinin elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte laboratuvar ve pilot ölçekli yapılan çalışmalarda da çeşitli türde kirleticilerin gideriminin gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Bu çalışmalarda işletme parametrelerinin, atıksu özelliklerine bağlı olarak belirlenmesinin gerekliliği, bu konularda yapılması gereken çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Literatür çalışmalarında ifade edildiği gibi elektrokimyasal metotlar geleneksel arıtma metotlarına göre daha avantajlı görülmekte ve yüksek kirletici giderme verimleri elde edilebilmektedir [11, 34, 113]

Sanayileşmenin günümüzde arttığı düşünüldüğünde, daha etkili ve ucuz arıtma sistemlerinin kullanılmasının önemi oldukça açıktır. Yapılan çalışmalarda, Ef prosesinin, çözünmüş hava flotasyonuna göre 2-4 kat daha ucuz işletme maliyetlerine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu literatür çalışmasında, farklı endüstriyel atıksu ve su arıtımı için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Elektrokimyasal arıtım proselerinin işleyişini elektrot türü belirlemektedir. Dolayısıyla daha uzun ömürlü ve ucuz elektrotların üretiminin, elektrokimyasal arıtmanın gelişmesine fayda sağlayacağı ve kullanımını artıracığı düşünülmektedir. Mevcut olarak Ef ve elektrokimyasal arıtma prosesleri daha düşük hacimli su ve atıksuların arıtımı için kullanılmaktadır. İleride bu sistemlerin geliştirilerek daha büyük ölçeklerde ve daha büyük hacimlerde su ve atıksuların kullanıma geçileceği yapılan çalışmalarla görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. H. Clark, "Green chemistry: challenges and opportunities," *Green Chemistry*, vol.1, pp. 1-8, 1999.
- [2] K. Müller, "Electroflotation from the Double Layer to Trouble Waters in Oliver". in *Electrochemistry in Transition*, J. Murphy and vs, Eds., Plenum Press, New York, 1992.
- [3] A. Y. Hosny, "Separating Oil from Oil-Water Emulsions by Electroflotation Technique," *Separations Technology*, vol. 6, pp.9-17, 1996.
- [4] L.B. Mansour, and S. Chalbi, "Removal of oil from oil/water emulsions using electroflotation process," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 36, pp. 577-581, 2006.
- [5] M. Kobya, E. Senturk, and M. Bayramoglu, "Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.133, pp.172-176, 2006.
- [6] S. Zaidi, T. Chaabane, V. Sivasankar, A. Darchen, R. Maachi, T. A. Msagati, and M. Prabhakaran, "Performance efficiency of electro-coagulation coupled electro-flotation process (EC-EF) versus adsorption process in doxycycline removal from aqueous solutions," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 102, pp. 450-461, 2016.
- [7] B. J. Hernlem, and L.S. Tsai, "Chlorine generation and disinfection by electroflotation," *Journal of Food Science*, vol. 65, pp. 834-837, 2000.
- [8] X. Chen, and G. Chen, "Stable Ti/RuO₂-Sb₂O₅-SnO₂ electrodes for O₂ evolution," *Electrochimica Acta*, vol. 50, pp. 4155-4159, 2005.
- [9] R. Mraz, and J. Krýsa, "Long service life IrO₂/Ta₂O₅ electrodes for electroflotation," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 24, pp.1262-1266, 1994.
- [10] C.C. Ho, and C. Y. Chan, "The application of lead dioxide-coated titanium anode in the electroflotation of palm oil mill effluent," *Water Research*, vol. 20, pp. 1523-1527. 1986.
- [11] V. A. Kolesnikov, V.I. Il'in, V.A. Brodskii, T.V. Guseva, and M. A. Vartanyan, "Improvement of electroflotation treatment of waste waters from ceramic enterprises," *Glass and Ceramics*, vol. 71, pp. 421-424, 2015.
- [12] G. Hassani, A. Alinejad, A. Sadat, A. Esmaeili, M. Ziaei, A. A. Bazrafshan, and T. Sadat, "Optimization of landfill leachate treatment process by electrocoagulation, electroflotation and sedimentation sequential method," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 11, pp. 6705-6018, 2016.
- [13] F. Ozyonar, "Optimization of operational parameters of electrocoagulation process for real textile wastewater treatment using Taguchi experimental design method," *Desalination and Water Treatment*, vol. 57:6, pp. 2389-2399, 2016.
- [14] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. T. Can, and M. Sozbir, "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater," *Separation and Purification Technology*, vol. 37, pp. 117-125, 2004.
- [15] F. Ozyonar, and B. Karagozoglu, "Investigation of technical and economic analysis of electrocoagulation process for the treatment of great and small cattle slaughterhouse wastewater," *Desalination and Water Treatment*, vol. 52:1-3, pp. 74-87, 2014.
- [16] M. F. Pouet, and A. Grasmick, "Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation," *Water Science and Technology*, vol. 31, pp.275, 1995.
- [17] M. Kobya, E. Demirbas, N.U. Parlak, and S. Yigit, "Treatment of cadmium and nickелеlectroplating rinse water by electrocoagulation," *Environmental Technology*, vol. 31, pp. 1471-1481, 2010.

- [18] F. Janpoor, A. Torabian, and V. Khatibikamal, "Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation," *J. Chemical Technology Biotechnology*, vol. 86, pp. 1113–1120, 2011.
- [19] S. Vasudevan, and J. Lakshmi, "Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water-A novel approach," *Separation and Purification Technology*, vol. 80, pp. 643-651, 2011.
- [20] S. Vasudevan, J. Lakshmi, and R. Vanathi, "Electrochemical coagulation for chromium removal: process optimization, kinetics, isotherms and sludge characterization," *Clean*, vol. 38, pp. 9-16, 2010.
- [21] K. Dermentzis, A. Christoforidis, and E. Valsamidou, "Removal of nickel copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation," *International Journal of Environmental Science*, vol.1, pp. 697–710, 2011.
- [22] R. Kamaraj, P. Ganesan, and S. Vasudevan, "Removal of lead from aqueous solutions by electrocoagulation: isotherm, kinetics and thermodynamic studies," *International Journal of Environmental Science Technology*, vol. 12, pp. 683-692, 2015.
- [23] C. T. Tanneru, and S. Chellam, "Mechanisms of virus control during iron electrocoagulation: microfiltration of surface water," *Water Research*, vol. 46, pp. 2111–2120, 2012.
- [24] P. Canizares, P. Martinez, M. A. Rodrigo, C. Jimenez, C. Saez, and J. Lobato, "Modelling of wastewater electrocoagulation processes Part I. General description and application to kaolin-polluted wastewaters," *Separation and Purification Technology*, vol. 60, pp. 155-161, 2008.
- [25] S. Calvo, J. P. Leclerc, G. Tanguy, M. C. Cames, G. Paternolte, G. Valentin, A. Rostan, and F. Lapique, "An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD," *Environmental Progress*, vol. 22, pp. 57-65, 2003.
- [26] P. I. Omwene, and M. Kobya, "Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: A comparative study," *Process Safety and Environmental Protection*, vol.116, pp.34-51, 2018.
- [27] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. P. Parga, and D. L. Cocke, "Electrocoagulation (EC)-science and applications," *Journal of Hazardous Materials*, vol.84, pp. 29-41, 2001.
- [28] G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment," *Separation and Purification Technology*, vol. 38, pp. 11-41, 2004.
- [29] A. Aouni, C. Fersi, M. B. S. Ali, and M. Dhahbi, "Treatment of textile wastewater by a hybrid electrocoagulation/nanofiltration process," *Journal of Hazardous Materials*, vol.168, pp. 868-874, 2009.
- [30] D. Landolt, R. Acosta, R. H. Muller, C. W. Tobias, "An optical study of cathodic hydrogen evolution in high rate electrolysis," *Journal of the Electrochemical Society*, vol.117, pp. 839-845, 1970.
- [31] P. J. Sides, "Phenomena and effects of electrolytic gas evolution," in *Modern Aspects of Electrochemistry*, Conway BE, Bockris JO, White RE Eds., Springer, Boston, MA, pp. 303–354, 1986.
- [32] C. Jiménez, B. Talavera, C. Saez, P. Cañizares, and M. A. Rodrigo, "Study of the production of hydrogen bubbles at low current densities for electroflotation processes," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol.85, pp. 1368-1373, 2010.
- [33] R. Alam, J. Q. Shang, and A. H. Khan, "Bubble size distribution in a laboratory-scale electroflotation study," *Environmental Monitoring and Assessment*, pp.189-193, Apr. 2017.
- [34] R. Mohtasham, and J. Q. Shang, "Electroflotation for Treatment of Industrial Wastewaters: A Focused Review," *Environmental Processes*, vol.6, pp. 325-353, 2019.
- [35] S. Vasudevan, B. S. Kannan, J. Lakshmi, S. Mohanraj, and G. Sozhan, "Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of fluoride from water," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol.86, pp. 428-436, 2011.
- [36] K. W. Pi, Q. Xiao, H. Q. Zhang, M. Xia, and A. R. Gerson, "Decolorization of synthetic methyl orange wastewater by electrocoagulation with periodic reversal of electrodes and optimization by RSM," *Process Safety and Environmental Protection*, vol.92, pp.796-806, 2014.
- [37] F. Ozyonar, and B. Karagozoglu, "Treatment of pretreated coke wastewater by electrocoagulation and electrochemical peroxidation processes," *Separation and Purification Technology*, vol. 150, pp. 268-277, 2015.
- [38] R. G. Bhaskar, and P. R. Khangaonkar, "Electroflotation-A critical review," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 37, pp. 59-66, 1984.
- [39] C. Y. Hu, S. L. Lo, and W. H. Kuan, "Effect of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminium electrodes," *Water Research*, vol. 37, pp. 4513-4523, 2003.
- [40] B. Lin, R. Hu, C. Ye, Y. Li, and C. Lin, "A study on the initiation of pitting corrosion in carbon steel in chloride-containing media using scandium electrochemical probes," *Electrochimica Acta*, vol.55, pp. 6542-6545, 2010.
- [41] C. H. Huang, L. Chen, and C. L. Yang, "Effect of anions on electrochemical coagulation for cadmium removal," *Separation and Purification Technology*, vol.65, pp.137-146, 2009.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

- [42] N. Mordishahla, M. A. Behnajady, and S. Mohammadi-Aghdam, "Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4- nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.154, pp.778-786, 2008.
- [43] M. Kobya, M. Bayramoglu, and M. Eyvaz, "Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections," *Journal of Hazardous Materials*, vol.148, pp.311-318, 2007.
- [44] M. Kobya, F. Ulu, U. Gebologlu, E. Demirbas, and M. S. Oncel, "Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: different connection modes and Fe-Al electrodes," *Separation and Purification Technology*, vol.77, pp. 283-293, 2011.
- [45] A. K. Golder, A. N. Samanta, and S. Ray, "Removal of Cr³⁺ by electrocoagulation with multiple electrodes: bipolar and monopolar configurations," *Journal of Hazardous Materials*, vol.141, pp. 653-661, 2007.
- [46] S. Garcia-Segura, M. Maesia, S. G. Eiband, J. V. de Melo, and C. A. Martinez-Huitle, "Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other Technologies," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol.801, pp. 267-299, 2017.
- [47] D. Gosh, C. R. Medhi, and M. K. Purkait, "Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections," *Chemosphere*, vol.73, pp.1393-1400, 2008.
- [48] Y. Esfandiyari, Y. Mahdavi, M. Seyedsalehi, M. Hoseini, G. H. Safari, M. G. Ghozikali, H. Kamani, and J. Jaafari, "Degradation and biodegradability improvement of the olive mill wastewater by peroxi-electrocoagulation/electrooxidation-electroflotation process with bipolar aluminum electrodes," *Environmental Science and Pollution Research*, vol.22, pp.6288-6297, 2015.
- [49] R. M. Bande, B. Prasad, I. M. Mishra, and K. L. Wasewar, "Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation," *Chemical Engineering Journal*, vol.137, pp.503-509, 2008.
- [50] M. Carmona, M. Khemis, J. P. Leclerc, and F. A. Lopicque, "Simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique," *Chemical Engineering Science*, vol.61 (4), pp. 1237-1246, 2006.
- [51] E. M. Kaliniichuk, I. I. Vasilenko, V. Y. Shchepanyuk, N. A. Sukhoverkhova, and I. A. Makarov, "Treating refinery wastewaters to remove emulsified oils by electrocoagulation and electroflotation," *International Chemical Engineering*, vol.16 (3), pp. 434-435, 1976.
- [52] X. Chen, G. Chen, and P.L. Yue, "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation," *Separation and Purification Technology*, vol.19 (1-2), pp. 65-76, 2000.
- [53] N. M. Mostefa, and M. Tir, "Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operating conditions," *Desalination*, vol. 161, pp.115-121, 2004.
- [54] I. Hassan, I. Nirdosh, and G. H. Sedahmed, "Separation of oil from oil-water emulsions by electrocoagulation in an electrochemical reactor with a fixed-bed anode," *Water, Air & Soil Pollution*, vol. 226, pp.271, 2015.
- [55] K. Ighilahriz, M. T. Ahmed, H. Djelal, and R. Maachi, "Electrocoagulation and electro-oxidation treatment for the leachate of oil-drilling mud," *Desalination and Water Treatment*, vol.52, pp.5833-5839, 2014.
- [56] F. M. D. Chequer, G. A. R. de Oliveira, E. R. A. Ferraz, J. C. Cardoso, M. V. B. Zanoni, and D. P. de Oliveira "Textile dyes: dyeing process and environmental impact," *Eco Friendly Text Dye Finish*, pp.151-176. 2013. <http://doi.org/10.5772/53659>.
- [57] U.B. Ogutveren, N. Gonen, and S. Koparal, "Removal of dye stuffs from wastewater: electrocoagulation of Acilan Blau using soluble anode," *Journal of Environmental Science and Health Part A*, vol.27 (5), pp.1237-1247, 1992.
- [58] Z. Zaroual, M. Azzi, N. Saib, and E. Chaïnet, "Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol.131, pp.73-78, 2006.
- [59] M. Kobya, O.T. Can, and M. Bayramoglu, "Treatment of Textile Wastewaters by Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes," *Journal of Hazardous Materials*, vol.100 (1-3), pp.163-178, 2003.
- [60] J. Ibanez, M. M. Singh, and Z. Szafran, "Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment. Part 4: color removal of simulated wastewater by electrocoagulation-electroflotation," *Journal of Chemical Education*, vol.75 (8), pp.1040-1041, 1998.
- [61] L. Fan, F. Yang, and W. Yang, "Performance of the decolorization of an Azo dye with bipolar packed bed cell," *Separation and Purification Technology*, vol.34, pp.89-96. 2004.
- [62] P. Canizares, M. Carmona, J. Lobato, F. Martinez, and M. A. Rodrigo, "Electrodissolution Of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Processes," *Indian journal of Engineering Chemical Research*, vol.44, pp. 4178-4185, 2005.
- [63] M. M. Emamjomeh, M. Sivakumar, "Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes," *Journal of Environmental Management*, vol. 90, pp.1663-1679, 2009.
- [64] D. T. Cestarolli, A. das G. de Oliveira, and E. M. Guerra, "Removal of Eriochrome Black textile dye from aqueous solution by combined electrocoagulation-electroflotation methodology," *Applied Water Science*, vol.9, pp.100-106, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0985-x>.

- [65] M. A. Abdel Khalek, F. I. El Hosiny, K. A. Selim, and I. Osama, "A novel continuous electroflotation cell design for industrial effluent treatment," *Sustainability Water Resources Management*, vol.5, pp.457-466, 2019. DOI 10.1007/s40899-017-0199-z.
- [66] M. A. Ahangarnokolaie, H. Ganjidoust and B. Ayat, "Optimization of parameters of electrocoagulation/ flotation process for removal of Acid Red 14 with mesh stainless steel electrodes," *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol.08-2, Pp.278-292, 2018.
- [67] M. V. B. Gonçalves, S. C. De Oliveira, B. M. P. N. Abreu, E. M. Guerra and D. T. Cestarolli, "Electrocoagulation/electroflotation Process Applied to Decolourization of a Solution Containing the Dye Yellow Sirius K-CF," *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, pp.7576-7583, 2016.
- [68] A. Amour, B. Merzouk, J. P. Leclerc, and F. Lapique, "Removal of reactive textile dye from aqueous solutions by electrocoagulation in a continuous cell," *Desalination and Water Treatment*, vol.57(48-49), pp.22764-22773, 2016.
- [69] P. Koedrith, H. Kim, J. I. Weon, and Y. R. Seo, "Toxicogenomic approaches for understanding molecular mechanisms of heavy metal mutagenicity and carcinogenicity," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol.216, pp.587-598, 2013.
- [70] S. Vasudevan, J. Lakshmi, and G. Sozhan, "Effects of alternatin and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water," *Journal of Hazardous Materials*, vol.192, pp.26-34, 2011.
- [71] R. Kamaraj, and S. Vasudevan, "Evaluation of electrocoagulation process for the removal of strontium and cesium from aqueous solution," *Chemical Engineering Research and Design*, vol.93, pp.522-530, 2015.
- [72] C. Escobar, C. Soto-Salazar, and M. I. Toral, "Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater," *Journal of Environmental Management*, vol.81, pp. 384-391, 2006.
- [73] R. G. Casqueira, M. L. Torem, and H. M. Kohler, "The removal of zinc from liquid streams by electroflotation," *Minerals Engineering*, vol.19, pp.1388-1392, 2006.
- [74] J. Zhu, F. Wu, X. Pan, J. Guo, and D. Wen, "Removal of antimony from antimony mine flotation wastewater by electrocoagulation with aluminium electrodes," *Journal of Materials and Environmental Science*, vol.23, pp. 1066-1071, 2011.
- [75] D. Lakshmanan, D. A. Clifford, and G. Samanta, "Comparative study of arsenic removal by iron using electrocoagulation and chemical coagulation," *Water Research*, vol.44, pp.5641-5652, 2010.
- [76] J. F. Martínez-Villafañe, C. Montero-Ocampo, and A. M. García-Lara, "Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water," *Journal of Hazardous Materials*, vol.172, pp.1617-1622, 2009.
- [77] F. Akbal, and S. Camci, "Treatment of metal plating wastewater by electrocoagulation," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol.31, pp.340-350, 2012.
- [78] H. J. Mansoorian, A. H. Mahvi, and A. J. Jafari, "Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes," *Separation and Purification Technology*, vol.135, pp.165-175, 2014.
- [79] A. H. Mahvi, S. J. A. Ebrahimi, A. Mesdaghinia, H. Gharibi, and M. H. Sowlat, "Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation- electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol.192, pp.1267-1274, 2011.
- [80] G. Moussavi, F. Majidi, and M. Farzadkia, "The influence of operational parameters on elimination of cyanide from wastewater using the electrocoagulation process," *Desalination*, vol.280, pp.127-133, 2011.
- [81] A. H. Essadki, B. Gourich, Ch. Vial, H. Delmas, and M. Bennajah, "Defluoridation of drinking water by electrocoagulation/electroflotation in a stirred tank reactor with a comparative performance to an external-loop airlift reactor," *Journal of Hazardous Materials*, vol.168, pp.1325-1333, 2009.
- [82] K. Govindan, M. Noel, and R. Mohan, "Removal of nitrate ion from water by electrochemical approaches," *Journal of Water Process Engineering*, vol.6, pp.58-63, 2015.
- [83] A. H. Mahvi, S. J. A. Ebrahimi, A. Mesdaghinia, H. Gharibi, and M. H. Sowlat, "Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation- electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol.192, pp.1267-1274, 2011.
- [84] M. Murugananthan, G. B. Raju, and S. Prabhakar, "Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.109(1-3), pp.37-44, 2004.
- [85] Y. Yu, X. Wang, D. Yang, B. Lei, X. Zhang, and X. Zhang, "Evaluation of human health risks posed by carcinogenic and non-carcinogenic multiple contaminants associated with consumption of fish from Taihu Lake, China," *Food Chemical Toxicology*, vol 69, pp.86-93, 2014.
- [86] O. T. Can, and M. Bayramoglu, "The effect of process conditions on the treatment of benzoquinone solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.173, pp.731-736, 2010.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

- [87] A. S. Fajardo, R. C. Martins, and R. M. Quinta-Ferreira, "Treatment of a synthetic phenolic mixture by electrocoagulation using Al, Cu, Fe, Pb, and Zn as anode materials," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.53, pp.18339-18345, 2014.
- [88] E. Mohora, S. Rončević, J. Agbaba, A. Tubić, M. Mitić, M. Klačina, and B. Dalmacija, "Removal of arsenic from groundwater rich in natural organic matter (NOM) by continuous electrocoagulation/flocculation (ECF)," *Separation and Purification Technology*, vol.136, pp.150-156, 2014.
- [89] M. Vepsäläinen, M. Pulliainen, and M. Sillanpää, "Effect of electrochemical cell structure on natural organic matter (NOM) removal from surface water through electrocoagulation (EC)," *Separation and Purification Technology*, vol.99, pp.20-27, 2012.
- [90] F. Ulu, S. Barisci, M. Kobya, and M. Sillanpää, "An evaluation on different origins of natural organic matters using various anodes by electrocoagulation," *Chemosphere*, vol.125, pp.108-114, 2015.
- [91] T. Olmez-Hanci, Z. Kartal, and I. Arslan-Alaton, "Electrocoagulation of commercial naphthalene sulfonates: process optimization and assessment of implementation potential," *Journal of Environmental Management*, vol.99, pp.44-51, 2012.
- [92] N. Mordishahla, M. A. Behnajady, and S. Mohammadi-Aghdam, "Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4- nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.154, pp.778-78, 2008.
- [93] K. L. Dubrawski, and M. Mohseni, "In-situ identification of iron electrocoagulation speciation and application for natural organic matter (NOM) removal," *Water Research*, vol.47, pp.5371-5380, 2013.
- [94] M. Ben-Sasson, Y. Zidon, R. Calvo, and A. Adin, "Enhanced removal of natural organic matter by hybrid process of electrocoagulation and dead-end microfiltration," *Chemical Engineering Journal*, vol.232, pp.338-345, 2013.
- [95] F. Ozyonar, and S. Aksoy, "Removal of Salicylic Acid from Aqueous Solutions Using Various Electrodes and Different Connection Modes by Electrocoagulation," *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, pp.3680-3696, 2016.
- [96] W. L. Chou, C. T. Wang, and K. Y. Huang, "Investigation of process parameters for the removal of polyvinyl alcohol from aqueous solution by iron electrocoagulation," *Desalination*, vol.251, pp.12-19, 2010.
- [97] E. Brillas, B. Boye, M. A. Baños, J. C. Calpe, and J. A. Garrido, "Electrochemical degradation of chlorophenoxy and chlorobenzoic herbicides in acidic aqueous medium by the peroxi-coagulation method," *Chemosphere*, vol.51, pp.227-235, 2003.
- [98] H. L. Kim, J. B. Cho, Y. J. Park, and I. H. Cho, "Treatment and toxicity reduction of textile dyeing wastewater using the electrocoagulation-electroflotation process," *Journal of Environmental Science and Health*, vol.51(8), pp.661-668, 2016.
- [99] O. Chavalparit, and M. Ongwandee, "Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology," *Journal of Environmental Sciences*, vol.21, pp.1491-1496, 2009.
- [100] R. S. Bejankiwar, "Electrochemical treatment of cigarette industry wastewater: feasibility study," *Water Research*, vol.36, pp. 4386-4390, 2002.
- [101] M. Panizza, and G. Cerisola, "Applicability of electrochemical methods to carwash wastewaters for reuse. Part 2: Electrocoagulation and anodic oxidation integrated process," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol.638, pp.236-240, 2010.
- [102] K. P. Kalyani, N. Balasubramanian, and C. Srinivasakannan, "Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation," *Chemical Engineering Journal*, vol.151, pp.97-104, 2009.
- [103] X. Yunqing, and L. Jianwei, "Application of electrochemical treatment for the effluent from marine recirculating aquaculture systems," *Procedia Environmental Sciences*, vol.10, pp.2329-2335, 2011.
- [104] M. Murugananthan, G. B. Raju, and S. Prabhakar, "Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation," *Separation and Purification Technology*, vol.40, pp.69-75, 2004.
- [105] E. A. Maksimov, and A. A. Ostsemin, "Intensifying the cleaning of emulsion-and oil-bearing waste water from rolled-product manufacturing by electroflotation," *Metallurgist*, vol.58, pp.945-949, 2015.
- [106] G. Hassani, A. Alinejad, A. Sadat, A. Esmaeili, M. Ziaei, A. A. Bazrafshan, and T. Sadat, "Optimization of landfill leachate treatment process by electrocoagulation, electroflotation and sedimentation sequential method," *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, pp.6705-6018, 2016.
- [107] R. Mahajan, V. Khandegar, and A. K. Saroha, "Treatment of hospital operation theatre effluent by electrocoagulation," *International Journal of Chemical Environmental Engineering*, vol.4, pp.104-107, 2013.
- [108] A. S. Fajardo, R. F. Rodrigues, R. C. Martins, L. M. Castro, and R. M. Quinta-Ferreira, "Phenolic wastewaters treatment by electrocoagulation process using Zn anode," *Chemical Engineering Journal*, vol.275, pp.331-341, 2015.
- [109] S. Zodi, O. Potier, F. Lapique, and J. P. Leclerc, "Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics," *Separation and Purification Technology*, vol.69, pp.29-36, 2009.

F. Özyonar

- [110] M. Kobya, H. Hiz, E. Senturk, C. Aydiner, and E. Demirbas, "Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation," *Desalination*, vol.190, pp.201-211, 2006.
- [111] X. Chen, G. Chen, and P. L. Yue, "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation," *Separation and Purification Technology*, vol.19, pp.65-76, 2000.
- [112] T. U. Un, and E. Ozel, "Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge," *Separation and Purification Technology*, vol.120, pp.386-391, 2013.
- [113] G. Z. Kyzas, and K. A. Matis, "Electroflotation process: A review" *Journal of Molecular Liquids*, vol.220, pp.657-664, 2016.





DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZİK SARI 28 GİDERİMİ

İlknur ŞENTÜRK^{1,*} , Muhammed Reha YILDIZ² 

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye
²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sivas, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, ham ve kimyasal aktivasyon uygulanan çam talaşı kullanılarak Bazik Sarı 28 tekstil boyar maddesinin sulu çözeltiden adsorpsiyonu çalışılmıştır. Temas süresi, adsorbent madde dozajı, başlangıç boya konsantrasyonu ve kimyasal aktivasyonun verime etkisi belirlenen koşullarda çalışılmıştır. Kimyasal aktivasyon sonrası adsorbent karakterizasyonu için SEM, FTIR ve izoelektrik nokta belirleme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bazik Sarı 28 adsorpsiyonu için denge verisi Langmuir eşitliği ile daha iyi uyum göstermiştir, maksimum tek tabakalı adsorpsiyon kapasitesi Q_0 değeri 62,89 mg/g olarak bulunmuştur. Bazik Sarı 28'in adsorpsiyonu sözde ikinci derece kinetik model ile en iyi şekilde tanımlanmıştır. Aktive olan çam talaşının adsorbent olarak yeniden kullanılabilirliği test edilmiş, dördüncü döngüden sonra bile hala %90'nın üzerinde Bazik Sarı 28 boya giderimi olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, talaşın H_2SO_4 ile aktivasyonu sonrasında elde edilen adsorbentin atık sulardan Bazik Sarı 28 tekstil boyasının adsorpsiyonla arıtılmasında etkin olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Aktive edilen çam talaşı, düşük maliyetli üretim ve adsorpsiyon performansı ile sürdürülebilir uygulamalar için yüksek bir potansiyele sahiptir.

Anahtar kelimeler: Adsorpsiyon, Bazik Sarı 28, Çam talaşı, Kimyasal aktivasyon, Tekstil boyası

BASIC YELLOW 28 REMOVAL BY ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTIONS WITH NATURAL AND ACTIVATED PINE SAWDUST

ABSTRACT

In this study, adsorption of Basic Yellow 28 textile dye from aqueous solution was studied by using raw and activated pine sawdust as a chemical with sulphuric acid. Contact time, adsorbent dosage, initial dye concentration, the effect of chemical activation on adsorbent efficiency were studied under determined conditions. SEM, FTIR and the point of zero charge (pH_{pzc}) were used for adsorbent characterization after chemical activation. The equilibrium data for Basic Yellow 28 adsorption well fitted to the Langmuir equation, with maximum monolayer adsorption capacity, Q_0 of 62.89 mg/g. The adsorption of Basic Yellow 28 could be best described by the pseudo-second-order kinetic model. The reusability as an adsorbent of activated pine sawdust was tested and still, over 90% Basic Yellow 28 was removed after four cycles. The obtained results showed that the adsorbent obtained after activation with H_2SO_4 of sawdust can be used effectively for the treatment of Basic Yellow 28 textile dye from wastewater by adsorption. Activated pine sawdust has a high potential for sustainable applications with low-cost production and adsorption performance.

Keywords: Adsorption, Basic Yellow 28, Pine sawdust, Chemical activation, Textile dye

1. GİRİŞ

Toksik endüstriyel atıklarla suların kirlenmesi günümüzün en ciddi sosyal ve ekonomik sorunlarından biridir. Tekstil, deri, kağıt, gıda, kozmetik, plastik vb. birçok endüstride ürünlere renk vermek için sentetik boyalar yoğun olarak kullanılmakta olduğu için en önemli kirlenmelerden biridir. İnsan sağlığı ve sucul ekosistemi aynı derecede etkiler. Çok küçük miktarda bile bulunsu suyun görünür rengi ve tuzluluğunda değişikliklere yol açar, güneş ışığının geçişine engel olarak sudaki fotosentezi engeller. Dahası boyalar, alerji, cilt tahrişi ve dermatolojik problemlere neden olabilir. En önemlisi de kanseri tetikleyebilir. Bu nedenle atıksu akımlarından boyaların giderimi çevre açısından oldukça önemlidir [1].

* İlknur ŞENTÜRK / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilknurg.senturk@gmail.com; ilknursenturk@cumhuriyet.edu.tr
Geliş / Recieved: 21.12.2019 Kabul / Accepted: 19.05.2020 doi: 10.28948/ngumuh.662944

İ. Şentürk, M. R. Yıldız

Boya lar üç ana kategoride sınıflandırılabilir. Anyonik, katyonik, non-iyonik. Bunlar arasında katyonik boyalar, geniş bir endüstriyel uygulamaya sahiptir. İpek, deri, kağıt, yün ve pamuk boyama için sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca katyonik boyalar, anyonik boyalara kıyasla daha da toksiktir. Onlar negatif olarak yüklenen hücre membran yüzeyleri ile kolaylıkla etkileşime geçebilir, hücre içine girebilir ve sitoplazmada birikebilir. Bazik Sarı 28 (BS 28) en tehlikeli katyonik boyalardan biridir. Akrilik fiber ve ipek tekstil boyama fabrikalarında, kağıt ve deri endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. BS 28 birkaç zararlı etkiye sahiptir. Yutulduğunda ve deriyle temas ettiğinde zararlıdır. Ayrıca sucul ortamda uzun süre kaldığı için sucul yaşam üzerinde toksik etkiye neden olur [2]. Bu yüzden BS 28 bu çalışmada adsorbat madde olarak seçilmiştir.

Boya giderimi için kullanılan çok farklı teknolojiler vardır. Flokülasyon, flotasyon, çöktürme, koagülasyon, iyon değiştirme, membran filtrasyon, elektroliz, fotodegradasyon, ekstraksiyon, radyasyon, oksidasyon, biyolojik arıtım, adsorpsiyon bu teknolojilere örnek olarak verilebilir [1]. Çok fazla metot olmasına rağmen bu metotların çoğu küçük ölçekli tesislerde uygulamak için ya çok pahalı ya da yetersizdir. Ancak bu metotlar arasında adsorpsiyon; tasarım basitliği, kullanım kolaylığı, yüksek verimlilik ve düşük maliyet nedeniyle en umut verici metotlardan biridir. Bu avantajından dolayı farklı sorbentlerin sorpsiyon kapasitesini araştırmak için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Yenilenebilir, bol miktarda bulunan, tarım ya da çeşitli endüstrilerden atık ya da yan ürün olarak çıkan maddeler sorpsiyon prosesinin maliyetini azaltabildiği için bu tarz ürünler ile yapılan çalışmalar da oldukça fazladır.

Doğal atık adsorbent olarak özellikle de ormancılık ve tarımsal aktivitelerden bol miktarda üretilen talaş; maliyet, miktar, yenilenebilirlik ve biyolojik ayrışabilirlik anlamında önemli avantajlara sahiptir. Talaş çoğunlukla selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşur. Bu özellikler talaşı kirlilik adsorpsiyonu için uygun bir adsorbent haline getirir. Ferrero [3] ve Hamdaoui [4], diğer tarımsal endüstriyel atıklar ile karşılaştırıldığında yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olmasından dolayı katyonik boya içeren kirlenmiş suların arıtımı için umut verici düşük maliyetli bir materyal olarak talaşın kullanılabilirliğini bildirmiştir [5]. Birçok araştırmacıya göre de talaş, atıksudan boya giderimi için ümit vaat eden adsorbentlerden biridir. Bu yüzden, son zamanlarda talaşın adsorbent olarak kullanımına olan ilgi daha da artmıştır. Diğer taraftan son dönemde yapılan çalışmalarda adsorbent adsorpsiyon kapasitesini geliştirmek için farklı modifikasyon ajanlarının NaOH [6], H₂SO₄ [7], formaldehit [7], cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) [8], CaCl₂ [9] vb. uygulanmasına yönelik çalışmalara odaklanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada adsorbent olarak seçilen çam talaşının yüzey alanını ve porozitesini artırmak bu şekilde adsorpsiyon kapasitesini daha da yükseltmek için, doğal haldeki çam talaşı H₂SO₄ kullanılarak kimyasal aktivasyonla aktive edilmiştir. Aktivasyon sonrası adsorbent madde FTIR, SEM ve izoelektrik nokta (pH_{pzc}) ile karakterize edilmiştir. Temas süresi, adsorbent dozajı, aktivasyonun etkisi, başlangıç boya konsantrasyonu, rejenerasyon gibi çalışma parametrelerinin BS 28 adsorpsiyon kapasitesi üzerine etkisi hazırlanan adsorbent madde ile araştırılmıştır. Langmuir, Freundlich ve Temkin modelleri adsorpsiyon dengesini analiz etmek için test edilmiştir. Kinetik prosesi tanımlamak için sözde ikinci dereceden reaksiyon kinetiği, partikül içi difüzyon modeli ve Elovich modelleri seçilmiştir.

2. MATERYAL ve METOT

Adsorbent

Deneysel çalışmalarda kullanılan çam talaşı, Sivas ilinde bulunan ve ağaç işleri ile uğraşan bir endüstriden temin edilmiştir. Doğal çam talaşı, öncelikle içinde bulunan kir, toz ve safsızlıklardan arınması için 5-6 kez saf su ile yıkanmıştır. Ardından 24 saat boyunca 80°C'de etüvde kurutulmuştur. +0,38 -2 mm arasında değişen (USA standart mesh açıklığı) geniş tane fraksiyonundaki talaş ön arıtıma uygun hale getirilmiştir. Hazırlanan bu materyal doğal haldeki çam talaşı (ÇT) olarak isimlendirilmiştir.

H₂SO₄ ile aktivasyon

Ön arıtım için hazırlanan talaştan 20 g alınarak 500 ml'lik erlene aktarıldıktan sonra üzerine 200 ml 1 N H₂SO₄ çözeltisi ilave edilmiştir. Erlenin ağzı kapalı bir şekilde karışım 24 saat boyunca 150°C'de fırında bekletilmiştir. İşlem sonrası oda sıcaklığına getirilen materyal saf su ile birkaç kez yıkandıktan sonra kalan asidi gidermek için gece boyunca %1'lik NaHCO₃ (Sodyum Bikarbonat) çözeltisi içinde bekletilmiştir. Materyal daha sonra tekrar saf su ile yıkanıp 24 saat 80°C'de etüvde kurutulmuştur. Elde edilen adsorbent materyal sülfürik asitle aktive edilmiş talaş olarak isimlendirilmiş (AÇT) ve çalışmalarda kullanılmak üzere kahverengi cam şişede saklanmıştır [7].

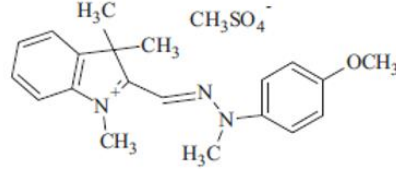
Boya

Tablo 1'de çalışmada kullanılan boyar maddenin özellikleri, Şekil 1'de ise kimyasal yapısı verilmiştir. Kullanılmış olan boyanın ticari adı Maxilon Golden Yellow GL 200% olarak bilinmektedir. Stok boya çözeltisi 1 g/L derişimde olacak şekilde boyanın tartılıp distile su içinde çözülmesiyle hazırlanmıştır. Stok çözeltiden istenilen konsantrasyona seyreltmeler yapılarak çalışmalarda kullanılmıştır.

DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZİK SARI 28 GİDERİMİ

Tablo 1. Bazik Sarı 28 boyar maddesinin özellikleri

Kimyasal formülü	λ_{max} (nm)	Molekül ağırlığı (g/mol)	Tip	Grup	Kaynak
Bazik Sarı 28 (C ₂₁ H ₂₇ N ₃ O ₅ S)	438	433.52	Katyonik	Azo Grup 1	[2]

**Şekil 1.** Bazik Sarı 28'in kimyasal yapısı [10]**Karakterizasyon Çalışmaları**

Adsorbent olarak kullanılan çam talaşının yüzey morfolojisi, izoelektrik nokta (pH_{pzc}) ve yüzey fonksiyonel grupları karakterize edilmiştir. Ham ve ön işlemden geçen çam talaşının kimyasal özellikleri, Bruker Tensor II marka Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile analiz edilmiş ve yorumlanmıştır. Adsorbent yüzey morfolojisini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) (Mira3 XMU) kullanılmıştır. Adsorbent maddelerin izoelektrik noktası (pH_{pzc}) Ferro-Garcia vd. [11] tarafından tarif edilen pH sapma yöntemi ile belirlenmiştir. pH_{pzc} 'yi belirlemek için, 50 ml 0,01 mol/L NaCl çözeltisi içeren erlenmeye 1,0 g talaş eklenmiştir. Her erlenmeye içindeki pH, NaOH veya HCl çözeltisi ilave edilerek 2-12 arasında değişen değerlere ayarlanmıştır. Daha sonra, erlenmeye şişeleri 24 saat 125 rpm'de çalkalanmış ve çözeltinin son pH'sı ölçülmüştür [12]. Daha sonra başlangıç pH'ına (X-ekseni) karşı başlangıç ve son pH arasındaki farkın (ΔpH) (Y-ekseni) grafiği çizilerek eğrinin X eksenini kesim noktasından pH_{pzc} değeri okunmuştur.

Adsorpsiyon Deneyleri

Adsorpsiyon deneyleri 25°C sıcaklıkta kesikli teknik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesikli deneyler temas süresi, adsorbent dozajı ve başlangıç boya konsantrasyonu çalışmalarından oluşmaktadır. Ayrıca çam talaşına uygulanan kimyasal ön işlemin adsorpsiyon verimine etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. En son ise tükenen adsorbentın rejenerasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Denge süresinin belirlenmesi için 75 mg/L başlangıç boya konsantrasyonunda çalışılmıştır. Hazırlanan karışımı içeren erlenler, çalkalayıcı inkübatör içerisine yerleştirilmiştir ve 125 devir/dk hızda uygun sürelerde çalkalamaya tabi tutulmuştur. Önceden belirlenen zaman aralıklarında çalkalayıcıdan rastgele seçilen erlenler içerisinde adsorplanmadan kalan boya konsantrasyonları analiz edilmiştir. Denge süresinin belirlenmesi haricinde tüm çalışmalarda boya giderimi, 4 saat adsorpsiyon sonrası boyanan adsorbentın 3000 devir/dk hızda 10 dk santrifüj edildikten sonra çözeltiden ayrılması ile belirlenmiştir. Çözeltide kalan boya konsantrasyonu UV/Vis spektrofotometre (Spectroquant Pharo 300, Merck) kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm deneyler en az iki defa, gerekli durumlarda ikiden daha fazla, tekrar edilerek analiz sonucunda elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Tüm adsorpsiyon çalışmalarında adsorbent içermeyen sadece boya çözeltisinden oluşan çalışma erlenleri kontrol amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan adsorbentın adsorpsiyon kapasitesi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Burada q_e : denge anında adsorbentın adsorpsiyon kapasitesini (mg/g), V: çözelti hacmini (L), C_o : çözeltideki başlangıç boya konsantrasyonunu (mg/L), C_e : Denge anında çözeltide kalan boya konsantrasyonunu (mg/L), m: adsorbent miktarını (g) ifade etmektedir.

Desorpsiyon Çalışmaları

Desorpsiyon çalışmaları için 0,8 g AÇT 100 ml boya çözeltisine (50 mg/L) eklendikten sonra 25°C'de 125 devir/dk hızla 4 saat karıştırılmıştır. Ardından boya yüklü adsorbent 3000 rpm'de 10 dk santrifüj edilerek sucul ortamdan ayrılmış, çözeltide kalan BS 28 konsantrasyonu spektrofotometrede ölçülmüştür. Desorpsiyon prosesi, seçilen desorpsiyon ajanının (0,4 M NaOH) 100 ml'si içinde boya yüklü adsorbentın 25°C'de 24 saat karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Tek bir adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsü bu aşamalardan oluşmuş olup adsorpsiyon-desorpsiyon döngüleri aynı AÇT kullanılarak 4 kez tekrarlanmıştır.

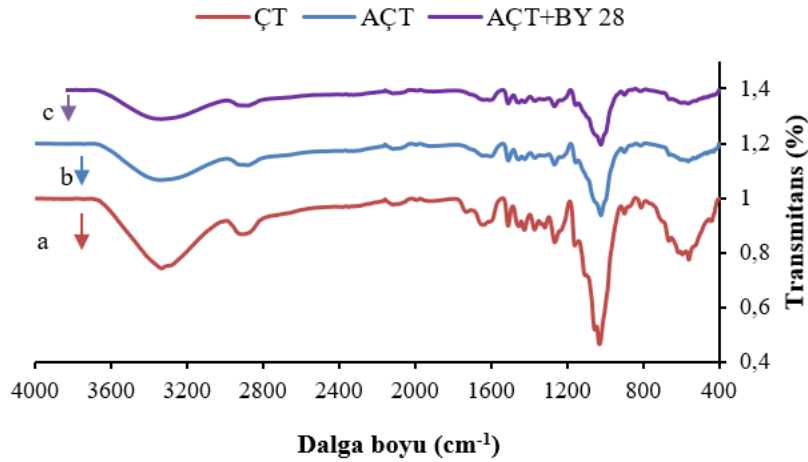
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Adsorbent Madde Karakterizasyonu

Adsorbent maddenin yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar ve fonksiyonel grupların titreşim frekanslarındaki değişimleri gözlemek için adsorpsiyon öncesi ve sonrası olmak üzere adsorbent olarak kullanılan çam talaşlarının FTIR spektrumları 400-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında incelenmiştir. Ham (a), aktive edilmiş (b) ve aktivasyon sonrası adsorpsiyonda kullanılan adsorbentlerin (c) FTIR spektrumları Şekil 2’de verilmiştir. Çam talaşı genel olarak, lignin ve selülozdan, lipit ve balmumlarından, alkol, keton ve karboksilik gruplar gibi fonksiyonel gruplar içeren saf olmayan bir kısımdan oluşur [11, 12].

Ön işlem sonrası ve adsorpsiyon sonrası spektrumda gözlemlenen değişiklikler, adsorpsiyon prosesinde adsorbent yüzeyindeki fonksiyonel grupların olası ilişkilerini gösterir. H_2SO_4 , karbonizasyon ve kısmi aromatisasyona sebep olarak hafif ve uçucu maddelerin pek çoğunun eliminasyonuna ve serbest kalmasına yol açar. Materyal içinde bulunan alifatik ve aromatik türlerin yapısındaki birçok bağı kırar [15]. Bu nedenle aktivasyondan sonra doğal çam talaşı (ÇT) yüzeyindeki bazı pikler (1729,51, 1424,18, 1334,53, 1103,06, 1053,09 cm^{-1}) yok olurken AÇT üzerinde 2114,32 cm^{-1} ($-\text{C}\equiv\text{C}-$ gerilme bandı) ve 1228,29 cm^{-1} (C-O gerilme bandı) dalga boyunda olmak üzere iki yeni pik oluşmuştur.

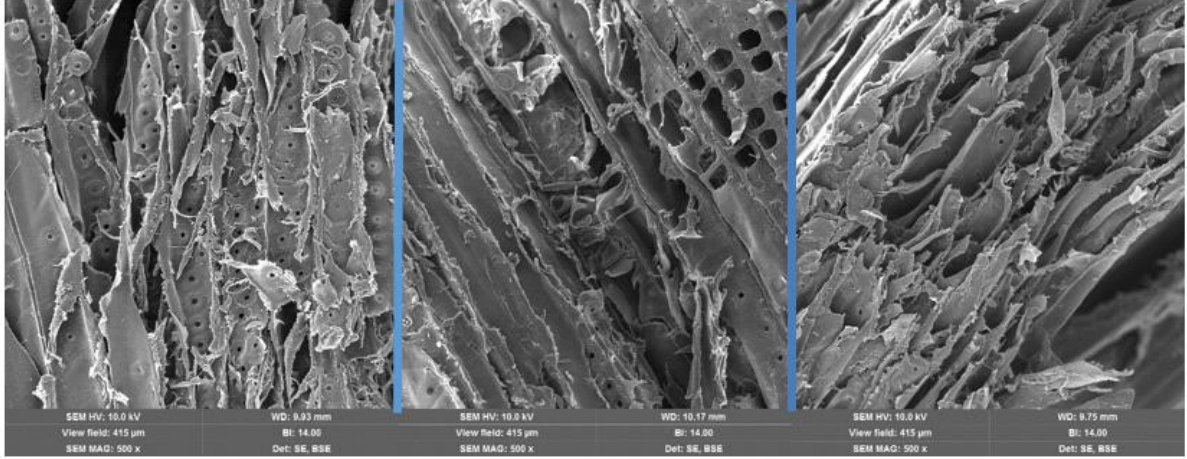
Genelde 3000-3500 cm^{-1} aralığında görülen kuvvetli ve geniş pik selüloz içinde çoğunlukla bulunan O-H gruplarından dolayı O-H gerilme bandı ile karakterize edilir. 2950-2850 cm^{-1} dalga boyu aralığındaki pik talaşın yapısını oluşturan lignin, selüloz, hemiselüloz gibi maddelerin fonksiyonel gruplarından kaynaklanan C-H gerilme bandı ile karakterize edilir. Doğal talaş için 1730 cm^{-1} ’de elde edilen pik karbonil gruplara ait C=O gerilmesini gösterir. Bu bant aktivasyondan sonra kaybolmuştur. Bu durum yukarıda da açıklandığı üzere asitle aktivasyon sonrası talaşın yapısındaki hemiselülozik yapının dağılmasından kaynaklanmaktadır. 1400-1750 cm^{-1} dalga boyu aralığında elde edilen pikler C=O ve C=C aromatik halkaya ait gerilme pikleridir. Şekil 2b ve 2c kıyaslandığında her iki spektrumun benzerlikler gösterdiği ancak adsorpsiyon sonrası pik yoğunlukları ve pik şiddetlerinde değişiklikler olduğu belirlenmiştir.



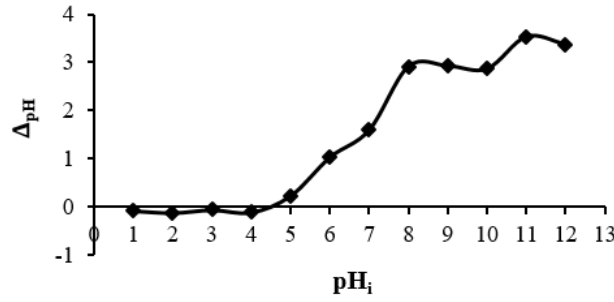
Şekil 2. FTIR spektrumları (a) Doğal talaş (ÇT), (b) H_2SO_4 ön işlemlenmiş talaş (AÇT), (c) Bazik Sarı 28 yüklü AÇT

Adsorbent maddenin yüzeysel özellikleri ve morfolojik karakteristikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM cihazı) kullanılarak incelenmiştir. SEM, çeşitli maddeler ve adsorpsiyonda kullanılan adsorbent maddelerin parçacık şekli ve gözenekli yapısını incelemek amacıyla sıklıkla kullanılan bir cihazdır. Ham (a), aktive edilmiş (b) ve aktivasyon sonrası adsorpsiyonda kullanılan adsorbentlerin (c) SEM görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir. Şekil 3a incelendiğinde ham haldeki çam talaşının yapısında çok sayıda gözenek olduğu, lifli bir dokuya ve düzensiz bir yüzey morfolojisine sahip olduğu ancak gözeneklerin düzenli bir şekilde yerleştiği görülmektedir. Aktivasyon sonrasında (Şekil 3b) çam talaşı gözenekleri daha da açılmış ve gözeneklerde genişleme meydana gelmiştir. Bu durum boyanın yüzeye tutunmasını daha da kolaylaştırmıştır. Adsorpsiyon sonrası ise (Şekil 3c) gözeneklerdeki boşlukların Bazik Sarı 28 boyası ile dolduğu net bir şekilde görülmektedir. Gözeneklerin büyük çoğunluğu kaybolmuş, bu yüzeyler boya molekülleri ile kaplanmıştır.

DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZIK SARI 28 GİDERİMİ



Şekil 3. SEM görüntüleri (a) Doğal talaş, (b) H₂SO₄ ön işlemlenmiş talaş, (c) Bazik Sarı 28 yüklü talaş



Şekil 4. H₂SO₄ ön işlemlenmiş çam talaşının izoelektrik noktası

Çam talaşı ile renk gideriminde adsorpsiyon prosesi mekanizmasını daha iyi anlamak için pH_{pzc} , Şekil 4'de görüldüğü şekilde belirlenmiştir. pH_{pzc} , adsorbentin asitlik ya da bazikliği ve çözelti içindeki adsorbentin net yüzey yükünü gösterdiği için önemli bir karakteristiktir. Bu yüzden sıfır yük noktasının pH_i ölçülmelidir. $pH > pH_{pzc}$ olduğunda adsorbent yüzeyi negatif yüklüdür ve kationların adsorpsiyonu tercih edilir. $pH < pH_{pzc}$ olduğunda adsorbent pozitif yüklenir ve anyonlar adsorbe olur [16, 17]. Şekilden pH_{pzc} 4,5 olarak okunmuştur. Buna göre $pH > pH_{pzc}$ olduğunda adsorbent yüzeyi negatif yük ile kaplandığından + ve - yüklerin birbirini çekmesinden ötürü kationik boya içerisindeki kationlar daha fazla tercih edileceğinden verimli bir adsorpsiyon işlemi gerçekleşir. Elde edilen sonuçlar da bu durumu destekler niteliktedir.

Temas Süresi ve Adsorbent Dozajının Etkisi

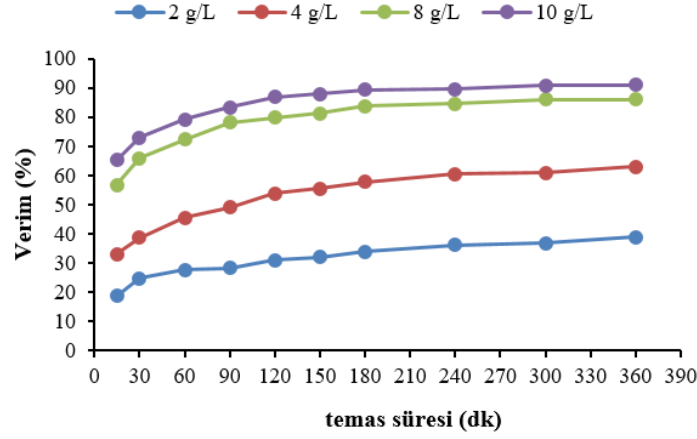
Adsorbentin verilen başlangıç konsantrasyonu için adsorbent kapasitesini belirlediğinden, adsorbent dozajı önemli bir parametredir. Bu nedenle temas süresinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar farklı adsorbent dozajlarında tekrarlanmıştır. Deneyler 75 mg/L'lik sabit başlangıç boya konsantrasyonunda adsorpsiyon zamanını optimize etmek için gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan boya çözeltisinin 100 ml'sine 0,2-0,4-0,8 ve 1,0 g olmak üzere 4 farklı dozda çam talaşı (ÇT) ilave edilerek boya çözeltisinin doğal pH değerinde (5,6-5,8) 125 devir/dk karıştırma hızında değişen sürelerde karıştırılmış, çözeltide kalan Bazik Sarı 28 konsantrasyonu spektrofotometrede ölçülmüştür. Bazik Sarı 28 boyanın temas süresine bağlı olarak giderim verimindeki değişim Şekil 5'de, adsorpsiyon kapasitesindeki değişim ise Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 5'den görüldüğü üzere adsorpsiyon daha ilk dakikalarda başlamıştır. Özellikle de 0,8 ve 1,0 g adsorbent dozajlarında 15 dk içinde %50'den daha fazla renk giderimi olmuştur. 90 dk içerisinde boyanın önemli miktarı giderilirken daha sonraki dakikalarda da artırım az da olsa devam etmiştir. İlk dakikalarda hızlı ve daha sonra yavaşlayarak devam eden adsorpsiyon hızı, adsorpsiyon için kullanılan adsorbentin bol miktardaki boş alanlarına bağlı olduğunu ve daha sonra adsorpsiyon için aktif bölgelerin azaldığını göstermektedir [18].

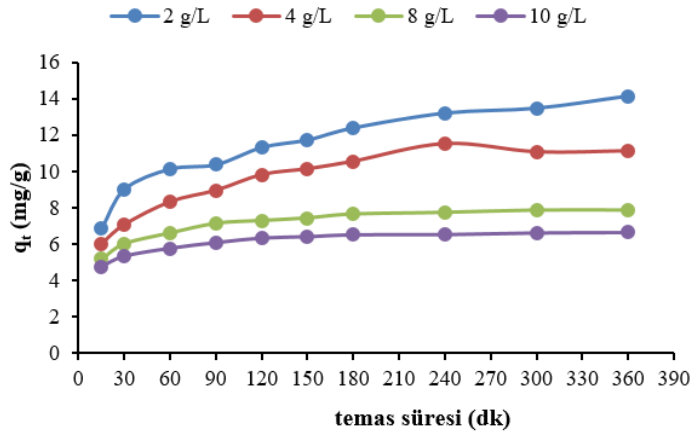
0,8 ve 1,0 g/100 ml adsorbent eklendiğinde giderim verimi açısından çok fazla fark görülmemekle birlikte her iki dozda da sistemin 240 dk içinde dengeye ulaştığı görülmektedir. Denge anında 0,8 g adsorbent dozajında %84,68 boya giderimi elde edilirken 1,0 g adsorbent dozajında %89,5 verim alınmıştır. 240 dakika sonunda adsorbentin adsorpsiyon kapasitesi ise 0,8 ve 1,0 g adsorbent dozu için sırasıyla 7,73 mg/g ve 6,54 mg/g olarak bulunmuştur. Bu nedenle optimum adsorbent dozajı yapılacak çalışmalar için 0,8 g/100 ml alınmıştır. Ayrıca yapılan ön denemelerde daha yüksek boya konsantrasyonlarında dengeye ulaşma süresinin biraz daha uzadığı belirlendiği için denge süresinin 240 dakika alınmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

İ. Şentürk, M. R. Yıldız

Adsorbent miktarı 0,2'den 1,0 grama doğru arttıkça adsorpsiyon kapasitesi (q_t) azalmakta, giderim verimi (%) ise yükselmektedir. Doz arttıkça q_t 'deki azalma, adsorbent partiküllerinin aşırı yüklenmesinin sonucunda adsorpsiyon bölgelerinin örtüşmesinden dolayı olabilir. Bu sonuç diğer araştırmacıların bulguları ile de benzerlik göstermektedir [7].



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Farklı adsorbent dozajlarında zamana bağlı Bazık Sarı 28 giderim verimi



Şekil 6. Farklı adsorbent dozajlarında zamanla Bazık Sarı 28 boyasının adsorplama kapasitesindeki değişim

Kinetik Çalışmalar

Adsorpsiyon işleminin tamamlanması için gerekli temas süresinin belirlenmesindeki adsorpsiyon hızı, adsorpsiyon kinetiği olarak tanımlanmaktadır. Adsorpsiyon hızını tahmin etmeye yardımcı olan kinetik parametreler, adsorpsiyon prosesini modellemek ve tasarlamak için önemli bilgiler sağlar. Bu yüzden sıvı ortamdan kirleticilerin adsorpsiyonunun modellenmesinde kinetik modeller yaygın olarak kullanılır. Çam talaşı adsorbenti ile Bazık Sarı 28 boyasının adsorpsiyon kinetikleri partikül içi difüzyon, sözde ikinci dereceden kinetik ve Elovich modellerine göre incelenmiştir. Şekil 7'de kullanılan kinetik modellere ait grafikler verilmiştir. Kinetiklerin hesabında kullanılan denklemler ise Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan Kinetik Modeller ve Denklemler

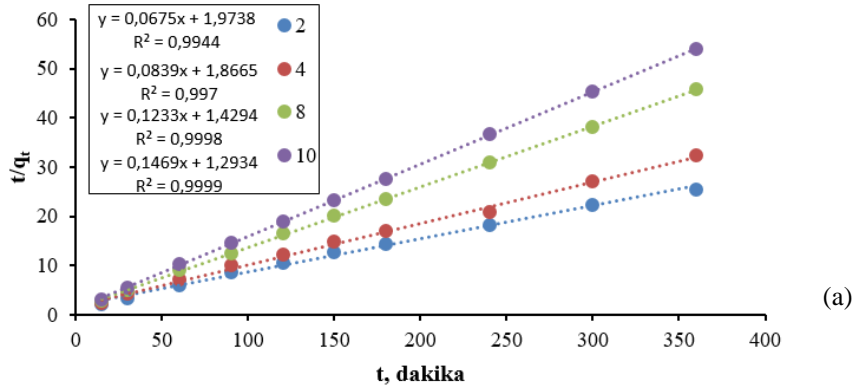
Kinetik Modeller	Denklemler	Kaynaklar
Sözde İkinci Dereceden Kinetik Modeli (Pseudo-second-order model)	$t/q_t = (1/k_2 \cdot q_e^2) + (t/q_e)$	[19]
Partikül İçi Difüzyon Modeli (Weber-Morris)	$q_t = (k_d \cdot t^{1/2}) + C$	[20]
Elovich Modeli	$q_t = (1/\beta) \cdot (\ln(\alpha\beta)) + (1/\beta) \cdot (\ln t)$	[21]

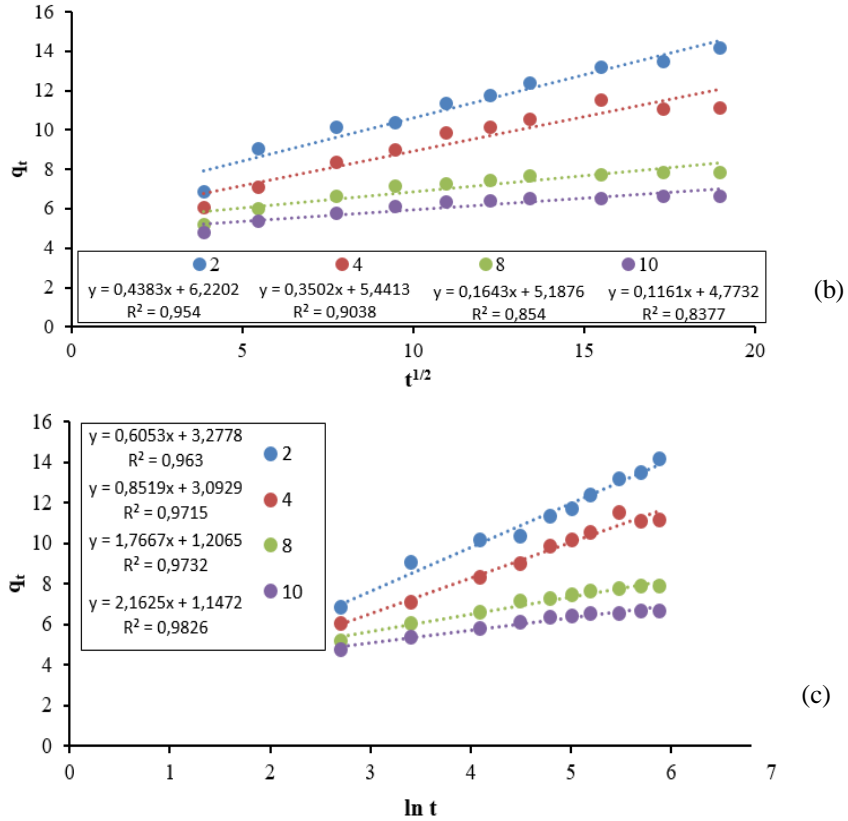
DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZİK SARI 28 GİDERİMİ

Şekil 7’de elde edilen denklemler kullanılarak kinetik modellere ait parametreler hesaplanmış, bu parametrelere ait değerler ise Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de görüldüğü üzere dört farklı adsorbent dozajında da diğer kinetik modeller ile kıyaslandığında sözde ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli için daha yüksek R^2 değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca k_2 değeri artan adsorbent dozajı ile birlikte artmıştır. Belirlenen denge süresi için sözde ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli ile hesaplanan adsorpsiyon kapasitesi değerlerinin (q_e hesaplanan (mg/g)) Şekil 6’da verilen q_e deneysel değeri ile oldukça yakınlık gösterdiği de görülmektedir.

Tablo 3. Bazık Sarı 28 boyasının farklı adsorbent dozajları ile adsorpsiyonu sonucu kinetik model parametreleri
Sözde İkinci Derece Reaksiyon Kinetiği Modeli

	q_e (mg/g)	k_2 (mg/g.dk)	R^2
2 g/L	14,814	$2,3 \times 10^{-3}$	0,9944
4 g/L	11,92	$3,77 \times 10^{-3}$	0,997
8 g/L	8,11	$1,063 \times 10^{-2}$	0,9998
10 g/L	6,81	$1,667 \times 10^{-2}$	0,9999
Partikül İçi Difüzyon Modeli			
	k_d (mg/g dk ^{1/2})	C	R^2
2 g/L	0,4383	6,2202	0,954
4 g/L	0,3502	5,4413	0,9038
8 g/L	0,1643	5,1876	0,854
10 g/L	0,1161	4,7732	0,8377
Elovich Modeli			
	α (mg/g dk)	β (g/mg)	R^2
2 g/L	26,517	1,652	0,963
4 g/L	22,040	1,174	0,9715
8 g/L	3,342	0,566	0,9732
10 g/L	3,149	0,462	0,9826



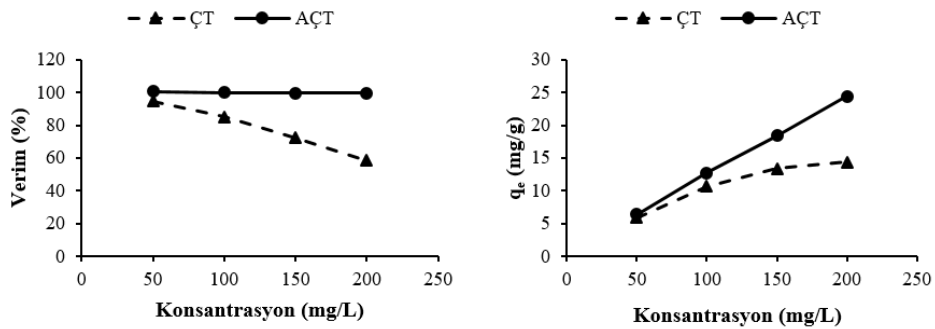


Şekil 7. (a) Sözde ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli (b) Partikül içi difüzyon modeli (c) Elovich modeli

Adsorbente Uygulanan Ön işlemin Adsorpsiyona Etkisi

Ham ve kimyasal ön işleme aktive edilen çam talaşı adsorpsiyon verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Hazırlanan her bir erlene 50, 100, 150 ve 200 mg/L olmak üzere dört farklı konsantrasyonda hazırlanan BS 28 boya çözeltilerinden 100 ml alınarak içlerine 0,8 gr adsorbent ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım 25°C sıcaklıkta, 125 devir/dk karıştırma hızında, boya çözeltilerinin doğal pH değerinde (5,6-5,8) 4 saat boyunca adsorpsiyona tabi tutulmuştur. 4 saat sonunda her bir çalışma erleninden alınan örnekler analiz edilerek BS 28 boya giderimi için en verimli olarak kullanılacak adsorbent belirlenmiştir. Belirtilen şekilde gerçekleştirilen çalışmalar sonrasında Bazık Sarı 28 için elde edilen sonuçlar ise Şekil 8’de verilmiştir.

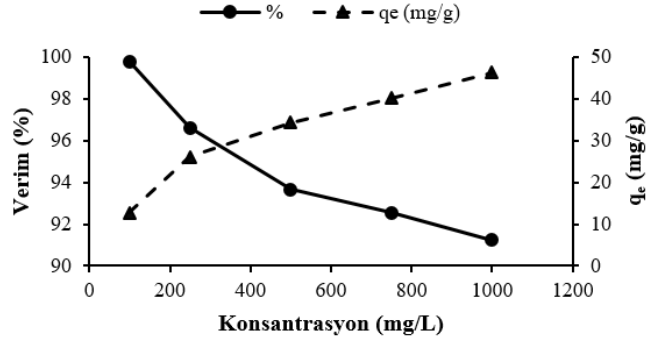
Asit ile kimyasal ön işlemde geçen çam talaşı adsorbentinin kullanılması sonucunda elde edilen giderim verimleri, doğal talaş kullanıldığında elde edilen değerlere göre daha yüksektir. Doğal çam talaşı kullanıldığında boya konsantrasyonu 50’den 200 mg/L’ye arttığında giderim verimi %94,6’dan %58,5’a azalırken, asit ile aktivasyon sonrasında boya konsantrasyonu artsa bile adsorbent BS 28 giderim verimleri %99 seviyelerinde sabit kalmıştır. Aynı şartlarda adsorbent adsorpsiyon kapasitesi doğal çam talaşı için 5,89’den 14,34 mg/g’a, asitle aktive edilmiş çam talaşı için ise 6,39’dan 24,39 mg/g’a yükselmiştir. Yüksek konsantrasyonlarda çalışıldığında doğal talaşın giderim veriminin azaldığı, aktive edilmiş talaşın ise BS 28 giderim veriminde herhangi bir düşüş olmadığı görüldüğünden bundan sonraki çalışmalara H₂SO₄ ile aktive edilmiş çam talaşı (AÇT) ile devam edilmesine karar verilmiştir.



DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZİK SARI 28 GİDERİMİ

Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Etkisi

Sulu çözeltilerden adsorpsiyon ile renk gideriminde etkili parametrelerden birisi de başlangıç boyar madde konsantrasyonudur. Çünkü biliyoruz ki kirlilik yükü ne kadar fazla ise arıtım ve uzaklaştırma da o kadar zor olacaktır [17, 18]. Başlangıç Bazik Sarı 28 boya konsantrasyonunun boya giderimine etkisinin belirlenmesi amacıyla, 8 g/L adsorbent dozajında 100, 250, 500, 750 ve 1000 mg/L boya konsantrasyonlarında çalışılmıştır. Başlangıç boya konsantrasyonu arttıkça boya giderimi az da olsa azalmaktadır. 100 mg/L boya konsantrasyonunda %99,8 boya giderimi elde edilirken, 1000 mg/L başlangıç boya konsantrasyonunda boya giderimi %91'e düşmüştür. Adsorpsiyon kapasitesi ise artan boya konsantrasyonu ile artmıştır (Şekil 9). Başlangıç boya konsantrasyonu 100 mg/L'den 1000 mg/L'ye yükseldiğinde AÇT'nin adsorplama kapasitesi de 12,68 mg/g'dan 46,23 mg/g değerine yükselmiştir. Daha yüksek boya konsantrasyonlarında daha düşük giderim yüzdesi, adsorbantın adsorpsiyon alanlarının dolmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 9. Başlangıç boya konsantrasyonuna bağlı olarak giderim verimindeki değişim

İzoterm Çalışmaları

Adsorbant yüzeyinde biriken madde konsantrasyonu ve arıtmak istenen çözeltilde kalan adsorbat konsantrasyonu arasında denge kuruluncaya kadar adsorpsiyon işlemi devam eder. Adsorpsiyon izotermi dengede sıvı içinde çözünmüş boyanın konsantrasyonu ve adsorbent üzerine adsorplanan boyanın miktarı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Denge sorpsiyon izotermi, sorpsiyon sisteminin tasarımında oldukça önemlidir [24]. Denge sorpsiyonu, genellikle adsorbentın adsorplanacak maddeye olan ilgisi ve sorbentın yüzey özelliklerini ifade eden bazı parametreler tarafından karakterize edilen izoterm eşitliği ile tanımlanır [25]. Adsorpsiyon dengesini tanımlamak için Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri seçilmiştir.

Üniform ve sınırlı adsorpsiyon alanlarını temel alan Langmuir modeline göre adsorbantın yüzeyinde alıcı noktaların olduğu, her alıcı noktanın sadece bir molekül adsorplama yapacağı kabul edilmiştir. Böylece meydana gelen tabaka bir molekül kalınlığında olur. Tek tabakalı homojen adsorpsiyonu açıklamak için kullanılmakta ve maksimum adsorpsiyon kapasitesinin tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bunun yanında, tüm adsorpsiyon alanları adsorbe edilmek istenen moleküllere karşı eşit miktarda çekim uygular ve adsorbe olan bir molekül bitişik alandaki bir başka molekülle herhangi bir etkileşim içinde olmaz [26]. Langmuir izoterm denklemi Eşitlik 2'de verilmiştir [27]. Eşitlik 2'ye göre C_e 'ye karşı C_e/q_e değerleri grafiğe geçirilerek Q_0 ve K_L adsorpsiyon sabitleri hesaplanabilir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 \times K_L} + \frac{1}{Q_0} C_e \quad (2)$$

Burada;

q_e : Denge anında birim adsorbant ağırlığı başına adsorplanan kirlenici miktarı (mg/g),

K_L : Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg),

Q_0 : Adsorbentın maksimum tek tabakalı adsorpsiyon kapasitesi (mg/g),

C_e : Denge anından sonra çözeltildeki kirlenici konsantrasyonu (mg/L)'dur.

K_L , adsorpsiyon prosesinin tercih edilebilirliğini açıklayan boyutsuz denge parametresinin (R_L) hesaplanmasında kullanılan önemli bir katsayıdır.

$$R_L = 1/(1+K_L C_0) \quad (3)$$

Freundlich izotermi, bir adsorbantın yüzeyi üzerinde bulunan adsorpsiyon alanlarının heterojen olduğunu yani farklı türdeki adsorpsiyon alanlarından oluştuğunu kabul etmektedir. Freundlich izotermi çözeltildeki kirlenici konsantrasyonu arttıkça adsorbant yüzeyi üzerinde tutunan kirlenici konsantrasyonunun arttığını varsayar [28]. Freundlich bağıntısının doğrusallaştırılmış

İ. Şentürk, M. R. Yıldız

hali Eşitlik 4’de verilmiştir [29]. $1/n$ ve K_F sabitleri ise sırasıyla doğrunun eğimi ve doğrunun y eksenini kesim noktasından belirlenir.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

Burada;

K_F : Adsorbanın adsorpsiyon kapasitesini gösteren sabit ($\text{mg}^{1-(1/n)}\text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$),

n : Adsorpsiyon yoğunluğunu gösteren sabit,

C_e : Adsorpsiyondan sonra çözeltilde kalan maddenin konsantrasyonu (mg/L)’dur.

Temkin izoterm modeli, adsorbe olan maddeler arasındaki etkileşimi göz önüne almaktadır. Hazırlanan adsorbat içerisindeki tüm moleküllerin adsorpsiyon entalpisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. Son derece düşük ve çok yüksek konsantrasyonları görmezden gelirken adsorpsiyon ısısının logaritmik azalmadan daha çok lineer olduğunu varsayar. Ayrıca maksimum bağ enerjisine kadar bağ enerjisinin üniform olarak dağıldığı varsayılır. Temkin izoterm eşitliği aşağıda verilmiştir [19]:

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (5)$$

Burada;

q_e : Denge de adsorbe olan adsorbat miktarı (mg/g),

C_e : Denge de çözelti içindeki adsorbat konsantrasyonu (mg/L),

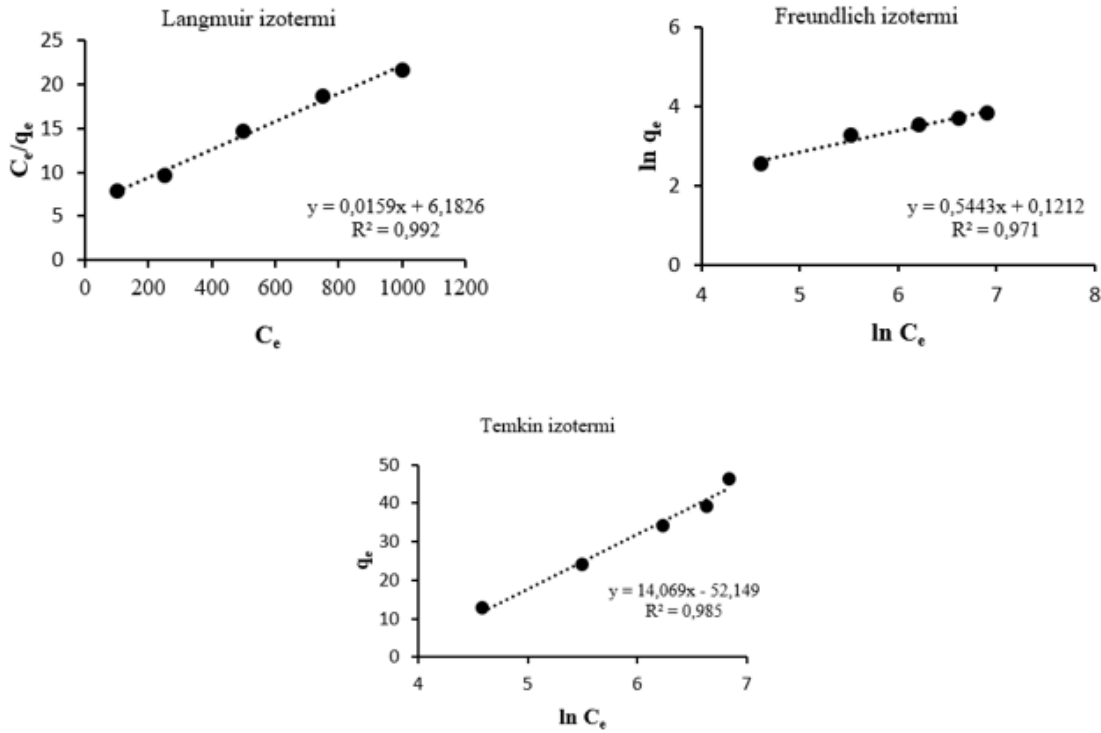
B : Adsorpsiyon ısısıyla ilgili bir sabittir ve $B = RT/b$ ile ifade edilir.

b : Temkin sabiti (J/mol), T mutlak sıcaklık (K), R gaz sabiti (8.314 J/mol K),

A : Temkin izoterm sabitidir (L/g).

$\ln C_e$ ’ye karşı q_e grafiğinin eğiminden B , eksenini kesim noktasından ise A değeri hesaplanabilir [30].

Şekil 10’da BS 28 boyası için elde edilen izoterm modelleri, Tablo 4’de ise izoterm hesaplarından elde edilen katsayılar verilmektedir. Şekil 10’da verilen korelasyon katsayısı (R^2) değerlerine baktığımızda adsorpsiyonun her üç izoterm de uyduğu görülmektedir. Ancak Langmuir izoterminden elde edilen R^2 değeri Freundlich ve Temkin izotermine göre biraz daha yüksektir.



Şekil 10. Bazık Sarı 28 için izoterm modelleri a) Langmuir b) Freundlich c) Temkin

DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZIK SARI 28 GİDERİMİ

Tablo 4. Bazık Sarı 28 boyar maddesinin AÇT ile adsorpsiyonu için hesaplanan izoterm parametreleri

İzoterm/Sabitler	Birim	Değer
Langmuir Modeli		
Q _o	(mg/g)	62,89
b	(L/mg)	2,57x10 ⁻³
R _L	-	0,61 (C _o =250 mg/L)
R ²	-	0,992
Freundlich Modeli		
n	(mg/g(L/mg) ^{1/n})	1,837
K _F	(mg/g)	1,128
R ²	-	0,971
Temkin Modeli		
B	(J/mol)	14,069
A	(L/g)	40,72
R ²	-	0,985

Freundlich izoterm denklemindeki K_F ve 1/n katsayıları sırasıyla adsorpsiyon kapasitesini ve adsorpsiyon yoğunluğunu ifade etmektedir. 1/n heterojenite faktörüdür. Yüzey ne kadar heterojense, 1/n değeri o kadar sıfıra yakın olmaktadır. Bunun yanı sıra adsorpsiyonun tercih edilebilir olması için Freundlich sabiti n, 1-10 arasında değişen değerler almalıdır [31]. Freundlich modelinde n>1 olması adsorbent yüzeyinde çoklu tabaka oluşumuna verinin uygunluğunu göstermektedir [12]. Tablo 4'de verilen n değeri (n=1,837) bu koşulları sağladığı için adsorbent yüzeyine boyanın adsorpsiyonunun çalışılan koşullarda tercih edilebilir olduğu söylenebilir.

Bazık Sarı 28 boyasının asidik ön işlem uygulanmış talaş üzerine adsorpsiyonunda adsorbent tercihi, Langmuir modelinden türetilen boyutsuz parametre olan R_L ile değerlendirilmiştir. 0<R_L<1 adsorpsiyon prosesinin elverişli olduğunu ve kendiliğinden gerçekleştiğini ifade etmektedir [28, 29]. Tablo 4'de hesaplanan verilerden, 250 mg/L başlangıç konsantrasyonu için R_L 0,61 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde çalışılan diğer konsantrasyonlarda da R_L 0-1 arasında değerler almaktadır. Bu da adsorpsiyon prosesinin elverişli olduğunu ve kendiliğinden gerçekleştiğini göstermektedir. Hollow mesoporous carbon nanospheres (HMCN) vasıtasıyla Bazık Sarı 28 boya adsorpsiyonu için yapılmış olan bir çalışmada R² değerleri sırasıyla 0,999 ve 0,973 elde edilerek verilerin Langmuir ve Freundlich izotermine uyumlu olduğu gösterilmiştir [35].

Bazık Sarı 28 boya giderimi için literatürde farklı adsorbentler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda Langmuir izoterm modeline göre hesaplanan maksimum adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 5'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada kullanılan AÇT'nin boya giderimi için oldukça etkili olduğu görülmektedir.

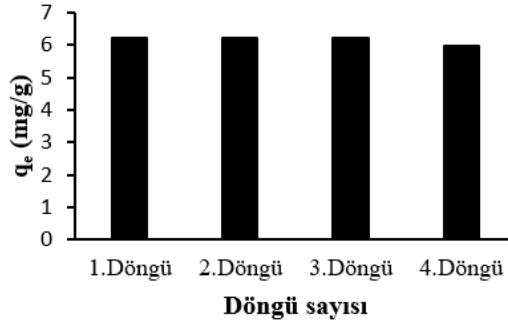
Tablo 5. Sucul ortamdan BS 28 giderimi için kullanılan çeşitli adsorbentlerin Langmuir izotermine göre hesaplanan Q_o değerlerinin karşılaştırılması

Adsorbent	Çalışma Koşulları				
	C_o (mg/L)	pH	Sıcaklık (°C)	Q_o (mg/g)	Kaynak
Klinoptilolit	14			52,9-59,6	[36]
Amberlite XAD-4	14	5,83	30	14,9	
Fe@G	40	7	30	52,36	[37]
Atık Bor	35	5,7-6	35	75,0	[38]
Kalsine edilmiş yumurta kabuğu (CES)	20	6	35	28,87	[10]
Green alga <i>Caulerpa scalpelliformis</i>	25-150	6	30	27,0	[39]
Graphene oxide (GO)	30	7	20	68,5	[40]
Persian Kaolin	10	6	24	16,23	[41]
ZnMn	30	7	30	48,8	[2]
Poly (methacrylic acid) (PMAA) based hydrogel	20-50	6	20	23,7	[42]

Agricultural Algerian olive cake waste (Powdered AAOCW)	100	5,6	24	38,95	[43]
Asitle aktive edilmiş çam talaşı (AÇT)	100	5,6-5,8	25	62,89	Mevcut Çalışma

Desorpsiyon ve Adsorbentin Yeniden Kullanılabilirliği

Desorpsiyon, katı yüzeyinde tutunan taneciklerin yüzeyden salınmasıdır. Bir adsorbentin geri kazanımı ekonomik bir teknoloji için en önemli özelliktir [34, 35]. Malzemenin rejenerasyon olasılığını değerlendirmek için, adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. AÇT adsorbent için adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsü 4 kez tekrarlanmıştır. Yeniden kullanım sürecinde BS 28'in adsorpsiyon kapasitesi Şekil 11'de gösterilmektedir. Şekle göre adsorpsiyon kapasitesi 1. döngüde 6,22 mg/g iken, 4. döngüde çok fazla değişmemiş 5,97 mg/g okunmuştur. Bu sonuçlar AÇT adsorbentin yeniden kullanılabilirlik açısından tatmin edici olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Rejenerasyon sonunda Bazik Sarı 28 boyasının adsorpsiyon kapasitesindeki değişim

4. SONUÇLAR

Sucul çözelti içinden Bazik Sarı 28 boyasının giderimi çam talaşı kullanılarak adsorpsiyonla çalışılmıştır. Adsorbentin arıtım verimini artırmak için adsorbent materyal kimyasal olarak aktive edilmiş, aktivasyondan sonra talaşın daha yüksek boya konsantrasyonlarında dahi %99 verimle BS 28 arıtımı için kullanılabilceği görülmüştür. Çözeltinin pH değeri BS 28 giderimi için maksimum koşulları sağladığından ayrıca bir pH çalışmasına gerek duyulmamıştır. Adsorpsiyon hızını belirlemek için farklı kinetik modeller kullanılmış veriler sözde ikinci derece reaksiyon kinetiğine uymuştur. Adsorpsiyon denge verisi çeşitli adsorpsiyon izoterm modelleri kullanılarak analiz edilmiştir. Aktive edilen çam talaşı ile Bazik Sarı 28'in adsorpsiyon verisinin Langmuir model ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Langmuir modelden maksimum adsorplama kapasitesi (Q_0) 62,89 mg/g olarak bulunmuştur. Art arda dört kez adsorpsiyon-desorpsiyon çalışması yapılarak kullanılan adsorbentin rejenerasyon sonrası yeniden kullanıma uygun olup olmadığı araştırılmış çok az bir verim kaybı ile adsorbentin yeniden kullanılabilceği belirlenmiştir. Sonuçlar açıkça göstermektedir ki kimyasal olarak aktive edilen çam talaşı BS 28 adsorpsiyonu için alternatif bir adsorbent olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] V. V. Panic, Z. P. Madzarevic, T. Volkov-Husovic, and S. J. Velickovic, "Poly(methacrylic acid) based hydrogels as sorbents for removal of cationic dye basic yellow 28: Kinetics, equilibrium study and image analysis," *Chemical Engineering Journal*, vol. 217, pp. 192–204, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.cej.2012.11.081.
- [2] W. Konicki, D. Sibera, and U. Narkiewicz, "Adsorptive removal of cationic dye from aqueous solutions by ZnO/ZnMn₂O₄ nanocomposite," *Separation Science and Technology*, vol. 53, no. 9, pp. 1295–1306, Jun. 2018, doi: 10.1080/01496395.2018.1444054.
- [3] F. Ferrero, "Dye removal by low cost adsorbents: Hazelnut shells in comparison with wood sawdust," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, no. 1–2, pp. 144–152, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.07.072.
- [4] O. Hamdaoui, "Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 135, no. 1–3, pp. 264–273, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.062.
- [5] J. J. Salazar-Rabago, R. Leyva-Ramos, J. Rivera-Utrilla, R. Ocampo-Perez, and F. J. Cerino-Cordova, "Biosorption mechanism of Methylene Blue from aqueous solution onto White Pine (*Pinus durangensis*) sawdust: Effect of operating conditions," *Sustainable Environment Research*, vol. 27, no. 1, pp. 32–40, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.serj.2016.11.009.

DOĞAL VE AKTİVE EDİLEN ÇAM TALAŞI İLE SUCUL ÇÖZELTİDEN ADSORPSİYONLA BAZİK SARI 28 GİDERİMİ

- [6] M. A. K. M. Hanafiah, W. S. W. Ngah, S. H. Zolkafly, L. C. Teong, and Z. A. A. Majid, "Acid Blue 25 adsorption on base treated Shorea dasyphylla sawdust: Kinetic, isotherm, thermodynamic and spectroscopic analysis," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 24, no. 2, pp. 261–268, Feb. 2012, doi: 10.1016/S1001-0742(11)60764-X.
- [7] V. K. Garg, R. Gupta, A. Bala Yadav, and R. Kumar, "Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust," *Bioresource Technology*, vol. 89, no. 2, pp. 121–124, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(03)00058-0.
- [8] F. Deniz and R. A. Kepekci, "Bioremoval of Malachite green from water sample by forestry waste mixture as potential biosorbent," *Microchemical Journal*, vol. 132, pp. 172–178, May 2017, doi: 10.1016/j.microc.2017.01.015.
- [9] F. Batzias and D. Sidiras, "Dye adsorption by calcium chloride treated beech sawdust in batch and fixed-bed systems," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 114, no. 1–3, pp. 167–174, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.014.
- [10] R. Slimani *et al.*, "Calcined eggshells as a new biosorbent to remove basic dye from aqueous solutions: Thermodynamics, kinetics, isotherms and error analysis," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 45, no. 4, pp. 1578–1587, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jtice.2013.10.009.
- [11] M. A. Ferro-García, J. Rivera-Utrilla, I. Bautista-Toledo, and C. Moreno-Castilla, "Adsorption of Humic Substances on Activated Carbon from Aqueous Solutions and Their Effect on the Removal of Cr(III) Ions," *Langmuir*, vol. 14, no. 7, pp. 1880–1886, Mar. 1998, doi: 10.1021/la970565h.
- [12] K. Kuśmierk and A. Świątkowski, "The influence of an electrolyte on the adsorption of 4-chlorophenol onto activated carbon and multi-walled carbon nanotubes," *Desalination and Water Treatment*, vol. 56, no. 11, pp. 2807–2816, Dec. 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.965221.
- [13] S. N. Jain and P. R. Gogate, "Efficient removal of Acid Green 25 dye from wastewater using activated Prunus Dulcis as biosorbent: Batch and column studies," *Journal of Environmental Management*, vol. 210, pp. 226–238, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.01.008.
- [14] G. Crini, "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review," *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 9, pp. 1061–1085, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.
- [15] Ö. Gerçel, A. Özcan, A. S. Özcan, and H. F. Gerçel, "Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of Euphorbia rigida by H₂SO₄ activation and its adsorption behavior in aqueous solutions," *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 11, pp. 4843–4852, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.apsusc.2006.10.053.
- [16] B. M. Babić, S. K. Milonjić, M. J. Polovina, and B. V. Kaludierović, "Point of zero charge and intrinsic equilibrium constants of activated carbon cloth," *Carbon*, vol. 37, no. 3, pp. 477–481, Feb. 1999, doi: 10.1016/S0008-6223(98)00216-4.
- [17] D. Savova *et al.*, "The influence of the texture and surface properties of carbon adsorbents obtained from biomass products on the adsorption of manganese ions from aqueous solution," *Carbon*, vol. 41, no. 10, pp. 1897–1903, 2003, doi: 10.1016/S0008-6223(03)00179-9.
- [18] R. Köklü and Ç. Özer, "Maliyetsiz bir adsorban olan sigara külü kullanılarak boyarmadde giderimi," *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 1–1, Apr. 2018, doi: 10.16984/saufenbilder.329234.
- [19] G. Moussavi and B. Barikbin, "Biosorption of chromium(VI) from industrial wastewater onto pistachio hull waste biomass," *Chemical Engineering Journal*, vol. 162, no. 3, pp. 893–900, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.06.032.
- [20] C. Xiaoli and Z. Youcai, "Adsorption of phenolic compound by aged-refuse," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 1, pp. 410–417, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.015.
- [21] M. Rajabi, K. Mahanpoor, and O. Moradi, "Preparation of PMMA/GO and PMMA/GO-Fe₃O₄ nanocomposites for malachite green dye adsorption: Kinetic and thermodynamic studies," *Composites Part B: Engineering*, vol. 167, pp. 544–555, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.030.
- [22] F. Mehrabi, A. Vafaei, M. Ghaedi, A. M. Ghaedi, E. Alipanahpour Dil, and A. Asfaram, "Ultrasound assisted extraction of Maxilon Red GRL dye from water samples using cobalt ferrite nanoparticles loaded on activated carbon as sorbent: Optimization and modeling," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 38, pp. 672–680, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.08.012.
- [23] M. Hamdi Karaoğlu, M. Doğan, and M. Alkan, "Removal of cationic dyes by kaolinite," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 122, no. 1–3, pp. 20–27, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.micromeso.2009.02.013.
- [24] S. K. Nadavala, K. Swayampakula, V. M. Boddu, and K. Abburi, "Biosorption of phenol and o-chlorophenol from aqueous solutions on to chitosan–calcium alginate blended beads," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 162, no. 1, pp. 482–489, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.070.
- [25] Z. Rawajfih and N. Nsour, "Characteristics of phenol and chlorinated phenols sorption onto surfactant-modified bentonite," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, no. 1, pp. 39–49, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.jcis.2005.11.063.
- [26] S. J. Allen, Q. Gan, R. Matthews, and P. A. Johnson, "Comparison of optimised isotherm models for basic dye adsorption by kudzu," *Bioresource Technology*, vol. 88, no. 2, pp. 143–152, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(02)00281-X.
- [27] Z. Aksu and J. Yener, "A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents," *Waste Management*, vol. 21, no. 8, pp. 695–702, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0956-053X(01)00006-X.

- [28] O. Hamdaoui and E. Naffrechoux, “Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon Part I. Two-parameter models and equations allowing determination of thermodynamic parameters,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 147, no. 1–2, pp. 381–394, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.021.
- [29] W. Jianlong, Q. Yi, N. Horan, and E. Stentiford, “Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass,” *Bioresource Technology*, vol. 75, no. 2, pp. 157–161, Nov. 2000, doi: 10.1016/S0960-8524(00)00041-9.
- [30] I. Sentürk, H. Buyukgungor, and F. Geyikci, “Biosorption of phenol from aqueous solutions by the *Aspergillus niger* biomass: comparison of linear and non-linear regression analysis,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 41, pp. 19529–19539, Sep. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1102088.
- [31] M. Radhika and K. Palanivelu, “Adsorptive removal of chlorophenols from aqueous solution by low cost adsorbent—Kinetics and isotherm analysis,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 138, no. 1, pp. 116–124, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.05.045.
- [32] G. Kaykıoğlu, “Kolemanit ve Üleksit Atığı ile Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisi Giderimi: Kinetik ve İzoterm Değerlendirmesi,” *CBÜ Fen Bil. Dergi.*, vol. 12, no. 3, p. 11, 2016.
- [33] D. İ. Çifçi, “Alizarin kırmızı boyasının hidroksiapatit kullanılarak adsorpsiyon prosesi ile giderimi,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, pp. 58–66, Jan. 2018, doi: 10.28948/ngumuh.384840.
- [34] A. Sarı and M. Tuzen, “Biosorption of cadmium(II) from aqueous solution by red algae (*Ceramium virgatum*): Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 157, no. 2–3, pp. 448–454, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.008.
- [35] W. Konicki, K. Cendrowski, G. Bazarko, and E. Mijowska, “Study on efficient removal of anionic, cationic and nonionic dyes from aqueous solutions by means of mesoporous carbon nanospheres with empty cavity,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 94, pp. 242–253, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.cherd.2014.08.006.
- [36] J. Yener, T. Kopac, G. Dogu, and T. Dogu, “Adsorption of Basic Yellow 28 from aqueous solutions with clinoptilolite and amberlite,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 294, no. 2, pp. 255–264, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.jcis.2005.07.040.
- [37] W. Konicki, A. Helminiak, W. Arabczyk, and E. Mijowska, “Adsorption of cationic dyes onto Fe@graphite core-shell magnetic nanocomposite: Equilibrium, kinetics and thermodynamics,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 129, pp. 259–270, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2017.11.004.
- [38] A. Olgun and N. Atar, “Equilibrium and kinetic adsorption study of Basic Yellow 28 and Basic Red 46 by a boron industry waste,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, no. 1, pp. 148–156, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.064.
- [39] R. Aravindhan, J. R. Rao, and B. U. Nair, “Removal of basic yellow dye from aqueous solution by sorption on green alga *Caulerpa scalpelliformis*,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, no. 1–2, pp. 68–76, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.07.058.
- [40] W. Konicki, M. Aleksandrak, and E. Mijowska, “Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on adsorption of cationic dyes from aqueous solutions using graphene oxide,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 123, pp. 35–49, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.cherd.2017.03.036.
- [41] A. R. Tehrani-Bagha, H. Nikkar, N. M. Mahmoodi, M. Markazi, and F. M. Menger, “The sorption of cationic dyes onto kaolin: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies,” *Desalination*, vol. 266, no. 1–3, pp. 274–280, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.desal.2010.08.036.
- [42] A. R. Nestic, V. V. Panic, A. E. Onjia, and S. J. Velickovic, “The enhanced removal of cationic dyes in binary system using novel copolymers with two kinds of acidic groups,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 476, pp. 24–34, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.colsurfa.2015.03.013.
- [43] K.-H. Toumi *et al.*, “Efficient Removal of Cationic Dyes From Aqueous Solutions Using the Low-Cost Algerian Olive Cake Waste Adsorbent,” *JOM*, vol. 71, no. 2, pp. 791–800, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11837-018-3143-2.
- [44] H. El Boujaady, M. Mourabet, A. El Rhilassi, M. Bennani-Ziatni, R. El Hamri, and A. Taitai, “Interaction of adsorption of reactive yellow 4 from aqueous solutions onto synthesized calcium phosphate,” *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 21, pp. S94–S100, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jscs.2013.10.009.
- [45] B. Kiran and A. Kaushik, “Cyanobacterial biosorption of Cr(VI): Application of two parameter and Bohart Adams models for batch and column studies,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 144, no. 3, pp. 391–399, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.cej.2008.02.003.





ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARIN SULAMADA KULLANIMINDA MİKROKİRLETİCİLERİN OLUŞTURABİLECEĞİ RİSKLER

Aynur YAŞAR^{1,*} , Esra CAN DOĞAN² 

¹Kocaeli Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, 41380, İzmit, Kocaeli, Türkiye
²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 41380, İzmit, Kocaeli, Türkiye

ÖZET

Teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte kentsel, tarımsal, endüstriyel ve rekreasyonel su ihtiyacının artış gösterdiği son dönemde arıtılmış kentsel atıksuların sulama amaçlı kullanımı büyük bir potansiyel su kaynağı olarak görülmektedir. Ancak özellikle ikincil arıtılmış atıksularda yeterli düzeyde giderilemeyen mikrokirleticilerin varlığı yeni bir endişe kaynağıdır. Bu tür atıksuların ileri arıtım teknikleri ile üçüncül arıtım yapıldıktan sonra sulamada kullanımı halk ve çevre sağlığı tehditlerini gidermek için zaruri bir ihtiyaçtır. Bu konuda arıtılmış atıksulardaki mikrokirleticilerden kaynaklanan çevresel riskler göz önüne alınmamaktadır. Ayrıca bu kirleticilerle ilgili deşarj standartlarının kabulündeki karmaşalar, atıksuların yeniden kullanımı/geri kazanımı önündeki engeller arasında yer almaktadır. Bu çalışma, kentsel arıtılmış atıksuların sulamada kullanımında endişe yaratan mikrokirleticiler, bu kirleticilerle ilgili yasal yönergeler, mikrokirleticilerin çevrede yaratacağı riskler ile bunların su ortamından uzaklaştırılması için uygulanan arıtma seçenekleri üzerine odaklanmıştır. Bu kapsamdaki literatür çalışmaları, mikrokirleticilerin ileri arıtma proseslerinin yanı sıra yenilikçi hibrit uygulamalar ile yüksek verimlerde giderildikten sonra arıtılmış kentsel atıksuların sulamaya uygun hale getirilebileceğini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: İleri oksidasyon, Kentsel atıksu, Sulama, Mikrokirleticiler, Membran Prosesler, Risk değerlendirme.

THE RISK OF MICROPOLLUTANTS WHEN THE USE OF TREATED URBAN WASTEWATER IN IRRIGATION

ABSTRACT

The use of treated urban wastewater for irrigation has been seen as a major potential water source in the recent years, when the need for urban, agricultural, industrial and recreational water has increased with the rapid development of technology. However, the presence of micropollutants is a new concern, which cannot be adequately removed, especially in secondary treated wastewater. The use of this type of wastewater for irrigation after applying advanced tertiary treatment techniques is an essential requirement to eliminate public and environmental health threats. The environmental risks due to presence of micropollutants in the treated wastewater have not taken into consideration. Furthermore the confusion in accepting the discharge standards related to these pollutants pose an obstacle for reuse/recovery of wastewater. The current study focused on micro-pollutants that cause concern in the use of urban treated wastewater in irrigation, legal guidelines regarding these pollutants, the risks that micro-pollutants will create in the environment and the treatment options applied to remove of micropollutants from the water environment. The studies investigated for this purposes indicate that treated urban wastewater can be made suitable to irrigation after removal at high efficiencies with innovative hybrid applications as well as advanced treatment processes of micropollutants.

Keywords: Advanced Oxidation, Urban Wastewater, Irrigation, Micropollutants, Membrane Processes, Risk Assessment.

1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, kentleşme, sulamaya açılan alanların genişlemesi, endüstrileşme ve küresel iklim değişikliği gibi nedenlerle su kaynakları üzerine baskılar artmıştır. Su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı üzerinde giderek artan tehditleri azaltabilmek için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı/geri kazanımı, mevcut su kaynaklarının korunması ile birlikte birçok alanda su ihtiyacının karşılanması için yeni bir kaynak yaratmaktadır.

Kentsel atıksular, evsel atıksu ya da evsel atıksuyun endüstriyel atıksu ve/veya yağmur suyu ile karışımını ifade etmektedir [1]. Kentsel atıksular genellikle konvansiyonel sistemler ile arıtılarak alıcı ortamlara deşarj edilmektedir. Ancak arıtılmış

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aynurfis@kocaeli.edu.tr

Geliş / Recieved: 06.02.2020 Kabul / Accepted: 03.07.2020 doi: 10.28948/ngumuh.685509

atıksuların, içeriğinde risk teşkil eden mikrokirleticilerin etkili bir şekilde giderilerek yeniden kullanıma/geri kazanıma uygun hale getirilmesi için ileri arıtım teknikleri ile arıtılması gerekmektedir.

Birçoğu sudaki organizmalar için akut veya kronik olarak toksik olabilen, insanlar ve hayvanlar için sağlık riski oluşturabilen 200'den fazla farklı kimyasal bileşik, belediye atıksu arıtma tesisi ikincil çıkış sularında tanımlanmaktadır. Bu kimyasalların çoğu (farmasotikler ve kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucu bileşikler, vb.) kolayca bozunmayan ve bu nedenle uzun vadeli çevresel etkilere neden olabilen mikrokirleticilerdir [2]. Su geri kazanımı ve yeniden kullanımının en büyük sorunlarından biri, halkı arıtılmış atık sularında bulunan kimyasal ve mikrobiyal kirleticilere maruz bırakma riskidir. Bu riskleri gidermenin en iyi yolu ise atıksuların üçüncül arıtımıdır [3],[4].

Bu çalışmada, öncelikle arıtılmış kentsel atıksularda bulunan, halk ve çevre sağlığı bakımından endişe yaratan mikrokirleticiler ve bu kirleticilerin çevreye deşarjı ile ilgili ulusal ve uluslararası yönergeler incelenmiştir. Daha sonra arıtılmış kentsel atıksuların sürdürülebilir su yönetimi kapsamında sulama amaçlı geri kazanımı ve yeniden kullanımının gerekliliği vurgulanarak, sulama suyu geri kazanımı için mikrokirleticilerin giderimini hedefleyen arıtma seçenekleri ve bunların hibrit uygulamalarını içeren çalışmalar değerlendirilmiştir. Ayrıca arıtılmış kentsel atıksuların sulamada kullanımında mikrokirleticilerin çevrede yaratacağı olası riskler literatürden araştırılarak derlenmiştir.

2. ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULAR

Kanalizasyon sistemlerine ya da diğer alıcı ortamlara boşaltılan evsel atıksular, endüstriyel atıksular ve/veya yağmursularının çeşitli fiziksel ve biyokimyasal süreçlerden geçirilmesi ile oluşan atıksular arıtılmış kentsel atıksulardır. Bu kapsamdaki evsel atıksular ise yaygın olarak yerleşim bölgelerinden ve yoğunlukla evsel faaliyetler ile insanların günlük yaşam faaliyetlerinin yer aldığı çeşitli hizmet sektörlerinden kaynaklanmaktadır [1]. Arıtılmış kentsel atıksular yüksek hacim, uygulanabilirlik ve iyi bilinen kalite özelliklerinden dolayı sürdürülebilir su yönetimi için en iyi sulama suyu kaynakları arasında gösterilmektedir [2]-[4]. Ancak bu kaynaklarda bulunan ve konvansiyonel sistemler ile yeterli oranlarda giderilemeyen birçok mikrokirletici grubu insan ve çevre sağlığı üzerinde kısa ve uzun vadede negatif etkilere yol açacak potansiyele sahiptir [3]-[8]. Konvansiyonel aktif çamur sistemi (AÇS) veya membran biyolojik reaktör (MBR) ile arıtım sonrasında çıkış sularında ve oluşan arıtma çamurlarında özellikle farmasotikler gibi mikrokirleticiler ng-µg arasında değişen konsantrasyonlarda bulunmaktadır [9],[10]. Ulusal ve uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan 78 adet makalede belediye atıksu arıtma tesisleri ham giriş suyunda analjezikler ve steroid olmayan anti-enflamatuar ilaçlar (NSAID) gibi mikrokirletici konsantrasyonlarının, 1.60 ng/L ile 373 µg/L arasında olduğu belirlenmiştir. Antibiyotik konsantrasyonları ise 1.0 ng/L ile 32 µg/L aralığında tespit edilmiştir [11].

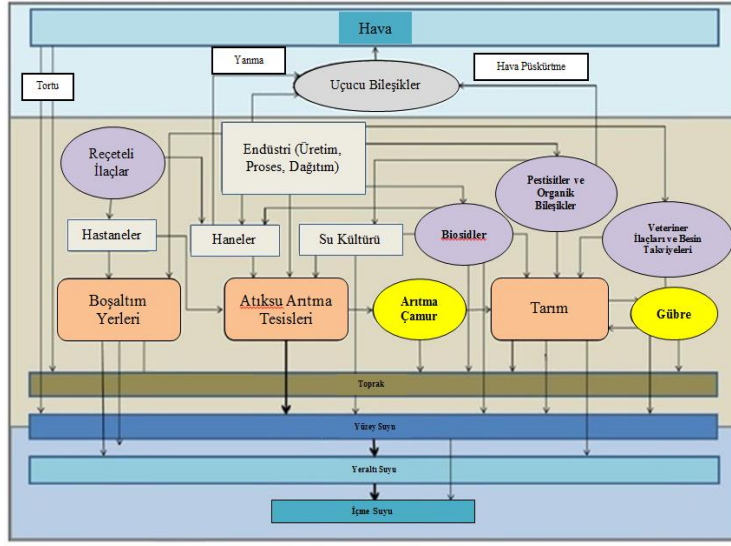
2.1. Arıtılmış Kentsel Atıksulardaki Mikrokirleticiler

Farklı su kaynaklarında, atıksularda ve arıtılmış atıksularda yeni ortaya çıkan kirleticilerin varlığı dikkat çekmektedir. USEPA bu kirleticileri, yasal statüsü olmayan ve çevre-insan sağlığı üzerine olan etkileri tam olarak anlayamayan yeni kimyasallar olarak tanımlamaktadır [12]. Geri kazanılmış sularında da, ng/L düzeyinde kalan, yüksek çeşitlilikte ve karmaşık fizikokimyasal özelliklerle karakterize olan kalıcı kimyasallar vardır ki bu kimyasallar mikrokirleticiler olarak tanımlanmaktadır [13].

Farmasotikler ve kişisel bakım ürünleri (PPCP), endokrin bozucular (EB), fitalatlar, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), poliklorlubifeniller (PCB), pestisitler, bitki büyüme düzenleyiciler, solventler, radyonükleidler, yüzey aktif maddeler, ağır metaller, mikroplastikler, fosfor alev geciktiriciler gibi pek çok grup bileşik kentsel atıksulardaki mikrokirleticiler arasında yer almaktadır [7],[12]. Mikrokirleticiler atıksu arıtma tesislerinde suda çözünerek, çamura absorbe olarak veya hidroliz, oksidasyon ve fotodegradasyon gibi bir çeşit kimyasal veya biyokimyasal süreçte bozularak çevreye karışmaktadırlar (Şekil 1). Birçok biyolojik arıtma tesisinde mikrokirleticiler kolaylıkla enzimatik reaksiyonlar ile biyodönüşüme uğrarlar [14].

Atıksular ile ilgili yapılan birçok çalışmada en sık incelenen mikrokirletici bileşikler ibuprofen, diklofenak, naproksen, ketoprofen ve asetaminofen, trimetoprim, sülfametoksazol, eritromisin, siprofloksasin, endokrin bozucu bileşikler ve diğer farmasotiklerdir [11]. Wang ve diğ. [7], Çin'de bulunan belediye atıksu arıtma tesislerine ait ikincil arıtma giriş ve çıkış suları ile ileri arıtma çıkış sularından 32 atıksu numunesinde toplam 43 yarı uçucu organik kimyasal madde tespit etmişlerdir. İkincil ve ileri arıtılmış nihai atıksularda ise elde edilen kimyasal madde miktarları sırasıyla 196 ve 145'tir. İkincil ve nihai atıksulardaki konsantrasyonlarına bağlı olarak tespit edilen zararlı mikrokirletici grupları, PAH'ler (2-metilnaftalen, fluoranten, piren, naftalen ve fenantren), fosfor alev geciktiriciler [tributil fosfat (TBP), tris(2-kloroetil) fosfat (TCEP) ve tris (1,3-dikloro-2-propil) fosfat (TDCP)], fitalatlar [bis(2-etilheksil)fitalat (DEHP)], benzotiyazoller [benzotiyazol, 2-(metiltiy)-benzotiyazol ve 2(3H)-benzotiazolon] ve fenol şeklindedir.

ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARIN SULAMADA KULLANIMINDA MİKROKİRLİTİCİLERİN OLUŞTURABİLECEĞİ RİSKLER



Şekil 1. Mikrokirleticilerin çevreye giriş yolları [14]

Mikrokirleticiler arasında yer alan mikroplastikler, birincil (primer) ve ikincil (sekonder) mikroplastikler şeklinde iki grupta sınıflandırılır [15],[16]. Özel olarak 5mm'den küçük boyutta üretilen plastik parçacıklarına birincil mikroplastikler denir [17],[18]. Günümüzde hemen hemen tüm dünyada yasaklı olan mikroboncuklar, makyaj, el işi ve tekstil malzemelerinde aşırı miktarda kullanılan simler, endüstriyel üretim peletleri ve geri dönüştürülmüş plastik peletler gibi doğrudan oluşan mikroplastikler birincil mikroplastikler arasındadır [16]. Birçok kişisel bakım ve kozmetik ürününde birincil mikroplastikler kullanılmaktadır. Daha büyük plastiklerin zamanla ve çeşitli etkilerle aşınarak parçalanması neticesinde oluşan mikroplastikler ise ikincil mikroplastiklerdir [18]. Plastik eşyaların dökülmüş parçaları, sentetik tekstil ürünlerinden kopan mikrolifler, ulaşımdan kaynaklanan araç lastiği döküntüleri, hava tozlarındaki sentetik partiküller ikincil mikroplastikler arasında sayılabilir [16]. Atıksularda bulunan mikroplastikler, farmasotikler ve patojen organizmalar gibi zararlı ajanların adsorbe edilmesiyle daha tehlikeli hale gelebilirler [15]. Mikroplastik konulu çalışmaların çoğu, okyanuslardaki plastiklerin %80'i topraklardan geldiği için tatlı su ve karasal ekosistemlere odaklanmıştır [17].

2.2. Mikrokirleticilerle İlgili Yasal Yönergeler

Dünya geneline baktığımızda, bugüne kadar mikrokirleticilerin çoğu için deşarj yönergeleri ve standartları oluşturulamamıştır. Bununla birlikte, AB Su Çerçeve Direktifi 2000/60/EC, Ek X ile 45 öncelikli madde veya madde grubunun bir listesi çıkarılmıştır. Bu liste, su ekolojisinin korunması amacıyla kalite hedefinin çıkarılması için metalleri, böcek ilaçlarını, fitatları, PAH'leri ve endokrin bozucu gibi mikrokirleticileri kapsamaktadır [19]. Ülkemizde bu maddeler için çevre kalite standartları, ilk olarak 30/11/2012 tarih ve 28483 sayılı resmi gazetede yayımlanan "Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği"nde yer almıştır [20]. 10.08.2016 tarih ve 29797 sayılı resmi gazetede yapılan değişikliklerle ismi de "Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği" olarak değiştirilen bu yönetmelikte nehirler/göller ile kıyı ve geçiş suları için mikrokirleticilere ait yıllık ortalama ve maksimum izin verilebilir çevre kalite standartları bulunmaktadır. Yerüstü su kaynakları için belirli kirletici adı altında yer alan; su kütlesini, kalitesini olumsuz yönde etkileyebilecek miktarda deşarj edilen madde veya madde gruplarını içeren 250 adet kirletici ve bunlara ait çevresel kalite standartları, yönetmelikte Ek V-Tablo 4'te verilmektedir. Ayrıca yerüstü su kaynakları için 45 adet öncelikli madde ve bunlara ilişkin çevresel kalite standartları da Ek V-Tablo 5'te belirtilmiştir [21].

Ayrıca, Avrupa Birliği çapında izlemeye yönelik maddelerin bir izleme listesi, 20 Mart 2015 tarih ve 2015/495/AB sayılı kararda rapor edilmiştir. Bu mikrokirleticiler iki ilaç [diklofenak ve sentetik hormon 17- α -etinilestradiol (EE2)], bir doğal hormon [17- β -estradiol (E2)], üç makrolid antibiyotik (azitromisin, klaritromisin ve eritromisin), diğer doğal hormon estron (E1), bazı pestisitler (metiokarb, oksadiazon, imidakloprid, tiyakloprid, tiyametoksam, klotianidin, asetamiprid ve triallat), bir UV filtresi (2-etilheksil-4-metoksisinamat) ve yaygın olarak gıda katkı maddesi olarak kullanılan bir antioksidan (2,6-di-*tert*-butil-4-metilfenol) olarak sıralanabilir [22].

2.3. Arıtılmış Kentsel Atıksuların Sulama Amaçlı Geri Kazanımı/Yeniden Kullanımı

Su kaynaklarındaki azalmalara bağlı olarak ihtiyaç ve rekabetin gün geçtikçe artması kaçınılmazdır. Uluslararası tarımsal araştırma üzerine bir danışma grubunun tahminlerine göre, 2.7 milyon insanın 2025 yılına kadar su kıtlığı olan bölgelerde hayat sürdüreceği beklenmektedir [23]. Su kıtlığı nüfus artışı, yaşam standartlarının yükselmesi, iklim değişikliği,

endüstrileşme, tarım ve insan faaliyetlerinden dolayı bir sorun haline gelmiştir [24]-[26]. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su ihtiyacının tatmin edici ölçüde temiz su kaynaklarından karşılanmasındaki zorluklardan dolayı global ölçekte su kıtlığı artmakta ve büyük bir problem haline gelmekte, bu bakımdan sulama suyu kaynağı olarak atıksu arıtma proseslerinden geri dönüştürülmüş su kullanımı önemli bir strateji olarak dikkat çekmektedir [27]-[34]. Bunun yanısıra belediye atıksularına göre daha düşük organik kirletici ve patojen içeriğine sahip gri suların arıtımı ve yeniden kullanımı planları da Avustralya ve Akdeniz ülkeleri gibi su stresli bölgelerde giderek yaygınlaşmaktadır [35]. Birleşik Arap Emirlikleri'nde (BAE) Sharjah ve diğer şehirlerde özellikle peyzaj sulama için atıksuyun yeniden kullanımı, ülkenin su kıtlığını hafifletmek ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek için bir su yönetimi stratejisi olarak yaygın olarak uygulanmaktadır [36].

Son yıllarda zorlayıcı AB düzenlemelerinden dolayı kentsel arıtılmış atıksuların kalitesinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Ayrıca endüstri, tarım ve kentsel tüketim gibi pek çok sektörde yüksek kalitede suya olan ihtiyaç artmıştır. Bu bakımdan atıksuların ve/veya ikincil arıtma çıkış sularının geri kazanımı ve yeniden kullanımı, sürdürülebilir kentsel su yönetimi yaratmak ve su kaynaklarını korumak için hassas, ekonomik ve güvenilir özellikte bir araç olarak kabul edilmektedir [2],[26],[37],[38]. Bu konuda Amerika, Japonya ve Avustralya suyun yeniden kullanımı ile ilgili sayıları hızla artan proje geliştirmektedir. Avrupa ve Akdeniz Bölgeleri gibi yetersiz su dengesine sahip alanlarda da çeşitli uygulamalar mevcuttur [39]-[41]. Avrupa Birliği ve üye devletleri ise sürdürülebilir bir su yönetimi süreci sağlamak için başarılı bir şekilde önlemler almaktadır. 1991-2025 yılları arasında Avrupa'da yeniden kullanım için arıtılmış belediye atıksularının kullanımının 2 katına çıkması beklenmektedir. Türkiye atıksuyun yeniden kullanımı ve uygulaması için büyük potansiyele sahiptir. Yeterince sosyal farkındalık olmasına rağmen, politika ve yasaların eksikliği, yeniden kullanım uygulamalarının önündeki ana engeldir [8].

Bugüne kadar arıtılmış kentsel atıksuların kullanımı için ortak uygulama alanı tarımsal sulama iken [39], son yıllarda membran teknolojilerin kullanıldığı su geri dönüşüm projeleri arasında akiferin beslenmesi, kentsel, endüstriyel, rekreasyonel ve çevresel kullanımlar, soğutma içeren endüstrilerde proses suyu eldesi, dolaylı olarak yangın suyu, tuvaletlerde geri kazanım, doğrudan içme suyu olarak geri kazanım alternatifleri ve bunların kombinasyonlarını içeren uygulamaları da ilgi çekmektedir [2],[8],[42]-[45]. Ancak araştırmalar göstermektedir ki; global ölçekte sadece atıksularda değil doğal sular da arıtılmış atıksularda bile kimyasal ve mikrobiyal kirleticilerin yanı sıra var olan toksik kirleticiler halk sağlığı açısından tehlike yaratmaktadır. Bu kirleticiler kentsel, tarımsal ve endüstriyel atıksu kaynaklarından ve konvansiyonel ikincil arıtma ile arıtılmış evsel atıksulardan genellikle yetersiz arıtma yoluyla su kaynaklarına karışmaktadırlar [23],[44].

3. SULAMA SULARINDAKİ MİKROKİRLETİCİLERİN ÇEVRESEL RİSKLERİ

Çeşitli patojenler (viral, bakteriyel, parazitik protozoa ve helmintler) ve mikrokirleticiler (farmasotikler, dezenfeksiyon yan ürünleri, pestisitler, metaller vb.) deri yoluyla alındığında, solunduğunda veya emildiğinde birçok riski beraberinde getirmektedir. Bu patojenler ve kimyasallar, geri kazanılmış suda bulunursa akut hastalıktan kronik hastalıklara ve ölümlere kadar bir dizi sağlık sonucuna neden olabilmektedir [8]. Bazı farmasotik sınıfları, örneğin antibiyotikler mikroorganizma genomlarında uzun süreli ve geri dönüşümsüz değişikliklere neden olduğundan, su kaynaklarında antibiyotik birikimi potansiyel bir tehlikedir. Bu nedenle su ortamından uygun ve daha etkili farmasotik eliminasyonu oldukça önemlidir [10].

Atıksuların yeniden kullanımında çok farklı risk türleri olduğundan, risk yönetimi süreci karmaşıklığı artırmaktadır [26]. Özellikle geri kazanılmış suda bulunan geniş yelpazedeki mikrokirleticilerle ilişkili sağlık riskleri bakımından gerekli yeniden kullanım kriterleri yerine getirilse dahi artan geri kazanılmış su kullanımının güvenliği önem teşkil etmektedir [13]. PPCP'ler toplumsal sağlığın ayrılmaz bir parçasıdır. Ancak bu mikrokirleticilerin arıtılmış atıksular da dahil olmak üzere çeşitli çevresel alanlardaki varlıkları, olası insan ve ekolojik sağlık etkileriyle ilgili endişelere yol açmaktadır. Ayrıca atıksuyun yeniden kullanımında insan sağlığı risk değerlendirmesi ile ilgili çalışma sayısı oldukça sınırlıdır [36]. Atıksulardaki PPCP'lerin konsantrasyonu arttıkça ekotoksosite ve insan toksisitesi etkileri de artmaktadır [47].

Mikrokirleticiler sınıfında yer alan mikropplastikler katkı malzemesi içermeleri, toksik kirleticileri adsorplayabilmeleri, canlılar tarafından besin zannedilerek yutulabilmeleri, atıksu arıtma tesislerinde tamamıyla giderilememeleri, atmosferde ve su kaynaklarında kolayca taşınmaları ve doğada zor yok olmaları gibi özelliklerinden dolayı çevre ve sağlık açısından büyük tehlike arz etmektedir. Bu kirleticiler çeşitli canlılar tarafından bünyelerine alındıktan sonra sindirim, boşaltım, üreme ve büyüme sistemlerinde ciddi problemler yaşanmaktadır. Bunun yanısıra mikron boyutundaki plastikler, organik kirleticileri çok iyi adsorplayabildiğinden, bu kirleticilerin besin zinciri yoluyla bir üstte bulunan canlılara aktarılmasına bir vasıta olabilmektedir. Bununla birlikte, nanoplastikler daha kolay emilir ve suda yaşayan türlerde ve diğer hayvanlarda beyin, karaciğer ve diğer dokularda birikebilir [16]. PCB'ler gibi kalıcı organik kirleticiler (KOK) mikropplastiklere adsorbe edilerek ortam konsantrasyonlarından 1 milyon kat daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir ve bu bileşikler organizmalar içinde daha fazla desorbe edilebilir, bu da daha yüksek trofik seviyelerde KOK biyoakümüülasyonunu şiddetlendirir [18].

Yapılan çalışmalar daha çok mikrokirleticilerin biyolojik etkilerine (biyoluminesans inhibisyonu, fotosentez inhibisyonu, suda yaşayan organizmalar üzerindeki olumsuz etkiler, endokrin bozulma etkileri, genotoksosite vb.) ve ekolojik tehditlerine odaklanmıştır. Bununla birlikte, geri kazanılmış suların yeniden kullanımı sırasında tespit edilen çok çeşitli mikrokirleticilere maruz kalmanın neden olduğu olası sağlık riskleri hakkında çok az bilgi vardır. Geri kazanılmış suyun yeniden kullanımı

ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARIN SULAMADA KULLANIMINDA MİKROKİRLETİCİLERİN OLUŞTURABİLECEĞİ RİSKLER

sırasında insan sağlığı üzerindeki mikrokirletici etkisinin ihmal edilmesi, bu maddelerin tespit edilmesindeki zorluklara, insan sağlığına ilişkin toksisite verilerinin bulunmamasına ve değerlendirme yöntemlerindeki eksikliklere bağlanabilir. Fizikokimyasal özelliklerine dayanarak geri kazanılmış su elde etmek için gerekli arıtma sistemlerinde mikrokirleticilerin uzaklaştırılmasının iyileştirilmesi ve potansiyel sağlık riskinin azaltılması mümkün olabilir [13].

Semerjian ve diğ. [36] yaptıkları çalışmada, arıtılmış atıksuyun özellikle peyzaj sulama amacıyla tekrar kullanıldığı Sharjah Atıksu Arıtma Tesisi (Biyolojik Arıtma+Hızlı Kum Filtrasyonu+UV Dezenfeksiyon sistemi içeren) atıksularında tanımlanan 10 farmasotik için insan sağlığı risk değerlendirmesi yapmayı amaçlamışlardır. Çalışmada risk değerlendirmesi alıcıları; yeşil alanlarda oynayan çocuklar, yetişkin peyzaj çalışanları ve arıtılmış atıksu ile sulanan atletik ve golf sahalarındaki yetişkin kullanıcılar olarak tanımlanmıştır. Alıcıların 10 farmasotiğin her birinin hem dermal hem de yutmaya maruz kalma risklerini değerlendirmek için kullanılan risk değerlendirme modelinde, tüm farmasotikler için güvenli maruz kalma risk oranı $RO < 1$ olarak belirlenmiştir. Bu durum tüm alıcılar için ilaçlarla ilgili sağlık risklerinin algılanmadığı anlamına gelmektedir. İncelenen farmasotikler arasında en yüksek risk oranı sıralaması; asetaminofen, metoprolol, siprofloksasin, eritromisin, ofloksasin, sülfadiazin, sülfametoksazol, sülfapiridin, risperidon ve sülfometazin şeklindedir. İlaçlardan en fazla etkilenen alıcı grubu ise peyzaj çalışanları olarak belirlenmiştir.

Kalıcılıklarından dolayı, bazı organik mikrokirleticiler, insan sağlığı ve çevre üzerinde potansiyel önemli etkileri ile toksik olabilir ve biyolojik olarak birikebilirler. Bu biyoakümülyasyon tipik olarak bir bileşiğin yüksek lipid çözünürlük özelliği ve uzun bir süre boyunca canlı organizmaların yağ dokularında birikme kabiliyeti ile ilişkilidir. Bu kalıcı bileşik besin zincirini hareket ettirir ve bazı organizma dokularında işlenip metabolize edildiklerinde konsantrasyonları artar, bu da ortamdaki toksisitesini artırır [14].

PPCP'lere sürekli maruz kalmak, çevredeki konsantrasyonları düşük olmasına rağmen, sucul ortamlar ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel toksisite etkileri nedeniyle kritik bir husustur [47]. Bu konuda Ma ve diğ. [13] tarafından yapılan çalışmaya göre tespit edilen tüm mikrokirletici maddeler ile ilişkili kanserojen ve kanserojen olmayan riskler ihmal edilebilir düzeyde olsa da, PPCP'lerin tehlike oranları, toplam tehlike oranının %92.03-97.23'ünü oluşturmaktadır. Buna rağmen PPCP'lerin peyzaj gölündeki ekolojik süreçler (adsorpsiyon, biyolojik bozulma, fotoliz, su bitkilerinin ve hayvanlarının aracılık ettiği diğer faaliyetler) boyunca kayda değer şekilde giderimi ile geri kazanılmış su kullanımının güvenliğinin artırılabilceği ve mikrokirleticilerin neden olduğu sağlık riskinin azaltılabileceği çalışmada tespit edilen bir diğer husustur.

126 adet PPCP'nin ileri arıtma proseslerinde yaşam döngüsü değerlendirmesinin yapıldığı bir çalışmada; 17 β -estradiol, amoksisilin, misk keton, irgarol, 17 α -etinilestradiol, oktilfenol, bendroflumetiazit, ofloksasin, izoproturon ve triklosan kirleticilerinin tatlı su ekotoksitesitesi için en yüksek konsantrasyon faktörü değerlerine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. İnsan toksitesitesine katkısı yüksek olan kirleticiler ise 17 α -etinilestradiol, sertralin, 17 β -estradiol, estron, diklofenak, paroksetin, terbutirin, diazepam, atorvastatin ve tonalidtir. Ayrıca, tatlı su ekotoksitesitesi insan toksitesitesinden çok daha yüksek bulunmuştur. Çünkü insan vücudu PPCP'lere tatlı suların daha toleranslıdır [47].

Papaioannou ve diğ. [55] tarafından yapılan çalışmada; atıksu arıtma tesisi çıkış suları ile sulanan bir serada toprakta ve pancar bitkisinin yenilebilir kısmında 7 farklı farmasotik (kafein, bisoprolol, karbamazefin, klaritromisin, metoprolol, sülfametoksazol ve trimetoprim) arasındaki etkileşimler incelenmiştir. Atıksuyun yeniden kullanımı ile toprakta birikmiş PPCP'ler arasındaki etkileşimlerin %99 sinerjistik olduğu; PPCP'lerin interaktif kapasitesindeki değişkenliğin, büyük olasılıkla her PPCP'nin spesifik kimyasal özelliklerinden kaynaklandığı çalışmada elde edilen sonuçlar arasındadır.

4. SULAMA SUYU GERİ KAZANIMINDA ARITMA SEÇENEKLERİ

İnsanların temas halinde olduğu alanlarda kentsel atıksuların sulama amaçlı geri kazanımında özellikle halk sağlığı bakımından mikrokirleticilerin en iyi şekilde giderilmesi gerekmektedir [2],[36]. Atıksu üzerine Avrupa yönetmelikleri biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ₅), askıda katı madde (AKM), azot, fosfor, bakteri vb. parametrelerin de yüksek giderim yüzdeleri için gelişmiş arıtma proseslerine ihtiyaç olduğunu bildirmektedir [46]. Bu nedenle sulama ve diğer amaçlarla kentsel atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı açısından mutlaka membran teknolojileri, aktif karbon ve ileri oksidasyon prosesi (İOP) gibi ileri arıtım teknolojileri ne ihtiyaç duyulmaktadır [41],[43]. İleri arıtma olarak nitelendirilen üçüncül arıtma; azot, fosfor, ağır metaller, biyolojik olarak parçalanamayan dirençli organikler, bakteri ve virüsleri gidermek için konvansiyonel ikincil arıtma seviyesinin üzerinde bir performans göstermektedir. Bu amaçla kullanılan membran filtrasyon uygulamaları atıksuyun yeniden değerlendirilmesi ve kullanımında diğer fiziksel arıtma teknikleri ile karşılaştırıldığında çeşitli avantajlarından dolayı tercih edilir hale gelmiştir. Ayrıca mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve düşük basınçlı ters ozmoz (TO) membranları kullanılarak oluşturulan entegre membran sistemleri de geri kazanılmış su kullanımı ile ilgili artış gösteren projelerde ana arıtma prosesi olarak uygulanmaktadır [2],[24],[38],[44].

Sucul çevrede mikrokirleticilerin giderimi hakkında yapılan birçok çalışma, AÇS veya MBR işlemleriyle mikrokirletici maddelerin uzaklaştırılması üzerine odaklanmıştır. Bu iki prosesin mikrokirletici giderim performansı bakımından önemli bir farkı yoktur [11]. Atıksu yeniden kullanımının başarılı bir şekilde gelişmesi, ortaya çıkan mikrokirleticilerle başa çıkabilen modern atıksu arıtma tesislerinin kurulması veya mevcut tesislerin yükseltilmesi ile yakın ilişki içindedir. Mikroorganizmalar

dahil birçok partikülü sudan uzaklaştırdığı için çok işlevli ve uygun maliyetli membran filtrasyon yöntemleri ham atıksuya doğrudan uygulanan yenilikçi teknolojilerden biridir [8]. Her ne kadar geleneksel atıksu arıtma işlemleri ile bir miktar giderilse dahi kalıntı PPCP'ler ikincil arıtılmış atıksularda bulunmaktadır. Gelişmiş atıksu arıtma teknolojilerinin, kalıntı PPCP'lerin daha yüksek verimde elimine edilmesi için büyük bir potansiyele sahip olduğu kanıtlanmıştır [47].

Bunun yanında membran filtrasyon ve İOP gibi hibrit sistemlerin, eşzamanlı ayırma ve parçalanma mekanizmalarına sebebiyet vermesi muhtemeldir. Geleneksel membran filtrasyon prosesleri ile kirleticilerin çoğu giderilebilir, ancak arıtılmış suda en küçük, bozulmamış ve stabilize edilmiş farmasotik atıklar kalabilmektedir. İOP ise arıtılmış atıksuda kalan biyolojik parçalanmaya dirençli ve toksik bileşikler çeşitli yan ürünlerle birlikte özellikle hidroksil radikalleri aracılığıyla son ürünlere dönüştürebilme yeteneğine sahiptir. Membran prosesler ile İOP'lerinin atıksudaki farmasotik kalıntıların ortadan kaldırılmasında tamamlayıcı bir etki göstererek membran performansını da arttıran hibrit sistem uygulamaları son birkaç yılda giderek artış göstermiştir [10]. Bu yaklaşım iki prosesin sadece avantajlarını birleştirmekle kalmaz, aynı zamanda birbirlerinin zorluklarını / dezavantajlarını da ortadan kaldırır. Entegre membran filtrasyonu-İOP'leri, farmasotik gibi mikrokirleticilerin su/atıksudan uzaklaştırılması için incelenmiş olan kombine veya sıralı işlemler bütünüdür. Membran filtrasyonu belediye ve endüstriyel su/atıksu arıtımında giderek daha fazla uygulanmakta ve sürdürülebilir su geri kazanımı için uygun fiyatlı bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, membran kirlenmesi sorunu ve konsantrinin uygun şekilde bertaraf edilmesi veya arıtılması ihtiyacı bu teknikte ciddi bir problemdir [48],[49]. Öte yandan İOP, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen daha küçük moleküllerin oluşumuna kadar birçok kirleticiyi gideren çevre dostu kimyasal, fotokimyasal veya elektrokimyasal yöntemlerdir. Ancak bu proseste ana kirleticilerden daha zararlı toksik yan ürünler oluşabilmekte ve bunların sucul ortamdan uzaklaştırılması için tamamlayıcı işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Kombine membran filtrasyonu-İOP gibi hibrit sistemler bu tamamlayıcı etkiyi sağlamaktadır [10],[49].

Çeşitli kaynaklardan sürekli olarak atıksu arıtma tesislerine ulaşan yüksek miktardaki mikroplastikler [18], çoğunlukla çöktürme veya yüzyeyden sıyırma işlemleri ile atıksudaki katı parçacıkların uzaklaştırılması sırasında tutulmaktadır. Daha küçük mikroplastikler atıksu arıtma tesislerinden alıcı ortamlara kaçabilmektedir [15]. Yapılan çalışmalarda mikroplastiklerin yaklaşık %35-59'unun ön arıtma sırasında atıksudan uzaklaştırılabileceği ve %50-98'inin ise birincil arıtma ile giderilebileceği bildirilmektedir. İkincil arıtma, atıksudaki mikroplastikleri %0.2-14'e kadar, üçüncül arıtma ise %0.2-2'ye kadar gidermektedir [18].

Talvitie ve diğ. [50] yaptıkları çalışmada, 4 farklı belediye atıksu arıtma tesisi çıkış suyundan MBR ile %99.9, hızlı kum filtrasyonu ile %97, çözünmüş hava flotasyonu ile %95 ve diskfiltre ile %40-98.5 mikroplastik giderim verimi elde etmişlerdir. Ancak üçüncül arıtma prosesleri tarafından mikroplastiklerin uzaklaştırılma etkinliğinin güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için ön-arıtma ve ikincil arıtma proseslerinin değerlendirilmesi için gerekenden daha büyük numune alma hacimleri gerekmektedir [18].

Arıtılmış kentsel suların tarımsal kullanımında tarım işçilerinin sağlığı ile birlikte en önemli endişeler; çevre ve insan sağlığı yönleri bir başka deyişle üretilen yiyeceklerin kalite ve güvenliği ile ilgilidir. Diğer kaygılar topraktaki infiltrasyon hızı ve tuzluluk, ağır metal birikimi ve nütrientlerin yol açtığı kirliliktir. Bu endişeleri ortadan kaldırmak ve özellikle tarımsal üretim için uygun çıkış suları üretmek için kesin çözüm, ileri arıtma tekniklerinin yaygınlaştırılmasıdır. Kentsel atıksuların sulama suyu üretimi için kullanımında uygulanan arıtma teknolojileri Tablo 1'de gösterilmektedir [33].

Ma ve diğ. [13] tarafından yapılan çalışmada; evsel atıksudan alınan örnekler anaerobik-anoksik-oksik üniteyi takiben membran biyoreaktör içeren A²O-MBR sisteminden geçirilip daha sonra çevre düzenlemesi, tuvalet temizleme, yol yıkama, bahçe vb. kullanılmak üzere bir peyzaj gölünde toplanmıştır. Sistemde alınan örneklerde 58 organik mikrokirletici, 13 PAH, 16 fenol, 3 pestisit ve 26 PPCP tespit edilmiştir. A²O prosesi süresince %51,43 PAH, %13,3-100 aralığında ise benzo(b)fluoranten hariç diğer önemli kimyasallar giderilmiştir. MBR arıtma prosesi süresince PAH giderimi oldukça düşüktür (%14,81). A²O-MBR prosesi sonrası ise pestisit ve fenol giderim verimi >%80, PPCP giderim verimi ise orta düzeydedir (%56,85). Peyzaj gölünde biriktirilen suyun ekolojik süreçten geçmesiyle ise PPCP'lerin daha da yüksek verimde uzaklaştırıldığı görülmüştür.

Vatankhah ve diğ. [51] yaptıkları çalışmada; US-Nevada'da üçüncül arıtmadan temin ettikleri geri kazanılmış atıksuyu pilot ölçekte dizayn edilen ozon-granül aktif karbon (O₃/GAC) sisteminden geçirerek 16 mikrokirleticinin giderimini araştırmışlardır. Ozonlama ile I. Grup mikrokirletici (triklosan, sülfametoksazol, karbamazefin, trimetoprim ve naproksen) için 0,3 mg O₃/mg DOC (çözünmüş organik karbon)'de >%96, 0,5 ve 0,85 mg O₃/mg DOC'de ise >%98 giderim verimi elde edilmiştir. II. Grup gemfibrozil ve fluoksetin mikrokirleticileri I. Gruba göre daha düşük verimde giderilmiştir (0,3 mg O₃/mg DOC'de %83 ± 1.8 gemfibrozil, %76 ± 1.9 fluoksetin; 0,5 mg O₃/mg DOC'da %89 ± 1.0 gemfibrozil, %94 ± 1.2 fluoksetin; 0,85 mg O₃/mg DOC'de >%98 gemfibrozil ve fluoksetin). III. grup mikrokirletici için ise (DEET, primidon, sükralo, meprobamat ve N-Nitrozomorfolin) I ve II. grup mikrokirleticiye göre çok daha düşük verimde giderim sağlanmıştır. Adsorpsiyon deneylerinde 0,5 gr/L granül aktif karbon dozunda gemfibrozil dışındaki diğer mikrokirleticiler için %3-12 giderim verimi elde edilmiştir. Naproksen, trimetoprim ve gemfibrozil için giderim verimleri sırasıyla %43, %50 ve %56 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; sadece ozonlama veya adsorpsiyonla TCEP, sükralo ve meprobamat mikrokirleticileri için iyi bir giderim sağlandığı, buna kıyasla O₃/GAC'de bir katalizör olarak GAC'nin mikrokirletici giderimine katkıda bulunmadığı ve 20 saatin üzerinde bir işletme süresi sağlandığında sükralo ve N-nitrozomorfolin haricindeki belirli mikrokirleticilerin azaltıldığı tespit edilmiştir.

ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARIN SULAMADA KULLANIMINDA MİKROKİRLETİCİLERİN OLUŞTURABİLECEĞİ RİSKLER

Tablo 1. Sulama suyu üretimi için uygulanan arıtma teknolojileri [33]

Teknoloji	Arıtma Yeteneği	Avantajları	Dezavantajları
NaOCl	Yüksek bakteri yok edici etki; EC giderimi yok, %10-NO ₃ giderimi ve %18-PO ₄ giderimi	Düşük işletme maliyetleri	Yüksek işletilebilme, yüksek yan ürün oluşumu, orta yatırım maliyeti
Ozon	Yüksek bakteri yok edici etki	Düşük yan ürün oluşumu	Yüksek işletilebilme, orta işletme maliyetleri, yüksek yatırım maliyetleri
UV	Yüksek bakteri yok edici etki	Yan ürün oluşumu yok, düşük işletme maliyetleri	Yüksek işletilebilme, orta yatırım maliyeti
TiO ₂	Koliformların yüksek inaktivasyonu	Güneş fotokatalizi durumunda muhtemel yenilenebilir enerji kullanımı, ucuz katalizörler ve tesislerin kullanımı, yan ürün oluşum yok	Kalıntı bakteri yok edici etki ve yavaş kinetik davranış eksikliği
Havuzlar, yapay sulak alanlar	EC giderimi yok, bakteri giderim verimi 1-6 log birim arasında bakteri taşınma, NH ₄ giderimi>%70, TP giderimi>%65, için %55 Cr, %25-35 Ni, %25-87 Zn, %9 Cu, %33 Cd, %75 Co giderimleri	Düşük bakım maliyetleri ve enerji kullanımı, yan ürün oluşumu yok	Meteorolojik koşullara bağlı olarak verimlilik, büyük alan ihtiyacı
Orta filtrasyon	Fekal koliform giderimi: 0.6-1.5 log-birim, TN:5mg/L, PO ₄ -P:4-10mg/L (Nihai konsantrasyon)	Düşük yatırım maliyeti, düşük işletme maliyetleri	Fekal koliform giderimi düşük
Membran filtrasyon	Bakteriyel giderim: > 5 logaritmik birim, gözenek büyüklüğüne göre nütrient giderimi, TO ile %90 EC, %83 Na ve %80 Cl giderimi, ayrıca nütrient eş zamanlı olarak sodyum iyonları ve çift değerli kasyon giderimi sağlanır. NF nütrientleri içeren tek değerli iyonlardan çok çift değerli iyonları rejekt eder, Cr için %75, As için >%80 giderim sağlar.	Eşzamanlı dezenfeksiyon ile EC ve ağır metal giderimi	Yüksek yatırım masrafları, yüksek işletme maliyeti
Elektroliz	Düşük akım yüklemeye ile etkili dezenfeksiyon (0.9 kA hm ⁻³ 'ün altında)	Geniş mikroorganizma spektrumunu öldürme etkisine sahip	Perkloratların önemli miktarda formasyonu

Başka bir çalışmada, pestisitlerin giderimi için ileri arıtma yöntemi olarak ozonla oksidasyon ve GAC ile filtrasyonun etkili olduğu, ancak gelişmiş oksidasyon proseslerinde aktif karbon doygunluğu ve toksik kimyasal yan ürünlerin oluşumu gibi problemlerin gelişebileceği belirtilmektedir [8].

Semreen ve diğ. [52] tarafından yapılan çalışmada, “Biyolojik Arıtma+Hızlı Kum Filtrasyonu+UV Dezenfeksiyon Sistemi” içeren Birleşik Arap Emirlikleri Sharjah Atıksu Arıtma Tesisi girişi ve çıkışı suyunda 10 farklı farmasotik için elde edilen giderim verimleri %31-96 arasında değişmektedir. Tesiste arıtma sonrası en yüksek giderimin asetaminofen, en düşük giderimin ise eritromisin için elde edildiği belirtilmektedir.

Wang ve diğ. [7] tarafından yapılan çalışmada, Çin’de bulunan belediye atıksu arıtma tesislerinde uygulanan ileri arıtma yöntemlerinden pıhtılaşma/sedimentasyon-kum filtrasyonu ile %36.9±%5.9, UV bazlı proses ile %47.5±%19.4, ozonlama ile %78.3±%2.2 ve TO prosesi ile %99.3 mikrokirletici giderim verimi elde edilmiştir. Mikrokirleticilerin tipine bağlı olarak ikincil arıtma süresince ise giderim verimi ortalama %87.0±%5.9 olmuştur.

Membran ayırma (NF90 ve BW30 membranları ile) ve fotokatalitik oksidasyonun (TiO₂ ya da Fe₂O₃/SBA-15) birleştirilerek, atıksulardan farmasotik kirleticilerin gideriminin incelendiği bir çalışmada, bu kombinasyonun sadece farmasotiklerin etkili bir şekilde atıksudan ayrılmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda foto-oksidasyon yoluyla bozunmasını da sağladığı belirlenmiştir [53].

Başka bir çalışmada süspanse TiO₂ ve batık bir ultrafiltrasyon hollow fiber membrandan oluşan fotokatalitik reaktörde, 33 iz organik kirletici maddenin fotokatalitik parçalanması değerlendirilmiş, 1 saat reaksiyondan sonra 18 adet bileşiğin tamamen

A. Yaşar, E. Can Doğan

bozulduğu, 14 adet bileşikten oluşan bir grubun %50-88 oranında giderildiği ve tris(2-kloroetil)fosfat miktarının ise azaltılmadığı tespit edilmiştir [54]. Zhou ve diğ.[48] tarafından; belediye atıksu arıtma tesisi terz ozmoz konsantresindeki organik kirleticilerin giderimi için lab-ölçekte 4 basit ileri oksidasyon işlemi [heterojen fotokatalitik oksidasyon, sonolisis, ozonlama (O₃) ve H₂O₂ oksidasyonu] ve bunların kombinasyonları araştırılmıştır. Çalışmada TO konsantresindeki organik kirleticilere ait en iyi giderim veriminin (%95), 6 saatlik sürede FeCl₃ koagülasyon + fotokataliz (UVC/TiO₂) entegrasyonu ile sağlandığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Atıksuların geri kazanımında arıtma yönteminin seçimi, mevcut su kaynaklarının durumu, konum, arazi, kültür gibi birçok sosyo-ekonomik faktöre bağlıdır. Aynı şekilde atıksu geri kazanım politikaları ve düzenlemeleri de halkın bilinçlendirilmesi ile birlikte önemlidir. Bazı bölgelerde suyun geri kazanımına olan ilginin artmasına bağlı olarak, mevcut atıksu arıtma tesislerinin modifiye edilmesi veya yeni gelişmiş atıksu arıtma tesislerinin inşa edilmesi atıksuların yeniden kullanım politikalarının ilk hedefi olmalıdır. Yeni atıksu arıtma tesisleri yapımında mikrokirleticilerin varlığı ve giderimine yönelik ileri arıtma seçenekleri mutlak surette dikkate alınmalıdır. Atıksu karakterizasyonuna bağlı olarak, sulama ve diğer amaçlarla kentsel atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı için membran ve ileri oksidasyon gibi teknolojiler ve bunların hibrit uygulamaları yaygınlaştırılmalıdır. Bu süreçte aktif olarak rol alacak tüm bilim insanlarının en ince ayrıntıya kadar yapılacak değişiklikleri planlaması, uygulama sürecinde ise olası makro ve mikrokirleticilerin sürekli olarak izlenerek artırılmış atıksuların geri kazanım sürecine dahil edilmesi halk ve çevre sağlığı açısından önem teşkil etmektedir. Bununla birlikte özellikle mikrokirleticilerle ilgili deşarj standartlarının ülkemizdeki sulama ile ilgili yönetmeliklerle net bir şekilde ilişkilendirilmesi atıksuların sulamada kullanımı üzerine var olan endişeleri ortadan kaldıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği,” Ankara, Türkiye, R.G. Tarih-No: 08.01.2006-26047, 2006.
- [2] J. L. Acero, F. J. Benitez, A. I. Leal, F. J. Real, F. Teva, “Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 177, no. 1-3, May., pp. 390-398, 2010.
- [3] F. Zanetti, G. De Luca, R. Sacchetti, “Performance of a full-scale membrane bioreactor system in treating municipal wastewater for reuse purposes,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 10, May., pp. 3768-3771, 2010.
- [4] E. Can Doğan, A. Yaşar, Ü. Şen, C. Aydın, “Water recovery from treated urban wastewater by ultrafiltration and reverse osmosis for landscape irrigation,” *Urban Water Journal*, vol. 13, no. 6, Jan., pp. 553-568, 2016.
- [5] P. Jin, X. Jin, X. C. Wang, X. Shi, “An analysis of the chemical safety of secondary effluent for reuse purposes and the requirement for advanced treatment,” *Chemosphere*, vol. 91, no. 4, Apr., pp. 558-562, 2013.
- [6] N. R. Mizyed, “Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas,” *Environmental Science Policy*, vol. 25, Jan., pp. 186-195, 2013.
- [7] J. Wang, Z. Tian, Y. Huo, M. Yang, X. Zheng, Y. Zhang, “Monitoring of 943 organic micropollutants in wastewater from municipal wastewater treatment plants with secondary and advanced treatment processes,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 67, May., pp. 309-317, 2018.
- [8] B. Maryam ve H. Büyükgüngör, “Wastewater reclamation and reuse trends in Turkey: Opportunities and challenges,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 30, Aug., pp. 100501, 2019.
- [9] P. Verlicchi, A. Galletti, M. Petrovic, D. Barcelo, “Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options,” *Journal of Hydrology*, vol. 389, no. 3-4, Aug., pp. 416-428, 2010.
- [10] N. Rosman, W. N. W. Salleh, M. A. Mohamed, J. Jaafar, A. F. Ismail, Z. Harun, “Hybrid membrane filtration-advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residue,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 532, Dec., pp. 236-260, 2018.
- [11] C. Grandclément, I. Seyssiecq, A. Pira, P. Wong-Wah-Chung, G. Vanot, N. Tiliacos, N. Roche, P. Doumenq, “From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A Review,” *Water Research*, vol. 111, Mar., pp. 297-317, 2017.
- [12] A. Yaşar, E. Can Doğan, A. Arslan, “Hastane atıksularında makro ve mikro kirleticiler ve arıtma seçenekleri,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 29, no. 2, Apr., pp. 144-158, 2013.
- [13] X. Y. Ma, X. C. Wang, X. C. Wang, Y. Wang, D. Wang, H. H. Ngo, “Micropollutants removal and health risk reduction in a water reclamation and ecological reuse system,” *Water Research*, vol. 138, July, pp. 272-281, 2018.

ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARIN SULAMADA KULLANIMINDA MİKROKİRLETİCİLERİN OLUŞTURABİLECEĞİ RİSKLER

- [14] P. Burkhardt-Holm, "Linking water quality to human health and environment: The fate of micropollutants, institute of water policy," Institute of Water Policy, *National University of Singapur*, pp. 1-62, 2011.
- [15] J. C. Prata, "Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 129, no. 1, Apr., pp. 262-265, 2018.
- [16] M. Yurtsever, "Küresel plastik kirliliği nano-mikroplastik tehlikesi ve sürdürülebilirlik," *Çevre Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 1, ISBN:978-605-7594-06-8, pp. 171-197, 2018.
- [17] Z. Long, Z. Phan, W. Wang, J. Ren, X. Yu, L. Lin, H. Lin, H. Chen, X. Jin, "Microplastic abundance, characteristics and removal in wastewater treatment plants in a Coastal City of China," *Water Research*, vol. 155, Feb., pp. 255-265, 2019.
- [18] J. Sun, X. Dai, Q. Wang, M. C. M. van Loosdrecht, B-J. Ni, "Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal," *Water Research*, vol. 152, Jan., pp. 21-37, 2019.
- [19] The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, Annex-X, 2000.
- [20] "Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği ve Ekleri," Ankara, Türkiye, R.G. Tarih ve Sayı: 30.11.2012-28483, 2012.
- [21] "Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ve Ekleri," Ankara, Türkiye, R.G. Tarih ve Sayı: 10.08.2016-29797, 2016.
- [22] M. O. Barbosa, N. F. F. Moreira, A. R. Ribeiro, M. F. R. Pereira, A. M. T. Silva, "Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495," *Water Research*, vol. 94, May, pp. 257-279, 2016.
- [23] J. Radjenovic, M. Petrovic, F. Ventura, D. Barcelo, "Rejection of pharmaceuticals in nanofiltration and reverse osmosis membrane drinking water treatment," *Water Research*, vol. 42, no. 14, Aug., pp. 3601-3610, 2008.
- [24] K. Chon, S. J. Kim, J. Moon, J. Cho, "Combined coagulation-disk filtration process as a pretreatment of ultrafiltration and reverse osmosis membrane for wastewater reclamation: An autopsy study of a pilot plant," *Water Research*, vol. 46, no. 6, Apr., pp. 1803-1816, 2012.
- [25] P. Bhattacharya, S. Ghosh, A. Mukhopadhyay, "Efficiency of combined ceramic microfiltration and biosorbent based treatment of high organic composite wastewater: An approach for agricultural reuse," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 1, no. 1-2, June, pp. 38-49, 2013.
- [26] C. Furlong, S. De Silva, K. Gan, L. Guthrie, R. Considine, "Risk management, financial evaluation and funding for wastewater and stormwater reuse projects," *Journal of Environmental Management*, vol. 191, Apr., pp. 83-95, 2017.
- [27] G. Murtaza, A. Ghafoor, M. Qadir, "Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation," *Agricultural Water Management*, vol. 81, no. 1-2, Mar., pp. 98-114, 2006.
- [28] C. Park, S-W. Hong, T. Hak Chung, Y-S. Choi, "Performance evaluation of pretreatment processes in integrated membrane system for wastewater reuse," *Desalination*, vol. 250, no. 2, Jan., pp. 673-676, 2010.
- [29] F. Pedrero, I. Kalavrouzotis, J. J. Alarcon, P. Koukoulakis, T. Asano, "Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture-review of some practices in Spain and Greece," *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 9, Sep., pp. 1233-1241, 2010.
- [30] A. Kajenthira, A. Siddiqi, L. D. Anadon, "A new case for promoting wastewater reuse in Saudi Arabia: Bringing energy into the water equation," *Journal of Environmental Management*, vol. 102, July, pp. 184-192, 2012.
- [31] S. Bunani, E. Yörükoğlu, G. Sert, Ü. Yüksel, M. Yüksel, N. Kabay, "Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis," *Desalination*, vol. 315, Apr., pp. 33-36, 2013.
- [32] N. B. Goodman, R. J. Taylor, Z. Xie, Y. Gozukara, A. Clements, "A feasibility study of municipal wastewater desalination using electrodialysis reversal to provide recycled water for horticultural irrigation," *Desalination*, vol. 317, May, pp. 77-83, 2013.
- [33] D. Norton-Brandao, S. M. Scherrenberg, J. B. van Lier, "Reclamation of used urban waters for irrigation purposes - A review of treatment technologies," *Journal of Environmental Management*, vol. 122, June, pp. 85-98, 2013.
- [34] S. Shanmuganathan, S. Vignesvaran, T. V. Nguyen, P. Loganathan, J. Kandasamy, "Use of nanofiltration and reverse osmosis in reclaiming micro-filtered biologically treated sewage effluent for irrigation," *Desalination*, vol. 364, May, pp. 119-125, 2015.
- [35] D. M. Revitt, E. Eriksson, E. Donner, "The implications of household greywater treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads," *Water Research*, vol. 45, no. 4, Feb., pp. 1549-1560, 2011.
- [36] L. Semerjian, A. Shanableh, M. H. Semreen, M. Smarai, "Human health risk assessment of pharmaceuticals in treated wastewater reused for non-potable applications in Sharjah, United Arab Emirates," *Environment International*, vol. 121, no. 1, Dec., pp. 325-331, 2018.
- [37] L. Fan, T. Nguyen, F. A. Roddick, J. L. Harris, "Low pressure membrane filtration of secondary effluent in water reuse: pre-treatment for fouling reduction," *Journal of Membrane Science*, vol. 320, no. 1-2, July, pp. 135-142, 2008.

- [38] P. Xu, C. Bellona, J. E. Drewes, "Fouling of nanofiltration and reverse osmosis membranes during municipal wastewater reclamation: Membrane autopsy results from pilot scale investigations," *Journals of Membrane Science*, vol. 353, no. 1-2, May, pp. 111-121, 2010.
- [39] S. Bakopoulou, C. Emmanouil, A. Kungolos, "Assessment of wastewater effluent quality in Thessaly Region, Greece, for determining its irrigation reuse potential," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 74, no. 2, Feb., pp. 188-194, 2011.
- [40] M. Rygaard, P. J. Binning, H. J. Albrechtsen, "Increasing urbanwater self-sufficiency: New era, new challenges," *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 1, Jan., pp. 185-194, 2011.
- [41] E. Agrafioti ve E. Diamadopoulou, "A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the island of Crete," *Agricultural Water Management*, vol. 105, Mar., pp. 57-64, 2012.
- [42] L. D. Nghiem ve S. Hawkes, "Effects of membrane fouling on the nanofiltration of pharmaceutically active compounds (PhACs): mechanisms and role of membrane pore size," *Separation and Purification Technology*, vol. 57, no. 1, Oct., pp. 176-184, 2007.
- [43] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Ek:7," Ankara, Türkiye, R.G. Tarih-No: 20.03.2010-27527, 2010.
- [44] M. El Tokhy, H. F. Shaalan, A. M. Sharaky, N. M. Abd El-Monem, G. A. Al Bazedı, "Performance analysis of upgrading of secondary treated wastewater by nanofiltration," *World Applied Sciences Journal*, vol. 25, no. 3, Oct., pp. 384-390, 2013.
- [45] I. Michael, L. Rizzo, C. S. McArdell, C. M. Manaia, C. Merlin, T. Schwartz, C. Dagot, D. Fatta-Kassinos, "Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review," *Water Research*, vol. 47, no. 3, Mar., pp. 957-995, 2013.
- [46] A. Blstakova, I. Bodik, L. Dancova, Z. Jacobcova, "Domestic wastewater treatment with membrane filtration – two years experience," *Desalination*, vol. 240, no. 1-3, May, pp. 160-169, 2009.
- [47] Y. Li, S. Zhang, W. Zhang, W. Xiong, Q. Ye, X. Hou, C. Wang, "Life cycle assessment of advanced wastewater treatment processes: involving 126 pharmaceuticals and personal care products in life cycle inventory," *Journal of Environmental Management*, vol. 238, May, pp. 442-450, 2019.
- [48] T. Zhou, T-T. Lima, S-S. Chind, A. G. Fane, "Treatment of organics in reverse osmosis concentrate from a municipal wastewater reclamation plant: feasibility test of advanced oxidation processes with/without pretreatment," *Chemical Engineering Journal*, vol. 166, no. 3, Feb., pp. 932-939, 2011.
- [49] S. O. Ganiyu, E. D. van Hullebusch, M. Cretin, G. Esposito, M. A. Oturan, "Coupling of membrane filtration and advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residues: A critical review," *Separation and Purification Technology*, vol. 156, no. 3, Dec., pp. 891-914, 2015.
- [50] J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistinen, O. Setälä, "Solutions to Microplastic Pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies," *Water Research*, vol. 123, Oct., pp. 401-407, 2017.
- [51] H. Vatankhah, S. M. Riley, C. Murray, O. Quinones, K. X. Steirer, E. R. V. Dickenson, C. Bellona, "Simultaneous ozone and granular activated carbon for advanced treatment of micropollutants in municipal wastewater effluent," *Chemosphere*, vol. 234, Nov., pp. 845-854, 2019.
- [52] M. H. Semreen, A. Shanableh, L. Semerjian, H. Alniss, M. Mousa, X. Bai, K. Acharya, "Simultaneous determination of pharmaceuticals by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry: a case study from Sharjah Sewage Treatment Plant," *Molecules*, vol. 24, Feb., pp. 633, 2019.
- [53] F. Martinez, M. J. Lopez-Munoz, J. Aguado, J. A. Melero, J. Arsuaga, A. Sotto, R. Molina, Y. Segura, M. I. Pariente, A. Revilla, L. Cerro, G. Carenas, "Coupling membrane separation and photocatalytic oxidation processes for the degradation of pharmaceutical pollutants," *Water Research*, vol. 47, no. 15, Oct., pp. 5647-5658, 2013.
- [54] R. L. Fernandez, J. A. McDonald, S. J. Khan, P. Le-Clech, "Removal of pharmaceuticals and endocrine disrupting chemicals by a submerged membrane photocatalysis reactor (MPR)," *Separation and Purification Technology*, vol. 127, Apr., pp. 131-139, 2014.
- [55] D. Papaioannou, P. H. Koukoulakis, M. Papageorgiou, D. A. Lambropoulou, I. K. Kalavrouziotis, "Investigation of pharmaceutical and personal care product interactions of soil and beets (*Beta vulgaris* L.) under the effect of wastewater reuse," *Chemosphere*, vol. 238, Jan., pp. 124553, 2020.





Cu (II) ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SEA URCHIN PREPARED BY ULTRASOUND-ASSISTED METHOD

Bahdişen GEZER^{1,*} 

¹Usak University, Engineering Faculty, Electrical Engineering Department, 64100, Usak, Turkey

ABSTRACT

In this study, activated carbon has been obtained by using sea urchin as an adsorbent substance, which is abundant, cheap, and natural in nature, as an alternative to active carbon used in heavy metal removal. Using the Ultrasound-assisted support, 1:1, 2:1, 3:1 (H₃PO₄/sea urchin) carbonization process was carried out by subjecting H₃PO₄ as the sea urchin activating agent. The BET surface area of the activated carbon obtained was characterized by total pore volume, ash content, and SEM analysis. Cu (II) removal in aqueous solutions were investigated with activated carbons. Experimental studies have been conducted to determine the effects of pH, contact time (min), adsorbent concentration (g/L), temperature, and initial metal concentration parameters affecting adsorption. The adsorption capacity of the activated carbon obtained from the sea urchin at 25 °C was calculated as 643 mg/g. Optimum conditions from the results were determined as pH 2.0, contact time 80 minutes, initial adsorbent concentration 10 mg/L, and temperature 25 °C. According to the results of the study, it has been concluded that the activated carbon obtained from the sea urchin can be an alternative adsorbent to other activated carbons in heavy metal removal.

Keywords: Ultrasound-assisted, Copper (II), Sea urchin, Activated carbon, Adsorption

ULTRASES YÖNTEMİ İLE HAZIRLANAN DENİZ KESTANESİNDEN ELDE EDİLEN AKTİF KARBON İLE Cu (II) ADSORPSİYONU

ÖZET

Bu çalışmada, ağır metal gideriminde kullanılan aktif karbonlara farklı seçenek olarak doğada bol, ucuz ve doğal olarak bulunan adsorbent bir madde olarak deniz kestanesi kullanılarak aktif karbon elde edilmiştir. Ultrason desteği kullanılarak deniz kestanesi aktifleştirme maddesi olarak H₃PO₄ 'ün kullanıldığı karbonizasyona tabi tutularak 1:1, 2:1, 3:1 (H₃PO₄ /deniz kestanesi) karbonizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aktif karbonun BET yüzey alanı, toplam gözenek hacmi, kül içeriği ve SEM analizleriyle karakterize edilmiştir. Aktif karbonlar ile sulu çözeltilerdeki Cu (II) giderimi araştırılmıştır. Adsorpsiyonu etkileyen pH, temas süresi (dk), adsorbent konsantrasyonu (g/L), sıcaklık ve başlangıç metal konsantrasyonu parametrelerinin etkilerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deniz kestanesinden elde edilen aktif karbonun 25 °C'de Cu (II) adsorplama kapasitesi 643 mg/g olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan optimum koşullar pH 2.0, temas süresi 80 dakika, başlangıç adsorbent madde konsantrasyonu 10 mg/L ve sıcaklık 25 °C olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, deniz kestanesinden elde edilen aktif karbonun ağır metal gideriminde diğer aktif karbonlara alternatif bir adsorbent olabileceği sonucu elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ultrason destekli, Bakır (II), Deniz kestanesi, Aktif karbon, Adsorpsiyon

1. INTRODUCTION

Today, the mixing of poisonous heavy metal ions from industrial wastes into water constitutes the most important environmental problem for many life types [1]. These heavy metal ions are taken into the human body directly from water and indirectly through nutrients [2]. It has been stated in scientific studies that heavy metal ions accumulating in the body significantly affect multiple organs and systems. In addition, it has been determined that humans cause the most forgetfulness or damage to the central nervous system, the composition of higher blood levels, the lungs, kidneys, liver, and other organs [3], [4].

The rapid development of the industry in recent years has led to the increase and accumulation of Cu (II) in the environment. Cu (II) is used in electricity, construction, transportation, industrial machinery, industrial production such as paint, jewelry, coins [5]. Physical, chemical, and physicochemical processes are applied in removing heavy metals from wastewater [6]. Different

*Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: bahdisengezer@gmail.com

Geliş / Recieved: 09.03.2020 Kabul / Accepted: 06.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.700773

B. Gezer

methods such as chemical precipitation, solvent extraction, vacuum evaporation, membrane technologies, adsorption, ion exchange are used in waters containing heavy metal pollution [7], [8]. Among these methods, adsorption is the oldest and most well-known, more useful and economical method, as well as a well-established method. The economy of this method is related to the cost of the adsorbent [9], [10]. While adsorption techniques are an efficient and attractive method for removing biodegradable pollutants (such as dyes, heavy metals, pesticides), they are also very popular with the use of natural adsorbents [11].

The adsorption method on activated carbon has gained importance in removing heavy metals from dirty metals. Activated carbon, produced from carbon-based materials, has a large internal surface area and pore structure of different diameters; therefore it has a high capacity to adsorb organic and inorganic substances in gas and liquid phases. However, due to the high cost of activated carbon production, research has focused on alternative raw materials and production methods. Natural adsorbents are particularly useful for developing countries, as they are renewable, can be grown everywhere, contribute to environmental protection, and are economical [12]. Studies have revealed that activated carbon is more efficient and useful than zeolites, metal oxides, ion exchange resins, and biosorbents in removing heavy metals from the aqueous solution [13], [14]. Usually activated carbons, banana peel [15], kindling pine shavings [16], apricot kernel shell [17], pumpkin kernel shell [18], waste tea [19], nutshell [20], corncob [21], olive waste is obtained from various biomass such as [22]. Of this biomass, activated carbon is produced mostly by physical and chemical activation methods [23].

Recently, the ultrasound-assisted process (US) has come to the fore in order to rise of the adsorbent surface [24], [25]. Cavitation the ultrasound process, which operates according to the principle, provides the adsorption surface activation thanks to the OH radicals and pyrolysis effect formed as a result of the explosion of bubbles formed in water under high temperature and pressure, and as a result, the adsorption pressure. As a result the effectiveness of ultrasound is made more active by particle surface with the effect of radical production and mechanical energy caused by the cavitation bubble formed in water, and a large surface area is obtained. The diffusion of molecules adsorbed through the pore due to the mechanical force caused by ultrasound is provided faster through the pore [24]-[26]. According to the studies, if the adsorption process is carried out in ultrasound supported systems, it is seen that both the higher adsorption efficiency is achieved and the adsorption process reaches equilibrium in a shorter time [27], [28], [29].

In this study, sea urchin, which is sea waste, both carbonization, and activated carbon was obtained using the activation/carbonization process and the capacity of the activated carbon to adsorb copper (II) from aqueous solutions was investigated. Cu (II) adsorption on activated carbons prepared by the carbonization process in N₂ atmosphere by absorbing phosphoric acid to sea urchin with the help of ultrasound. In the adsorption of Cu (II); The effects of parameters such as pH, contact time, adsorbent dose, concentration temperature, and metal concentration were investigated in the adsorption experiments. The results obtained were applied to the Langmuir and Freundlich isotherms.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Material

The sea urchin used in the study was obtained from a firm located in the province of Izmir (Figure 1). Various chemicals were used in the experimental stages of the study. The H₃PO₄ chemical used for the carbonization of sea urchin in the experiment. HCl and NaOH chemicals (Merck, 0.99%) were used to adjust the pH values of the solution.



Figure 1. Sea urchin samples

*Cu (II) ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SEA URCHIN PREPARED BY ULTRASOUND-ASSISTED METHOD***2.2. Preparation of Experimental Samples**

The sea urchin was used as the main ingredient. Samples were cleaned by brush washing in tap water. Afterward, it was washed three times in pure water and removed from impurities and dried in a 110 °C oven for 4 hours. Samples were pulverized in the cleaned ball mill. The powders were brought to the standard powder size with a 100µm sieve.

2.3. Activated Carbon Production from Sea Urchins with Ultrasound-Assisted

40 kHz fixed frequency to increase the adsorption capacity ultrasound-assisted device was used. The adsorbent's modification process was achieved by dispersing it with low-frequency ultrasound cutting forces in each experiment phase used to obtain activated carbon in sea urchins. 3 different impregnation (wetting) processes were applied: sea urchin, 1:1, 2:1, 3:1 (H₃PO₄ / sea urchin) by mass. After 24 hours impregnation, the samples were dried in the oven at room temperature, then at 120 °C from time to time with mixing. Carbonization was applied to the completely dried samples for two hours at a heating rate of 10 °C/min, with the temperature of the oven being 600 °C. After the carbonization step, the samples were washed with pure water until the pH range was 4-5 and dried at 110 °C in the oven (Figure 2).



Figure 2. Carbonized sea urchin powders

2.4. Characterization Studies

The specific surface areas of the activated carbon sample obtained were carried out with the Quantachrome Corporation, Autosorb-6 model surface area determiner available in the laboratory of the Middle East Technical University. In order to determine the surface morphology and pore structure of activated carbon, for example, SEM images were taken using the JEOL/JSM-6510 LV electron microscope in the Research Laboratory of the Middle East University.

2.5. Analysis Ash Determination and Carbon Content

Before determining the ash content of the activated carbon sample obtained, 2.5 hours in an oven at 100 °C in sample porcelain, it was brought to constant weighing, and moisture content was determined. The sample, whose moisture content was determined, was weighed 2 grams and burned for 2.5 hours in porcelain crucibles brought to constant weight at 550 °C until reaching fixed weight. The residual amount at the end of the combustion was weighed and the amount of ash (in %) contained in the activated carbon sample was calculated with the help of Equation 1 [30]. The ash content calculated with this equation gives the ash content, for example, on the dry foundation.

$$\text{Ash\%} = \left(\frac{100}{m_1}\right) \left(\frac{100}{100-N}\right) \quad (1)$$

In this equation, m_1 : The initial weight of the activated carbon sample (g), m_2 : Ash weight (g), and N:% moisture.

B. Gezer

The suspension prepared by adding 50 ml of distilled water and 10 ml of skin HCl on 2 grams of activated carbon samples were boiled under reflux for 20 minutes. Mix filter paper after boiling process filtered with. In order to completely remove chlorine ions, the filtrate was washed with 0.15 N AgNO₃ solution until it did not precipitate. After washing, the sample was kept at 550 °C for 20 hours and dried. The mass remaining on the filter paper was brought to constant weight at 110 °C and its weight was determined. Later, the sample was burned at 550 °C in a porcelain crucible, which was brought to weigh, and the amount of ash was determined [31] The carbon content of the activated carbon sample subjected to these processes that It was calculated with the help of Equation 2.

$$\text{carbon}\% = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_0} \right) 100 \quad (2)$$

where, m₀: for example, the initial weight (g), m₁: For example, the weight (g) after drying at 110 °C, and the amount (g) remaining after combustion at m₂: 550 °C.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Analysis Results of Sea Urchin

Preliminary analysis results to characterize the sea urchin are given in Table 1. When Table 1 is investigated, it is seen that the sea urchin we use in our study is appropriate for the production of activated carbon with its low ash content (3.6%), high volatile matter (31.7%) and fixed carbon (87.4%) content. In the literature, it is stated that vegetable wastes containing volatile content 20-67%, fixed carbon content 17-70% and ash content 3-5% are used as raw materials in activated carbon production [32], [33].

Table 1. Sea urchin analysis results

Analyzes made	Results
Particle size	0.75 mm
Determination of moisture content	8.3%
Determination of ash content	3.6%
Determination of volatile matter	31.7%
Fixed carbon	87.4%
Determination of lignin	9.5%

The carbonization efficiency depends largely on the organic groups that form in the sea urchin, breaking down into smaller molecules during carbonization. As the carbonization time and temperature increase, it is possible to separate some of the non-carbon elements (H, N, O, and S) and volatile molecules and a product with a high carbon content remain [34]. The high ash content of products obtained as a result of carbonization at very high temperatures is seen as a disadvantage for the industrial use of the activated carbon obtained. Increasing the ash content with the carbonization temperature indicates that an extreme thermal degradation of the sea urchin occurs with the temperature. On the other hand, it is stated that the amount of acid that cannot be removed from the environment as a result of carbonization increases the ash content of activated carbon [35].

3.2. The Effect of Chemical Activation Rate

Activator doses is an important parameter in chemical activation. The effect of this parameter on the production of activated carbon obtained from sea urchins; The weight ratio (impregnation rate) of H₃PO₄/activated carbon was changed between 1:1, 2:1 and 3:1, and was examined in chemically activated samples at 25 °C for 24 hours. The properties of the carbonized products obtained by carbonization of the products obtained in each condition are given in Table 2.

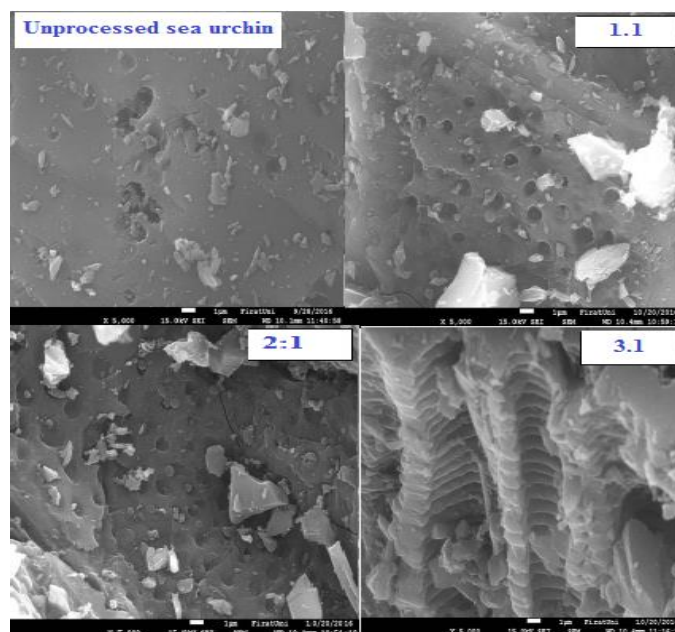
Significant increases in BET surface area and total pore volumes were determined due to the increase in chemical activator dose. At high impregnation rates, it has been determined that macro and mesopores turn into micropores with the effect of H₃PO₄, and therefore significant increases occur in BET surface areas and total pore volumes. It was determined that microporous activated carbons were obtained by activation, especially on the impregnation rate. Similar findings have been reported in studies on obtaining activated carbon by chemical activation of the grape stem [36] and vine branch [37] with H₃PO₄. The high impregnation rate also confirms that it has an important effect on obtaining activated carbon-containing carbon (Table 2). It is stated that the commonly used active carbon has a surface area of 500-1500 m²/g, the total pore volume is 0.3 cm³/g and the carbon content varies between 85-95% [38]. Compared with the commercial activated carbons, it can be said that the active carbons with commercial activated carbon properties can be obtained with the chemical activation of the sea urchin H₃PO₄ at the rates of impregnation 3:1 and above (Table 2).

*Cu (II) ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SEA URCHIN PREPARED BY ULTRASOUND-ASSISTED METHOD***Table 2.** The effect of the impregnation rate on the acquisition of activated carbon (impregnation time: 24 hours; impregnation temperature: 25°C; carbonization temperature: 550 ° C; carbonization time: 20 hours)

H ₃ PO ₄ /activated carbon	Yield (%)	BET-surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Por diameter (nm)	C (%)
1:1	48.23	1147.63	0.7402	1.9731	80.27
2:1	39.84	1381.74	0.9044	1.8247	83.39
3:1	37.15	1528.95	1.0873	1.8012	87.4

3.3. Analysis of SEM (scanning electron microscope) Images

The activated carbon samples obtained were subjected to SEM analysis to determine the surface morphology. In Figure 3, SEM images of sea urchin and activated carbon samples obtained by chemical activation are given. As can be seen from the images, the raw sea urchin surface, which has not been subjected to any treatment, is quite smooth, has no cracks, and has a very low pore structure, while chemical activation shows cracks and pores on its surface. Especially due to the increase in the impregnation rate, although the number of pores on the surface increases, the formation of sewers has started. At high impregnation rates, open channels of deep inhomogeneous open channels appear on the surfaces of activated carbon samples. This suggests that activation occurs superficially. In samples obtained by impregnation carried out at 25 °C, the surface area is observed to increase due to superficial sewage and porosities. Therefore, it can be said that the impregnation conditions should be optimized under suitable conditions in order to obtain homogeneous and larger surface area activated carbons [39].

**Figure 3.** SEM images of unprocessed sea urchin and activated carbon samples obtained by chemical activation**3.4. Effect of Contact Time on Adsorption of Cu (II)**

Contact time is one of the important parameters to be determined in the adsorption process. To determine the equilibration time for removal of Cu (II) ion with sea urchin activated carbon, 100 mg/L metal concentration, and 10 g/L adsorbent concentration were taken at room temperature. As can be seen in Figure 4, the contact time study was carried out for up to 320 minutes to see where the adsorption stabilized. As a result, adsorption reached equilibrium in 120 minutes. The greater the initial

B. Gezer

concentration, the steeper the slope of the refraction curve, and the smaller the refraction time. These results show that the change in concentration gradient affects the saturation rate and refraction time, or the diffusion process is concentration-dependent [40].

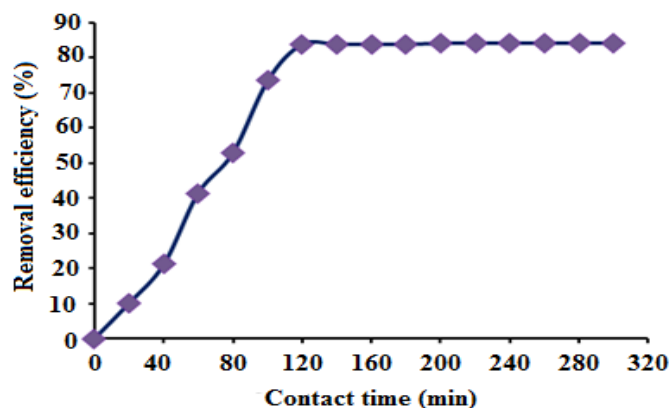


Figure 4. Effect of contact time of sea urchin on activated carbon with Cu (II) removal ($C_0 = 100$ mg/L, $T = 25$ °C, Adsorbent concentration = 10 g/L)

3.5. The Effect of pH on Cu (II) Removal

pH affects the surface mechanism of the adsorbent and therefore the binding points of the pollutant and the adsorbent [41]. The initial pH value is 2.0 in the adsorption of Cu (II) ions with activated carbon obtained from the sea urchin; 3.0; 4.0; Changed to 5.0 and 6.0. The change of Cu (II) removal efficiency over time with different pH values is given in Figure 4. As seen in Figure 5, there is an inverse ratio between Cu (II) removal and pH, and as the pH value decreases, the amount of adsorbed copper increased. While 100 mg / L copper (II) ion at pH = 2 is removed by 77.52% with 5 g/L sea urchin, this ratio has decreased to 11.32% at pH = 5. Negative charged Cu $2+$ forms at low pH values are now electrostatically bound to the positively charged adsorbent surface due to the density of hydrogen ions in the environment, and this event usually occurs at low temperatures. Since the effect of the pH parameter on adsorption is examined at 25 °C, no chemical interaction can be mentioned between metal particles and adsorbent particles at this temperature [42]. It was determined that pHzpc values of the activated carbon samples obtained varied between 4.81 and 5.68. Acidic groups were determined to be predominant in surface functional groups that were determined due to Boehm titration. These values falling in the slightly acidic region are due to the predominance of the acidic groups on the surface of the activated carbon obtained [43]. The values obtained are also in line with those reported in the literature [44].

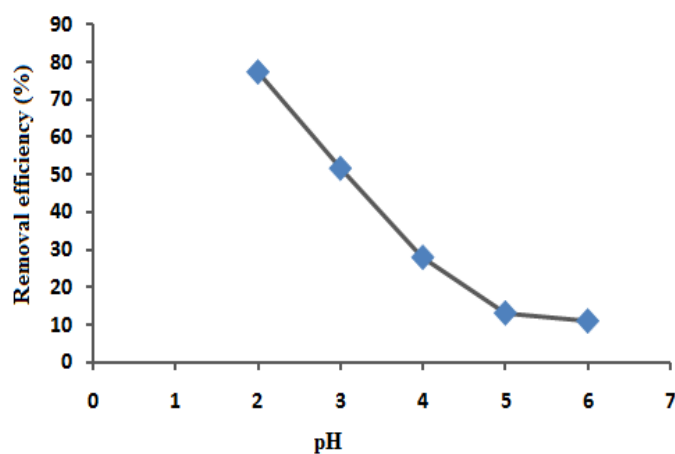


Figure 5. The effect of pH on Cu (II) removal with activated sea urchin ($C_0 = 100$ mg/L, $T = 25$ °C, Adsorbent concentration = 10 g/L)

*Cu (II) ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SEA URCHIN PREPARED BY ULTRASOUND-ASSISTED METHOD***3.6. Effect of Adsorbent Amount on Cu (II) Removal**

The effect of adsorbent concentration was investigated by taking the amount of adsorbent 2.0, 4.0, 6.0, 8 and 10 g/L in the removal of copper (II) with activated carbon obtained from sea urchin. As seen in Figure 6, it is determined that the copper (II) ion at the concentration of 100 mg / L is removed by 30% with 2 g/L actif carbon, while the ion (copper) ion at the same concentration with the concentration of 10 g /L is 88.64%. As the amount of adsorbent increased, the adsorbent and Cu (II) substance that caused more removal efficiency increased in the column and the slope of the refraction curve decreased, indicating that an expanded mass transfer region was formed. Due to the increase in the adsorption surface, higher adsorption capacity has been observed by creating more binding sites for adsorption in more adsorbent amount [45]. Similar results by different researchers has been reported [46], [47].

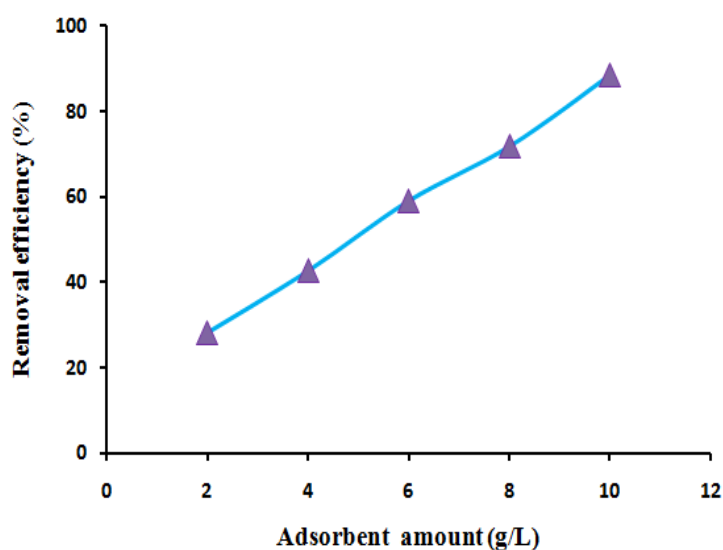


Figure 6. Effect of adsorbent concentration on copper (II) removal with sea urchin activated carbon ($C_0 = 100$ mg/L, $T = 25$ °C, Adsorbent concentration = 10 g/L)

Since adsorption is a surface phenomenon, the magnitude of adsorption is proportional to the specific surface area. It is the properties that are desired to be in a particle structure with the adsorbent's large surface area, pore-volume, and a certain pore distribution [48]. Since increasing the adsorbent concentration will increase the surface area, the amount of metal adsorbed in the unit adsorbent mass increases. In contrast, the number of metal ions adsorbed in the adsorbent mass decreases. The metal ion concentration adsorbed in the unit adsorbent mass in the adsorption of 100 mg/L copper (II) ion with 2 g/L adsorbent is 10 mg.met/g adsorbent. While 10g/L adsorbent is used, this value decreases to 8.4 mg/g.

3.7. Effect of Initial Metal Concentration and the Temperature on Cu (II) Removal

The effect of initial metal ion concentration and temperature on the adsorption of copper (II) ion with sea urchin activated carbon was investigated. At 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C and 45 °C temperatures, the amount of adsorbent was reduced, and experiments were carried out by taking the initial metal concentrations as 20, 40, 60, 80 and 100 mg/L. In Table 3, removal efficiencies of copper (II) ion with different concentrations at different temperatures is given. As seen in the table, the increase in temperature causes the adhesion efficiency of the metal to increase. While 70 mg/L copper (II) ion 89.32% was removed at 25 C, 98.15% removal was achieved at 45 °C.

It is said that with increasing temperature, the number of binding regions on the adsorbent increases and more regions becomes active [49]. In a study, it was observed that the adsorption capacity increased by 60% with the increase of temperature from 25 °C to 40 °C in the removal of Cr^{6+} ions with activated carbon [50]. With increasing temperature, the kinetic energy of the solvent increases. Therefore, it was supported by a similar study in which an increase in adsorption capacity was observed. In the removal of granulated activated carbon and trinitrotoluene in a fixed-bed adsorption column, temperatures in the range of 10 °C - 60 °C were tried and it was observed that the adsorption capacity of granular activated carbon increased with increasing temperature [51]. The adsorption capacity is expected to be increased by increasing the starting material concentration because the high concentration difference provides a high driving force for the adsorption process [52].

B. Gezer

Table 3. Elimination efficiency of copper (II) ion with different concentrations at distinct temperatures (pH = 2.0, X = 2 g/L)

Temperature (°C)	Copper (II) removal efficiency (%)				
	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	100 mg/L
25	89.32	80.54	63.03	59.32	48.74
30	91.06	84.96	67.75	62.54	57.49
35	95.28	88.29	71.28	66.55	59.08
40	97.87	90.06	79.71	73.42	65.19
45	98.15	91.23	85.34	76.03	70.21

3.8. Adsorption Isotherm Studies

Langmuir Isotherm explains better whether it is physical or chemical adsorption in the active adsorption areas on solid surfaces compared to other isotherms. In Langmuir isotherm; adsorption increases linearly with adsorbate initial concentration. The adsorption rate is directly proportional to the adsorbate concentration and the empty adsorption areas on the surface [53].

The simplest theoretical model for adsorption is the Langmuir model. It is expressed as equality below,

$$q = \frac{x}{m} = \frac{a.K.C_e}{1+K.C_e} \quad (3)$$

Where is $q = x/m$: The amount of adsorbed substance per unit adsorber weight in equilibrium (mg/g adsorbent), a : The amount of adsorbed substance (mg/g) per unit weight of the adsorber to form a complete single layer on the surface, K : Adsorption constant related to adsorption net enthalpy and C_e : Soluble concentration (mg / L) remaining in solution without adsorption in equilibrium.

Freundlich model adsorption on heterogeneous surfaces It is applied. It is expressed by the formula below.

$$q = \frac{x}{m} = K_f C_e^{(1/n)} \quad (4)$$

Where is K_f : Adsorption capacity, n : Adsorption intensity.

Freundlich and Langmuir adsorption models were used in the mathematical description of sea urchin activated carbon and copper (II) adsorption and isotherm constants were calculated It is given in Table 4. As can be seen from Table 4, under the most suitable adsorption conditions, the sea urchin activated carbon and the adsorption isotherms obtained in the removal of copper (II) (pH = 2.0, 20 mg/L adsorbent amount) results at all temperatures Langmuir and Freundlich's isotherm appears to be compatible with both.

Table 4. Constants obtained from Langmuir and Freundlich isotherm for copper (II) ion at different temperatures

Temperature (°C)	Langmuir isotherm			Freundlich Izotermi		
	q (mg/g)	C _e (mg/L)	R ²	K _f	n	R ²
25	7.33	0.5102	0.9672	0.9576	0.9846	0.9132
30	7.65	0.5324	0.9891	1.5382	1.4847	0.9207
35	7.74	0.6667	0.9981	1.8473	1.6116	0.9961
40	8.04	0.8161	0.9985	2.3759	1.9052	0.9979
45	7.93	0.9977	0.9984	2.8632	2.8305	0.9873

While the K_f value is 0.9576 at 25 °C, it increases to 2.3759 by increasing at 40 °C. The increase in K_f value with temperature indicates that the rate of adsorption increases with increasing temperature. A value of $1/n$ between 0.1 and 1.0 means that adsorption is favorable [39]. On the other hand, for 298, 303, 308, 313 and 318 K temperatures, adsorption Gibbs free energy according to Equation 5; Found as 1.666, 1.587, 1.037, 0.528 and 6.088x10⁻³ kJ/molK [54]. It shows that the free energy enthalpy value is very small, positive, and decreases with temperature increase. This indicates that adsorption occurs better at high temperatures and is endothermic shows.

$$\Delta G = -RT \ln C_e \quad (5)$$

*Cu (II) ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SEA URCHIN PREPARED BY ULTRASOUND-ASSISTED METHOD***4. RESULTS**

As a result of the study, sea urchins were subjected to the carbonization process with chemical processes with phosphoric acid. It was observed that high efficiency occurred in Cu (II) removal. In copper (II) removal, it was observed that as the adsorbent dose increased. The highest removal was obtained at pH = 2.0. It was also seen that copper (II) removal decreased with increasing initial metal concentration. It was concluded that the amount of samples obtained was higher for both temperatures in ultrasound-assisted conditions, thereby increasing the synthesis efficiency of ultrasound waves. The results obtained were compatible with both Langmuir and Freundlich adsorption isotherms. However, Langmuir fit more to the adsorption isotherm. The impregnation rate is also an important parameter in increasing porosity in chemical activation. In order to see the effect of the impregnation ratio on the obtained activated carbons, the properties of the activated carbons obtained in the impregnation ratios of 1:1, 2:1, and 3/1 were compared. It has been determined that the surface properties increase with the increase of the impregnation rate. The highest surface area has been determined as a 3/1 impregnation rate and 1528.95 m²/g. It seems very advantageous to convert these agricultural residues with lignocellulosic structure, which have very low economic value, into active carbon by the proposed method. As a result; It can be considered from the obtained results that sea urchin can be an appropriate adsorbent in the removal of copper with copper (II).

REFERENCES

- [1] M. P. Papini, Y. D. Kahie, B. Troia, and M. Majone, "Adsorption of lead at variable pH onto a natural porous medium: Modeling of batch and column experiments," *Environmental Science and Technology*, vol. 33, pp. 3357-4464, 1999.
- [2] K. Zhang, W. Cheung, and M. Valix, "Roles of physical and chemical properties of activated carbon in the adsorption of lead ions," *Chemosphere*, vol. 60, pp. 1129-1140, 2005.
- [3] S. Tunali, A. Cabuk, and T. Akar, "Removal of lead and copper ions from aqueous solutions by bacterial strain isolated from soil," *Chemical Engineering Journal*, vol. 115, pp. 203-211, 2006.
- [4] S. S. Baral, S. N. Das, and P. Rath, "Hexavalent chromium removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 31, pp. 216-222, 2006.
- [5] E. S. Abdel-Halima, and S. Salem Al-Deyab, "Removal of heavy metals from their aqueous solutions through adsorption onto natural polymers," *Carbohydrate Polymers*, vol. 84, pp. 454-458, 2011.
- [6] H. A. Albroomi, M. A. Elsayed, A. Baraka, and M. K. Abdelmaged, "Factors affecting the removal of a basic and azo dye from artificial solutions by adsorption using activated carbon," *Journal Turkish Chemistry Science*, vol. 2(1), pp. 17-33, 2015.
- [7] G. Kaykıoğlu, "Kolemanit ve üleksit atığı ile sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi: kinetik ve izoterm değerlendirmesi," *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12(3), pp. 499-509, 2016.
- [8] I. Fatimah, A. Yahya, and R. A. T. Sasti, "Preparation of sodium dodecyl sulphate-functionalized activated carbon from Gnetum gnemon shell for dye adsorption," In AIP Conference Proceedings, 2017, pp. 1823(1), 20125.
- [9] M. Z. Hussein, R. S. H. Tarmizi, Z. Zainal, R. Ibrahim, and M. Badri, "Preparation and characterization of active carbons from oil palm shells," *Carbon*, vol. 34(11), pp. 1447-1454, 1996.
- [10] A. C. Lua, and J. Guo, "Preparation and characterization of chars from oil palm waste," *Carbon*, vol. 36 (11), pp. 1663-1670, 1998.
- [11] Z. Aksu, "Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review," *Process Biochemistry*, vol. 40 (3-4), pp. 997-1026, 2005.
- [12] L. J. Yu, S. S. Shukla, K. L. Dorris, A. Shukla, and J. L. Margrave, "Adsorption of chromium from aqueous solutions by fagus orientalis," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 100, pp. 53-63, 2003.
- [13] H. E. Smith, W. Lu, T. Vengris, and R. Binkiene, "Sorption of Heavy Metals by Lithuanian Glauconite," *Water Research*, vol. 30, pp. 2883-2892, 1996.
- [14] K. Zhang, W. Cheung, and M. Valix, "Roles of physical and chemical properties of activated carbon in the adsorption of lead ions," *Chemosphere*, vol. 60, pp. 1129-1140, 2005.
- [15] E. Inam, U. J. Etim, E. G. Akpabio, and S. A. Umoren, "Process optimization for the application of carbon from plantain peels in dye adsorption," *Journal of Taibah University for Science*, vol. 11(1), pp. 173-185, 2017.
- [16] J. Han, J. H. Kwon, J. W. Lee, J. H. Lee, and K. C. Roh, "An effective approach to preparing partially graphitic activated carbon derived from structurally separated pitch pine biomass," *Carbon*, vol. 118, pp. 431-437, 2017.
- [17] U. S. Zhenisbekovna, M. I. Satayev and S. V. Viktorovich, "Production of active carbons from apricot pit shells by thermal activation in the mixture of carbon dioxide and water vapors," *Biosciences Biotechnology Research Asia*, vol. 13(3), pp. 1319-1325, 2016.

B. Gezer

- [18] I. Demiral, "Kabak çekirdeği kabuğundan elde edilen aktif karbonun sulu çözeltiden boyarmadde gideriminde değerlendirilmesi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı, pp. 212-217, 2016.
- [19] E. Ustabaş, "İşlenmiş ve Demlenen atık çaydan elde edilen aktif karbonun tekstil boyar maddesi metilen mavisini adsorplama özellikleri," Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016, 83.
- [20] C. Kumaş, "Fındık kabuğundan aktif karbon elde edilmesinde fosforik asit ve bor kullanılması," Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015, 34.
- [21] N. V. Sych, S. I. Trofymenko, O. I. Poddubnaya, M. M. Tsyba, V. I. Sapsay, D. O. Klymchuk, and A. M. Puziy, "Porous structure and surface chemistry of phosphoric acid activated carbon from corncob," *Applied Surface Science*, vol. 261, pp. 75-82, 2012.
- [22] H. Bozkan, "Azo boyalarının zeytin atığı(pirina) kullanılarak adsorpsiyon metodu ile giderimi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012, 56.
- [23] S. Naeem, V. Baheti, J. Wiener, and J. Marek, "Removal of methylene blue from aqueous media using activated carbon web," *The Journal of The Textile Institute*, vol. 108(5), pp. 803-811, 2017.
- [24] M. Breitbach, and D. Bathen, "Influence of Ultrasound on Adsorption Processes," *Ultrasonic Sonochemistry*, vol. 8(3), pp. 277-283, 2001.
- [25] J. Benedito, J. A. Carcel, C. Rossello, and A. Mulet, "Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics," *Meat Science*, vol. 57, pp. 365-370, 2001.
- [26] E. Şayan, and O. N. Ata, "Ultrases Kullanarak Aktif Karbon Üzerine Reactive Blue 19'un Adsorpsiyon Termodinamiğinin İncelenmesi," In Proc.11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Eskişehir, 2014.
- [27] E. Kalıpcı, S. Şahinkaya, S. Aras, and M. Öztürk, "Ultrasonik Aktifleştirilmiş Aktif Karbon ile Krom(VI) Adsorpsiyonu," *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 2(1), pp.20-25, 2013.
- [28] S. Wang, and Z. H. Zhu, "Sonochemical Treatment of Fly Ash for Dye Removal from Wastewater," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 126(1-3), pp. 91-95, 2005.
- [29] M. E. Edecan, "Kombine Ultrases/Aktif Karbon Kullanarak Tekstil Boyar Maddesinin Renk Gideriminin Modellenmesi ve Optimizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2006.
- [30] R. L. Tseng, F. C. Wu, and R. S. Juang, "Liquid-phase adsorption of dyes and phenols using pinewood-based activated carbons," *Carbon*, vol. 41, pp. 487-495, 2003.
- [31] H. Amjad El-Sheikh, P. N. Alan, K. Al-Daffae Hafid, P. Suki, and C. Neil, "Characterization of activated carbon prepared from a single cultivar of Jordanian Olive stones by chemical and physicochemical techniques," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 71, pp. 151-164, 2004.
- [32] H. Hadoun, Z. Sadaoui, N. Souami, D. Sahel, and I. Toumert, "Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H3PO4 chemical activation," *Applied Surface Science*, vol. 280, pp. 1-7, 2013.
- [33] J. J. Gao, Y. B. Qin, T. Zhou, D. D. Cao, P. Xu, D. Hochstetter, and Y. F. Wang, "Adsorption of methylene blue onto activated carbon produced from tea (*Camellia sinensis* L.) seed shells: kinetics, equilibrium, and thermodynamics studies," *Journal of Zhejiang University Science B*, vol. 14(7), pp. 650-658, 2013.
- [34] S. Babel, and T. A. Kurniawan, "Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 97, pp. 219-243, 2003.
- [35] G. G. Stavropoulos, and A. A. Zabaniotou, "Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue," *Micropor Mesopor Mater.*, vol. 82, pp. 79-85, 2005.
- [36] I. Ozdemir, M. Şahin, R. Orhan, and M. Erdem, "Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation," *Fuel Processing Technology*, vol. 125, pp. 200-206, 2014.
- [37] M. Erdem, R. Orhan, M. Şahin, and E. Aydın, "Preparation and Characterization of a Novel Activated Carbon from Vine Shoots by ZnCl2 Activation and Investigation of Its Rifampicine Removal Capability," *Water Air Soil Pollut*, vol. 227, pp. 226-240, 2016.
- [38] P. Hadi, M. Xu, C. Ning, C. S. K. Lin, and G. Mc Kay, "A critical review on preparation, characterization and utilization of sludge-derived activated carbons for wastewater treatment," *Chemical Engineering Journal*, vol. 260, pp. 895-906, 2015.
- [39] G. Yupeng, S. Y. Jurui Qi, Y. Kaifeng, W. Zichen, and X. Hongding, "Adsorption of Cr(VI) on micro-and mesoporous rice husk-based active carbon," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 78, pp. 132-137, 2002.
- [40] J. Goel, K. Kadirvelu, C. Rajagopal, and V. K. Garg, "Removal of lead(II) by adsorption using treated granular activated carbon: batch and column studies," *J. Hazard. Mater. B*, vol. 125, pp. 211-220, 2005.
- [41] E. Malkoç, "Farklı adsorbent türleri ile sulardan ağır metallerin giderimi" Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 2005.
- [42] V. Marinovic, M. Ristic, and M. Dostanic, "Dynamic adsorption of trinitrotoluene on granular activated carbon," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 117, pp. 121-128, 2005.

Cu (II) ADSORPTION WITH ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SEA URCHIN PREPARED BY ULTRASOUND-ASSISTED METHOD

- [43] S. Hashemian, K. Salari, and Z. A. Yazdi, "Preparation of activated carbon from agricultural wastes (almond shell and orange peel) for adsorption of 2-pic from aqueous solution," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, pp. 1892-1900, 2014.
- [44] S. A. Torrellas, R. G. Lovera, N. Escalona, C. Sepúlveda, J. L. Sotela, and J. Garcia, "Chemical-activated carbons from peach stones for the adsorption of emerging contaminants in aqueous solutions," *Chemical Engineering Journal*, vol. 279, pp. 788-798, 2015.
- [45] K. Vijayaraghavan, J. Jegan, K. Palanivelu, and M. Velan, "Removal of nickel(II) ions from aqueous solution using crab shell particles in a packed bed up flow column," *J. Hazard. Mater*, vol. 113B (1–3), pp. 223–230, 2004.
- [46] M. Foroughi-dahr, M. Esmaili, H. Abolghasemi, A. Shojamoradi, and E. S. Pouya, "Continuous adsorption study of Congo red using tea waste in a fixed-bed column," *Desalin. Water Treat*, vol. 57, pp. 8437–8446, 2016.
- [47] I. Mobasherpour, e. Salahi, and A. Asjodi, "Research on the batch and fixed-bed column performance of red mud adsorbents for lead removal," *Canadian Chemical Transactions*, vol. 2(1), pp. 83-96, 2014.
- [48] P. Venkateswarlu, M. Venkata Ratnam, D. Subba Rao, and M. Venkateswara Rao, "Removal of chromium from an aqueous solution using *Azadirachta indica* (neem) leaf powder as an ad-sorbent," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 2(8), pp. 188-195, 2007.
- [49] C. C. V. Cruz, A. C. A. Da Costa, C. A. Henriques, and A. S. Luna, "Kinetic modeling and equilibrium studies during cadmium biosorption by dead *Sargassum Sp.* Biomass," *Bioresource Technology*, vol. 91(3), pp. 249-257, 2003.
- [50] R. L. Ramos, A. Juarez Martinez, and R. M. Guerro Coronado, "Adsorption of chromium (VI) from aqueous solutions on activated carbon," *Water Science and Technology*, vol. 30 (9), pp. 191-197, 1994.
- [51] V. Marinovic, M. Ristic, and M. Dostanic, "Dynamic adsorption of trinitrotoluene on granular activated carbon," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 117, pp. 121-128, 2005.
- [52] S. Sadaf, and H. N. Bhatti, "Evaluation of peanut husk as a novel, low cost biosorbent for the removal of Indosol Orange RSN dye from aqueous solutions: batch and fixed bed studies," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 16, pp. 527-544, 2014.
- [53] Z. Z. Chowdhury, S. M. Zain, A. K. Rashid, and K. Khalid, "Linear regression analysis for kinetics and isotherm studies of sorption of manganese (II) ions onto activated palm ash from waste water," *Orient. J. Chem*, vol. 27(2), pp. 405-415, 2011.
- [54] M. El Haddad, R. Slimani, R. Mamouni, S. ElAntri, and S. Lazar, "Removal of two textile dyes from aqueous solutions onto calcined bones," *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, vol. 14(1), pp. 51-59, 2013.





BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Burçin YILDIZ^{1,*} , Özge HANAY² 

¹ Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 65090, Van, Türkiye

² Fırat Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 23200, Elazığ, Türkiye

ÖZET

Anaerobik membran biyoreaktörler (AnMBR), kirletici konsantrasyonu yüksek olan atıksuların arıtılması için etkili bir teknolojidir ancak membran kirlenmesi uygulamanın gelişmesini kısıtlayan temel faktördür. Bu çalışmada, sentetik olarak hazırlanan hafif tuzlu ve hafif alkali atıksuyun arıtılması sırasında meydana gelen membran kirlenmesinin incelenmesi amacıyla batık bir anaerobik membran biyoreaktör 59 gün boyunca işletilmiştir. Biyoreaktör, 3000 mg/L KOİ, 3000 mg/L SO₄²⁻ ve 10000 ile 20000 mg/L tuz konsantrasyonlarına sahip olan sentetik atıksu ile beslenmiştir. Tuz konsantrasyonunun artırılması kirlenmenin daha hızlı gerçekleşmesine sebep olmuş ve kek tabakası oluşumu, temel kirlenme mekanizması olarak belirlenmiştir. SMP ve EPS fraksiyonları içerisinde SMP_p, en büyük kısmı oluşturmuştur. Membran gözenekleri, daha çok organik kirlenmeye bağlı olarak tıkanmıştır. FTIR spektrumları, membran yüzeylerinde hidroksil fonksiyonel gruplarının, amid I grubunun ve EPS'nin selülozik lipid yapısıyla ilişkili grupların varlığını göstermiştir. Ayrıca *g-proteobacteria* grubuna ait bakterilerin, biyoreaktördeki baskın mikrobiyal türlerin önemli bir yüzdesini (%50) oluşturduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Membran biyoreaktör, Membran kirlenmesi, Akı, Direnç, Organik kirlenme

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SALTING CHANGE ON MEMBRANE FOULING IN SUBMERGED ANAEROBIC MEMBRANE BIOREACTOR

ABSTRACT

Anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) is an effective technology for the treatment wastewater of high pollutant concentration but membrane fouling is the main factor that limits the development of the application. In this study, a submerged anaerobic membrane bioreactor was operated for 59 days in order to investigate membrane fouling during the treatment of synthetically prepared slightly saline and slightly alkaline wastewater. The bioreactor was fed with synthetic wastewater with 3000 mg/L COD, 3000 mg/L SO₄²⁻ and salt concentrations of 10000 and 20000 mg/L. Increasing the salt concentration caused faster fouling and cake layer formation was determined as the basic fouling mechanism. Among the SMP and EPS fractions, SMP_p was the largest part. Membrane pores are mostly clogged due to organic fouling. FTIR spectra showed the presence of hydroxyl functional groups, amide I group and groups associated with cellulosic lipid structure of EPS on membrane surfaces. In addition, bacteria belonging to the *g-proteobacteria* group were found to constitute a significant percentage (50%) of the dominant microbial species in the bioreactor.

Keywords: Membrane bioreactor, Membrane fouling, Flux, Resistance, Organic fouling

1. GİRİŞ

Biyokütle alıkonması, anaerobik arıtımın en önemli yönlerinden biridir. Konvansiyonel yüksek hızlı anaerobik biyoreaktörlerin başarılı bir şekilde işletilebilmesi için kendi kendine agrega oluşumu (örn., granüler çamurlar) veya biyofilm oluşumu yoluyla hidrolik bekleme süresinin (HBS) ve hücre alıkonma süresinin birbirinden ayrılması gereklidir [1], [2]. Bununla birlikte, konvansiyonel anaerobik reaktörler, spesifik mikroorganizmaların eklenmesi ve tutulması yoluyla belirli bir metabolik kapasitenin sisteme eklenmesi için çok uygun değildir çünkü eklenen mikroorganizmalar çoğunlukla granülleri veya biyofilmleri tutamaz veya immobilize etmez ve granüler çamur veya biyofilm sistemlerden kaçmaktadır. Anaerobik membran biyoreaktörlerde, belirli bir metabolik kapasiteye sahip yeni eklenmiş bakteri türleri de dahil olmak üzere biyoreaktördeki tüm

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: burcinyildiz23@gmail.com

Geliş / Received: 01.04.2020 Kabul / Accepted: 08.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.712463

mikroorganizmaların tamamen tutulması sağlanabilir. Ayrıca, membran biyoreaktörler (MBR) granülasyona veya biyofilm oluşumuna bağlı değildir böylece MBR'ler hücre süspansiyonları veya zayıf çökeltme özelliklerine sahip floklar ile de işletilebilir. Bu nedenle, MBR'lerin saf bir kültür veya bilinen bakteriyel türlerin bir kombinasyonu ile aşılması, biyokütle kaçıışı olmadan gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda bu durum, çok düşük HBS değerlerinde bile spesifik bir metabolizma gerçekleştiren yavaş büyüyen mikroorganizmaların büyük bir popülasyonunun alınmasına bağlı olan biyolojik sistemler için özellikle ilgi çekicidir [3]. Bu avantajlarıyla birlikte MBR'nin, temel dezavantajı membran kirlenmesidir, bu da membran süzütü akılarının azalmasına ve dolayısıyla maliyetlerin artmasına ve MBR'lerin daha hızlı bir şekilde ticarileşmesinin engellenmesine neden olur [4]. Ayrıca, membran maliyeti son yıllarda önemli ölçüde azalmış olmasına rağmen, anaerobik membran biyoreaktörlerin (AnMBR'lar) tam ölçekte uygulanmasında halen önemli bir maliyet söz konusudur [5].

Tuzlu atıksular biyolojik arıtma için bir zorluk oluşturmaktadır. Nitekim, biyogaz üretimi ve organik madde giderimi bakımından AnMBR performansı, deniz mahsulleri işleme ve peynir üretiminden kaynaklanan atıksu gibi yüksek oranda tuzlu beslemelerin arıtımı söz konusu olduğunda azalmaktadır [6]. Tuzluluğun çamur üzerinde birçok etkisi vardır. Tuzlu su yoğunluğu tatlı sudan daha yüksektir, bu da daha yüksek kaldırma kuvvetleri sayesinde bozulmaya karşı daha fazla direnç sağlar. Yüksek tuz konsantrasyonları, hücre plazmolizine ve kanalizasyonda genellikle bulunan ozmotik basıncın artmasına bağlı olarak mikroorganizmaların ölümüne neden olur ve bu da parçacık boyutunda ve yoğunluğunda bir azalmaya neden olur. Ayrıca tuzluluk duyarlılığı, flokların mekanik bütünlüğünde ve yapısında önemli bir rol oynayan filamentli bakteri miktarını azaltır. Son olarak, protozoa eksikliği de çıkış suyu bulanıklığını artırabilir. Yani, yüksek tuzluluk, enzim inhibisyonu, hücre aktivitesinde düşüş ve anaerobik mikroorganizmalar için plazmoliz ile sonuçlanabilir, böylece anaerobik arıtım işlemini olumsuz yönde etkiler [7]. Ayrıca artan tuz konsantrasyonu, tuzluluk seçimine bağlı olarak mikrobiyal topluluğu değiştirir [8]. Mikroorganizmalar farklı optimum tuz konsantrasyonlarına sahip olduklarından, mikrobiyal topluluk yapısı, EPS (hücre dışı polimerik maddeler) ve SMP (çözünür mikrobiyal ürünler) üretimi ve membran biyokirlenmesi için çok önemlidir [9], [10]. Halotolerant (tuzluluğa toleranslı) veya halofilik mikroorganizmaların aklımasyonu ve ortama verilmesi, artan bir tuz ortamı için uygulanabilir stratejilerdir [8]. Klasik MBR sistemi, düşük tuzlu (<10 g/L NaCl) atıksuların verimli bir şekilde arıtılması için doğrudan kullanılabilir. Daha yüksek tuzluluklar için MBR sistemlerinde ön arıtım uygulanabilir.

Bu çalışmada, hafif tuzlu ve alkali koşullarda işletilen batık bir anaerobik membran biyoreaktörde eş zamanlı sülfat ve organik madde giderimi esnasında tuzluluğun membran kirlenmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, Van Gölü'nden alınan çamurla aşılana ve belirli bir kimyasal oksijen ihtiyacı/sülfat (KO_1/SO_4^{2-}) oranında, hidrolik bekleme süresinde (HBS), organik yüklenme oranında (OLR) ve sülfat yüklenme oranında (SLR) işletilen reaktörde iki farklı tuzluluk oranının, membrandaki akı, transmembran basıncı ve membran direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda membran kirlenmesinin değerlendirilmesi açısından membran modül yüzeyi bakteriyel analiz, PBD (partikül büyüklüğü dağılımı), FTIR (fourier dönüşümü kızılötesi), SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve EDX (enerji dağılımlı x-ışını analizi) analizleri ile detaylıca incelenmiştir.

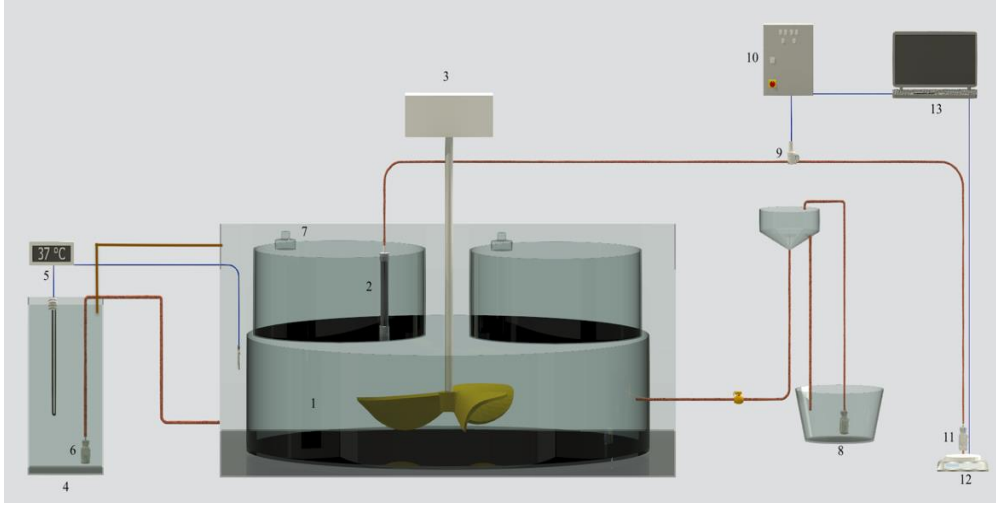
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Anaerobik Membran Biyoreaktör

Çalışmada, 110Y043 no'lu TÜBİTAK desteğiyle yapılan laboratuvar ölçekli tam karışımli anaerobik batık MBR sistemi kullanılmıştır. Reaktörün şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

Reaktörde; besleme tankı, proses tankı, süzütü suyunu deşarj eden peristaltik pompa (Watson Marlow 320S), 2000 mL süzütü suyu depolama tankı, membran modülü (hollow fiber), transformator, sıcaklık göstergesi, manometreler, vanalar, PVC ve silikon bağlantı boruları bulunmaktadır. İki yönlü çalışan süzütü suyu pompaları, merkezi kontrol paneli ile yarı otomatik olarak kontrol edilmektedir. Sistem bir su ceketine sahiptir ve dikdörtgen şeklindeki su ceketinde silindirik şekilli anaerobik tank yer almaktadır. Reaktörün toplam sıvı hacmi 24,5 L'dir. Reaktörde tam karışımı sağlamak için pedallı karıştırıcı (Heidolph, RZR 2041) kullanılmıştır. Karıştırıcının hızı 0-150 rpm arasında değişebilmekte ve değerler dijital ekranda görülebilmektedir. Sistemde akı basıncı için manometre (Kellgr Drugmeststehing, PA-21-BA) kullanılmıştır. Manometre bir kontrol paneli vasıtasıyla kontrol edilmiş ve bu panel bilgisayar programıyla (DAQ factory run time) desteklenmiştir. Akı ölçümü için kullanılan terazi (AND, EK 3000i) bir bilgisayar programına (Rs multi ver. 1.10P) bağlanmış olup anlık akı ve basınç değişimleri izlenmiştir. Çalışmada kullanılan membran modülleri, Zena Membranes'den temin edilen hollow fiber tipteki 0,1 µm por çapına sahip olan polipropilen membranlar ile hazırlanmıştır. Membranlar, işletim şartı değişiminde yenisi ile değiştirilmiş ve temiz membran ile kirlili membran numuneleri için membran yüzeyinde analizler gerçekleştirilmiştir.

BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ



Şekil 1. Anaerobik batık membran biyoreaktör: 1) Tam karışım anaerobik reaktör, 2) Membran 3) Mekanik karıştırıcı, 4) Isıtma tankı, 5) Termostatlı ısıtıcı, 6) Dalgıç pompalar, 7) Gaz çıkışı, 8) Atıksu besleme tankı, 9) Basınç sensörleri, 10) Bilgisayar bağlantılı kumanda tablosu, 11) Peristaltik pompa, 12) Bilgisayar bağlantılı teraziler, 13) Bilgisayar

2.2. AnMBR İşletim Koşulları

AnMBR, Tablo 1’de bileşimi verilen sentetik olarak hazırlanan atıksu ile beslenmiştir. Karbon kaynağı olarak asetat ve etanol, sülfat kaynağı olarak Na_2SO_4 kullanılmıştır. Reaktör toplamda 409 gün boyunca işletilmiş, bu süre içerisinde farklı karbon kaynaklarının, HBS’lerin, $\text{KOİ}/\text{SO}_4^{2-}$ oranlarının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ise tuzluluk konsantrasyonu 310-340 günleri arasında 10 g/L iken son 29 günde yani 380-409. günlerde 20 g/L’ye çıkarılarak tuzluluğun membran kirlenmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yani reaktör 409 gün boyunca işletilirken bu sürenin 59 günlük kısmında tuzluluğun etkisi, geri kalan kısmında ise HBS, $\text{KOİ}/\text{SO}_4^{2-}$ oranları gibi şartların etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada da 59 günlük sürede elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu amaçla bu iki periyotta $\text{KOİ}/\text{SO}_4^{2-}$ ve etanol/asetat oranı 1 olarak ayarlanmış ve bu oranlara göre sentetik atıksuya ilave edilecek olan kimyasal miktarları belirlenmiştir. Biyoreaktördeki işletimde pH yaklaşık 9,5 civarında tutulmuş ve sıcaklık 37 °C olarak ayarlanmıştır. Reaktör 1/3 oranında aşı (zenginleştirme sonrası DSMZ)/sentetik atıksu karışımıyla beslenmiştir. Reaktör işletiminde HBS, 10 gün olarak ayarlanmıştır. 59 gün boyunca çalıştırılan reaktör işletimine ait deneysel şartlar Tablo 2’de sunulmuştur. Başlangıç KOİ ve SO_4^{2-} konsantrasyonu ve HBS esas alınarak reaktör işletimindeki şartlar değiştirilmiştir.

Tablo 1. AnMBR beslemesi için kullanılan sentetik atıksuyun bileşimi

Bileşen	Konsantrasyon (1000 mL için)
NaCl	10-20 g
Na_2HPO_4	0,2 g
KCl	0,2 g
NH_4Cl	1,0 g
Metal solüsyonu	10 mL
Resazurin	0,5 mg
NaHCO_3	15 g
Na_2CO_3	10 g
Maya ekstraktı	1,5 g
Vitamin solüsyonu	10 mL
$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	1 g

B. Yıldız, Ö. Hanay

Tablo 2. AnMBR işletiminde uygulanan şartlar

Periyot	Gün	KOI (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NaCl (mg/L)	HBS (gün)
1	0-30	3000	3000	10 000	10
2	31-59	3000	3000	20 000	10

2.3. Membran Kirlenme Karakterizasyonu

Hazırlanan modüllerde sabit transmembran basıncı koşullarında deiyonize su vakumlanarak, deiyonize suyun süzöntü akışı ve dinamik viskozitesi dikkate alınarak temiz su membran dirençleri (R_m) belirlenmiş ve hesaplamada aşağıdaki Denklem (1) kullanılmıştır [11].

$$J = \frac{TMP}{\eta \cdot R_m} \quad (1)$$

Burada;

J : Membrandan geçen süzöntü akışı (L/m².sa),

TMP : Transmembran basıncı (Pa),

η : Dinamik viskozite (Pa.s)

R_m : Membran direnci (1/m)'dir.

Membran modülünde temiz su membran dirençleri belirlendikten sonra modül, daha önceden hazır hale getirilmiş olan biyoreaktöre yerleştirilmiştir. Membran biyoreaktörde sabit TMP'de filtrasyonun başlangıç aşamasında hızlı bir akı azalmasının oluşacağı beklenir. Membran kirlenme potansiyelini değerlendirmek için sabit basınçta sürekli akı ölçümü izlenmiş ve detaylı hidrolik bir analiz yapılarak Darcy kanununa dayalı olan toplam membran direnci Denklem (2)'ye göre tespit edilmiştir.

$$J = \frac{TMP}{\eta \cdot R_t} \quad (2)$$

Kirlenen membran modülleri sistem içerisinde alınarak oluşan kek tabakası sıyrılmış ve deiyonize su kullanılarak akı ve viskozite belirlenmiştir. Spesifik kek direnci dışındaki direnç (R_m+R_p) Denklem (3)'e göre hesaplanmıştır.

$$J = \frac{TMP}{\eta \cdot (R_m+R_p)} \quad (3)$$

Kek direnci dışındaki dirençten (R_m+R_p) temiz membran için ölçülen direnç (R_m) çıkarılarak por tıkanması ve yüzeyde adsorblanma sonucu oluşan kirlenme direnci (R_p) belirlenmiştir. Aşağıdaki Denklem (4) kullanılarak toplam direnç ve kek direnci dışındaki direncin farkı alınarak spesifik kek direnci hesaplanmıştır.

$$R_t = R_m + R_c + R_p = \frac{TMP}{\eta \cdot J} \quad (4)$$

Burada;

J : Süzöntü akışı (l/m².sa),

R_t : Toplam membran direnci (1/m),

η : Süzöntü suyunun dinamik viskozitesi (Pa.s),

R_m : Temiz membran direnci (1/m),

R_p : Gözenek tıkanması ve adsorbsiyondan kaynaklanan kek direnci dışındaki direnç (1/m),

R_c : Kek direncidir (1/m)

2.4. DGGE Analizi

Çalışma süresince AnMBR reaktöründe mikrobiyal tür değişimini tespit etmek amacıyla PCR-DGGE (polimeraz zincir reaksiyonu-denatüre gradyan jel elektroforezi) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla AnMBR'nin işletme süresi boyunca membran yüzeyinden numune alınarak -20 °C'de muhafaza edilerek biriktirilmiştir. Mikrobiyal analizler uygulanırken ilk olarak numunelerde mevcut olan mikroorganizmalara ait DNA, PowerSoil DNA İzolasyon Kiti kullanılarak ekstrakte edilmiş ve daha sonra izole edilen DNA'lara PCR işlemi (ilk denatürasyon, denatürasyon, bağlama, uzama ve son uzama işlemleri için sıcaklıklar sırasıyla 95, 94, 50, 72 ve 72 °C iken süreler sırasıyla 5, 0.5, 1, 2 ve 10 dakikadır) uygulanarak hedeflenen bölgenin çoğaltılması sağlanmıştır. Ardından elde edilen PCR ürünlerine DGGE işlemi uygulanarak her bir mikroorganizmaya ait DNA'nın gradyan jel içerisinde ayrılması sağlanmıştır. Jel içerisinde ayrılan DNA'lar jelden ekstrakte edilerek PCR işlemi ile tekrar çoğaltılmış ve

BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DNA dizileme işlemine gönderilmiştir. Dizi analizi sonuçları BLAST programı kullanılarak gen bankasındaki [12] benzerlik yüzdeleri, organizma sınıfları ve referansları belirlenmiştir.

2.5. Analitik Metotlar

SMP analizleri için, karışık sıvı 10 dakika süreyle 4000 rpm'de santrifüjlenmiş ve daha sonra süpernatant gözenek boyutu 0.45 µm olan bir membrandan süzümüştür. Süzüntü, protein ve karbonhidrat olarak SMP ölçümü için kullanılmıştır. Karbonhidrat ve protein ölçümleri için sırasıyla fenol-sülfürik asit ve Lowry yöntemleri kullanılmıştır [13], [14]. EPS ölçümü için, santrifüjleme işleminden kalan pelete distile su ve formaldehit ilave edilerek 4 °C'de bekletilmiştir. NaOH içerisinde bekletme ile kimyasal ekstraksiyon işlemi tamamlanmıştır ve bir kez daha santrifüj işlemi uygulanmıştır. Süpernatant, 0.45 µm gözenek boyutlu filtreden süzümüş ve EPS'deki protein ve karbonhidrat konsantrasyonları belirlenmiştir. Protein kalibrasyonunda standart protein çözeltisi olarak Bovin Serum Albumin (BSA) kullanılmıştır. Karbonhidrat analizinde ise standart çözeltiler glikoz kullanılarak hazırlanmıştır. Ölçümler, UV spektrofotometre kullanılarak protein için 660 nm, karbonhidrat için 490 nm dalga boyunda aynı koşullarda hazırlanan şahide karşı yapılmıştır. Çalışma süresince reaktör girişinden, sıvısından, çıkışından ve kirlenmiş membran yüzeyinden alınan örneklerde EPS ve SMP analizleri yapılmıştır.

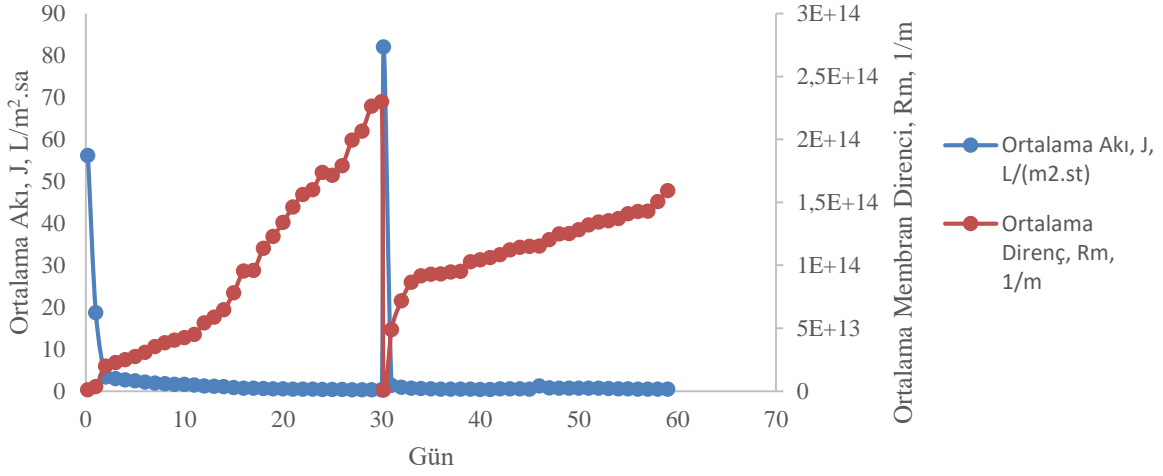
Aynı KOİ/SO₄²⁻ oranında ve aynı HBS'de fakat farklı tuzluluk konsantrasyonlarında çalıştırılan SANMBR sisteminde her çalışma periyodu sonunda membran modülleri çıkarılarak, membran modülünün ortasından yaklaşık 1 cm olacak şekilde bir parça kesilmiş ve %2,5 paraformaldehit çözeltisinde bekletilmiştir. Kesilen membran örnekleri 0,1 mol/L'lik fosfat tampon çözeltisi ile pH 7,2'de ve +4 °C'de üç kez yıkanmıştır. Membran tabakası sıyrılmış ve sıyrılmamış örneklere ait görüntüler Taramalı Elektron Mikroskopu'nda (FEI-Quanta FEG 250) görüntülenmiştir. Ayrıca temiz membran ve kirlenmiş membran kek tabakasının inorganik bileşiminin belirlenmesi için Enerji Diffüz X-Ray analiz cihazı (FEI-Quanta FEG 250) kullanılarak elementel analizleri gerçekleştirilmiştir. Kirlenmiş membran modüllerinin üzerinde oluşan kek tabakası, bir sünger vasıtasıyla sıyrılmış ve kek tabakasının partikül boyutları ile reaktör sıvısının tane boyutu dağılımı, Mastersizer analizörü (Malvern Mastersizer 2000) kullanılarak lazer difraksiyon metodu ile hacimsel dağılımlara dayalı olarak belirlenmiştir. Temiz ve kirlenmiş membranların yüzey yapısında meydana gelen değişimlerin belirlenmesinde FTIR spektrofotometresi (Perkin Elmer-Spectrum 100) kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Akı, TMP, Membran Direnci Değişimleri ve Kirlenme Oranları

Hazırlanan her bir membran modülü için temiz su membran akıları 1 saat süre ile alınmıştır. Uygun HBS'leri sağlayan transmembran basınçları uygulandığında; akılar her bir membran modülü için sırasıyla 54-59 l/m².sa ve 80-87 l/m².sa aralığında hemen hemen sabitlenmiştir ve temiz membran dirençlerinin ise sırasıyla 1,12.10¹²-1,35.10¹² 1/m ve 7,82.10¹¹-8,1.10¹¹ 1/m aralığında sabit olduğu belirlenmiştir.

Çalışma sırasında peristaltik pompalar istenilen HBS'leri sağlayacak olan devir/dak'larda çalıştırılarak membranda süzüntü akısı izlenmiştir. Şekil 2'de membranlarda zamana karşı kaydedilen süzüntü akıları ve ortalama membran dirençleri görülmektedir. Bu şekle göre başlangıç membran akı değerleri giderek azalmıştır. Bir süre daha çalıştırdıktan sonra membranlar yenisi ile değiştirilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi tüm membran modülleri için akı değerlerindeki azalma, modül reaktöre yerleştirildikten sonra çok hızlı bir şekilde meydana gelmiştir. Yani ilk anlarda çok ani akı düşüşü görülmüştür. Daha sonra işleme devam edildikçe akı azalması devam etmesine rağmen bu düşüş ilk günlerdeki gibi yüksek hızlı olmamıştır. Bu durum tüm membran modülleri için aynı şekilde gerçekleşmiştir. Bu da, filtrasyon sırasında, membran gözenek boyutundan daha küçük partiküllerin gözeneklerde birikmesi, gözenekleri bloke etmesi, daha büyük partiküllerin membran yüzeyinde birikmesi [15] ve ilave olarak, membran yapısının içinde tutulan veya membran yüzeyinde biriken kolloidlerin çözünmüş organik bileşikleri adsorbe edebilmesi [16] sebebiyledir.



Şekil 2. Her iki periyoda ait membranlarda zamana karşı kaydedilen süzütü akıları ve hesaplanan ortalama membran dirençleri

P1'in başlangıcında temiz membranın su akısı $56,196 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ iken bu değer ilk günde $18,708 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ 'e ikinci günde $3,896 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ 'e periyodun sonunda $0,329 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ 'a kadar düşmüştür. P2'de başlangıçta $82,055 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ olan akı değeri bir gün sonunda $1,416 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ 'e periyot sonunda $0,470 \text{ l/m}^2\cdot\text{sa}$ 'e düşmüştür.

SAnMBR sisteminin işletilmesi sürecinde, toplam kirlenme dirençleri membran modülündeki süzütü akısının tam tersi yönünde artış göstermiştir. Membran akısında başlangıçta meydana gelen akı düşüşüne karşılık TMP'de ani artış gözlenmiştir. Hızlı TMP artışı, (1) işletme süresiyle birlikte kek tabakasına uygulanan bir sıkıştırılmadan ve (2) kek tabakasının içinde hücre dışı polimerik maddelerin (EPS) içeriğinin artmasından kaynaklanan gözeneklilikteki bir azalma ile ilişkili olabilir [17], [18].

Beslemedeki partiküllerin boyutunun membran gözeneklerinin boyutuna oranı membrandaki kirlenmeyi en çok etkileyen parametrelerden biridir [15]. Gözenekler, gözenek çapından daha küçük partiküller tarafından daha hızlı bloke edilir. Çalışmamızda da membranlar sisteme yerleştirildikten sonra meydana gelen hızlı akı azalması dolayısıyla membran direnci artışı muhtemelen gözeneklerin küçük partiküller tarafından tıkanması ve sonuç olarak membran gözenek boyutunun azalması sebebiyledir. Sonrasında meydana gelen daha düşük değişim oranları ise kirleticilerin membran yüzeyindeki kek tabakasında birikmesi sebebiyledir.

Membran modülü için toplam kirlenme direnci içerisinde spesifik kek direnci (R_c), temiz membran direnci (R_m), gözenek tıkanması ve yüzeyde adsorplanma sonucu oluşan direnç (R_p) bulunmaktadır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için modül her değiştirildiğinde üzerinde bulunan kek tabakası dikkatli bir şekilde sıyrılmış ve sonrasında temiz su membran akıları 1 saat süreyle alınmış ve Denklem (4)'e göre hesaplamalar yapılmıştır. Sıyrılmış membranların dirençleri yani spesifik kek direnci dışındaki direnç ise her iki membran modülü için sırasıyla $2,6.10^{12}$ - $2,7.10^{12}$ ve $1,69.10^{12}$ - $1,75.10^{12}$ olarak hesaplanmıştır.

Denklem (4) dikkate alındığında membran modülleri için R_p değerleri sırasıyla, $1,47.10^{12} \text{ 1/m}$ ve $9,14.10^{11} \text{ 1/m}$ olarak hesap edilmiş ve R_c değerleri de sırasıyla $2,27.10^{14} \text{ 1/m}$ ve $1,49.10^{14} \text{ 1/m}$ şeklinde bulunmuştur.

Her iki periyot boyunca direnç artışları akı azalmasını doğrulayacak şekilde meydana gelmiştir. Kirlenme daha çok kek tabakası oluşumu sebebiyle gerçekleşmiştir ve kek dirençleri, por tıkanması sebebiyle oluşan dirençlerin 150 ile 165 katı olarak hesap edilmiştir.

P1'de sisteme aşı verilmesiyle birlikte organik madde olarak asetat ve etanol kullanılmıştır. Sisteme 3000 mg/L 'lik SO_4^{2-} konsantrasyonu uygulanmıştır. KOİ/SO_4^{2-} oranı $3000/3000$ ve etanol/asetat: $1500/1500$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu periyotta kirlenmenin çok fazla olması sülfatın yüksek konsantrasyonu sebebiyledir. Song vd. [19], yüksek sülfat konsantrasyonunun ($> 200 \text{ mg/L}$), yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörün işletimi sırasında, anaerobik çürütücülerden SMP ve EPS'nin ana bileşenleri olan karbonhidrat ve proteinin salınımını önemli ölçüde arttırdığını bildirmiştir. Hem SMP hem de EPS, aerobik veya anaerobik MBR sistemlerinde gözenek tıkanıklığında ve membran yüzeyinde kek tabakasının oluşumunda önemli bir rol oynar.

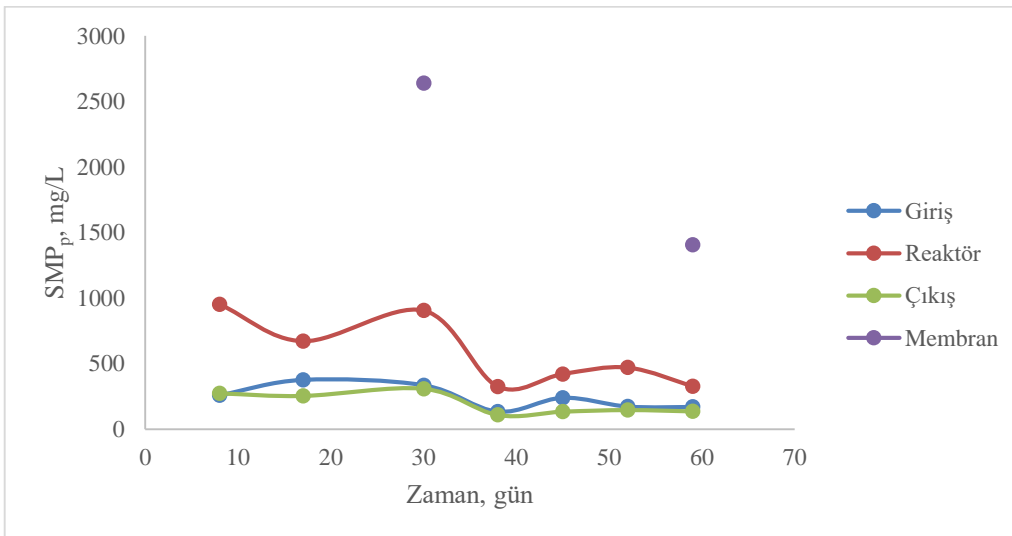
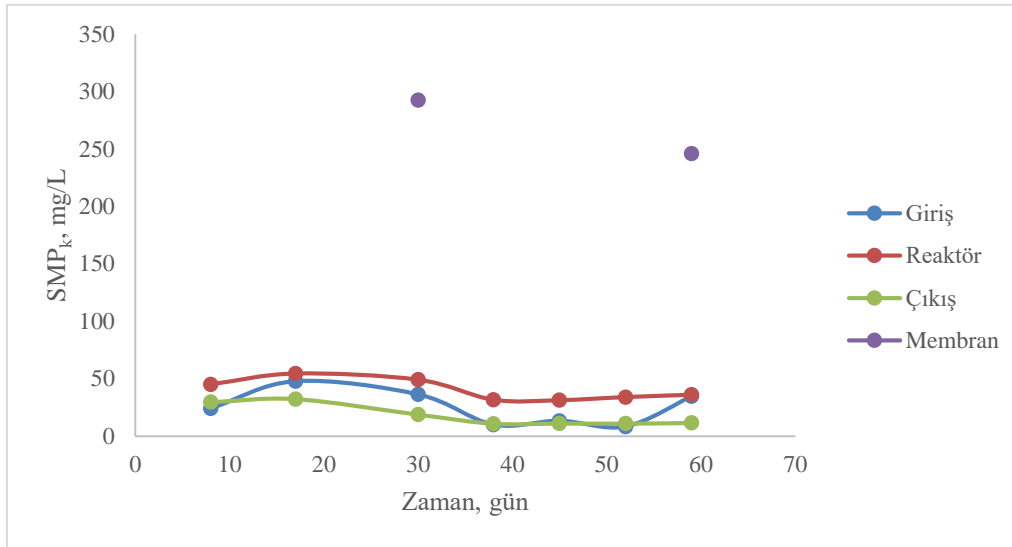
İkinci periyotta yani P2'de artan tuzluluğun membran kirlenmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu periyotta membran değişimi yapılarak işletmeye devam edilmiş KOİ/SO_4^{2-} : $3000/3000$, etanol/asetat: $1500/1500$ olarak seçilmiş ve NaCl : 20 g/L olarak uygulanmıştır. Tuz konsantrasyonunun artması diğer periyotlardaki gibi akının hızla azalmasına neden olmuştur. Fakat toplam membran direnci daha hızlı ve daha fazla artış göstermiştir. Bu da membran gözeneklerinde inorganik maddelerin birikmesi ve membran yüzeyindeki kek tabakasında EPS ve SMP konsantrasyonlarının artmasıyla açıklanabilir. Ayrıca inorganik moleküller, sadece gözenekleri bloke edecek kadar büyük olmasa da hücre dışı polimerlerin fonksiyonel gruplarıyla bağlanabilir, böylece inorganik moleküllerin boyutunu artırabilir ve gözenekleri bloke edebilir [20]. Tuz stresinin membran kirliliğini

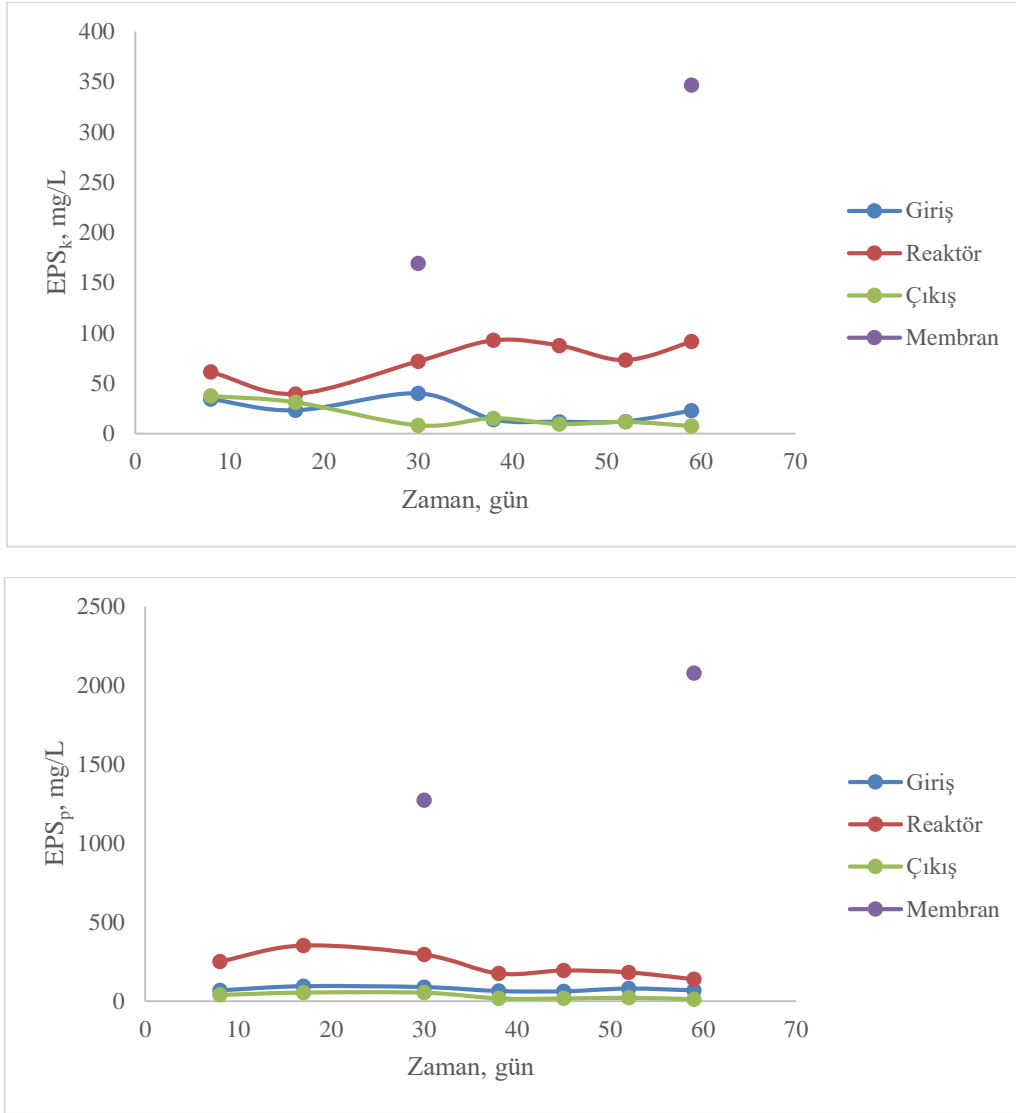
BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

arttırdığına dair sonuçlar Temmerman vd. [21], tarafından yapılan çalışmada da bulunmuştur. Yüksek tuzluluk veya yüksek iyonik kuvvetler, elektrostatik çift katmanlı itici kuvvetleri azaltır, böylece kirletici kek katmanındaki partiküller arası mesafe azalır. Bu durum, daha yoğun bir şekilde meydana gelmiş olan kirlenme tabakasının oluşumuna katkıda bulunur ve biyolojik bir süspansiyonun daha yüksek iyonik kuvvetinde süzüntü akışına karşı direnci artırır [22]. P2'yi şartların aynı olduğu sadece tuzluluğun 10 g/L olduğu P1'e kıyaslırsak toplam kirlenme, por tıkanmasından kaynaklanan kirlenme ve kek oluşumundan kaynaklanan kirlenme yaklaşık 1,5 kat azalmıştır. Bir diğer yönden; flokların parçalanması, biyolojik arıtım süreci için şok yüklerin en önemli sonucudur [23]. Yüksek tuz konsantrasyonları bazı mikroorganizmaların yapısının bozulmasına neden olur ve flokülasyona yardımcı olan polimerleri ve EPS üretmelerini önler [24].

3.2. SMP ve EPS konsantrasyonlarındaki değişimler

Membran kirlenmesinin değerlendirilmesi amacıyla tüm deneysel periyotlarda belli aralıklarda giriş, reaktör, çıkış ve membran yüzeyinden alınan numunelerde SMP ve EPS konsantrasyon değerleri ölçülmüştür. Şekil 3'de, her iki periyot için SMP ve EPS fraksiyonları verilmiştir. Her iki parametre için reaktör çıkışında daha düşük konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Bu durum membran modülünün ve kek tabakasının SMP ve EPS'yi tutabilen bir ortam sağladığını göstermektedir. Genel olarak EPS ($EPS_k + EPS_p$) (EPS'deki karbonhidrat+EPS'deki protein) değerleri SMP ($SMP_k + SMP_p$) (SMP'deki karbonhidrat+SMP'deki protein) değerlerinden daha düşük olarak belirlenmiştir. Ayrıca EPS ve SMP, karbonhidratlardan daha fazla miktarda proteine sahiptir, bu da önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyum içindedir [25]-[27]. Ayrıca daha yavaş hidrolize olmaları sebebiyle de proteinlerin konsantrasyonu, karbonhidratlarınkinden daha yüksektir [17]-[28].





Şekil 3. İki periyot için ölçülen SMP ve EPS fraksiyonları

Reaktörün işletildiği ilk 309 günün aksine tuzluluğun membran kirlenmesi üzerindeki etkisinin incelenmeye başlandığı P1'de organik madde olarak etanol ve asetat birlikte kullanılmaya başlanmıştır. İki elektron vericisinin kullanılması protein konsantrasyonunda değişikliğe sebep olmuştur fakat sistem iki organik maddeye alıştıktan sonra meydana gelen dalgalanma düzelmiştir. Proteinde meydana gelen bu değişiklik hücre lizis ürünlerinden (örneğin DNA, RNA, enzimler) kaynaklanmış olabilir. Kek tabakasında yapılan analizler de aşırı şekilde protein ve karbohidratın biriktiğini göstermiştir. Bu durumun bu periyotta uygulanan aşı sebebiyle meydana gelmiş olabileceği düşünülmüştür.

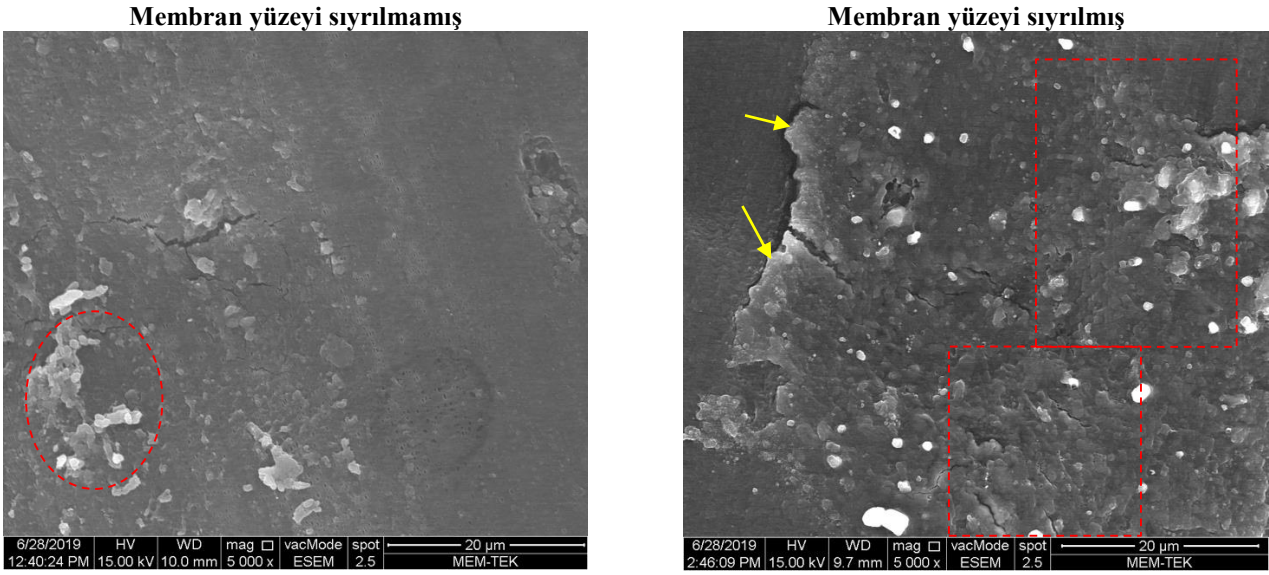
P2'de tuzluluğun arttırılması SMP_k'da bir değişiklik meydana getirmezken, SMP_p'de, EPS_k'da ve EPS_p'de dalgalanmalara neden olmuştur. Membran yüzeyindeki EPS konsantrasyonunun çok fazla şekilde arttığı SMP konsantrasyonunun ise çok değişmediği görülmüştür. Bu periyotta önceki başlıkta belirtildiği gibi kirlenmenin artması tuzluluk artışı sebebiyle özellikle EPS'nin artması nedeniyledir. Çözünabilir EPS'deki artış esas olarak plazmolizden ve hücre içi bileşenlerin salınmasından, organik maddelerin ve mikrobiyal olarak üretilen polimerlerin tamamlanmamış bozunmasıyla metabolize edilmemiş ürün ve ara ürünlerin birikmesinden kaynaklanmaktadır [29]. Bazen bazı mikroorganizmalar, toksik bileşiklere karşı kendini savunmak ve kendilerini korumak için polimerler üretirler. Bu aynı zamanda sodyum klorür konsantrasyonundaki artışa karşı, çözünür EPS'deki artışın bir nedeni olabilir. Yagalakshmi ve Joseph [24], yaptıkları çalışmada artan sodyum klorür şok yükleri ile bağlı EPS'de azalma ve çözünür EPS'de bir artış olduğunu, bağlı EPS'de meydana gelen azalmaların flok bozulmasına neden olduğunu bulmuşlardır.

BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

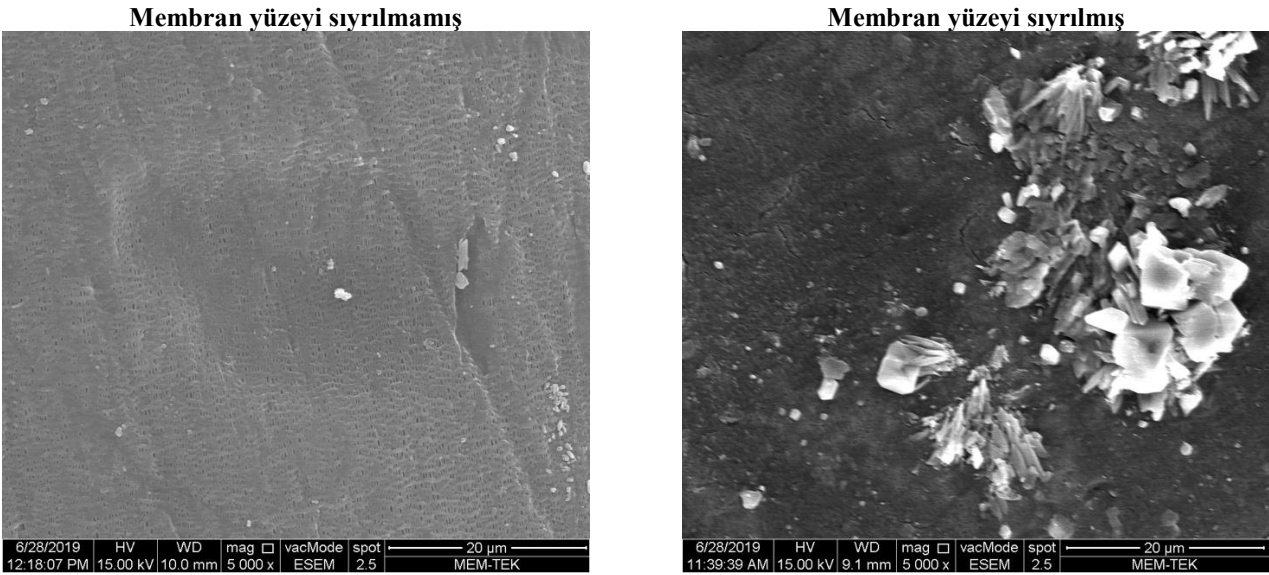
3.3. SEM, EDX, FTIR ve PBD Sonuçları

Reaktörden çıkarılan membranların yüzeyleri sıyrılmamış ve sıyrılmış olarak SEM görüntüleri, Şekil 4 ve 5’de ve EDX sonuçları, Şekil 6 ve 7’de gösterilmiştir.

P1’e ait SEM görüntüleri incelenecek olunursa; her iki yüzeyde de flok yapılarına benzer yapıların oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4). Buna göre mikrobiyal bir kirlenmenin olduğu her iki yüzey için de tespit edilmiştir. Bu duruma paralel olarak EDX sonuçlarında da karbon yüzdesi %80 ve %85 olarak belirlenmiştir (Şekil 6). Şekil 5’de P2’ye ait SEM görüntülerinde sıyrılmamış kısımda her ne kadar kristalize yapıların mevcut olduğu düşünülse de EDX sonuçlarına bakıldığında farklı bir durum oluşmuştur. Karbon yüzdesi ağırlıkça %87 iken sıyrılmış kısımda bu oran %55’e düşmüştür. Aynı zamanda sıyrılmış yüzeydeki Na⁺ ve Cl⁻ iyonlarının mevcudiyeti membran gözeneklerinin bu iyonlarla tıkalı olabileceğini düşündürmüştür (Şekil 7).

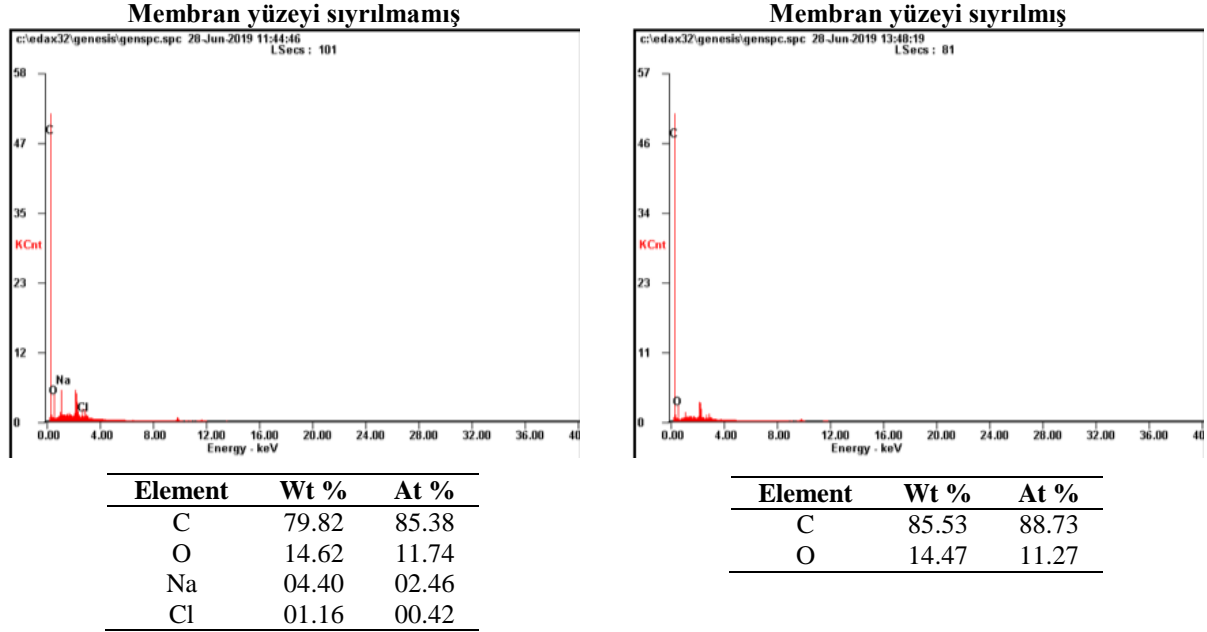


Şekil 4. P1’e ait membran SEM görüntüleri (kırmızı: flok benzeri yapılar, sarı: EPS benzeri yapılar)

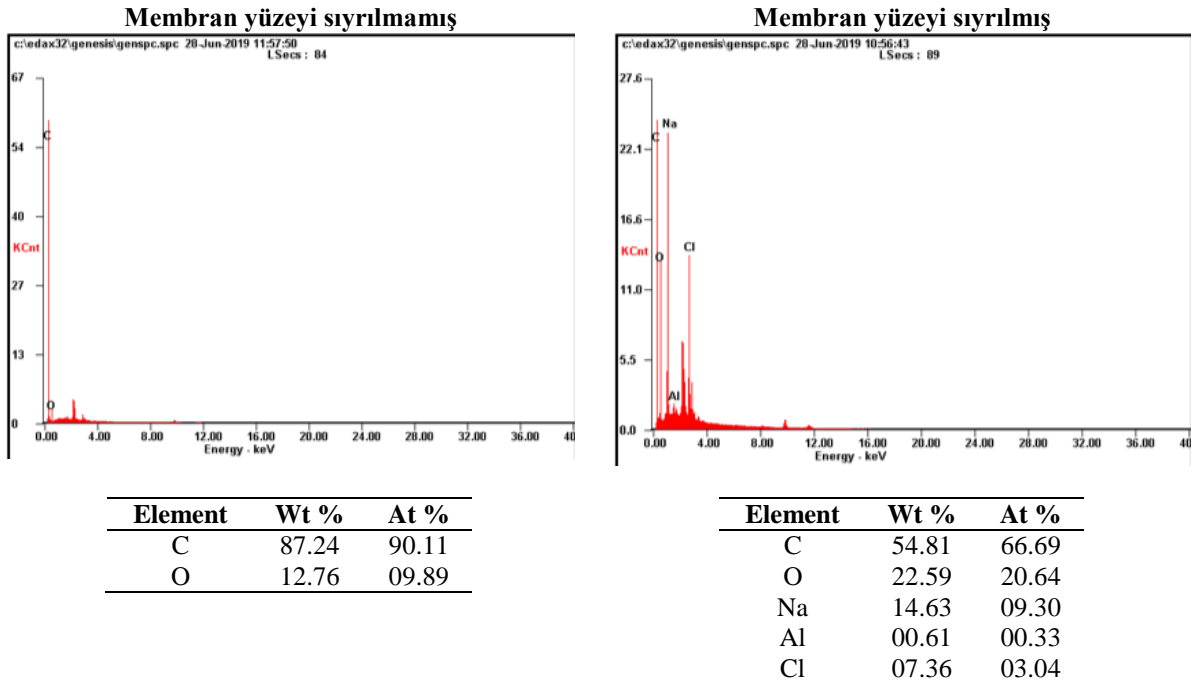


Şekil 5. P2’ye ait membran SEM görüntüleri

B. Yıldız, Ö. Hanay



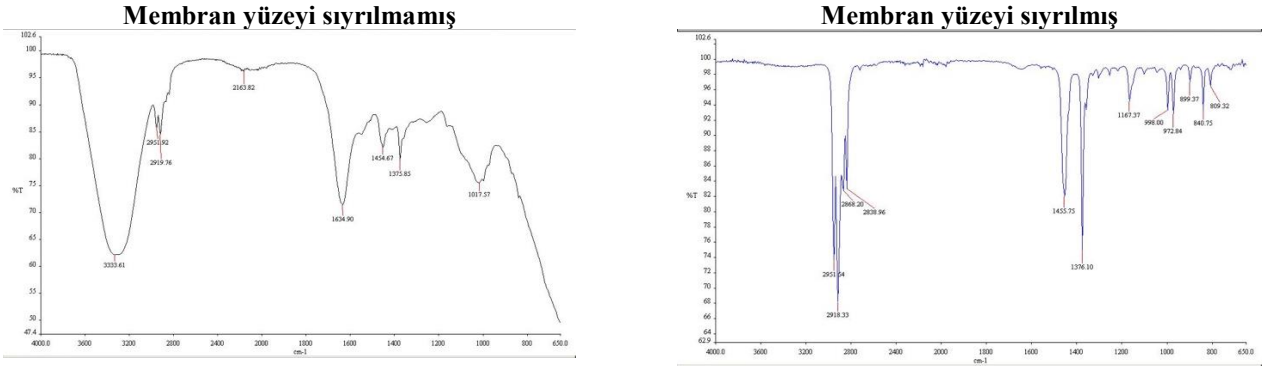
Şekil 6. P1'e ait membran EDX sonuçları



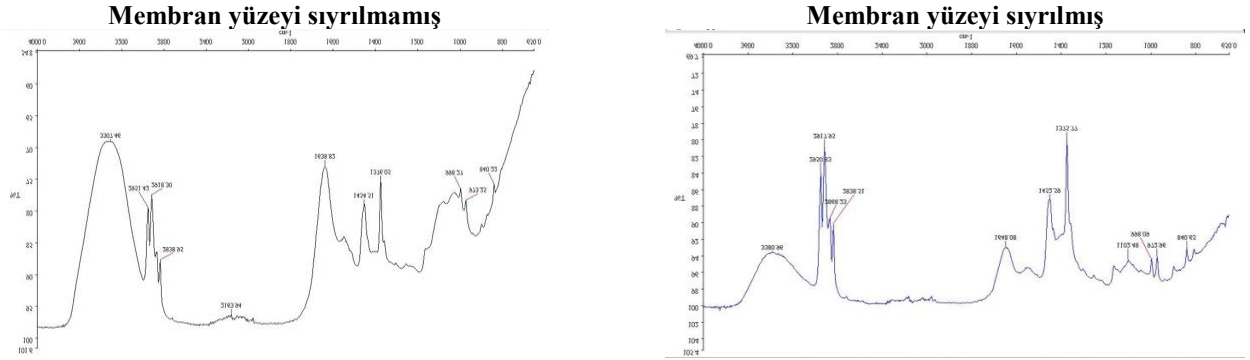
Şekil 7. P2'ye ait membran EDX sonuçları

Farklı periyotlarda gerçekleşen fonksiyonel gruptaki değişiklikleri belirlemek amacıyla hem kirli membrana ait hem de yüzeyi sıyrılmış membrana ait FTIR sonuçları aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Şekil 8'de P1'e ait membran FTIR spektrumları gösterilmiştir. P1'de diğer membrana kıyasla sıyrılmış membran yüzeyi tamamıyla temiz membran ile aynıdır, dolayısıyla sıyırma işlemi etkin gerçekleşmiştir. Buna karşılık sıyrılmamış kısımda 3333, 2163 ve 1634 cm^{-1} spektrumları tespit edilerek; bunların hidroksil fonksiyonel gruba ve amid gruplarına ait olduğu belirlenmiştir. P2'ye ait FTIR sonuçları ise Şekil 9'daki gibidir. Buna göre sıyrılmış membran yüzeyinde daha fazla fonksiyonel grup çeşitliliği gözlenmiştir. 3380, 2868, 2838, 1648, 1102 cm^{-1} , ikincil protein gruplarına ait amid grupları ile alifatik metilen bandlarını ve hidroksil gruplarını işaret etmektedir.

BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ



Şekil 8. P1'e ait membran FTIR sonuçları



Şekil 9. P2'ye ait membran FTIR sonuçları

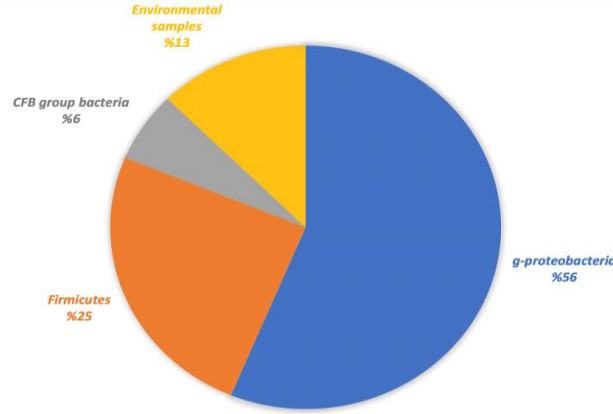
Tüm periyotlar dikkate alındığında membran yüzeyinin daha çok protein ve polisakkaritlerden oluşan tabaka ile kirlendiği ve membran yüzeyindeki organik kirlenmenin EPS kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Her ne kadar partikül boyut dağılımının membran kirlenmesindeki rolünün hala belirsiz olduğu belirtilmişse de [17,30] tek başına partikül boyutunun membran kirlenmesi ile ilişkilendirilmeyeceği, flok şekli, EPS/SMP ve AKM konsantrasyonunun önemli olduğu da belirtilmiştir [31]. Partikül boyut dağılımı sonuçlarından kek tabakasının çoğunlukla 1-100 µm aralıklarında (daha çok 10-100 µm) olduğu görülmüştür. Bu durum iki periyotta da aynıdır. Flok yapısının reaktör işletme faktörlerinin değiştirilmesiyle bir değişime uğramadığı düşünülmüştür. Ng vd. [17], farmasötik atıksuların arıtımında kullanılan anaerobik biyoreaktördeki membran kek tabakasında 1 ile 160 µm aralıklarında değişen partikül boyutlarını tespit etmişlerdir.

Tuzluluk konsantrasyonunun artırıldığı son periyotta EPS konsantrasyonu artmış olmasına rağmen SMP konsantrasyonu çok az miktarda azalmış, daha çok karbonhidrat konsantrasyonunda değişiklik meydana gelmiştir. Bu durum partikül boyut dağılımının 100-1000 µm olan aralığında bir değişiklik meydana getirmemiştir. Bu da karbonhidratların partikül boyut dağılımının daha çok 1-100 µm aralığında olduğunu, 100 ile 1000 µm aralığında olan dağılımın ise daha çok protein kaynaklı olduğunu düşündürmüştür.

3.4. Bakteriyel Topluluk Değişimi

Çalışma süresince reaktör ortamında gerçekleştirilen mikrobiyal ekoloji çalışma sonuçlarıyla P1 ve P2'de baskın mikrobiyal türlerin önemli bir yüzdesinin (%56) Şekil 10'da gösterildiği gibi *g-proteobacteria* grubuna ait bakteriler olduğu tespit edilmiştir. Yine bu periyotlarda tespit edilen bakterilerin %6'sı *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides (CFB)* grubuna ait bakterilerdir. Her iki periyot için tespit edilen bakterilerin %25'i *Firmicutes* grubuna ait bakterilerdir. Literatürde yapılmış çalışmalarda söz konusu bakteri gruplarına ait bakterilerin haloalkali şartlarda işletilen reaktörlerde [32] veya sülfat indirgemesinin gerçekleştiği diğer ortamlarda tespit edilen bakteriyel gruplar olduğu belirtilmiştir [33,34,35]. Şekil 10'daki *Environmental Samples*, kültürlenememiş türleri gösterirken %13 değeri ise rölatif bulunma yüzdesi düşük olan bu türlerin sistemdeki tüm türler içerisindeki bulunma yüzdesini ifade etmektedir.



Şekil 10. P1-P2'ye ait örneklerde tespit edilen türlerin ait olduğu tür sınıfları

Özellikle *Uncultured Trachelomonas* (JN679075), *Uncultured Chitinophagaceae bacterium* (HG973425), *Uncultured Trachelomonas* (JN679099), *Uncultured beta proteobacterium* (FM991991), *Georgfuchsia toluolica* (NR_115995), *Uncultured proteobacterium* (HE861143), *Uncultured bacterium* (KR312920), *Uncultured bacterium* (KR325607) türleri, sistemde baskın durumda olduğu için bu türlerin etanol oksidasyonundan sorumlu olabileceği düşünülmektedir. İkinci işletme periyodunda *g-proteobacterium*, *Halomonas aidingensis* ve *Halomonas campisalis* türleri ortamda baskın duruma gelmiştir. Bu türlerden *Halomonas aidingensis* ve *Halomonas campisalis* de yüksek alkali şartlarda ve tuz konsantrasyonlarında yaşayan türlerdir [36], [37].

AnMBR'da direkt olarak sülfat indirgenmesinden sorumlu bir tür tespit edilememiştir. Ancak belirlenen türlerden *Uncultured gamma proteobacterium* [38], *Thiobacillus aquaesulis* [39,40,41], *Zobellella taiwanensis* [39,40] türlerinin, sülfatın mevcut olduğu ortamlarda, *Gamma proteobacterium* [44], *Acinetobacter calcoaceticus* [45], *Caldanaerobacter subterraneus* [46] ve *Uncultured Clostridia bacterium* [47] türlerinin ise sülfat indirgenmesinin gerçekleştiği ortamlarda baskın oldukları daha önce tespit edilmiştir. Literatür verileri ortamda direkt olarak sülfat indirgenmesinden sorumlu bir mikroorganizma türünün olmaması durumunda da sülfat indirgenmesinin gerçekleşebileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada haloalkali şartlarda sentetik atıksuda eş zamanlı organik madde giderimi ve sülfat indirgenmesi söz konusu olduğunda tuzluluğun oluşturabileceği membran kirlenmesi araştırılmıştır. Bu amaçla ilk periyotta 30 gün boyunca 10 g/L olan NaCl konsantrasyonu ikinci periyotta 20 g/L'e çıkartılarak biyoreaktör yaklaşık bir ay daha işletilmiştir. İlk periyotta %50-65 arasında KOİ giderimi elde edilirken, %60-70 arasında SO₄²⁻ giderimi gözlenmiştir. İkinci periyotta ise %80-98 oranında KOİ ve azalan SO₄²⁻ giderimi meydana gelmiştir. Periyodun sonlarına doğru KOİ giderimi artarken, SO₄²⁻ giderimi sağlanamamıştır. Mikrobiyal analiz sonuçlarından da görülebileceği gibi ortamda metan bakterilerinin mevcut olmaması sebebiyle ve yüksek oranda KOİ giderimine karşılık reaktör karışımının pH'ı yüksek olduğu için CO₂'nin daha çok karbonat ve bikarbonat formunda bulunması sebebiyle her iki periyotta da gaz oluşumu gözlenmemiştir. Her iki periyottaki membran kirlenmesi daha çok kek tabakası oluşumu sebebiyle gerçekleşmiştir. Tuz konsantrasyonunun artması diğer periyottaki gibi akının hızla azalmasına neden olmuştur. Membran modülü ve kek tabakası SMP ve EPS'yi tutabilen bir ortam sağladığı için reaktör çıkışında daha düşük konsantrasyonlar elde edilmiştir. Genel olarak SMP değerleri EPS değerlerinden daha yüksek ve SMP ile EPS'in protein kısımları da karbonhidrat kısmından daha yüksek konsantrasyonlarda bulunmuştur. SEM ve EDX sonuçlarından membran porlarının daha çok organik kirlenmeye bağlı olarak kirlendiği düşünülmüştür. Sıyrılmış ve sıyrılmamış membran yüzeylerinin FTIR spektrumlarından membran yüzeylerinde hidroksil fonksiyonel grupları, amid I grubu ile EPS'nin selülozik lipid yapısıyla ilişkili gruplar belirlenmiştir. İkili organik karbon kaynağının beslemede kullanılması, daha büyük yapılı organik maddelerin (100-1000 µm) küçük moleküllerle (10-100 µm) birlikte kirlenmeye katkıda bulunmaya başladığını göstermiştir. Mikrobiyal ekoloji analizi ile her iki periyotta da baskın olan mikrobiyal türlerin önemli bir yüzdesinin (%50) *g-proteobacteria* grubuna ait bakteriler olduğu tespit edilmiştir.

BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Burçin Yıldız'ın Doktora Tezi verilerini içermektedir. Bu araştırma, 116Y133 ve 110Y093 numaralı projeler ile TÜBİTAK tarafından finansal olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] J. C. Young, and P. L. McCarty, "The anaerobic filter for waste treatment," *J. Water Poll. Contr. Fed.*, vol. 41, pp. 160-170, 1969.
- [2] G. Lettinga, A. F. M. Van Velsen, S. W. Hobma, W. J. de Zeeuw, and B. Klapwijk, "Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 22, pp. 699-734, 1980.
- [3] M. V. G. Vallero, G. Lettinga, and P.N.L. Lens, "High rate sulfate reduction in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBaR) at high salinity," *Journal of Membrane Science*, vol. 253, pp. 217-232, 2005.
- [4] S. F. Aquino, A. Y. Hu, A. Akram, and D. C. Stuckey, "Characterization of dissolved compounds in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAMBaRs)," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, pp. 1894-1904, 2006.
- [5] D. Jeison, I. Diaz, and J. B. Van Lier, "Anaerobic membrane bioreactors: are membranes really necessary?," *Electron J. Biotechnol.*, Vol 11, no. 4., 2008.
- [6] R. K. Dereli, M. E. Erşahin, H. Özgün, I. Öztürk, D. Jeison, F. van der Zee, and J. B. van Lier, "Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters," *Bioresour. Technol.*, vol. 122, pp. 160-170, 2012.
- [7] Y. Chen, J. J. Cheng, and K. S. Creamer, "Inhibition of anaerobic digestion process: a review," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4044-4064, 2008.
- [8] W. C. L. Lay, Y. Liu, and A. G. Fane, "Impacts of salinity on the performance of high retention membrane bioreactors for water reclamation: A review," *Water Research*, vol. 44, pp. 21-40, 2010.
- [9] A. Cheville, K. Arnold, C. Buchrieser, C. Cheng, and C. Kaspar, "rpoS regulation of acid, heat, and salt tolerance in *Escherichia coli* O157:H7," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 62, pp. 1822-1824, 1996.
- [10] A. Metris, S. George, F. Mulholland, A. Carter, and J. Baranyi, "Metabolic shift of *Escherichia coli* under salt stress in the presence of Glycine betaine," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 80, pp. 4745-4756, 2014.
- [11] W. Lee, S. Kang, and H. Shin, "Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors," *Journal of Membrane Science*, vol. 216, pp. 217-227, 2003.
- [12] Available: www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/. [Accessed Jun 1, 2019].
- [13] O. H. Lowry, N. J. Rosebrough, A. R. Farr, and R. J. Randall, "Protein measurement with the folin phenol reagent," *J. Biol. Chem.*, vol. 193, pp. 265-275, 1951.
- [14] M. Dubois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith, "Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances," *Analytical Chemistry*, vol. 28, no. 3, 350-356, 1956.
- [15] A. Lim, R. Bai, "Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater," *Journal of Membrane Science*, 216, 279-290, 2003.
- [16] L. H. Andrade, F. D. S. Mendes, J. C. Espindola, M. C. S. Amaral, "Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor," *Separation and Purification Technology*, 126, 21-29, 2014.
- [17] K. K. Ng, X. Q. Shi, and H. Y. Ng, "Evaluation of system performance and microbial communities of a bioaugmented anaerobic membrane bioreactor treating pharmaceutical wastewater," *Water Res.*, vol. 81, pp. 311-324 2015.
- [18] D. Cheng, H. H. Ngo, W. Guo, Y. Liu, S. W. Chang, D. D. Nguyen, L. D. Nghiem, J. Zhou, and B. Ni, "Anaerobic membrane bioreactors for antibiotic wastewater treatment: Performance and membrane fouling issues," *Bioresour. Technology*, vol. 267, pp. 714-724, 2018.
- [19] X. Song, W. Luo, J. McDonald, S. J. Khan, F. I. Hai, W. Guo, H. H. Ngo, and L. D. Nghiem, "Effects of sulphur on the performance of an anaerobic membrane bioreactor: Biological stability, trace organic contaminant removal and membrane fouling," *Bioresour. Technology*, vol. 250, pp. 171-177, 2018.
- [20] I. S. Kim, N. Jang, "The effect of calcium on the membrane biofouling in the membrane bioreactor (MBR)," *Water Research*, 40, 2756-2764, 2006.
- [21] L. D. Temmerman, T. Maere, H. Temmink, A. Zwijnenburg, and I. Nopens, "Salt stress in a membrane bioreactor: Dynamics of sludge properties, membrane fouling and remediation through powdered activated carbon dosing," *Water Research*, vol. 63, pp. 112-124, 2014.
- [22] A. R. Pendashteh, L. C. Abdullah, A. Fakhru'l-Razi, S. S. Madaeni, Z. Z. Abidin, and D. R. A. Biak, "Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 90, pp. 45-55, 2012.

- [23] I. D. S. Henriques, R. D. Holbrook, R. T. Kelly, and N. G. Love, "The impact of floc size on respiration inhibition by soluble toxicants—a comparative investigation," *Water Research*, vol. 39, pp. 2559-2568, 2005.
- [24] K. N. Yogalakshmi, and K. Joseph, "Effect of transient sodium chloride shock loads on the performance of submerged membrane bioreactor," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 7054–7061, 2010.
- [25] F. Meng, S.-R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.-S. Shin, and F. Yang, "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material," *Water Res.*, vol. 43, pp. 1489–1512, 2009.
- [26] Z. Huang, S. L. Ong, and H. Y. Ng, "Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling," *Water Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 705–713, 2011.
- [27] K. K. Ng, X. Shi, M. K. Y. Tang, and H. Y. Ng, "A novel application of anaerobic bio-entrapped membrane reactor for the treatment of chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater," *Separation and Purification Technology*, vol. 132, pp. 634-643, 2014.
- [28] A. Hafuka, R. Mashiko, R. Odashima, H. Yamamura, H. Satoh, and Y. Watanabe, "Digestion performance and contributions of organic and inorganic fouling in T an anaerobic membrane bioreactor treating waste activated sludge," *Bioresource Technology*, vol. 272, pp. 63–69, 2019.
- [29] C. S. Lapidou, and B. E. Rittmann, "Non-steady state modeling of extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass," *Water Research*, vol. 36, no. 8, pp. 1983-1992, 2002.
- [30] J. Hu, H. Ren, K. Xu, J. Geng, L. Ding, X. Yan, and K. Li, "Effect of carriers on sludge characteristics and mitigation of membrane fouling in attached-growth membrane bioreactor," *Bioresource Technology*, vol. 122, pp. 35-41, 2012.
- [31] F. Meng, and F. Yang, "Fouling mechanisms of deflocculated sludge, normal sludge, and bulking sludge in membrane bioreactor," *J. Membr. Sci.*, vol. 305, pp. 48–56, 2007.
- [32] J. A. B. Sousa, D. Sorokin, M. F. M. Bjmans, C. M. Plugge, and A. J. M. Stams, "Ecology and application of haloalkaliphilic anaerobic microbial communities," *Applied Microbiol Biotechnology*, vol. 99, pp. 9331-9336, 2015.
- [33] Y. He, X. Xiao, and F. Wang, "Metagenome reveals potential microbial degradation of hydrocarbon coupled with sulfate reduction in an oil-immersed chimney from Guaymas Basin," *Frontiers in Microbiology*, vol. 4, pp. 148, 2013.
- [34] R. Kondo, Y. Mori, and T. Sakami, "Comparison of Sulphate-reducing Bacterial Communities in Japanese Fish Farm Sediments with Different Levels of Organic Enrichment," *Microbes and Environments*, vol. 27, no. 2, pp. 193-199, 2012.
- [35] A. Sherry, N. D. Gray, A. K. Ditchfield, C. M. Aitken, D. M. Jones, W. F. M. Röling, C. Hallmann, S. R. Larter, B. F. J. Bowler, and I. M. Head, "Anaerobic biodegradation of crude oil under sulphate-reducing conditions leads to only modest enrichment of recognized sulphate-reducing taxa," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 81, pp. 105-113, 2013.
- [36] W. Y. Liu, J. Wang, and M. Yuan, "Halomonas aidingensis sp. nov., a moderately halophilic bacterium isolated from Aiding salt lake in Xinjiang, China," *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 99 no. 3, pp. 663–670, 2011.
- [37] M. R. Mormile, M. F. Romine, M. T. Garcia, A. Ventosa, T. J. BailEy, and B. M. Peyton, "Halomonas campisalis sp.nov., a Denitrifying, Moderately Haloalkaliphilic Bacterium," *Systematic and Applied Microbiology*, vol. 22, no. 4, pp. 551-558, 1999.
- [38] N. Dafale, L. Agrawal, A. Kapley, S. Meshram, H. Purohit, and S. Wate, "Selection of indicator bacteria based on screening of 16S rDNA metagenomic library from a two-stage anoxic–oxic bioreactor system degrading azo dyes," *Bioresource Technology*, vol. 101, no.2, pp. 476-484, 2010.
- [39] A. M. Clarke, R. Kirby, and P. D. Rose, "Molecular microbial ecology of lignocellulose mobilisation as a carbon source in mine drainage wastewater treatment," *Water Sa*, vol. 30, no. 5, pp. 558-661, 2004.
- [40] A. Kılıç, E. Şahinkaya, and Ö. Çınar, "Kinetics of autotrophic denitrification process and the impact of sulphur/limestone ratio on the process performance," *Environmental technology*, vol. 35, no. 22, pp. 2796-2804, 2014.
- [41] K. K. Krishnani, G. Gopikrishna, S. M. Pillai, and B. P. Gupta, "Abundance of sulphur-oxidizing bacteria in coastal aquaculture using soxB gene analyses," *Aquaculture research*, vol. 41, no. 9, pp. 1290-1301, 2010.
- [42] M. A. Abdel-Rahman, S. E. S. Desouky, M. S. Azab, and M. E. Esmael, "Fermentative Production of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) from Glycerol by *Zobellella taiwanensis* Azu-IN1," *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, vol. 5, no. 5, pp. 16-25, 2017.
- [43] M. İbrahim, and A. Steinbüchel, "Zobellella denitrificans strain MW1, a newly isolated bacterium suitable for poly (3-hydroxybutyrate) production from glycerol," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 108, no. 1, pp. 214-225, 2010.
- [44] T. I. Zemskaya, T. V. Pogodaeva, O. V. Shubenkova, S. M. Chernitsina, and O. P. Dagurova, "Geochemical and microbiological characteristics of sediments near the Malenky mud volcano (Lake Baikal, Russia), with evidence of Archaea intermediate between the marine anaerobic methanotrophs ANME-2 and ANME-3," *Geo-Marine Letters*, vol. 30, no. 3–4, pp. 411–425, 2010.
- [45] B. Palaniappan, and S. R. Toleti, "Characterization of microfouling and corrosive bacterial community of a firewater distribution system," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 121, no. 4, pp. 435-441, 2016.

BATIK ANAEROBİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TUZLULUK DEĞİŞİMİNİN MEMBRAN KİRLENMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

- [46] N. M. Shestakova, V. S. Ivoilov, T. P. Tourova, S. S. Belyaev, A. B. Poltarau, and T. N. Nazina “Which Microbial Communities Are Present? Application of Clone Libraries: Syntrophic Acetate Degradation to Methane in a High-Temperature Petroleum Reservoir – Culture-Based and 16S rRNA Genes Characterisation,” *Applied Microbiology and Molecular Biology in Oilfield Systems*, 2010, pp. 45-53.
- [47] T. Lienen, K. Lüders, H. Halm, A. Westphal, R. Köber, and H. Würdemann, “Effects of thermal energy storage on shallow aerobic aquifer systems: temporary increase in abundance and activity of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing bacteria,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, no. 261, 2017.





AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

Selçuk METE^{1,*} , Hasan ZORLU² , Şaban ÖZER² 

¹Department of Network Management Center, Turk Telekom A.S., 38030, Kayseri, Turkey.

²Department of Electrical-Electronic Eng., Erciyes University, 38039, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Wiener block structure is formed by cascade of linear and nonlinear models. A novel and improved Wiener model structure for system identification area is proposed in this study. In proposed Wiener model, Finite Impulse Response (FIR) model is used as linear part and Soft Switching based Hybrid (SSH) model is used as nonlinear part. The SSH structure consists of a Second Order Volterra (SOV) nonlinear model, a Memoryless Polynomial (MP) nonlinear model, and a soft-switching part through a Neuro-Fuzzy (NF) network. In simulation studies, different types systems are identified by presented novel model. In addition to the mentioned identified systems, the performance of the improved model is also compared with Volterra model and Wiener models presented in the literature. Simulation results find out the success of the proposed model.

Keywords: System identification, Wiener, Hybrid model, Optimization.

SİSTEM KİMLİKLENDİRME İÇİN GELİŞTİRİLEN BİR WIENER MODEL

ÖZET

Wiener blok yapısı doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin kaskad bağlanması ile oluşturulmaktadır. Bu çalışmada sistem kimliklendirme alanı için yeni ve geliştirilmiş bir Wiener model yapısı sunulmuştur. Önerilen yapıda, doğrusal kısım olarak Sonlu Darbe Cevaplı model, doğrusal olmayan kısım olarak Esnek Anahtarlama Temelli Hibrit (EATH) model kullanılmıştır. EATH yapısı, doğrusal olmayan ikinci derece bir Volterra model, doğrusal olmayan hafızasız bir polinom model ve bir bulanık sinir ağı temelli esnek anahtarlama mekanizmasından oluşmaktadır. Simülasyonlarda, önerilen model ile dört farklı sistem tipi kimliklendirilmiştir. İlave olarak, bu sistemleri kimliklendirmek için literatürde yeralan Volterra ve Wiener modellerde ayrıca kullanılarak önerilen modelin performansı ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen modelin başarısını ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Sistem kimliklendirme, Wiener, Hibrit model, Optimizasyon.

1. INTRODUCTION

System identification process begins with the selection of suitable input signals. So in our case one or several of coup, step, sinus or random signals are applied to system as input and output signal is recorded [1]. Since the main work of system identification is to obtain the best convenient and acceptable mathematical model to demonstrate the relations between the input, output and noise of a system. The behaviour of systems can be determined more clearly by using different models. It can be said that the performance of the model is detected by the convergence of the final solution and the real solution [2], and this mentioned model structure can be linear or nonlinear that shows the behaviour of most physical systems [3-12]. Many systems have nonlinear behaviours in real life. Since linear models are insufficient in the identification of such systems, nonlinear models are used [6-12]. The obtained parameters of the model are determined through some estimated or statistical methods. Another significant step of the identification procedure is estimation of the parameters correctly. In this step, the difference between the model's output and the system's output is determined. If the difference is wide another model structure is selected. If the difference is small, the obtained model can be used to identify and control the system [1].

Nonlinear block-oriented models are used to describe the nonlinear behaviour of the system over the entire range of operating conditions adequately, and the identified system is typically sectioned into linear and nonlinear blocks. Wiener model is a well-known block oriented model [13-19]. This model is obtained by cascade connecting of a linear block and nonlinear block, respectively [2]. The main motivation of using Wiener models is the computational effort related with the correct parameter

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail:

Geliş / Received: 12.04.2019 Kabul / Accepted: 08.06.2020 doi: 10.28948/ngumuh.553279

estimation and the low suitability for control design. So, many studies have been presented on the parameters estimation of nonlinear systems [16,17]. Wiener model is used because of both its usefulness and its ability to effectively predict a wide nonlinear process [18-20]. Wiener model applied in a variety of fields, such as chemical studies [21], biological systems [22], control of electrical systems [23], biomedical engineering [24], wireless mobile communications [25], model predictive control (MPC) [26-32], pH processes [33], signal processing [34]. In addition, the Wiener structure is used frequently in control, particularly in advanced MPC. MPC studies based on Wiener models can be effectively applied to multivariable processes that have many inputs and outputs, and for processes that have difficult dynamic properties [26-32].

Generally, MP (Memoryless Polynomial) or SOV (Second Order Volterra) model as a nonlinear part and FIR or IIR (Infinite Impulse Response) linear model as a linear part is used in Wiener models [13-19, 35-40]. Most of the studies in literature, MP representation is preferred for nonlinear parts of block oriented structure because of its flexibility and simple usage [2, 16]. In addition to these advantages MP also decreases the number of parameters to be determined, therefore decreases computational complexity and convergence time of the Wiener block model. However once SOV model is used instead of MP model, identification performances of block models increases [38, 41].

In the last decade, many applications of soft computing techniques have been used to solve the problems in many areas like neural networks (NN) and fuzzy inference system (FIS) [42]. Neural network and FIS have robust learning and adaptation capabilities to solve linear or nonlinear problems. Neuro-Fuzzy (NF) system which integrates both NN and FIS has the potential to combine the advantages of NN and FIS in a single structure [43-45]. Thus, NF systems can be used as very powerful tools for identification areas. In literature there are various studies about NF based on Wiener [31, 40, 46-49] model types applied to system identification.

The main motivation of this study is to propose a robust and successful model structure. At this point authors designed an original Wiener model by combining linear FIR model and nonlinear Soft Switching Based Hybrid (SSH) model in which different types of memory and memoryless nonlinear models are used that previously proven Wiener block models in literature. The structure of the proposed Wiener model is shown in Figure 5. The SSH structure consists of a SOV nonlinear model, a MP nonlinear model, and a soft-switching mechanism through a NF network. Soft switching mechanism in SSH model increases the success of block model by selecting the best results of both nonlinear model outputs. This is due to enhanced features; the proposed Wiener model is a new block model different from the other models in literature.

2. WIENER MODEL TYPES

2.1. Wiener model with FIR and MP

In this Wiener model's structure, FIR model and MP model are used as a linear and nonlinear block, respectively. This block model is illustrated in figure 1 [13-19, 35, 36]

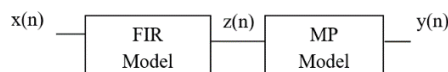


Figure 1. Wiener model with FIR-MP

FIR model [50,51] output;

$$z(n) = \sum_{k=0}^m a_k x(n-k) \tag{1}$$

m is model length, MP model output [52,53];

$$y(n) = \sum_{l=1}^p c_l z^l(n) \tag{2}$$

where p is MP model length [13-19, 35, 36].

2.2. Wiener model with FIR and SOV

In this Wiener model's structure, FIR model and SOV model are used as a linear and nonlinear block, respectively. This block model is illustrated in figure 2 [38].

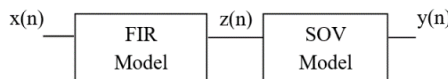


Figure 2. Wiener model with FIR-SOV

AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

FIR model output;

$$z(n) = \sum_{k=0}^m a_k x(n-k) \tag{3}$$

m is model length. SOV model output [54,55];

$$y(n) = \sum_{i=0}^r h_i z(n-i) + \sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^r q_{i,j} z(n-i)z(n-j) \tag{4}$$

r is SOV model length [38].

3. NEURO-FUZZY (NF) NETWORK

Fuzzy logic is a popular computation system that is based on fuzzy IF-THEN rules, set theory and reasoning concepts. NF network is a fuzzy logic system that is developed by adaptable NF network framework. NF network is a combination of modelling uncertain features of fuzzy logic systems and learning ability of neural networks. Thus NF networks bring together the benefits of neural networks and fuzzy logic systems in one model. Fast and accurate learning, using data and expert knowledge together, and well generalization ability make the NF networks more popular in recent years [42-45, 56-58]

A typical NF network structure is shown in figure 3. In the above figure circle cells represent stable cells and square cells represent adaptive cells. For simplicity, the system has two inputs x and y , which can be considered as two canonical system. Sugeno’s model is the first and most demanding model because of its well applicability, computational efficiency and optimization problems [59,60].

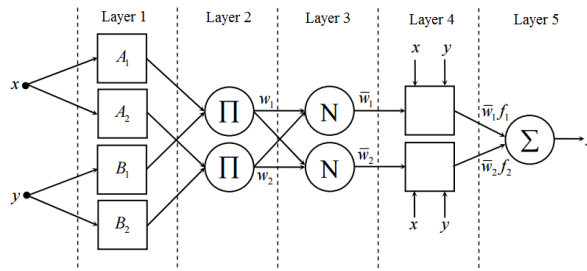


Figure 3. NF network structure

Since Sugeno’s fuzzy model allows composing fuzzy rules based on input-output data couples, first degree of Sugeno model is used as NF network. According to this model, IF-THEN rules of the system can be written as follows [56];

Rule 1: If (x, A_1) and (y, B_1) then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ (5)

Rule 1: If (x, A_2) and (y, B_2) then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ (6)

Here A_i and B_i define fuzzy sets and p_i, q_i and r_i define designed parameters. As seen in figure 3 NF network consists of 5 layers.

Layer 1: Each cell in this layer defines the cell function as;

$$O_{n,i} = \begin{cases} \mu_{A_i}(x), & i = 1, 2 \\ \mu_{B_{i-2}}(y), & i = 3, 4 \end{cases} \tag{7}$$

Here $\mu_{A_i}(x)$ and $\mu_{B_{i-2}}(y)$ shows fuzzy membership functions, $O_{n,i}$, represents i . Output of n . layer. Data from this layer output is the blurred version of selected data of NF input through membership functions. These values define selected values’ membership degree of the sets. The membership function of the NF network presented in this study is as follows;

generalized bell $(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$ (8)

$\{a, b, c\}$ parameters that change the shape of membership function is named as rest parameters.

S. Mete, H. Zorlu, S. Özer

Layer 2: Each cell in this layer performs AND process in input signals (in fuzzy IF-THEN rules). So, trigger force of each rule can be calculated. Here fuzzy AND corresponds to multiplication process:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y) \quad , i = 1, 2 \tag{9}$$

Layer 3: i cell in this layer finds the trigger rate of i rule to sum of all trigger forces. So the i rule of trigger force is normalized:

$$O_{3,i} = \tilde{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^2 w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad , i = 1,2 \tag{10}$$

Here every \tilde{w}_i is described as normalized trigger force of i rule.

Layer 4: Each cell in this layer has the following cell function:

$$O_{4,i} = \tilde{w}_i f_i = \tilde{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad , i = 1, 2 \tag{11}$$

Here \tilde{w}_i is the output of layer 3. Parameter set of this layer is named as $\{p_i, q_i, r_i\}$ result parameter.

Layer 5: The sole cell in this layer calculates the sum of all signals and sends to output. This can be described as [56];

$$O_5 = f = \sum_{i=1}^2 \tilde{w}_i f_i = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} \tag{12}$$

During training, rest parameters in layer 1 and result parameters in layer 4 are adjusted until the NF network produce the desired response. In this study, in NF network training (parameter optimization) Levenberg-Marquardt algorithm [61, 62] is used [56].

4. PROPOSED WIENER MODEL

Proposed Wiener model is shown in figure 4. In inner structure of the model, FIR model and SSH model are used as linear and nonlinear part, respectively. The SSH structure consists of a SOV nonlinear model, a MP nonlinear model, and a NF network which uses output of the SOV model and the MP model to compute the Wiener model output.

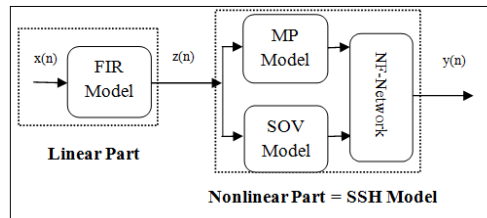


Figure 4. Proposed Wiener model

Soft switching mechanism of the system is a Sugeno typed NF network with first degree 2 input and 1 output. In each input of the network, there are 2 generalized bell typed membership function (13) and in output there is a linear membership function (14) [63-66].

$$\mu_{jk}(u) = \frac{1}{1 + \left| \frac{u - a_{jk}}{b_{jk}} \right|^{2c_{jk}}} \quad , (j= 1, \dots, 10 ; k=1,2) \tag{13}$$

$$z_t(u_1, u_2) = d_{t1}u_1 + d_{t2}u_2 + d_{t3} \quad , (t= 1, \dots, 10) \tag{14}$$

In above equations a_{jk} is sigma of membership function, b_{jk} is dispersion of membership function, c_{jk} is center of membership function and d_t is the t th consequence of fuzzy rule. These parameters are used to adapt the type of membership functions. M_{jk} is the j th antecedent membership function of the k th input, and z_t is the consequent membership function of the t th rule. Rule base of the system consists of 10 rules that is the combination of inputs and the membership functions of these inputs. If x_1, x_2 represent 2 inputs of NF network and y represents output of NF network, the rule base of the NF network is as;

AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

$$1) \text{ If}(x_1 \in M_{11}) \& (x_2 \in M_{12}) \text{ then} \tag{15}$$

$$z_1 = d_{11}x_1 + d_{12}x_2 + d_{13}$$

$$2) \text{ If}(x_1 \in M_{21}) \& (x_2 \in M_{22}) \text{ then} \tag{16}$$

$$z_2 = d_{21}x_1 + d_{22}x_2 + d_{23}$$

$$3) \text{ If}(x_1 \in M_{31}) \& (x_2 \in M_{32}) \text{ then} \tag{17}$$

$$z_3 = d_{31}x_1 + d_{32}x_2 + d_{33}$$

⋮

$$10) \text{ If}(x_1 \in M_{101}) \& (x_2 \in M_{102}) \text{ then} \tag{18}$$

$$z_4 = d_{101}x_1 + d_{102}x_2 + d_{103}$$

the NF network’s parameters are optimized by using the hybrid learning optimization algorithm that combines the gradient method and the least squares estimate [63]. The NF network’s output is the weighted average of rule outputs [63-66]. Weighted factor of each rule w_i is calculated through the past membership functions. For this process, first input values are converted to fuzzy membership and then AND operator is applied this membership values. AND operator is equal to multiplication of input membership values. So, weighted factors of rules are calculated as;

$$w_1 = M_{11}(x_1). M_{12}(x_2) \tag{19}$$

$$w_2 = M_{21}(x_1). M_{22}(x_2) \tag{20}$$

$$w_3 = M_{31}(x_1). M_{32}(x_2) \tag{21}$$

⋮

$$w_{10} = M_{101}(x_1). M_{102}(x_2) \tag{22}$$

NF network’s output y can be obtained by calculating weighted average of rules when weighted factors are identified [63-66];

$$y = \frac{\sum_{t=1}^{10} w_t z_t}{\sum_{t=1}^{10} w_t} \tag{23}$$

5. SIMULATION STUDIES

The performance of Wiener model proposed in this paper is compared with known models in literature which are Wiener model with FIR-MP (in figure 1), Wiener model with FIR-SOV (in figure 2) and second order Volterra model. So, firstly, the optimization framework of known models are given in figure 5 for system identification. The identification processes for these known models are performed on unknown system. In simulations, white Gaussian noise and Chirp-type signals are used as $x(n)$, input signal, separately. The white Gaussian noise is shown in figure 6. The Chirp-type signal is given as $x(n) = \sin[(\pi/3)[L/(L-1)][n/L-1]^5]$, $n = 0, 1, \dots, L-1$, and as shown in figure 7. These models that are used for identification to unknown systems are optimized by Recursive Least Square (RLS) algorithm [41, 67].

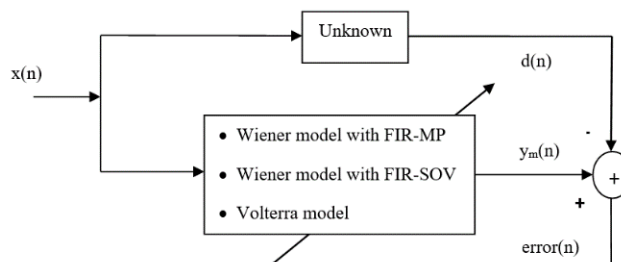


Figure 5. Optimization structure of system identification

S. Mete, H. Zorlu, S. Özer

Wiener model with FIR-MP (y_{m1}), Wiener model with FIR-SOV (y_{m2}) and second order Volterra model (y_{m3}) are given below in equation (24), (25), (27) respectively. Equation (24) is obtained from equation (2) with $p=3, m=1$, equation (25) is obtained from equation (4) with $r=1, m=1$ and equation (27) is obtained from equation (26) with $r=1$.

$$y_{m1}(n) = c_1[a_0x(n) + a_1x(n-1)] + c_2[a_0^2x^2(n) + a_0a_1x(n)x(n-1) + a_1a_0x(n-1)x(n) + a_1^2x(n-1)x(n-1)] + c_3[a_0^3x^3(n) + a_0^2a_1x^2(n)x(n-1) + a_1a_0^2x^2(n)x(n-1) + a_0a_1^2x(n)x^2(n-1) + a_1a_0^2x^2(n)x(n-1) + a_0a_1^2x(n)x^2(n-1) + a_0a_1^2x(n)x^2(n-1) + a_1^3x^3(n-1)] \quad (24)$$

$$y_{m2}(n) = h_0[a_0x(n) + a_1x(n-1)] + h_1[a_0x(n-1) + a_1x(n-2)] + q_{00}[a_0^2x^2(n) + a_0a_1x(n)x(n-1) + a_1a_0x(n-1)x(n) + a_1^2x^2(n-1)] + q_{01}[a_0^2x(n)x(n-1) + a_0a_1x(n)x(n-2) + a_1a_0x(n-1)x(n-1) + a_1^2x(n-1)x(n-2)] + q_{10}[a_0^2x(n-1)x(n) + a_0a_1x(n-1)x(n-1) + a_1a_0x(n-2)x(n) + a_1^2x(n-2)x(n-1)] + q_{11}[a_0^2x(n-1)x(n-1) + a_0a_1x(n-1)x(n-2) + a_1a_0x(n-2)x(n-1) + a_1^2x(n-2)x(n-2)] \quad (25)$$

SOV model [54,55];

$$y(n) = \sum_{i=0}^r h_i x(n-i) + \sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^r q_{i,j} x(n-i)x(n-j) \quad (26)$$

r is SOV model length [38].

$$y_{m3}(n) = h_0x(n) + h_1x(n-1) + q_{00}x(n)x(n) + q_{01}x(n)x(n-1) + q_{10}x(n-1)x(n) + q_{11}x(n-1)x(n-1) \quad (27)$$

Secondly, figure 6 infers the training and testing structure representing the optimization of the proposed Wiener model for system identification. The identification process for this model is performed on as unknown systems. In simulations, two different types of input signal are used; white Gaussian noise (in figure 7) and noiseless Chirp-type signal (in figure 8). The NF network uses the output of the SOV model and the MP model to compute the Wiener model output. This model is optimized with RLS and hybrid learning optimization algorithms.

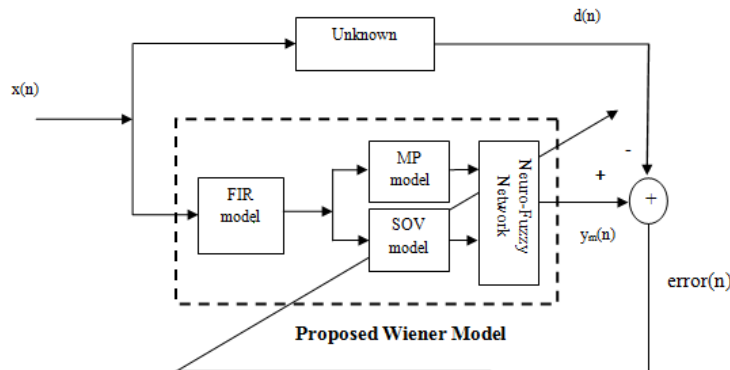


Figure 6. Training and testing of proposed Wiener model for adaptive optimization.

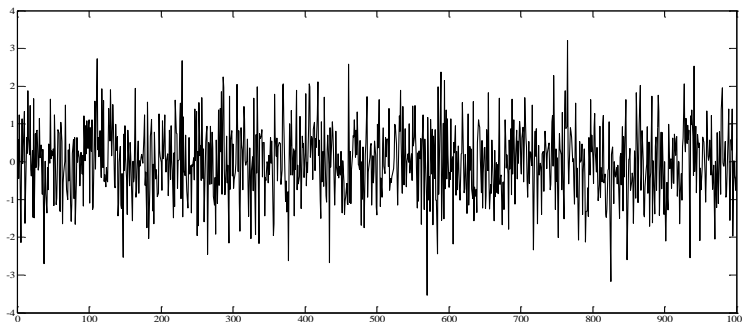


Figure 7. White Gaussian noise signal

AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

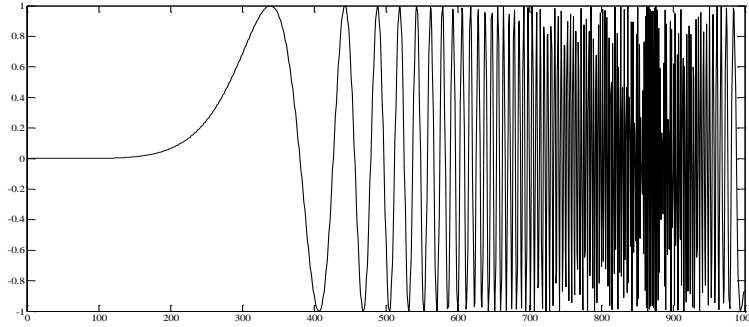


Figure 8. Noiseless Chirp-type signal

5.1. Example-I

A Wiener system (equation 29) is used as an unknown system in the structure of figure 5,6 [14].

The linear part,

$$z(n) = 0.75x(n) + 0.433x(n-1) + 0.5x(n-2) \tag{28}$$

and the memoryless nonlinearity of Wiener system,

$$d(n) = z(n) + z^2(n) \tag{29}$$

For White Gaussian noise input signal, MSE (Mean Square Error) and correlation results are given in table 1. Model outputs are shown in figure 9.

Table 1. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Volterra Model	0.98630	0.78526
Wiener Model with FIR-MP	0.98049	0.78541
Wiener Model with FIR-SOV	0.47824	0.91628
Proposed Wiener Model	0.28106	0.94294

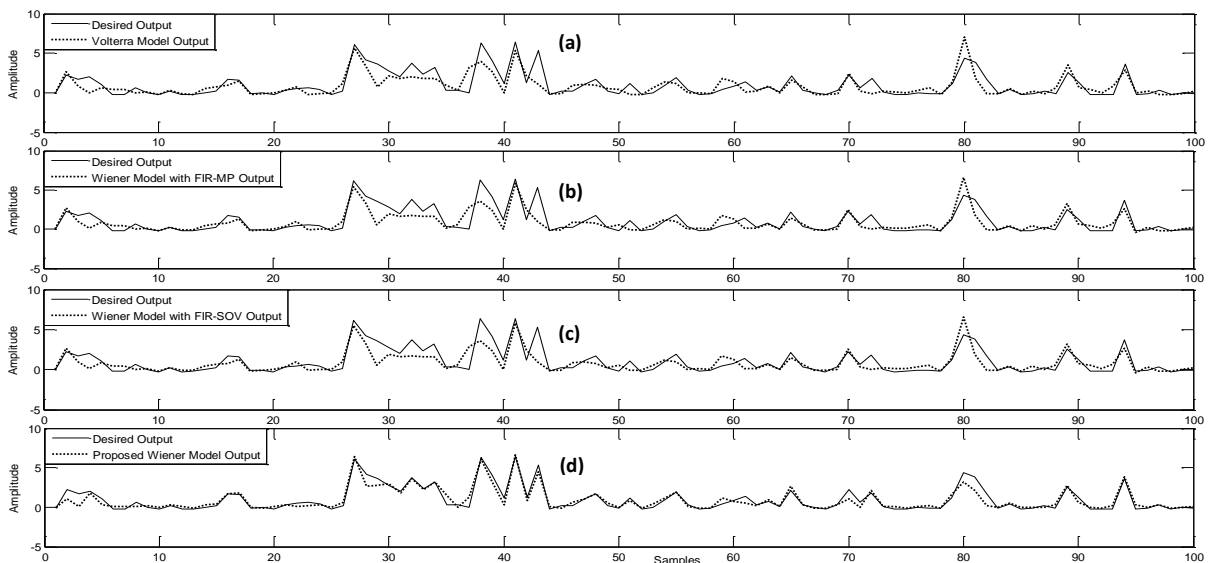


Figure 9. Simulation results [(a) Volterra model (b) Wiener model with FIR-MP (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

For Chirp-type input signal, MSE and correlation results are given in table 2. Model outputs are shown in figure 10.

Table 2. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Wiener Model with FIR-MP	0.39486	0.83407
Volterra Model	0.22557	0.85223
Wiener Model with FIR-SOV	0.09758	0.93408
Proposed Wiener Model	0.06176	0.95952

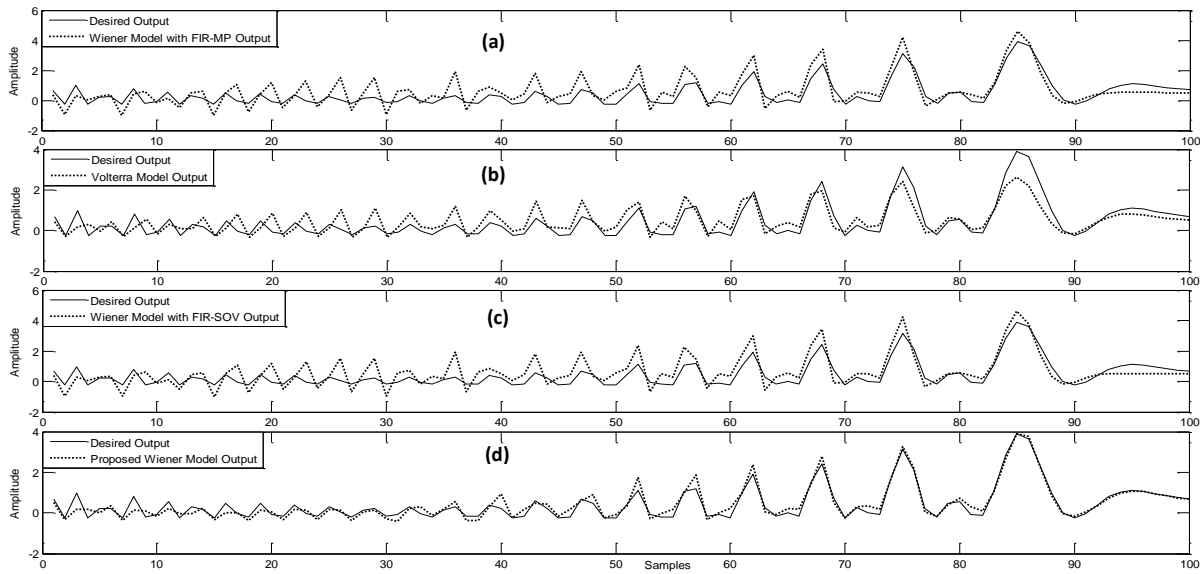


Figure 10. Simulation results [(a) Wiener model with FIR-MP (b) Volterra model (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

5.2. Example-II

A Hammerstein system (equation 31) is used as an unknown system in the structure of figure 5,6 [68]. The memoryless nonlinearity of Hammerstein system,

$$z(n) = x(n) + 0.5x^3(n) \tag{30}$$

and a linear component with the transfer function

$$H(z) = \frac{0.4 + 0.2z^{-1}}{1 + 0.8z^{-1} + 0.6z^{-2}} \tag{31}$$

For White Gaussian noise input signal, MSE and correlation results are given in table 3. Model outputs are shown in figure 11.

Table 3. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Volterra Model	0.53478	0.77142
Wiener Model with FIR-MP	0.43585	0.82348
Wiener Model with FIR-SOV	0.42313	0.82510
Proposed Wiener Model	0.32238	0.87221

AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

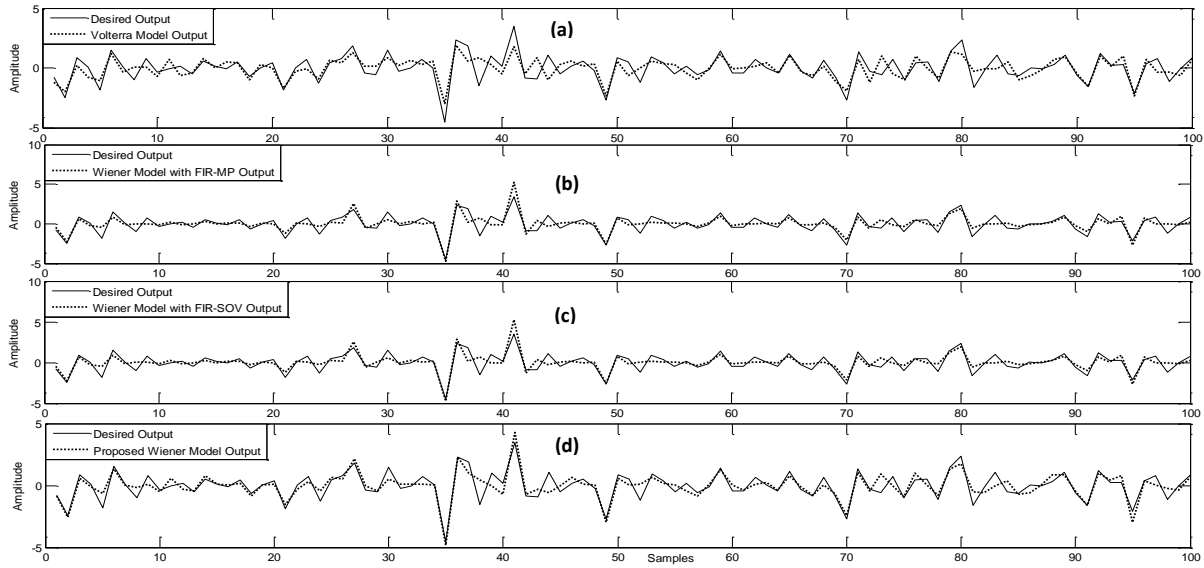


Figure 11. Simulation [(a) Volterra model (b) Wiener model with FIR-MP (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

For Chirp-type input signal, MSE and correlation results are given in table 4. Model outputs are shown in figure 12.

Table 4. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Wiener Model with FIR-MP	0.12535	0.81874
Volterra Model	0.12427	0.82079
Wiener Model with FIR-SOV	0.08005	0.87279
Proposed Wiener Model	0.07635	0.87860

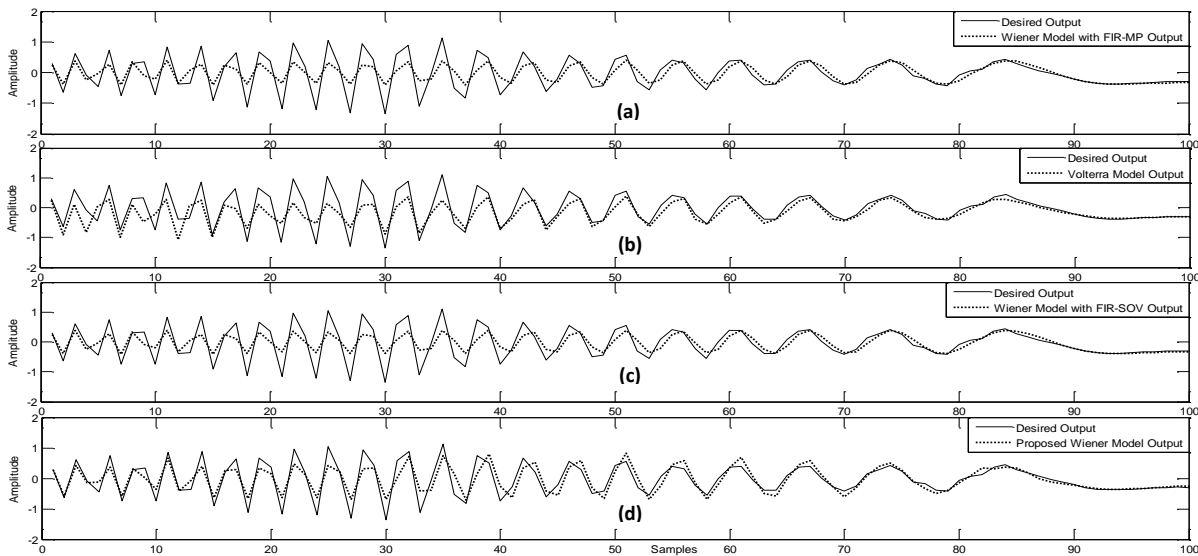


Figure 12. Simulation results [(a) Wiener model with FIR-MP (b) Volterra model (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

5.3. Example-III

An ARMA system (equation 32) is used as an unknown system in the structure of figure 5,6 [69-73].

$$d(n)=0.7x(n)-0.4x(n-1)-0.1x(n-2)+0.25d(n-1)-0.1d(n-2)+0.4d(n-3) \tag{32}$$

For White Gaussian noise input signal, MSE and correlation results are given in table 5. Model outputs are shown in figure 13.

Table 5. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Wiener Model with FIR-MP	0.11292	0.89780
Volterra Model	0.10022	0.90236
Wiener Model with FIR-SOV	0.06813	0.93929
Proposed Wiener Model	0.06218	0.94072

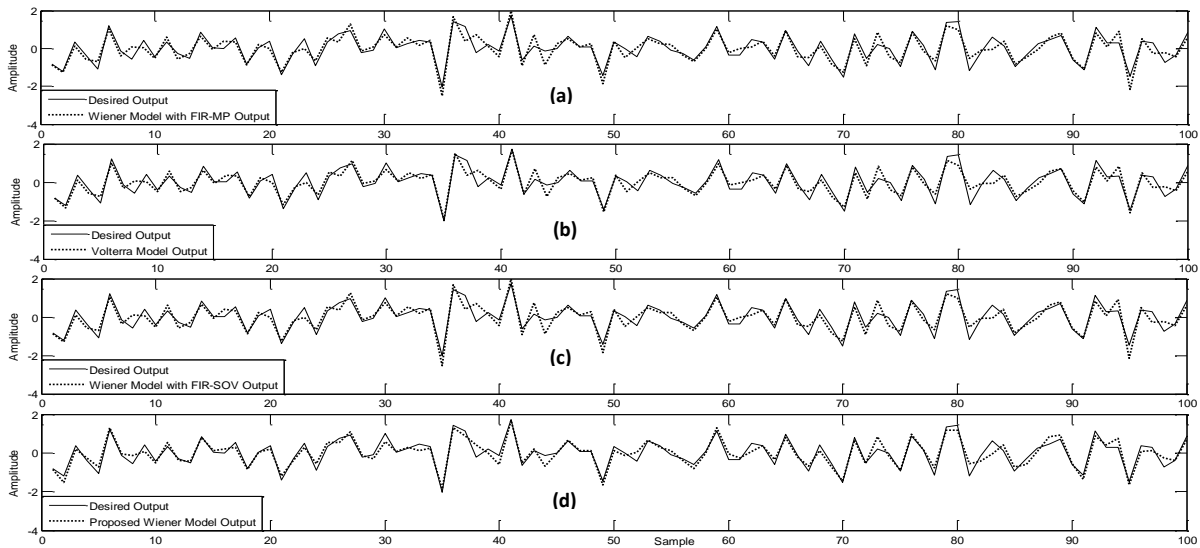


Figure 13. Simulation results [(a) Wiener model with FIR-MP (b) Volterra model (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

For Chirp-type input signal, MSE and correlation results are given in table 6. Model outputs are shown in figure 14.

Table 6. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Wiener Model with FIR-MP	0.11444	0.89375
Volterra Model	0.08841	0.90354
Wiener Model with FIR-SOV	0.06520	0.91946
Proposed Wiener Model	0.06201	0.92257

AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

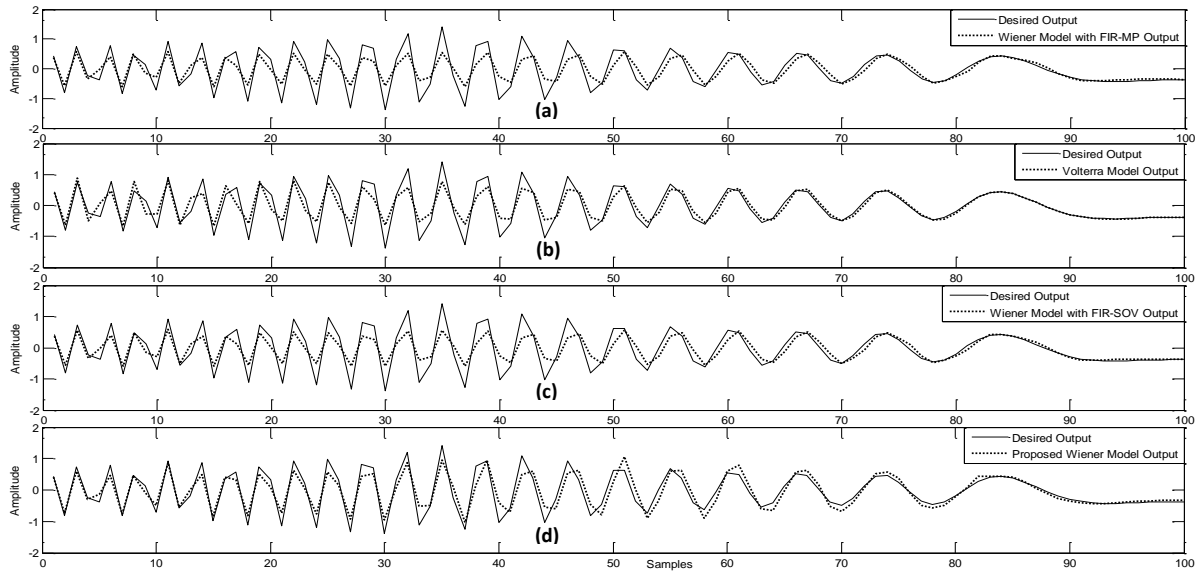


Figure 14. Simulation results [(a) Wiener model with FIR-MP (b) Volterra model (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

5.4. Example-IV

A Bilinear system (equation 33) is used as an unknown system in the structure of figure 5,6 [41,70-73].

$$d(n) = 0.25d(n-1) - 0.5d(n-1)x(n) + 0.05d(n-1)x(n-1) - 0.5x(n) + 0.5x(n-1) \tag{33}$$

For White Gaussian noise input signal, MSE and correlation results are given in Table 7. Model outputs are shown in figure 15.

Table 7. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Wiener Model with FIR-MP	0.05451	0.93877
Volterra Model	0.04456	0.94861
Wiener Model with FIR-SOV	0.02647	0.97267
Proposed Wiener Model	0.02099	0.97664

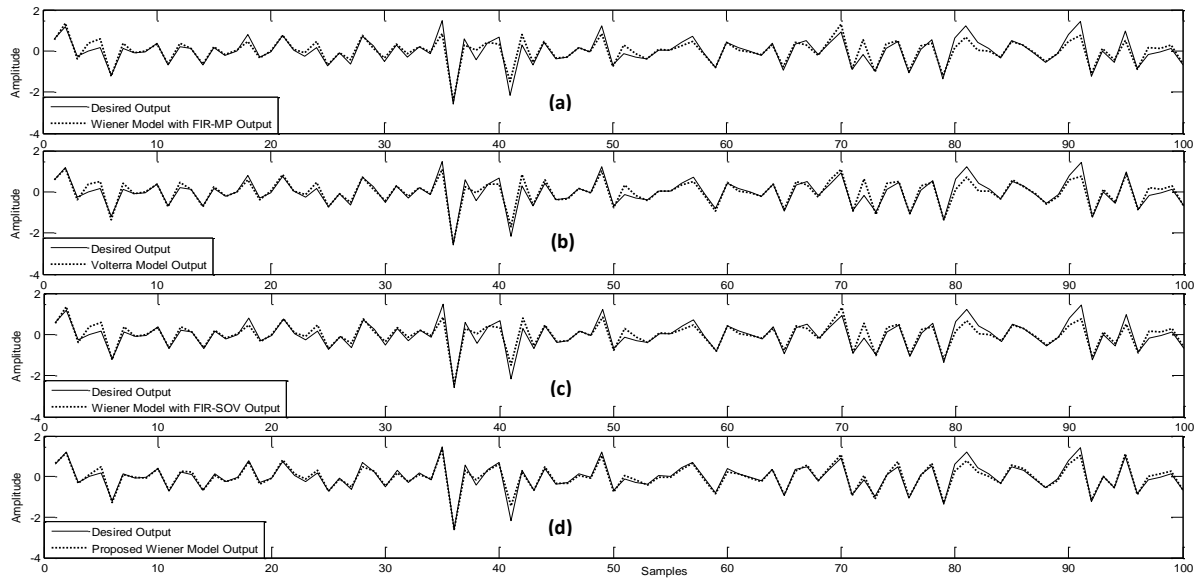


Figure 15. Simulation results [(a) Wiener model with FIR-MP (b) Volterra model (c) Wiener model with FIR-SOV (d) Proposed Wiener model]

For Chirp-type input signal, MSE and correlation results are given in Table 8. Model outputs are shown in figure 16.

Table 8. MSE and correlation results

Model	MSE	Correlation
Wiener Model with FIR-SOV	0.01971	0.96419
Wiener Model with FIR-MP	0.01908	0.96483
Volterra Model	0.01697	0.96742
Proposed Wiener Model	0.00823	0.98365

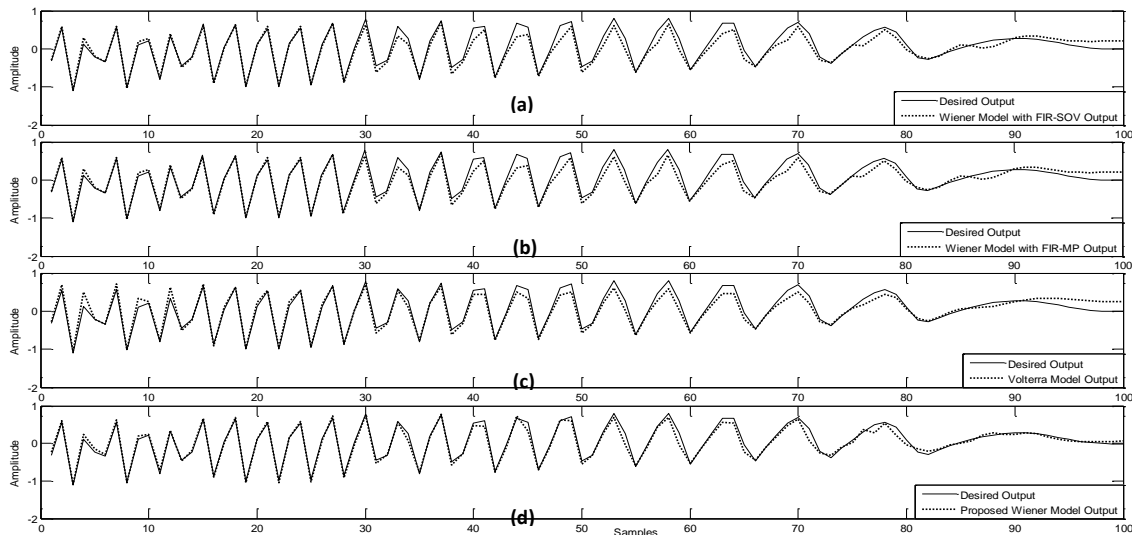


Figure 16. Simulation results [(a) Wiener model with FIR-SOV (b) Wiener model with FIR-MP (c) Volterra model (d) Proposed Wiener model]

According to results of all simulations, the proposed Wiener model is more successful in terms of MSE and correlation value compared to other models. In figures 9-16 and tables 1-8 the results are analysed.

AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

6. CONCLUSIONS

This study aims to improve Wiener model for system identification area. Different from previous works in literature, in order to improve the Wiener model, FIR model is used as linear part, SSH model is used as nonlinear part. The SSH structure consists of a SOV nonlinear model, a MP nonlinear model, and a NF network. The NF network uses the information from the SOV model and the MP model to compute the Wiener model output.

System identification studies are carried out to determine the performance of proposed model. So, different structure unknown systems are identified with both proposed model and different type models. Proposed model has more complex structure compared to Volterra model, Wiener model with FIR-MP and Wiener model with FIR-SOV as disadvantage of the model but proposed model has a successful identification tool as advantage. According to MSE and correlation results, the systems can be identified with less error in proposed model compared to Volterra model, Wiener model with FIR-MP and Wiener model with FIR-SOV. In addition the author will try to identify real system problems in future studies.

REFERENCES

- [1] S. Bagis, "System modelling by using artificial intelligence algorithms," M. S. thesis, Erciyes University, Kayseri, Turkey, 2009.
- [2] F. Guo, "A new identification method for wiener and hammerstein systems," Dissertation thesis, Karlsruhe University, Germany, 2004.
- [3] T. Schweickhardt and F. Allgower, "On system gains, nonlinearity measures, and linear models for nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, pp. 62-78, 2009.
- [4] N.B. Hızır, M.Q. Phan, R. Betti and R.W. Longman, "Identification of discrete-time bilinear systems through equivalent linear models," *Nonlinear Dynamics*, vol. 69, pp. 2065-2078, 2012.
- [5] Ö. Erçin and R. Çoban, "Identification of linear dynamic systems using the artificial bee colony algorithm," *Turk J Elec Eng & Comp Sci.*, vol. 20, pp. 1175-1188, 2012.
- [6] X. Hong, R.J. Mitchell, S. Chen, C.J. Harris, K. Li and G.W. Irwin, "Model selection approaches for nonlinear system identification: a review," *International Journal of Systems Sci.*, vol. 39, pp. 925-946, 2008.
- [7] Ş. Özer and H. Zorlu, "Identification of bilinear systems using differential evolution algorithm," *Sadhana Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 36, pp. 281-292, 2011.
- [8] C.S. Manohar and D. Roy, "Monte Carlo filters for identification of nonlinear structural dynamical systems," *Sadhana Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 31, pp. 399-427, 2006.
- [9] A. Rahrooh and S. Shepard, "Identification of nonlinear systems using NARMAX model," *Nonlinear Analysis*, vol. 71, pp. 1198-1202, 2009.
- [10] A. Naitali and F. Giri, "Wiener-Hammerstein system identification an evolutionary approach," *International Journal of Systems Science*, vol. 47, pp. 45-61, 2015.
- [11] F. Ding, Y. Wang and J. Ding, "Recursive least squares parameter identification algorithms for systems with colored noise using the filtering technique and the auxiliary model," *Digital Signal Processing*, vol. 37, pp. 100-108, 2015.
- [12] F. Ding, X.P. Liu and G. Liu, "Identification methods for Hammerstein nonlinear systems," *Digital Signal Processing*, vol. 21, pp. 215-238, 2011.
- [13] P. Chelka, N.J. Bershad and J.M. Vesin, "Fluctuation analysis of stochastic gradient identification of polynomial Wiener systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, pp. 1820-1825, 2000.
- [14] C. Zhijun and B. Er-Wei, "How nonlinear parametric Wiener system identification is under Gaussian inputs?," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, pp. 738-742, 2011.
- [15] S.H. Hwang, C.Y. Hsieh, H.T. Chen and Y.C. Huang, "Use of discrete laguerre expansions for noniterative identification of nonlinear Wiener models," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, pp. 1427-1438, 2011.
- [16] E. Abd-Elrady, "A recursive prediction error algorithm for digital predistortion of FIR Wiener systems," In 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CNSDSP), Graz, 2008, pp. 698-701.
- [17] S. Zhenwei and J. Zhicheng, "Identification of Wiener nonlinear systems using the key-term separation principle and the filtering approach," In Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, China, 2015, pp. 1878-1885.
- [18] S. Hafsi, K. Laabidi and M.K. Lahmari, "Identification of wiener-hammerstein model with multi segment piecewise-linear characteristic," In IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Tunisia, 2012, pp. 5-10.
- [19] L.A. Aguirre, M.C.S. Coelho and M.V. Correa, "On the interpretation and practice of dynamical differences between Hammerstein and Wiener models," *IEE P-Contr Theor Ap.*, vol. 152, pp. 349-356, 2005.

- [20] J. Lee, W. Cho and T.F. Edgar, "Control system design based on a nonlinear first-order plus time delay model," *J Process Contr.*, vol. 7, pp. 65-73, 1997.
- [21] G. Shafiee, M. Arefi, M. Jahed-Motlagh and A. Jalali, "Nonlinear predictive control of a polymerization reactor based on piecewise linear Wiener model," *Chemical Engineering Journal*, vol. 143, no. 1, pp. 282-292, 2008.
- [22] I.W. Hunter and M.J. Korenberg, "The identification of nonlinear biological systems: Wiener and Hammerstein cascade models," *Biological Cybernetics*, vol. 55, no. 2, pp. 135-144, 1986.
- [23] T.Y. Kuc and K.H. You, "Dynamic state feedback and its application to linear optimal control," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 667-674, 2012.
- [24] D.T. Westwick and R.E. Kearney, "Nonparametric identification of nonlinear biomedical systems, Part I. Theory," *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 26, pp. 153-226, 1998.
- [25] R.K.H. Galvao, A. Izhac, S. Hadjiloucas, V.M. Becerra and J.W. Bowen, "MIMO Wiener model identification for large scale fading of wireless mobile communications links," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 6, pp. 513-515, 2007.
- [26] S.J. Norquay, A. Palazoglu and J.A. Romagnoli, "Model predictive control based on Wiener models," *Chem. Eng. Sci.* vol. 53, no. 1, pp. 75-84, 1998.
- [27] A.L. Cervantes, O.E. Agamennoni and J.L. Figueroa, "A nonlinear model predictive control based on Wiener piecewise linear models," *J. Proc. Control*, vol. 13, pp. 655-666, 2003.
- [28] M. Lawrynczuk, "Practical nonlinear predictive control algorithms for neural Wiener models," *J. Proc. Control*, vol. 23, pp. 696-714, 2013.
- [29] M. Lawrynczuk, Eds., *Computationally Efficient Model Predictive Control Algorithms: A Neural Network Approach*. Switzerland: Springer, 2014.
- [30] S. Mahmoodi, J. Poshtan, M.R. Jahed-Motlagh and A. Montazeri, "Nonlinear model predictive control of a pH neutralization process based on Wiener-Laguerre model," *Chem. Eng. J.*, vol. 146, pp. 328-337, 2009.
- [31] S. Oblak and I. Skrjanc, "Continuous-time Wiener-model predictive control of a pH process based on a PWL approximation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, pp. 1720-1728, 2010.
- [32] J. Peng, R. Dubay, J.M. Hernandez and M. Abu-Ayyad, "A Wiener neural network-based identification and adaptive Generalized Predictive Control for nonlinear SISO systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, pp. 7388-7397, 2011.
- [33] J.C. Gomez, A. Jutan and E. Baeyens, "Wiener model identification and predictive control of a pH neutralisation process," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 151, no. 3, pp. 329-338, 2004.
- [34] P. Celka and P. Colditz, "Nonlinear nonstationary Wiener model of infant EEG seizures," *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, vol. 49, no. 6, pp. 556-564, 2002.
- [35] T. Wigren, "Convergence analysis of recursive identification algorithms based on the nonlinear Wiener model," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, pp. 2191-2206, 1994.
- [36] A.E. Nordstjo and L.H. Zetterberg, "Identification of certain time-varying nonlinear Wiener and Hammerstein systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, pp. 577-792, 2001.
- [37] H.N. Al-Duwaish, "Identification of Wiener model using genetic algorithms," In 5th IEEE GCC Conference & Exhibition, Kuwait City, 2009, pp. 1-4.
- [38] Ş. Özer, H. Zorlu and S. Mete, "System identification using Wiener model," In Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO), Turkey, Bursa, 2014, pp. 543-547.
- [39] X. Weili, Y. Xianqiang, K. Liang and X. Baoguo, "EM algorithm-based identification of a class of nonlinear Wiener systems with missing output data," *Nonlinear Dynamics*, vol. 80, pp. 329-339, 2015.
- [40] C.L. Chena and C.Y. Chiub, "A fuzzy neural approach to design of a Wiener printer model incorporated into model-based digital halftoning," *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 1288-1302, 2012.
- [41] S. Mete, Ş. Özer and H. Zorlu, "System identification using Hammerstein model," In 22nd Signal Processing and Communications Appllica. Conf. (SIU), Turkey, 2014, pp. 1303-1306.
- [42] J.T.R. Jang, C.T. Sun and E. Mizutani, Eds., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. PTR: Prentice Hall, 1997.
- [43] M.E. Yuksel and A. Basturk, "Efficient removal of impulse noise from highly corrupted digital images by a simple neuro-fuzzy operator," *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, vol. 57, pp. 214-219, 2003.
- [44] M.E. Yuksel and E. Besdok, "A simple neuro-fuzzy impulse detector for efficient blur reduction of impulse noise removal operators for digital images," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 12, pp. 854-865, 2004.
- [45] H. Zorlu, "Identification of nonlinear systems with soft computing techniques", Dissertation thesis, Erciyes University, Kayseri, Turkey, 2011.
- [46] R. Yanyan, W. Dongfeng, L. Changliang and H. Pu, "PSO and RBF network-based Wiener model and Its application to system identification," In 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, 2012, pp. 2063-2068.
- [47] L. Yong and T. Ying-Gan, "Chaotic system identification based on a fuzzy Wiener model with particle swarm optimization," *Chin. Phys. Lett.*, vol. 27, pp. 090503/1-090503/4, 2010.



AN IMPROVED WIENER MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION

- [48] O.M. Mohamed Vall and M. Radhi, "An approach to the closed loop identification of the Wiener systems with variable structure controller using an hybrid neural model," In IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Que, 2006, pp. 2654-2658.
- [49] T. Yinggan and L. Zhonghui, "Identification of nonlinear system using fuzzy Wiener model through self-adaptive differential evolution algorithm," In 13th IFAC Symposium on Large Scale Complex Systems: Theory and Applications, Shanghai, 2013, pp. 575-580.
- [50] B. Chen, Y. Zhu, J. Hu and J.C. Principe, "A variable step-size SIG algorithm for realizing the optimal adaptive FIR filter," International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 9, pp. 1049-1055, 2011.
- [51] P.S.R. Diniz, Eds., Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementations. USA: Springer Verlag, 2008.
- [52] F. Sbeity, J.M. Girault, S. Menigot and J. Charara, J., "Sub and ultra harmonic extraction using several Hammerstein models," Int Conf Comp Syst (ICCS), Morocco, 2012, pp. 1-5.
- [53] Z. Du and X. Wang, "A novel identification method based on qdpso for Hammerstein error-output system," In Chinese Control Decis Conf (CCDC), PRC, 2010, pp. 3335-3339.
- [54] C.A. Schmidt, S.I. Biagiola, J.E. Cousseau and J.L. Figueroa, "Volterra-type models for nonlinear systems identification," Applied Mathematical Modelling, vol. 38, pp. 2414-2421, 2014.
- [55] A. Maachou, R. Malti, P. Melchior, J.L. Battaglia, A. Oustaloup and B. Hay, "Nonlinear thermal system identification using fractional Volterra series," Control Engineering Practice, vol. 29, pp. 50-60, 2014.
- [56] A. Basturk, "Noise removal from digital images and image enhancement by soft computing based methods," Dissertation thesis, Erciyes University, Kayseri, Turkey, 2006.
- [57] M.E. Yuksel and A. Basturk, "A simple generalized neuro-fuzzy operator for efficient removal of impulse noise from highly corrupted digital images," AEU International Journal of Electronics and Communications, vol. 59, no. 1, pp. 1-7, 2005.
- [58] M.E. Yuksel and A. Basturk, "Efficient distortion reduction of mixed noise filters by neuro-fuzzy processing," Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), vol. 4252, pp. 331-339, 2006.
- [59] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, pp. 116-132, 1985.
- [60] M. Sugeno and G.T. Kang, "Structure identification of fuzzy model," Fuzzy Sets and Systems, vol. 28, pp. 15-33, 1988.
- [61] K. Levenberg, "A method for the solution of certain problems in least squares," Quan. Appl. Math., vol. 2, pp. 164-168, 1944.
- [62] D.W. Marquardt, "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters," J. Soc. Industrial and Applied Mathematics, vol. 31, pp. 431-441, 1963.
- [63] Ş. Özer and H. Zorlu, "Neuro-Fuzzy soft-switching hybrid filter for impulsive noisy environments," Turk J Elec Eng & Comp., vol. 19, pp. 73-85, 2011.
- [64] A. Basturk and M.E. Yuksel, "Neuro-Fuzzy soft switching hybrid filter for impulse noise removal from digital images," In Proceedings of the IEEE 13th Signal Proces Com Ap Conf (SIU), Kayseri, 2005, pp. 13-16.
- [65] M.A. Soyurk, A. Basturk and M.E. Yuksel, "A novel fuzzy filter for speckle noise removal," Turk J Elec Eng & Comp., vol. 22, pp. 1367-1381, 2014.
- [66] M.T. Yıldırım, A. Basturk and M.E. Yuksel, "Impulse noise removal from digital images by a detail-preserving filter based on type-2 fuzzy logic," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 16, pp. 920-928, 2008.
- [67] Z. Wang, Y. Shen, Z. Ji and R. Ding, "Filtering based recursive least squares algorithm for Hammerstein FIR-MA systems," Nonlinear Dynamics, vol. 73, pp. 1045-1054, 2013.
- [68] S.J. Nanda, G. Panda and B. Majhi, "Development of immunized PSO algorithm and its application to Hammerstein model identification," In IEEE Congresson Evolutionary Computation, Trondheim, 2009, pp. 3080-3086.
- [69] K.H. Chon and R.J. Cohen, "Linear and nonlinear arma model parameter estimation using an artificial neural network," IEEE T Bio-Med Eng., vol. 44, pp. 168-174, 1997.
- [70] S. Mete, H. Zorlu and S. Ozer, "A new hybrid model based on neuro fuzzy network soft switching mechanism for system identification," Bilişim Teknolojileri Dergisi, vol. 12, no. 1, pp. 1-8, 2019.
- [71] S. Mete, S. Ozer and H. Zorlu, "System identification using Hammerstein model optimized with differential evolution algorithm," International Journal of Electronics and Communications (AEU), vol. 70, pp. 1667-1675, 2016.
- [72] S. Mete, S. Ozer and H. Zorlu, "System identification application using hammerstein model," Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, vol. 41, pp. 597-605, 2016.
- [73] S. Mete, H. Zorlu and S. Ozer, "An improved Hammerstein model for system identification," in Information Innovation Technology in Smart Cities, L. Ismail and L. Zhang, Eds. Singapur: Springer-Verlag, Part I, 2018, pp.47-61.





TAMAMEN OPTİK MİKROSİSTEMLER İÇİN 180NM CMOS TEKNOLOJİSİNDE TASARLANMIŞ DÜŞÜK GERİLİM BESLEMELİ OSİLATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Emin Cihan ANIL¹ , Baykal SARIOĞLU^{2,*} 

^{1,2} İstanbul Bilgi University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 34060, İstanbul, Turkey

ÖZET

Bu çalışmada tamamen optik entegre bir biyomedikal sistem için düşük güç tüketimine ve düşük besleme gerilimine sahip üç temel osilatör bazlı kapasitif ve dirençsel algılama devre yapısı incelenmiş ve bu devreler güç tüketimi, çalışma besleme gerilimi ve çıkış frekansı değerleri göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Osilatör temelli algılama devrelerinde kullanılan elemanların değerleri 180 nm CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor - Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken) Teknolojisine göre hesaplanmış ve benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çıkış frekansının algılayıcı direnç ve kapasite değerine bağlı teorik eşitlikleri türetilmiştir. Halka osilatör devresi ile 0,5 V besleme geriliminde başarılı sonuçlar alınmış ve bu algılayıcının gerilim yükseltici devreler kullanımına ihtiyaç duymadan tek bir tümleşik CMOS fotodiyot ile çalışabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Optik iletişim, Algılayıcı, CMOS, Osilatör, Düşük güç

COMPARISON LOW VOLTAGE OSCILLATORS IN 180NM CMOS TECHNOLOGY FOR ALL-OPTICAL MICROSYSTEMS

ABSTRACT

In this work, the design and results of three oscillator-based capacitive and resistive sensing circuits with low supply voltage and low power consumption for an optically powered biomedical microsystem are investigated. The oscillator-based sensing circuits are designed and simulated using 180 nm CMOS Technology. In addition, the theoretical relationships of output frequency depending on sensor resistance and capacitance are derived. Moreover, it is also shown that the ring oscillator can work at 0.5 V supply voltage and it can be operated with a single integrated CMOS photodiode without utilizing a voltage doubler circuit.

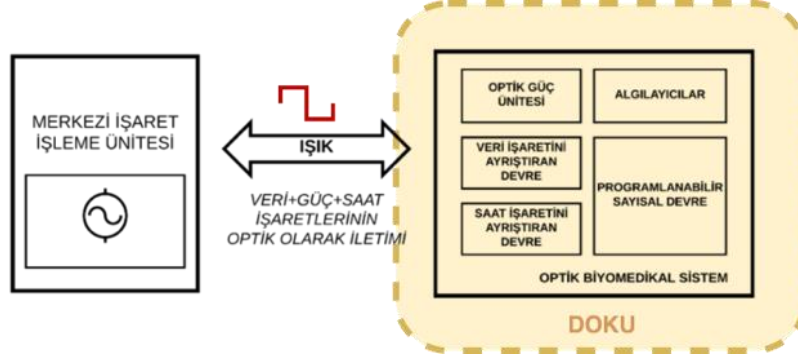
Keywords: Optical transmission, Sensor, CMOS, Low power

1. GİRİŞ

Hastalık seyrinin izlenebilmesi adına sürekli çalışacak ve hasta üzerine yerleşimi mümkün olan mikro boyutlu ve çok düşük güç tüketimli mikro-sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır [1]-[7]. Bu sistemlerin hastalığa özgü olarak hastalığın seyrini izleyebilme olanağı sağlayacak çeşitli yapıda algılayıcı ünitelere sahip olmaları gerekmektedir. Bu algılayıcılar yapıları itibarı ile kapasitif, endüktif ve dirençsel olmaktadır [3],[8],[9]. Kapasitif algılayıcılar, biyomedikal sistemler ve implant sistemlerinde basınç değişimi, nem değeri gibi değerlerin algılamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [8]-[16]. Kapasitif algılayıcıların uygulanan farklı basınç değerlerine bağlı olarak algılayıcı kapasite değeri de değişmektedir. Basınca bağlı değişen bu kapasite değerinin gerilim, akım ya da frekans gibi elektriksel bir büyüklüğe dönüştürülmesi ile basınç algılanması gerçekleştirilmektedir. Literatürde bu tip algılayıcıların çeper içi basınç veya kan basıncının ölçülmesinde kullanılabilirliği gösterilmiştir [8]-[15]. Ayrıca kapasitif algılayıcılar, diş implant operasyonlarının ve ortopedik operasyonların başarısını arttırmak adına da nem ve sıcaklık ölçümlerinde de kullanılabilmektedir [12]-[18]. Bu algılayıcıların sürekli çalışabilirliği için gerekli olan enerji, alternatif kaynaklardan, hareket, radyo dalgaları ya da optik yöntemler kullanarak sürekli olarak veya ihtiyaç duyulduğunda pil kullanmadan sağlanabilmektedir. Bu alternatif kaynaklarından en verimli olan optik enerji iletimi, görece yapısal olarak karışık olmayan sistemler ile oluşturulabilmektedir. Bunun yanında, optik enerjiyi elektriksel enerjiye

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: baykal.sarioglu@bilgi.edu.tr
Geliş / Received: 04.10.2019 Kabul / Accepted: 06.05.2020 doi: 10.28948/ngumuh.629606

çeviren sistemlerin ve algılayıcıların aynı elektronik devrede kullanımı mümkündür. Optik enerji, güç kaynağı seçimi konusunda esneklikte barındırmaktadır. Örneğin, optik enerji iletimi için güneş ışığı dışında lazer, LED (Light Emitting Diode – Işık Yayan Diyot) gibi kontrol edilebilen ışık kaynakları da kullanılabilir. Enerjinin optik iletilmesi yanında, iletişim için gerekli işaretler de optik olarak iletilmekte ve tamamen optik bir yapı ortaya çıkartılabilmektedir.



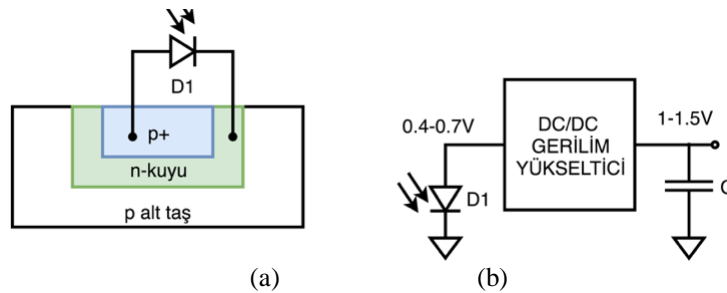
Şekil 1. Tamamen optik biyomedikal sistemin blok şeması.

Şekil 1’de tamamen optik olarak çalıştırılabilen bir biyomedikal mikrosistemin blok şeması verilmiştir [19]. Bu sisteme güç ve veriler optik olarak aktarılmaktadır. Tümleşik tek yonga üzerindeki fotoduyarlı elemanların, optik güç elde edilmesinde kullanıldığı optik sistemler en fazla %5 oranında enerji çevirim oranına sahiptir [20].

Bu tip mikro-sistemlerin tutarlı çalışabilmesi adına 40 mW ve üzerinde güce sahip bir lazer ile güç aktarımı gerçekleştirilmesi gerekliliği görülmektedir [21]. Bu nedenle bu tip optik güç ile operasyonel hale gelen mikro-sistemin verimli olarak çalıştırılabilmesi için üzerinde ihtiva ettiği devrelerin düşük besleme gerilimi ile çok düşük güç tüketerek çalışması elzemdir. Bunun yanında sunulan sistemin mikro boyutlarda olması, hasta üzerine yerleştirilebilmesi ve taşınabilirlik açılarından kritiktir. Bundan dolayı bütün sistemin aynı teknoloji kullanılarak gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. CMOS Teknolojisi, yaygınlığı, tasarım açısından getirdiği kolaylıklar ve düşük maliyeti düşünülerek amaçlanan biyomedikal mikrosistemin yaygın kullanımı açısından tercih edilmiştir.

Bu çalışmada tamamen optik bir biyomedikal sistem için düşük gerilim ile çalışan düşük güç tüketen algılayıcı yapıları incelenmiş ve bu yapıların karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör, gevşeme ve halka osilatör olmak üzere üç adet yapı incelenmiştir [9][13][14]. Bu devreler 180nm CMOS teknolojisine optik enerji ile çalışan sistemler göz önüne alınarak aktarılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT



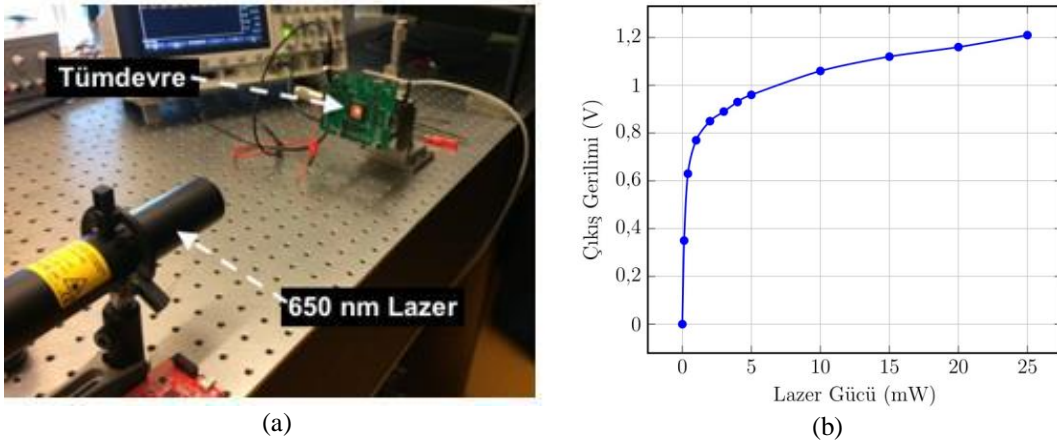
Şekil 2. (a) Güç elde etmek için kullanılan tümleşik CMOS fotodiyot yapısı, (b) Fotodiyot geriliminin gerilim yükselticisi ile artırılması.

Tamamen optik mikroelektronik sistem analog ve sayısal devrelere entegre bir şekilde tümleşik CMOS fotodiyot ihtiva etmektedir. Şekil 2 (a)’da optik güç elde edilmesinde kullanılan örnek bir CMOS tümleşik fotodiyot yapısı gösterilmiştir. Bu fotodiyotlar p+/n-well jonksiyonunu kullanmaktadırlar. Bu fotodiyotlar diğer devre elemanları ile entegre olarak kullanılacağı için p-alt taşın toprağa bağlanması gerekmektedir. Bu nedenle birden fazla fotodiyot seri olarak bağlanamamaktadır. Sonuç olarak tümleşik fotodiyotlardan en yüksek 0,7 V mertebesinde bir gerilim elde edilebilmektedir. Bu gerilimin artırılabilmesi için Şekil 2 (b)’de gösterilen gerilim yükselticisi yapısı fotodiyot çıkışına bağlanmaktadır [22]. Bu tümleşik gerilim yükselticilerin ise verimlilik değeri %60-70 civarında olmaktadır. Bu şekilde tümleşik fotodiyotlardan güç elde etme %2-5

TAMAMEN OPTİK MİKROSİSTEMLER İÇİN 180NM CMOS TEKNOLOJİSİNDE TASARLANMIŞ DÜŞÜK GERİLİM BESLEMELİ OSİLATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

civarında verimliliğe düşmektedir [19]. Bu sebeple optik güç ile çalışacak devrelerin çok düşük güç tüketimine sahip olmaları ve düşük gerilimlerde çalışmaları gerekmektedir.

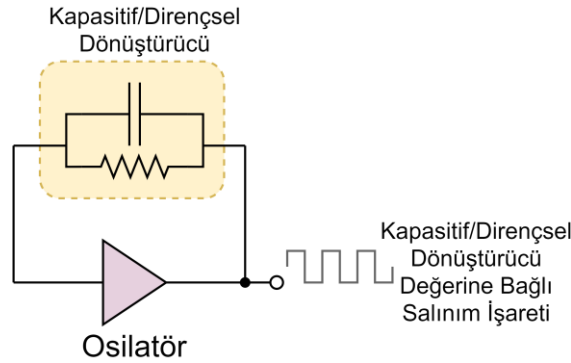
Şekil 3 (a)'da 180 nm CMOS Teknolojisinde tasarlanıp üretilen, Şekil 2 (b)'de de gösterilen, tümleşik devre ve buna bağlı bir gerilim yükselticiden oluşan, bir optik güç ünitesinin deney düzeneği ve gerçekleştirilen deneylerin sonuçları gösterilmektedir. Bu deneyler sırasında 650 nm dalga boyuna sahip çıkış optik gücü ayarlanabilen bir lazer, tümdevre üzerinde tümleşik fotodiyot yapısı üzerine uygulanmıştır. Deneyler sırasında lazer gücü 0-25 mW aralığında taranmış ve Şekil 3 (b)'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlardan optik güç ünitesinin gerilim çıkışından 1 V üzerinde bir besleme gerilimi elde edilebilmesi için sisteme yüksek güçte ve odaklanmış bir lazer ışığı uygulanması gerektirdiği anlaşılmıştır. Bu nedenle bu tarz lazer kaynakları ihtiyacının ortadan kaldırılabilmesi adına mikro-sistemde çalışacak algılayıcı devre yapılarının düşük gerilim ve düşük güçte çalışması gerekliliği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. (a) Optik güç iletilme deney düzeneği, (b) bu düzenden elde edilen gerilim deneysel sonucu.

2.1 Düşük Gerilim Beslemeli Osilatör Yapıları

Kapasitif ve dirençsel algılayıcıların değerine bağlı olarak farklı frekanslarda çıkış işareti üreten algılayıcı devre Şekil 4'te iletilmiş olan mikro sistem içerisinde gerçekleştirilebilmektedir. Algılayıcı devre osilatör bazlı olup giriş bağlantısına yerleştirilmiş olan direnç ve kapasite değerinin değişimine göre çeşitli frekanslarda çıkış işareti üretmektedir. Bu işaret frekansı direk olarak dönüştürücü değer algılamasında kullanılabilir ya da bu işaret referans bir osilatör işareti ile karşılaştırılır ve iki işaret arasındaki fark, darbe genişliği kiplenmeli bir işaret olarak bir sonraki bloğa iletilir. Faz karşılaştırılması işlemi basit bir XOR devresi ile gerçekleştirilebilmektedir. Darbe genişliği değeri ise giriş kapasite ve direnç değerine tekabül etmektedir.



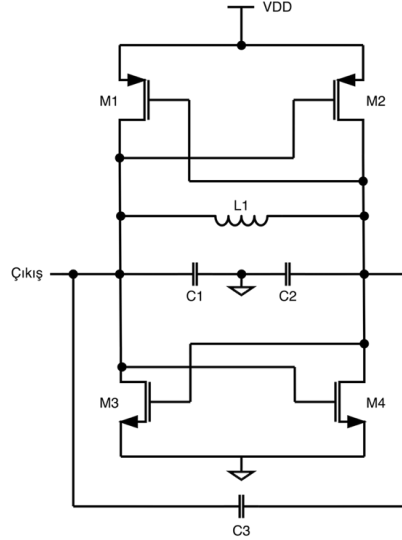
Şekil 4. Kapasitif/Dirençsel algılayıcı için örnek bir osilatör tabanlı algılayıcı devresinin blok şeması.

Bu çalışma kapsamında algılayıcı devrede kullanılmak üzere düşük güç tüketimli ve düşük besleme geriliminde çalışabilen, literatürde bu tip algılayıcıların gerçekleştirilmesinde kullanılan (1) LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör, (2) gevşeme osilatör ve (3) halka osilatör olmak üzere temel olarak üç tip osilatör devresi incelenmiştir. Osilatör devrelerindeki elemanların değerleri 180nm teknolojisine göre tekrardan hesaplanmış ve tamamen optik sistem için uygunlukları açısından karşılaştırılmıştır.

E. C. Anıl, B. Sarıoğlu

Hesaplanan yeni değerlere göre oluşturulan osilatörlerin benzetimleri Mentor Graphics IC Flow uygulaması kullanılarak yapılmıştır.

2.1.1. Çapraz Kuplajlı LC Osilatör Tasarımı



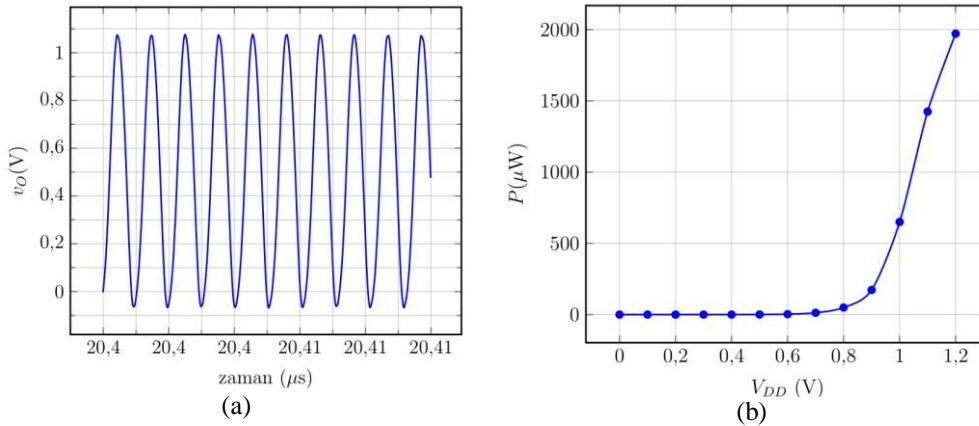
Şekil 5. LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör devre şematığı, $C1 = C2 = C3 = 4$ pF, $L = L1 = 4$ nH.

LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörler negatif empedans temelinde çalışırlar. Elde edilen açıl salınım frekans değeri devrede kullanılan endüktans (L) ve kapasite (C) değerine \sqrt{LC} eşitliği ile bağlıdır. Bu eşitlik uyarınca kullanılan L ve C değerinin değişimi çıkış frekansında da değişime yol açacaktır. Çıkış frekansının ölçülmesi ile kapasite ya da endüktans değeri bulunabilmektedir.

Şekil 5'te LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör devresi gösterilmektedir [13]. LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörün kapasite-frekans eşitliği eğri uydurma yöntemi kullanılarak şu şekilde ifade edilebilmektedir.

$$f(C) = \frac{10751,97}{C^{0,433}} \quad (1)$$

Bulunan eşitliğin benzetim sonuçlarına olan yakınsaklığını gösteren istatistiksel R^2 değer 0,9946 olarak bulunmuştur. R^2 değerinin eşitlik ile benzetim sonuçlarına tam uyumu gösteren 1 değerine olan yakınlığı, devre üzerine yerleştirilecek değişik kapasitif dönüştürücülerin sonuç vereceği frekans değerlerinin bulunmasında, elde edilen eşitliğin kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 6. (a) LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörün benzetim sonuçları, $V_{DD} = 1$ V, (b) LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörün güç tüketimi - besleme gerilimi ilişki grafiği.

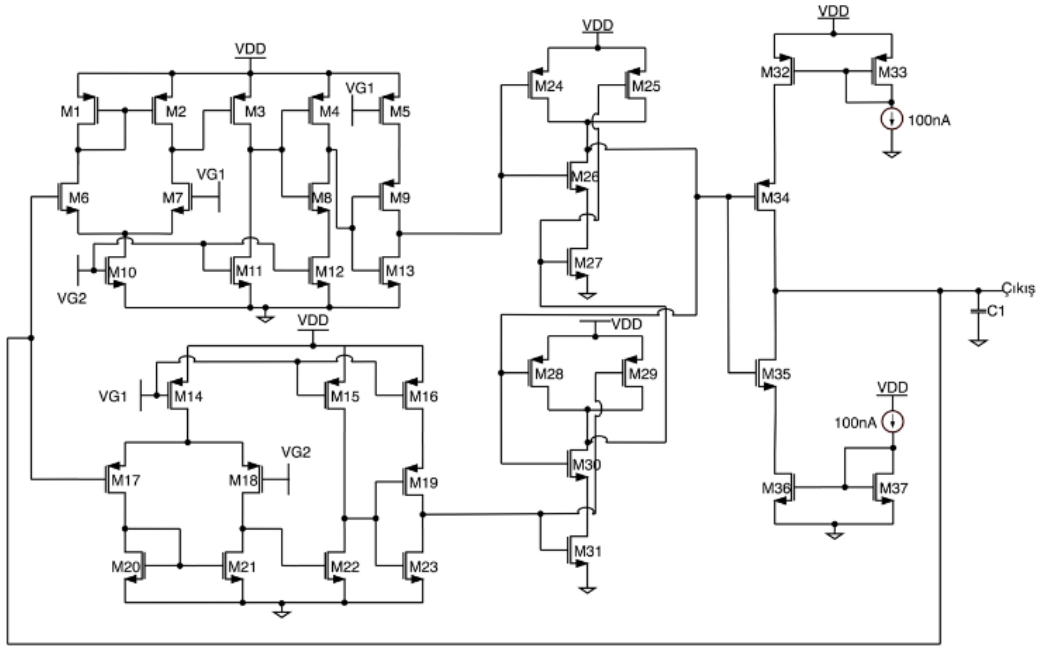
TAMAMEN OPTİK MİKROSİSTEMLER İÇİN 180NM CMOS TEKNOLOJİSİNDE TASARLANMIŞ DÜŞÜK GERİLİM BESLEMELİ OSİLATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Devrede kullanılan transistörlerinin boyutları L değeri minimum tutularak sırası ile PMOSlar $W = 190 \mu\text{m}$, $L = 0,18 \mu\text{m}$; NMOSlar $W = 96 \mu\text{m}$, $L = 0,18 \mu\text{m}$ olmaktadır. L olarak 4 nH ve kapasitif dönüştürücüyü temsilen C olarak ise 4 pF seçilmiştir. Optik güç ünitesinden gelen gerilim değeri 0,4 V-2 V aralığında olabileceğinden benzetimlerimiz esnasında osilatöre bu besleme gerilimi aralığında çeşitli besleme gerilimleri uygulanmıştır.

LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör devresinin besleme gerilimi 1,2 V iken salınım frekansı 936 MHz olmaktadır. Devrede ortalama çekilen akım ise 1,643 mA, harcanan güç ise 1,972 mW olmaktadır. LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör devresinin besleme gerilimi 1 V iken ürettiği salınım için benzetim sonuçları Şekil 6 (a)'da verilmiştir. Besleme gerilimi 1 V'a düşürüldüğünde çıkış frekans aralığı 945 MHz olarak görülmektedir. 1 V besleme geriliminde devre ortalama 649,9 μA akım çekmektedir. Toplam harcanan güç ise 649,9 μW olmaktadır. LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörün besleme gerilimi 0,99 V altına düşürüldüğünde devrenin salınım gerçekleştirmediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörün tek fotodiyottan alınacak 0,5 V-0,7 V aralığındaki bir besleme gerilimi için uygun olmadığı görülmüştür.

2.1.2. Gevşeme Osilatörü Tasarımı

Çalışmada incelenen bir diğer osilatör yapısı Şekil 7'de gösterilen gevşeme osilatörüdür [14]. Gevşeme osilatörü 555 zamanlayıcı devresi baz alınarak kurulmuştur. Gevşeme osilatörü tasarımında yer alan 100 nA'lık akım kaynağı ile kondansatör şarj edilir. Kondansatör, gerilimin üst eşiğe ulaşması esnasında deşarj durumuna geçer. Bu durum osilatör tasarımında yer alan karşılaştırıcı tarafından algılanır ve gerilimin düşük eşiğe ulaşması sağlanır. Gerilimin düşük eşiğe ulaşmasıyla tekrardan kondansatörün şarj edilmesi sağlanır. Kondansatörün şarj-deşarj durumu ile bir salınım meydana gelir.



Şekil 7. Gevşeme osilatör devre şematığı, $C1 = 1 \text{ pF}$.

Gevşeme osilatörü devresinin salınım frekansının analitik eşitliği ise [14] te iletildiği üzere;

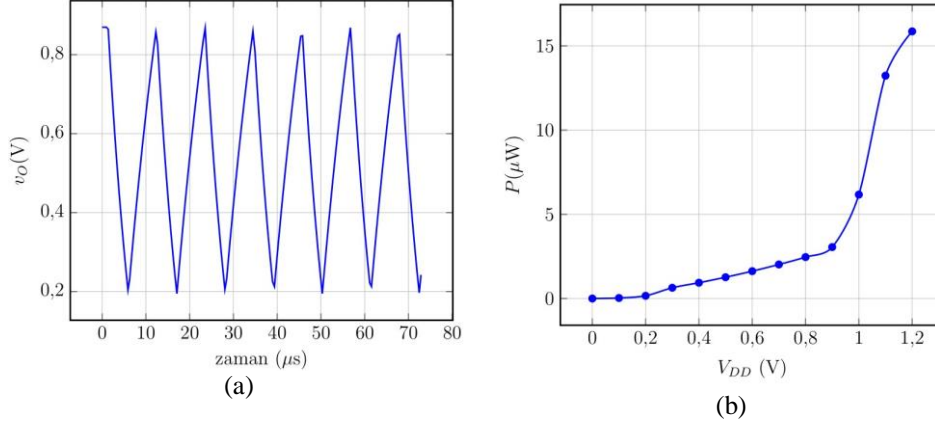
$$f(C) = \frac{\alpha I}{C(VG1 - VG2)} \quad (2)$$

dir ve akım katsayısı çalışmamızda sunulan devre için $\alpha = 10,23 \times 10^{-2}$ olarak eğri uydurma tekniği kullanarak hesaplanmıştır. Gevşeme osilatör devresinde PMOS ve NMOS transistörlerinin boyutları $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 0,24 \mu\text{m}$ alınmıştır. Kondansatörün şarj olmasını başlatmak için 100 nA'lık akım kaynağı kullanılmıştır. Kapasitif dönüştürücüyü temsilen C1 olarak ise 1 pF seçilmiştir. Devrede $VG1 = 0,9 \text{ V}$, $VG2 = 0,2 \text{ V}$ değerlerindedir. Diğer osilatörlerde izlenen metotlar gevşeme osilatör benzetimleri için de izlenmiş ve benzetimler besleme gerilimi 1,2 V ve 1 V iken yapılmıştır.

Gevşeme osilatör devresinde besleme gerilimi 1,2 V olan gevşeme osilatörün çıkış frekansı 93,220 kHz ve ortalama akımı 13,22 μA ' dir. Osilatörün harcadığı güç ise 15,864 μW olmaktadır. Gevşeme osilatör devresinin besleme gerilimi 1 V iken ürettiği salınım için benzetim sonuçları Şekil 8 (a)'da verilmiştir. Devrenin besleme gerilimi 1 V iken çıkış frekansı 90,222 kHz ve ortalama akımı 6,172 μA ' dir. Osilatörün harcadığı güç ise 6,172 μW olmaktadır. Gevşeme osilatörün besleme gerilimi

E. C. Anıl, B. Sarıoğlu

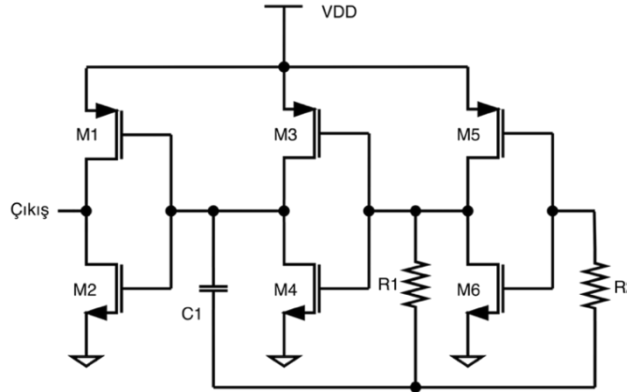
0,99 V altına düşürüldüğünde devrenin salınım gerçekleştirmediği tespit edilmiştir. Bundan ötürü gevşeme osilatörün tek fotodiyottan alınacak 0,5 V-0,7 V aralığındaki bir besleme gerilimi için uygun olmadığı görülmüştür.



Şekil 8. (a) Gevşeme osilatörün benzetim sonuçları, $V_{DD} = 1$ V, (b) gevşeme osilatörün güç tüketimi - besleme gerilimi ilişki grafiği.

2.1.3. Halka Osilatör Tasarımı

Bu çalışma kapsamında son olarak incelenen osilatör yapısı ise eviricilerin arka arkaya bağlanması prensibine dayanan halka osilatör yapısıdır [9]. Bu yapının doğal salınım frekansı eklenecek ek direnç ve kapasite değerleri ile değişmektedir. Bu özellik sayesinde halka osilatörler kapasite ve direnç değerlerinin tespitinde kullanılabilir. Şekil 9’da üç katlı halka osilatör devresi gösterilmektedir.



Şekil 9. Halka osilatör devre şematığı

Bu devrenin salınım frekansının eşitliği [9] da iletilen eşitlik kullanılarak;

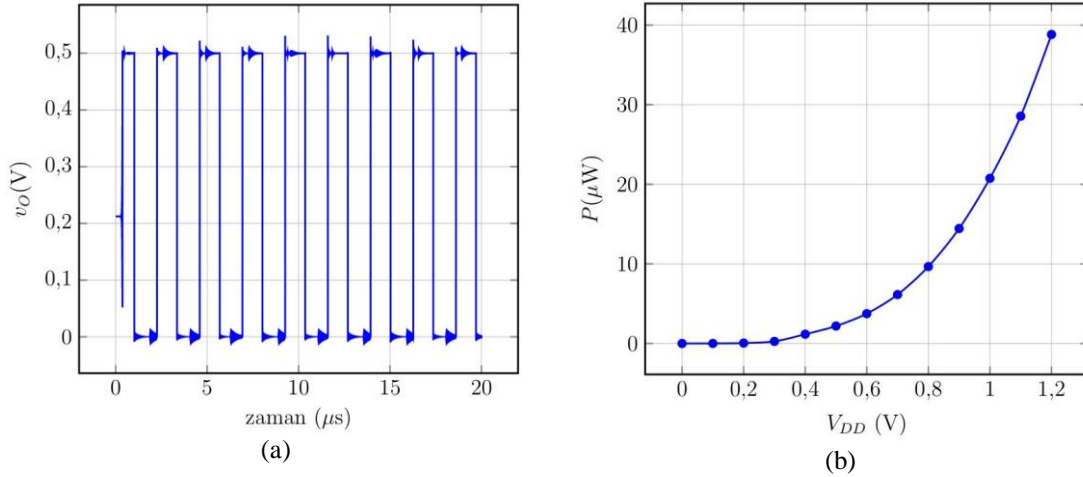
$$f(C) = \frac{1}{2R1C \left(\frac{0,405R1}{R1+R2} + 0,693 \right)} \quad (3)$$

olarak hesaplanmıştır.

Halka osilatör devresinde PMOS ve NMOS transistörlerinin boyutları $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 0,24 \mu\text{m}$ alınmıştır. Salınım frekansının ayarlanması adına devreye $100 \text{ k}\Omega$ değerinde iki adet direnç eklenmiştir. Salınım frekansının 1 MHz 'in altında olması hedeflendiğinden kapasitif dönüştürücüyü temsil olarak 10 pF değerinde bir adet kondansatör eklenmiştir. LC CMOS çapraz kupajlı osilatör ile izlenen benzer bir metot halka osilatör benzetimleri için de izlenmiş ve benzetimler besleme gerilimi $1,2 \text{ V}$, 1 V , $0,8 \text{ V}$ ve $0,5 \text{ V}$ iken yapılmıştır. Halka osilatör beslemesine $1,2 \text{ V}$ gerilim uygulandığında osilatörün çıkış frekansı $452,514 \text{ kHz}$, devrede çekilen ortalama akım $32,35 \mu\text{A}$, harcanan güç ise $38,82 \mu\text{W}$ olarak tespit edilmiştir. Halka osilatörün besleme gerilimi 1 V iken çıkış frekansı $444,873 \text{ kHz}$ olarak ölçülmüştür. Devrenin çektiği ortalama akım $20,75 \mu\text{A}$ iken harcadığı güç ise $20,75 \mu\text{W}$ olmaktadır. Besleme gerilimi $0,8 \text{ V}$ olan halka osilatörün çıkış frekansı $437,698 \text{ kHz}$ ve ortalama akımı $12,08 \mu\text{A}$ dir. Osilatörün harcadığı güç ise $9,664 \mu\text{W}$ olmaktadır. Halka osilatörün güç tüketiminin azaltılması için

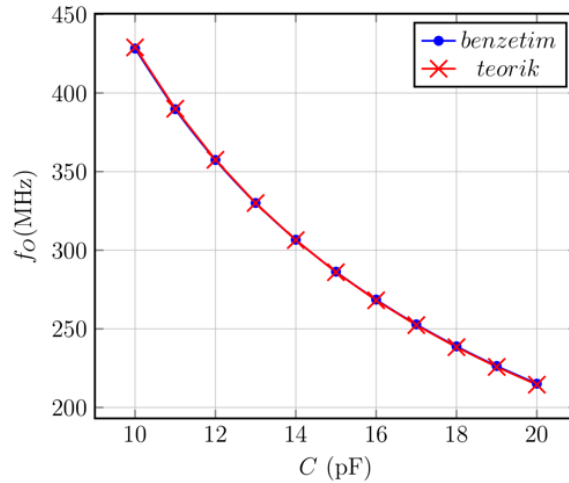
TAMAMEN OPTİK MİKROSİSTEMLER İÇİN 180NM CMOS TEKNOLOJİSİNDE TASARLANMIŞ DÜŞÜK GERİLİM BESLEMELİ OSİLATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

tasarımlarda düşük eşik gerilimli MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör) modelleri kullanılmıştır. Düşük eşik gerilimli MOSFET modelleri kullanılarak halka osilatöre ait benzetim sonuçları Şekil 10 (a)'da görülmektedir. Devre beslemesi olarak 0.5 V uygulanmıştır. Çıkış salınım frekansı 428,295 kHz olarak ölçülmüştür. Devrenin çektiği ortalama akım 4,382 μ A iken harcadığı güç ise 2,191 μ W olmaktadır.



Şekil 10. (a) Halka osilatörün benzetim sonuçları, $V_{DD} = 0,5$ V, (b) halka osilatörün güç tüketimi-besleme gerilimi ilişki grafiği.

Şekil 11'de ise Eşitlik (4) de verilen teorik kapasite değeri-frekans değişimi eşitliği ile benzetim sonuçları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Teorik olarak elde edilen eşitliğin benzetim sonucu ile örtüştüğü anlaşılmıştır. Bu eşitlik kullanılarak algılayıcı kapasite değerini hesaplamak ve bu şekilde algılayıcının ifade ettiği nem, sıcaklık veya basınç değerlerine ulaşmak mümkündür.

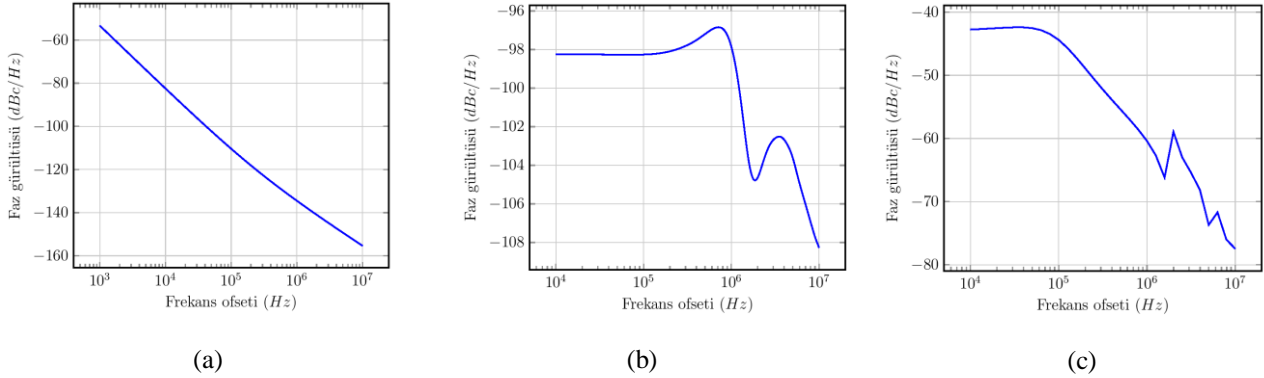


Şekil 11. Çıkış frekans değeri bazında halka osilatörünün benzetim – teorik sonuç karşılaştırma grafiği.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada dönüştürücü değerleri olarak özellikle laboratuvarımızda tasarlanan kapasitif basınç dönüştürücülerin sahip olduğu 1-10 pF aralığındaki değerler kullanılmıştır [23]. Bu dönüştürücü değeri bu aralığa sabitlenmiş ve osilatör tasarımları bu yönde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle üç tip osilatörden değişik frekans bandında işaret çıktıları alınmıştır. İncelenen osilatörlerin karşılaştırılması Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablo 1'de elde edilen sonuçlar minimum besleme gerilimleri olan LC CMOS çapraz kuplajlı ve gevşeme osilatöründe 1 V, halka osilatöründe 0.5 V verilerek alınmıştır.

E. C. Anıl, B. Sarıoğlu



Şekil 12. Osilatörlerin faz gürültüsü benzetimleri (a) LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör faz gürültüsü, (b) Gevşeme osilatörü faz gürültüsü (c) Halka osilatörü faz gürültüsü.

Tablo 1. Tasarımların karşılaştırılması.

	LC CMOS Çapraz Kuplajlı Osilatör	Gevşeme Osilatör	Halka Osilatör
Salınım Frekansı	950,785 MHz	90,222 kHz	428,295 kHz
Akım Tüketimi	649,9 μ A	6,172 μ A	4,382 μ A
Güç Tüketimi	649,9 μ W	6,172 μ W	2,191 μ W
Faz Gürültüsü (1MHz)	-135 dBc	-98 dBc	-60 dBc

Osilatör seçiminde, kullanılacağı sistemden dolayı minimum güç tüketimi ve minimum besleme gerilimi şartları göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca optik enerjinin verimli kullanılabilmesi için çıkış işaret frekans değerinin düşürülmesi gerekmektedir. LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör çıkış işaretinin düşürülmesi için hacimce entegre devreye oranla fazla yer kaplayacak endüktanslara ihtiyaç duymaktadır. Düşük değerli endüktans değerleri kullanım gerekliliği, LC CMOS çapraz kuplajlı osilatörün, diğer osilatörlere göre hem daha yüksek enerji tüketimine hem de daha yüksek çıkış frekansına sahip olmasına neden olmaktadır. Gevşeme osilatöründe ise sistemde istenen gerilim değerlerinde bir salınma rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu üç osilatör karşılaştırıldığında bu şartları sağlayan halka osilatör olmuştur. Halka osilatör ayrıca çok düşük gerilimlerde çalışabileceği de görülmektedir. Optik güç veriminin %2-5 aralığında düşünüldüğünde, halka osilatörün yaklaşık 1 mW gücündeki bir optik kaynak ile çalışabilirliği de görülmektedir. Ayrıca halka osilatör daha az sayıda transistör yapısına ihtiyaç duymakta, bu nedenle daha az tümdevre alanı gereksinimine ihtiyaç duyması açısından da avantajlıdır. Kapasite değerinin frekans değeri ölçüleceği göz önüne alındığında, frekans değerinin istenilen aralıkta ayarlanması da algılayıcı devrelerden beklenen bir özelliktir.

Şekil 12 de ayrıca faz gürültüsü benzetim sonuçları da iletilmektedir. Faz gürültüsü işaret frekansının doğru olarak belirlenmesinde önemli bir değerdir. Bu konuda en az faz gürültüsüne beklenildiği üzere LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör sahiptir. En kötü değer ise halka osilatöre aittir.

LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör L ve C değerlerine bağlı olarak salındığı için bu değerlerin uygun seçilmesi ile frekans aralığı belirlenebilmektedir. Öte yandan tümleşik olarak endüktans değerinin yükseltilmesi için yüksek bir silikon alanına ihtiyaç duyulmakta ve nH mertebesinde yüksek tümleşik endüktans değeri elde etmek pratikte mümkün olamamaktadır [21]. Bu nedenle pF aralığındaki algılayıcı kapasite değerleri için LC CMOS çapraz kuplajlı osilatör salınım frekans değerleri 500 MHz-1 GHz aralığında olmaktadır. Bu nedenle güç tüketimi de yüksek çıkmaktadır. Gevşeme osilatörün salınım frekansı uygulanan gerilim değerleri ve akım kaynağı değeri ile ilintili olduğu için salınım frekansının kontrolü daha kolay olmaktadır.

Yaptığımız çalışmalar gevşeme osilatör yapısının tek fotodiyot gerilimi olan 0,5 V-0,7 V düzeyinde sonuç vermediğini göstermektedir. Öte yandan halka osilatör yapısı herhangi bir gerilim yükseltici yapısına ihtiyaç duymadan 0,5 V değerindeki bir besleme gerilimi ile çalışmaktadır ve bu şekilde halka osilatör tabanlı algılama devresinin tek entegre fotodiyot ile çalışabilirliği de görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada tamamen optik entegre bir biyomedikal sistem için düşük güç tüketimine ve düşük besleme gerilimine sahip LC çapraz kuplajlı, gevşeme ve halka osilatör temelli kapasitif ve dirençsel algılama devreleri incelenmiş ve bu tasarımlar güç tüketimi, çalışma besleme gerilimi ve çıkış frekansı değerleri göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Osilatör temelli algılama devreleri 180 nm UMC CMOS Teknolojisi kullanılarak tasarlanmış ve benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çıkış

TAMAMEN OPTİK MİKROSİSTEMLER İÇİN 180NM CMOS TEKNOLOJİSİNDE TASARLANMIŞ DÜŞÜK GERİLİM BESLEMELİ OSİLATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

frekansının algılayıcı direnç ve kapasite değerine bağlı teorik eşitlikleri türetilmiştir. Bu tasarımlar karşılaştırılmış ve optik güç ile çalışan bir mikrosistem için uyarlanabilirlikleri tartışılmıştır. Yaptığımız karşılaştırmalı incelemeler sonucunda halka osilatör tasarımı ile 0,5 V düşük besleme geriliminde başarılı sonuç alınmış ve algılayıcının tek bir tümleşik CMOS fotodiyot ile çalışabilirliği gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Tübitak Proje No:114E549 kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] K. Agarwal, R. Jegadeesan, Y.X. Guo, and N. Thakor, "Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 10, pp. 136-161, 2017.
- [2] R. Bashirullah, "Wireless Implants," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 7, pp. 14-23, 2010.
- [3] P. Bose P, A. Khaleghi, M. Albatat, J. Bergsland, and I. Balasingham, "RF Channel Modeling for Implant-to-Implant Communication and Implant to Subcutaneous Implant Communication for Future Leadless Cardiac Pacemakers," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 65, no. 12, pp. 2798-2807, 2018.
- [4] P. Gutruf and J.A. Rogers, "Implantable, Wireless Device Platforms for Neuroscience Research," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 50, pp. 42-49, 2018.
- [5] L. Jiang, Y. Yang, R. Chen, G. Lu, R. Li, D. Li, M.S. Humayun, K.K. Shung, J. Zhu, Y. Chen, and Q. Zhou, "Flexible Piezoelectric Ultrasonic Energy Harvester Array for Bio-Implantable Wireless Generator," *Nano Energy*, vol. 56, pp. 216-224, 2019.
- [6] R. Pavelková, D. Vala, and K. Gecová, "Energy Harvesting Systems Using Human Body Motion," *IFAC-PapersOnLine*, vol.51, no. 6, pp. 36-41, 2018.
- [7] F. Ali, W. Raza, X. Li, H. Gul, and K.H. Kim, "Piezoelectric Energy Harvesters for Biomedical Applications," *Nano Energy*, vol. 57, pp. 879-902, 2019.
- [8] H.Y. Lee, B. Choi, S. Kim, S.J. Kim, J.W. Bae, and S.W. Kim, "Sensitivity-Enhanced LC Pressure Sensor for Wireless Bladder Pressure Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 12, pp. 4715-4724, 2016.
- [9] R. Aragonés, P. Álvarez, J. Oliver, and C. Ferrer, "Comparison of Readout Circuitry Techniques for Data Acquisition in Raw Sensor Systems," In Proc. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, pp. 1252-1257.
- [10] S. Wang, T.J. Koickal, A. Hamilton, E. Mastropaolo, R. Cheung, A. Abel, L.S. Smith, and L. Wang, "A Power-Efficient Capacitive Read-Out Circuit with Parasitic-Cancellation for MEMS Cochlea Sensors," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 25-37, 2016.
- [11] C. Brandon, D. Elliott, and K. Moez, "An Ultra Low-Voltage Low-Power Capacitance-to-Digital Converter for Wirelessly Powered Intraocular Pressure Sensor," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 1, no. 3, pp. 208-218, 2017.
- [12] N.A. Qadir, L. Albasha, M. Taghadosi, N. Qaddoumi, and B. Hatahet, "Low-Power Implanted Sensor for Orthodontic Bond Failure Diagnosis and Detection," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 3003-3009, 2018.
- [13] Y. Wang, W.L. Goh, J.H. Lee, K.T.C. Chai, and M. Je, "Resonant-Based Capacitive Pressure Sensor Read-Out Oscillating at 1.67 GHz in 0.18µm CMOS," *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 7, no. 7, pp. 375-378, 2013.
- [14] Y.C. Shih, T. Shen, and B.P. Otis, "A 2.3µW Wireless Intraocular Pressure/Temperature Monitor," In Proc. 2010 IEEE Journal of Solid-State Circuits Conference, 2011, pp. 2592-2601.
- [15] J.F. Drazan, O.T. Abdoun, M.T. Wassick, R. Dahle, L. Beardslee, G.A. Marcus, N.C. Cady, and E.H. Ledet, "Simple Implantable Wireless Sensor Platform to Measure Pressure and Force," *Medical Engineering & Physics*, vol. 59, pp. 81-87, 2018.
- [16] C.C. Chiang, C.C.K. Lin, and M.S. Ju, "An Implantable Capacitive Pressure Sensor for Biomedical Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 134, no. 2, pp. 382-388, 2007.
- [17] S.S. Karipott, P.M. Veetil, B.D. Nelson, R.E. Guldberg, and K.G. Ong, "An Embedded Wireless Temperature Sensor for Orthopedic Implants," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 1265-1272, 2018.
- [18] D. Cirmirakis, A. Demosthenous, N. Saeidi, and N. Donaldson, "Humidity-to-Frequency Sensor in CMOS Technology with Wireless Readout," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 900-908, 2013.

E. C. Anıl, B. Sarioğlu

- [19] A. Yelkenci and B. Sarioğlu, “CMOS optical receiver for low power biomedical microsystems,” In Proc. 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2017, pp. 1-4.
- [20] B. Camli, B. Sarioğlu, and A.D. Yalcinkaya, “Photodiodes for Monolithic CMOS Circuit Applications,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 336-343, 2014.
- [21] B. Sarioğlu, M. Tumer, U. Cindemir, B. Camli, G. Dunder, C. Ozturk, and A.D. Yalcinkaya, “An Optically Powered CMOS Tracking System for 3 T Magnetic Resonance Environment,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 12-20, 2015.
- [22] E. Ashenafi and M.H. Chowdhury, “Noise Voltage Analysis of Spiral Inductor for On-Chip Buck Converter Design,” In Proc. 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2017, pp. 1-4.
- [23] Y.D. Gokdel and B. Sarioğlu, “Üç Boyutlu Baskı Metodu ile Üretilmiş Dalgalı Yüzeyli Sıralı Basınç Algılayıcı,” *Düzce University Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 1151-1161, 2019





5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

Yasin KABALCI^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

ÖZET

Bu çalışma beşinci nesil (5G) iletişim sistemleri için aday olan iletim tekniklerinin bit hata oranı (BHO) başarımlarını araştırmaktadır. Performans analizleri 5G araştırmaları için önerilmiş kanal modellerinden birisi olan A tipi Dalli Gecikme Hattı kanal modeli göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Analizler gerçekleştirilirken detaylı incelemelerin gerçekleştirilebilmesi için hem sabit alıcı/verici birimler hem de hareketli alıcı/verici birimlerin olduğu durumlar dikkate alınmıştır. Ayrıca kanal gecikme yayılımının farklı profilleri de değerlendirilerek analiz senaryoları genişletilmiştir. Elde edilen performans sonuçları hareketli ve yüksek gecikme yayılımına sahip kanal durumunda Filtre Bankası Çoklu Taşıyıcı (Filtered Bank Multiple Carrier, FBMC) iletim tekniğini kullanan iletişim sistemlerinin daha iyi bir performansa sahip olduğunu ve bu sistemin diğer sistemlere göre daha kararlı davrandığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Mobil iletişim sistemleri, 5G, TDL kanal modeli, BHO analizi

BIT ERROR RATE PERFORMANCE INVESTIGATION OF CANDIDATE TRANSMISSION TECHNIQUES FOR 5G COMMUNICATION SYSTEMS

ABSTRACT

This paper examines bit error rate (BER) performances of transmission techniques that are candidates for fifth-generation (5G) communication systems. Performance analyses are performed by considering Tapped Delay Line (TDL-A) which is a channel model proposed for the 5G studies. In order to provide comprehensive analysis, both stationary transmitter/receiver units and active receiver/transmitter units are taken into account while performing the analyses. In addition, analysis scenarios are expanded by evaluating different delay spread profiles. The obtained results show that the communications systems utilizing Filtered Bank Multiple Carrier (FBMC) transmission technique provides better performance and it operates more reliable than that of other candidates in case of active units and channel conditions with high delay spread.

Keywords: Mobile communication systems, 5G, TDL channel model, BER analysis

1. GİRİŞ

Gelecek nesil iletişim sistemlerinde ağı bağlı cihazların sayısında beklenen büyük artışın yüksek veri hızı ve daha fazla kapasite gereksinimlerini de beraberinde getirmesi beklenmektedir [1]. İletişim sistemleri için çoklu erişim tekniklerinin seçimi, servis kalitesi (quality-of-service, QoS), kararlılık ve spektral verimlilik gibi önemli performans ölçütlerini belirlemek için önemli bir parametre olmuştur. Zaman bölümlü çoklu erişim (time division multiple access, TDMA), frekans bölümlü çoklu erişim (frequency division multiple access FDMA) ve kod bölümlü çoklu erişim (code division multiple access, CDMA) gibi önceki nesil teknikler, çok sayıda bağlı cihazın bulunduğu iletişim ağlarında kaynakları yeterli derecede yönetemediklerinden dolayı çeşitli sorunlarla karşı karşıya kalmışlardır [2]. Ayrıca, veri hızı gereksinimleri, iletişim sistemlerinde kullanılan cihazların farklılıklarından dolayı cihazdan cihaza değişmektedir. TDMA, FDMA ve CDMA gibi dikgen çoklu erişim (orthogonal multiple access, OMA) yöntemlerinin aksine, dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA) yöntemleri daha fazla sayıda mobil cihazı destekleyebilmektedir. Bununla birlikte NOMA sistemler, farklı cihazların aynı bant genişliğini paylaşmasına izin vererek (cihazların verilerini güç ekseninde çoğullayarak) kapasite kazancını artırabilmektedir [3]–[6].

Kablosuz iletişim ağlarına bağlı cihazların sayısı, önemli oranda artış göstermeye devam etmekte ve buna bağlı olarak yüksek veri trafiği talebi yoğun oranda artmaktadır. Beşinci nesil (Fifth Generation, 5G) iletişim ağlarında yüksek veri hızı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yasinkabalcı@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 02.12.2019 Kabul / Accepted: 07.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.654386

Y. Kabalcı

gerektiren masif sayıda cihazın entegrasyonu beklenmektedir [1], [7]–[9]. Bu yüzden, kablosuz iletişim endüstrisi gelecek nesil iletişim sistemleri daha fazla cihaza hizmet sunabilsin diye, veri trafiğini mevcut sistemlere göre yaklaşık 1000 kat daha geliştirmek zorunda kalmıştır [10], [11]. Spektrumun optimum kullanımı hedeflenen amaçlara ulaşmak için kaçınılmaz bir gereksinimdir ve bu işaret işleme, lisanslı ve lisansız frekans bantlarının uygun adaptasyonu ve baz istasyonlarının yoğunlaştırılması ile gerçekleştirilebilir [12]. Ayrıca, 5G iletişim sistemleri ile gigabit veri hızlarına ulaşmak için en iyi iletim tekniğinin (i.e., Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM), Filtered OFDM (F-OFDM), Filtered Bank Multiple Carrier (FBMC) gibi) ve kanal kodlama şemalarının (i.e., Turbo, Polar, Low-Density Parity-Check (LDPC) gibi) bulunması gerekmektedir [13]. OFDM, modern kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın kullanımdan dolayı önemli bir yere sahiptir ancak bu tekniğin spektral verimliliğini geliştirmek için bant dışı (Out-of-Band, OOB) emisyon ve tepe güç-ortalama güç oranı (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir [14]. OOB emisyonu, modülasyon işleminden kaynaklanan gerekli bant genişliğinin hemen dışındaki bir frekans veya frekanslardaki emisyonudur. OOB emisyon seviyesi, ilgili bilgi iletimini etkilemeden azaltılamaz. Diğer taraftan, filtrelenmiş OFDM (Filtered OFDM, F-OFDM) ve Filtre Bankası Çoklu Taşıyıcı (Filtered Bank Multiple Carrier, FBMC) sistemler bahsedilen bu problemlerin üstesinden gelebilmek için iyi birer aday olarak değerlendirilmektedir [15], [16]. F-OFDM, OFDM tekniğindeki spektral sızıntıların üstesinden gelmek için alçak geçiren filtreler kullanılmaktadır. OFDM tekniğinin modern formu olarak değerlendirilen FBMC ise döngüsel ön ek kullanılmamakta ve spektral verimliliği artırmak için ofset dördün genlik modülasyonu (Offset QAM, OQAM) kullanılmaktadır [15]. NOMA teknikleri yüksek kapasite kazancı, spektrumun etkin kullanımını sağlama ve aynı frekans kaynaklarını kullanarak çok sayıda cihaza hizmet verme potansiyeline sahip olduklarından dolayı artan bir ilgiye sahiptir [17].

Bu çalışma, 5G iletişim sistemlerinde kullanılacak farklı iletim tekniklerinin performanslarını araştırmaktadır. Performans incelemeleri gelecek nesil iletişim sistemlerinin potansiyel dalga şekli adaylarından olan OFDM, F-OFDM, WOLA, FBMC ve UPMC sistemleri için gerçekleştirilmiştir. İncelemeler gerçekleştirilirken A tipi Dallı Gecikme Hattı (Tapped Delay Line, TDL-A) kanal modeli göz önünde bulundurulmuştur. Bu kanal modelinin değerlendirilmesinin temel nedeni ise bu modelin Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) tarafından 5G araştırmalarında 0.5-100 GHz frekans aralığı için önerilmiş kanal modellerinden birisi olmasıdır [18]. Performans analizleri gerçekleştirilirken farklı kanal gecikme yayılım profilleri, alıcı birimin sabit olduğu durumlar, alıcı birimin düşük hızla hareketli olduğu durumlar ve alıcı birimin yüksek hızla hareketli olduğu durumlar gibi değişik senaryolar göz önünde bulundurulmuştur.

2. İLETİM TEKNİKLERİ VE KANAL MODELİ

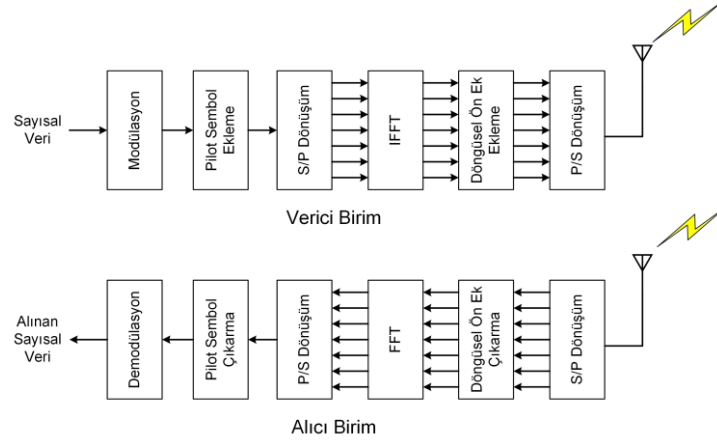
2.1. OFDM

Bant sınırlı işaretlerin dikgen alt kanallar üzerinden paralel olarak ilemesine dayanan OFDM tekniği, ilk kez 1966 yılında Chang [19] tarafından önerilmiştir. Bu ilk öneride, semboller arası girişim (Intersymbol interference, ISI) ve kanallar arası girişim (inter-channel interference, ICI) problemleri göz ardı edilmiştir. Ardından, örnekleme zaman hatası, taşıyıcı faz kayması gibi pratik sorunlar da göz önünde bulundurularak OFDM tekniğinin detaylı performans analizleri gerçekleştirilmiş ve 1970 yılında bu teknik patentlenmiştir [20], [21]. Ancak paralel modülasyon ve demodülasyon işlemlerini gerçekleştirmek için gerekli olan çok sayıda alt taşıyıcı osilatör ve maliyet kriterleri bu sistemin ana problemi olarak gündeme gelmiştir. İlerleyen yıllarda alt taşıyıcı osilatör gereksinimi ortadan kaldıran yeni bir yaklaşım olan ayrık Fourier dönüşümü (discrete Fourier transform, DFT) kullanımı önerilmiştir [22]. Bu yeni tekniğin hesaplama karmaşıklığının yüksek olması nedeniyle bu teknik yerini daha etkili bir yöntem olan hızlı Fourier dönüşümü (fast Fourier transform, FFT) tekniğine bırakmıştır. ISI ve ICI problemlerinin üstesinden gelebilmek için ise zaman ekseninde güvenlik bandı ve yükseltilmiş kosinüs pencereleme kullanılmış olmasına rağmen, çoklu yol yayılım ortamında alt taşıyıcılar arasında iyi dikgenlik sağlanamamıştır. Bu problemi çözmek için ise döngüsel ön ek (cyclic prefix, CP) kullanımı önerilmiştir [23]. OOB emisyonu, PAPR ve alıcı birimde gerekli olan katı eş zamanlama bu tekniğin en önemli problemleri olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzün en popüler iletim tekniklerinden birisi olan OFDM, geniş bantlı iletişim sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda çok girişli çok çıkışlı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) iletişim sistemlerinde de yoğun olarak kullanılan bu tekniğin geliştirilmiş blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir. Blok diyagramın üst kısmı verici birimi modellerken, alt kısım alıcı birimi modellemektedir. Tasarlanan iletişim sisteminde iletilmesi hedeflenen mesaj bilgisi için rastgele üretilmiş sayısal veri dizileri kullanılmaktadır. Mesaj bilgisini oluşturan sayısal veri dizilerine modülasyon işlemi uygulandıktan sonra pilot sembollerin eklenmesi için devam eden bloğa uygulanmaktadır. Pilot sembol ekleme işleminin gerçekleştirilmesinin ardından sayısal veri dizilerine seri/paralel dönüşüm işlemi gerçekleştirilmektedir. Ters hızlı Fourier dönüşüm bloğu (IFFT), OFDM işaretlerinin zaman ekseninde üretilmesini sağlamaktadır. Zaman eksenine aktarılan OFDM işaretlerine sonraki işlem adımında döngüsel önek bilgisi eklenerek semboller arası girişimin önlenmesi amaçlanmaktadır. Bu aşamadan sonra mesaj işareti, paralel/seri dönüşüm işlemi ile iletme uygunlaştırılarak iletim kanalına aktarılır. Mesaj işareti

5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

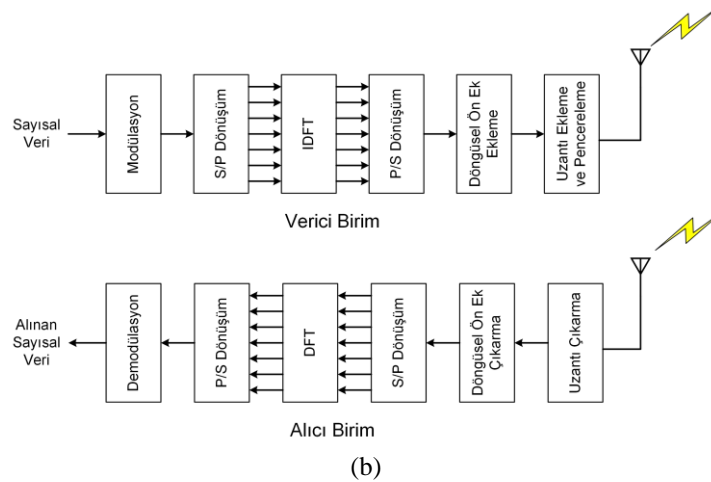
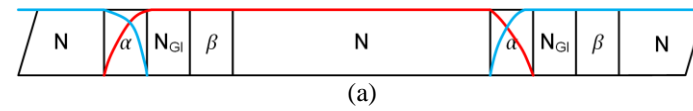
iletim kanalından geçerek alıcı birime ulaşmaktadır. Alıcı birime ulaşan mesaj işaretinden döngüsel önek bilgisinin çıkarılabilmesi için öncelikli olarak seri/paralel dönüşüm işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemlerin devamında mesaj işareti zaman ekseninden frekans eksenine FFT bloğu ile aktarılmaktadır. Bu işlemin devamında işaret paralel/seri dönüşümü yapılarak pilot sembol çıkarılması gerçekleştirilmektedir. Alıcı birimde gerçekleştirilen son işlemler demodülasyon işlemleridir. Bu işlemlerden sonra iletilen mesaj bilgileri karşılaştırılarak sistem başarımı bit hata oranı (BHO) cinsinden belirlenmektedir.



Şekil 1. OFDM iletişim sistemine ait blok diyagram

2.2. WOLA

Pencerelemiş OFDM [24] olarak da adlandırılan WOLA, geleneksel döngüsel ön ekli OFDM sistemine benzer bir yapıdadır ancak OFDM çerçevesinde ilave sol ve sağ uzantılara sahiptir. N alt taşıyıcılı geleneksel OFDM sistemindeki son CP örnekleri N örneğin önüne eklenerek CP uyumluluğu sağlanır. Eklenen N örnek parçası üç farklı grubun birleşiminden oluşur. Ön tarafa eklenen sol uzantı $\alpha + \beta$ örneklerinden ve güvenlik aralığından (guard interval, GI) oluşurken, sağ çerçeve uzantısı $\alpha + \beta$ örneklerinden oluşur. Ön ve arka uzantıdaki α örnekleri, vericide dikkörtgen olmayan pencereler kullanılarak elde edilir. WOLA çerçevesinin grafiksel gösterimi Şekil 2(a)'da, WOLA sistemin genel blok şeması ise Şekil 2(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) WOLA sembollerinin yapısı, (b) WOLA iletişim sistemine ait blok diyagram

Y. Kabalcı

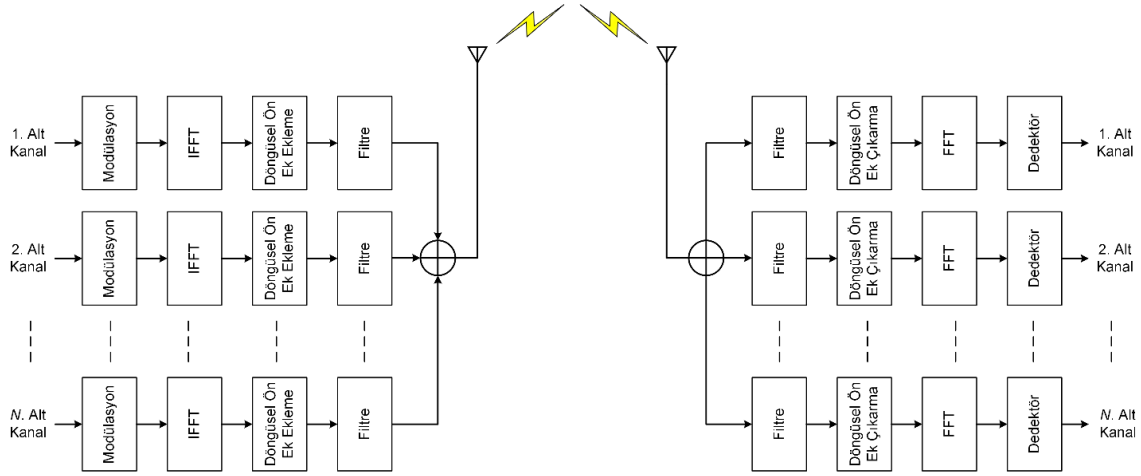
Alıcı birimde sembolün başlangıcındaki ve sonundaki α örnekleri silinir. GI örnekleri, ISI ve ICI girişimlerinin giderilmesi için kullanılmaktadır. Her bir taşıyıcıda iletilen kompleks değerler, elde edilen işarete N -noktalı FFT uygulanarak elde edilir. İletilen WOLA sembollerinin ayrık zamanlı ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S(k) = \sum_{m=0}^{L_{FFT}-1} \sum_{n=0}^{N_{OFDM}-1} c_{m,n} g[k - n(L_{FFT} + L_{GI})] e^{j2\pi kn/L_{FFT}} \quad (1)$$

burada L_{FFT} FFT boyutunu, L_{GI} GI uzunluğunu, g sembol penceresini, $c_{m,n}$, n . OFDM sembolünün m . alt taşıyıcısındaki modülasyonlu veri sembolünü, N_{OFDM} ise iletilen sembol sayısını göstermektedir. Pencereleme işlemi temelde iki uzantıda gerçekleştirilerek OOB emisyonunun düşürülmesi amaçlanmaktadır. Ancak, bu genişletme nedeniyle ortaya çıkan iki tür sorun vardır. Birincisi fazlardan zaman kaynaklarının kullanılması iken, ikincisi ise veri çarpışmasından dolayı eklentinin sol kısmının önceki OFDM çerçevesinin sağ eklentisine karışma ihtimalidir.

2.3. F-OFDM

Bu teknikte alçak geçiren filtreler kullanılarak OOB emisyonu düşürülmeye çalışılır [16], [25]–[27]. F-OFDM tekniği, ISI, ICI ve komşu kanal girişimi (adjacent-channel interference, ACI) için hem kapalı bir form sunar hem de iyi bir spektrum kullanımı sağlar. Bu yüzden F-OFDM, 5G iletişim teknolojileri için iyi bir aday olarak önerilmektedir. Ayrıca bu teknik ile PAPR değerinin azaltılabileceği de gösterilmiştir [28]. F-OFDM tekniğinde, tüm sistem bant genişliği istenilen sayıda alt bant kanallara bölünür ve her alt kanal için farklı dalga şekilleri uygulanabilir [29]. Filtreler ise alt kanal dalga şekillerinin ayrıştırılmasında kullanılmaktadır. Tüm alt kanallar örtüşmez olduğundan dolayı, OOB emisyonu çok düşük değerdedir ve böylelikle spektrum verimliliği sağlanır [30]. Tipik bir F-OFDM iletişim sisteminin blok diyagramı Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. F-OFDM iletişim sistemine ait blok diyagram

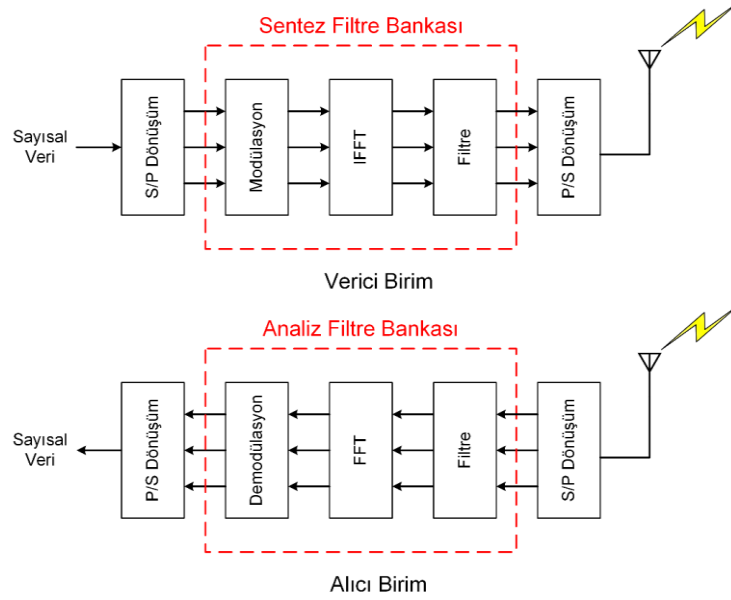
Blok diyagram incelendiğinde, F-OFDM sisteminin (OFDM sistemine ek olarak) CP bloğundan sonra ve OOB emisyonunu düşürmek için gerçekleştirilen frekans kaydırma işleminden önce (alçak geçiren) filtre içerdiği görülmektedir. F-OFDM tekniğinde iletilecek işaret farklı alt bantlara bölüldüğünden dolayı, alt bantlarda farklı uygulamaların gereksinimlerini karşılamak için değişik modülasyonlar ve uzunluklar kullanılabilir. Diğer bir ifadeyle, her alt bantın IFFT boyutu farklı olabilmektedir. Bu yüzden, her alt kanalın CP uzunluğu farklı olabilir. Alıcı birimde ise vericide gerçekleştirilen işlemlerin tersi yapılarak iletilen verinin elde edilmesi sağlanmaktadır.

2.4. FBMC

FBMC tekniğinin temel prensibi, iletim oranını M alt taşıyıcı kullanarak M bağımsız veri akışına bölmektir. Alıcı birime ISI ve ICI problemi olmadan sembol iletimi gerçekleştirilebilmek için alt taşıyıcılar arasında dikgenlik şartının sağlanması gerekmektedir. Bu teknikte dikgenliğin sağlanabilmesi için sembollerin faz içi ve faz dışı bileşenleri yarım sembol süresi kaydırılarak iletilmektedir. FBMC tekniğinde, işaretin yan loplarının bastırılması için alt taşıyıcılar filtre bankasından geçirilir. Verici birimde sentez filtre bankası, alıcı birimde ise analiz filtre bankası kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan filtreler

5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

çok fazlı filtrelerle gerçekleştirilebileceği gibi FFT/IFFT blokları ile de gerçekleştirilebilir. Elde edilen dalga şekli asenkron işaretlere karşı daha fazla sağlamlığa sahiptir. Bu nedenle eş zamanlama karmaşıklığı daha azdır ve kablosuz ağlarda hem aşağı yönlü hem de yukarı yönlü bağlantı için kullanılabilir. Aynı zamanda, bu teknikte CP kullanılmadığından dolayı daha yüksek veri hızı oranı elde edilebilmektedir. Genelleştirilmiş bir FBMC iletişim sisteminin blok diyagramı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. FBMC iletişim sisteminin blok diyagramı

Blok diyagramdan görüleceği üzere, öncelikli olarak üretilen veri dizileri sisteme giriş mesaj bilgisi olarak uygulanır ve ardından üretilen işaret seri/paralel dönüştürücü bloğuna aktarılır. Paralel verilere modülasyon işlemi uygulandıktan sonra işaret IFFT bloğuna beslenir. IFFT yaklaşımı, tasarımı ve uygulaması basit bir filtre bankası yaklaşımına dönüşebilir. IFFT bloğunun çıkışı, çok fazlı ağ FFT bloğuna uygulanır. Bu yaklaşım daha az hesaplama karmaşıklığı sağlamakla birlikte, FFT blok uzunluğunu da korur. Alıcı birime ulaşan işaretten veri dizisinin elde edilmesi için vericide gerçekleştirilen işlemlerin tersi gerçekleştirilir. İletilen FBMC işaretinin analitik ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S(n) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} X_n(l) g(t-lT) e^{j2\pi n t / T_0} e^{j\phi_n(l)} \quad (2)$$

burada $X_n(l)$ kompleks formda iletilen semboller, $g(t)$ şekillendirme dalga formunu, $\phi_n(l)$ alıcı birimde sembollerin ayrıştırılmasını kolaylaştırmak için kullanılan ek faz terimini göstermektedir.

2.5. UFMC

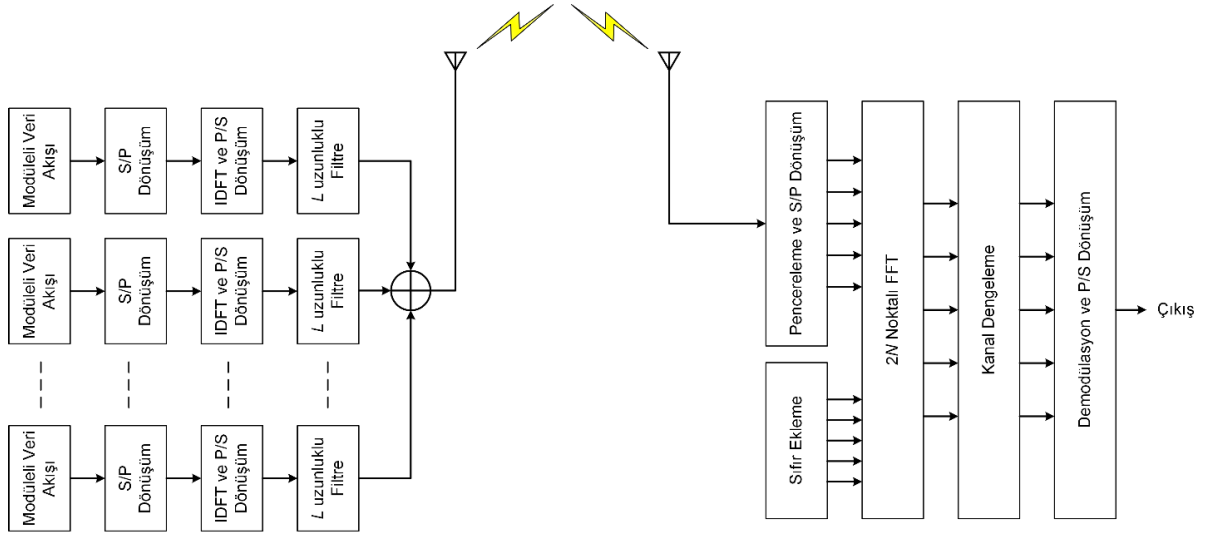
UFMC, F-OFDM ve FBMC tekniklerinin kombinasyonunun özel bir durumudur. Bu yöntem asenkron verilerin varlığında hataya karşı daha dayanıklıdır. UFMC, OFDM ve FBMC tekniklerinin sınırlamalarının üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem alt taşıyıcıları ayrı ayrı filtrelemek yerine, alt taşıyıcı frekanslarını içeren her grup birlikte filtrelendirir. Bu yaklaşım OOB emisyonunun düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Genelleştirilmiş bir UFMC iletişim sisteminin blok diyagramı Şekil 5'te görülmektedir.

Bu sistemde öncelikli olarak modüle edilmiş veri dizisi x_{ik} seri/paralel dönüştürücü bloğuna uygulanır ve elde edilen paralel işaretler L_{DFT} uzunluğundaki ters ayrık Fourier (IDFT) bloğuna beslenir. Ardından, L uzunluklu filtre bloğu ile işaretlerin filtrelenmesi gerçekleştirilir. Burada verici birimin B bant genişliklerinden oluşan alt bantların birleşiminden oluştuğunu ve CP kullanılmadığını hatırlatmak faydalıdır. İletilen işaretin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır:

Y. Kabalcı

$$y_k = \sum_{i=1}^B y_{ik} = \sum_{i=1}^B F_{ik} V_{ik} x_{ik} \quad (3)$$

burada y_{ik} i . alt kanaldaki iletilen işareti, B toplam alt bant sayısını, V_{ik} i . alt kanaldaki IDFT matrisini, F_{ik} ise i . alt kanaldaki darbe şekillendirme matrisini, x_{ik} i . alt kanaldaki modülasyonlu işareti göstermektedir.



Şekil 5. UFMC iletişim sistemine ait blok diyagram

2.6. TDL Kanal Modeli

3GPP teknik raporunda [18], 500 MHz - 100 GHz aralığında bağlantı seviyesi değerlendirmeleri için tanımlanmış kanal modellerinden birisi TDL kanal modelidir. Bu raporda görüş yollu olmayan yayılım şartları için üç farklı kanal profili (TDL-A, TDL-B ve TDL-C) ve görüş yollu yayılım şartları için ise iki farklı kanal profili (TDL-D ve TDL-E) tanımlanmaktadır. Önceki Uzun Dönem Evrim (Long Term Evolution, LTE) kanal modellerinden farklı olarak, TDL-A kanal modelinde istenilen gecikme yayılım değerinin elde edilebilmesi için gecikme yayımları lineer olarak ölçeklenebilmektedir. 3GPP teknik raporunda [18] beş farklı gecikme yayılım tanımı yapılmış olup bu tanımlar Tablo 1’de listelenmiştir.

Tablo 1. TDL kanal modelleri için tanımlanmış örnek ölçekleme parametreleri [18]

Model	Gecikme Yayımları
Çok kısa gecikme yayılımı	10 ns
Kısa gecikme yayılımı	30 ns
Normal gecikme yayılımı	100 ns
Uzun gecikme yayılımı	300 ns
Çok uzun gecikme yayılımı	1000 ns

N sayıda dal sayısına sahip çok yollu TDL modelin kanal dürtü yanıtı matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^N a_k(t) \delta(\tau - \tau_k) \quad (4)$$

burada $a_k(t)$ k . daldaki τ_k gecikme bileşenindeki toplam genliği ifade etmektedir. Her bir daldaki Doppler gecikmesi (f_D) Jake modeline bağlı olarak ifade edilebilir:

5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

$$f_D = \frac{|\bar{v}|}{\lambda_0} \quad (5)$$

burada \bar{v} hareket hızını, λ_0 ise dalga boyunu göstermektedir.

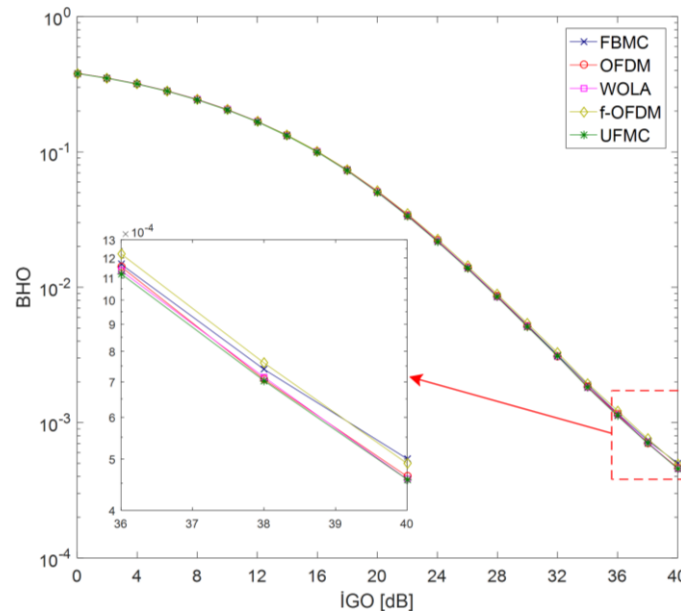
3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

5G iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinin Tablo 2’de verilen parametrelere göre gerçekleştirilen tasarımlarının performans analizleri bu bölümde kapsamlı olarak sunulmaktadır. Gerçekleştirilen performans analizlerinde BHO’ya karşılık İşaret-Gürültü Oranı (İGO) cinsinden incelemeler yapılmaktadır.

Tablo 2. Performans değerlendirmesinde kullanılan sistem parametreleri

Parametre	Değer
Taşıyıcı Frekansı	28 GHz
Alt Taşıyıcı Sayısı	24
Alt Taşıyıcı Bant Genişliği	15 kHz
Kanal Bant Genişliği	0.54 MHz
Modülasyon	64QAM
Kanal Modeli	TDL-A
Gecikme Yayılımı	10, 100, 1000 ns
Hareket Hızı	0, 50, 150 km/saat

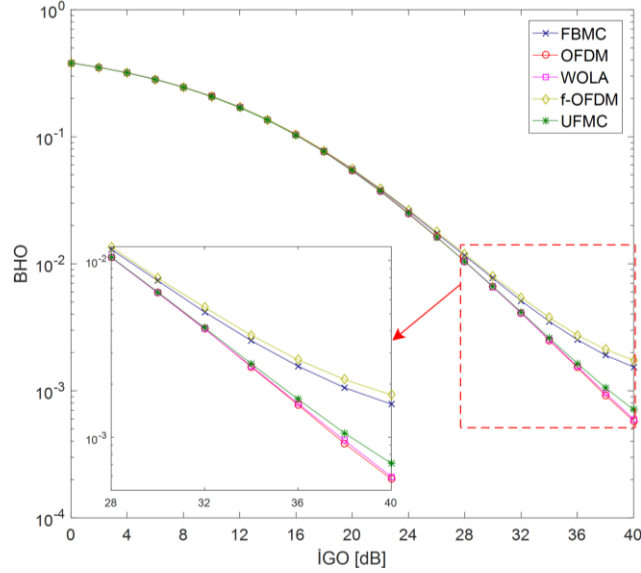
İlk analiz hareketsiz (sabit) verici alıcı birim arasında ve 10 ns gecikme yayılımına sahip kanal şartları için gerçekleştirilmiş olup, elde edilen BHO performansları Şekil 6’da sunulmuştur. Performans eğrileri incelendiğinde iletim tekniklerinin bu kanal şartlarında birbirlerine çok yakın sonuçlar sunduğu görülmektedir. 10^{-3} seviyelerinde bir BHO elde edebilmek için iletişim sistemlerinin yaklaşık olarak 36 dB İGO seviyelerine ihtiyaçlarının olduğu değerlendirilmiştir. Yüksek İGO değerleri için daha yakın bir inceleme gerçekleştirildiğinde ise, OFDM, WOLA ve UFMC iletim tekniklerini kullanan iletişim sistemlerinin diğer teknikleri kullanan sistemlere göre hafif bir oranda daha iyi başarımlar sundukları Şekil 6’dan görülmektedir.



Şekil 6. Çok kısa gecikme yayılımına sahip kanal şartlarında elde edilen performans sonuçları

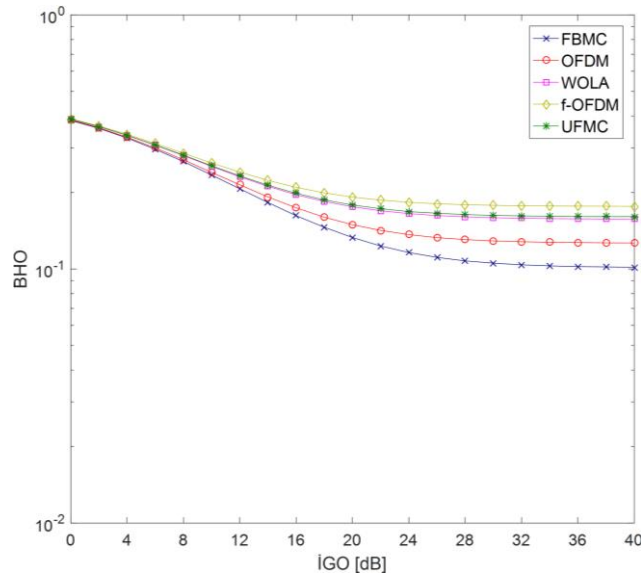
Y. Kabalcı

Aynı iletişim sistemlerinin 100 ns gecikme yayılımına sahip TDL-A kanal şartlarındaki başarımları Şekil 7’de verilmektedir. Bu test değerlendirmesinde de verici ve alıcı birimlerin sabit konumlu oldukları varsayılmıştır. Sunulan grafik değerlendirildiğinde, bu şartlar altında iletişim sistemleri arasındaki performans farkı daha net görülebilmektedir. Özellikle 22 dB İGO seviyesinden itibaren iletişim sistemleri arasındaki performans farklılığı artan İGO ile birlikte artmaktadır. Yüksek İGO değerleri göz önünde bulundurulduğunda; en iyi performansın OFDM ve WOLA iletim tekniklerini kullanan iletişim sistemleri tarafından, ardından ise UFMC iletim tekniğini kullanan iletişim sistemi tarafından sunulduğu görülmektedir.



Şekil 7. Normal gecikme yayılımına sahip kanal şartları için elde edilen sistem performansları

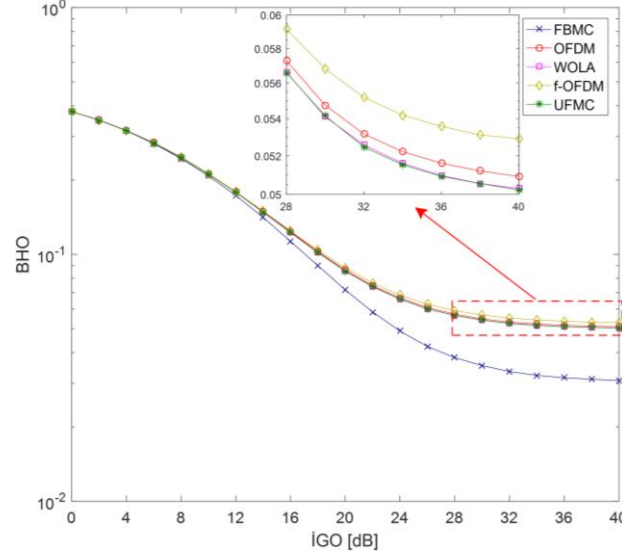
Sabit verici alıcı durumları için gerçekleştirilmiş olan son performans analizi Şekil 8’de verilmektedir. Bu analiz gerçekleştirilirken kanal gecikme yayılım değeri 1000 ns olan, çok uzun gecikme yayılım değerine ayarlanmıştır. Performans sonuçları değerlendirildiğinde artan gecikme yayılım değerinin iletişim sistemleri üzerinde önemli oranda performans düşüşüne sebep olduğu açık olarak görülmektedir. Bu şartlar altında en iyi başarımlar sırasıyla FBMC, OFDM ve WOLA iletim teknikleri ile elde edilmiştir. FBMC iletim tekniğinde kullanılan filtre bankaları yüksek gecikme yayılımı şartları altında ISI ve ICI etkilerine karşı iletişim sistemini daha kararlı hale getirerek yüksek İGO değerlerinde daha iyi performans elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, performansı araştırılan iletim sistemlerinin hata katı değeri 10^{-1} seviyesinin altına inememiştir.



Şekil 8. Çok uzun gecikme yayılımına sahip kanal şartlarında elde edilen performans sonuçları

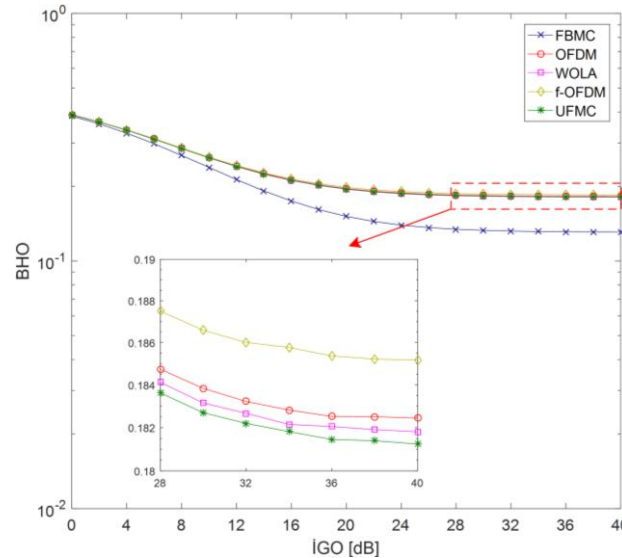
5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

Sabit verici alıcı birim durumları için gerçekleştirilen analizlerden sonra alıcı birimin hareket halinde olduğu farklı durumlar da değerlendirilmiştir. Alıcı birimin 50 km/saat hız ile hareket halinde olduğu ve kanalın normal gecikme yayılımına sahip olduğu varsayılarak gerçekleştirilen analizin sonuçları Şekil 9'da verilmektedir. Eğrilerden açık şekilde görülebileceği gibi, bu şartlar altında hareketli alıcı birim için en iyi iletim performansı FBMC sistemi ile sağlanmıştır. Diğer iletim tekniklerinin performansları birbirlerine çok yakın görünse de, bu teknikler arasında UFMC ve WOLA diğerlerine göre kısmi olarak daha iyi performans sağlamaktadır. Ancak FBMC iletim tekniğine sahip iletişim sisteminin yüksek İGO değerlerinde önemli oranda performans kazancı sunduğu dikkat çekmektedir. Bu performans değeri her ne kadar yüksek olarak değerlendirilmiş olsa da, genel olarak sistemlerin hata oranı düzeyinin 10^{-1} seviyesinde olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 9. Normal gecikme yayımlı kanal ve 50 km/saat hızı sahip alıcı birim için elde edilen sistem performansları

Aynı kanal gecikme yayılım şartları altında, alıcı birimin hareket hızı 150 km/saat değerine çıkarılarak elde edilen eğriler Şekil 10'da verilmektedir. Alıcı birimin hızındaki artışın beklediği gibi Doppler gecikmesinde önemli bir artışa sebep olduğu ve performansların oldukça düştüğü görülmektedir. Ancak bu durumda da FBMC iletim tekniğinin diğer iletim tekniklerine göre daha iyi performans sunduğu ve kararlılığını koruduğu dikkat çekmektedir. FBMC iletim tekniğini kullanan iletişim sistemi haricindeki diğer sistemler arasındaki durum ise önceki performans sonuçlarına benzerdir. UFMC, WOLA ve OFDM sistemler yine yakın sonuçlar verirken, tüm senaryolarda en kötü performans f-OFDM ile elde edilmiştir.



Şekil 10. Normal gecikme yayımlı kanal ve 150 km/saat hızı sahip alıcı birim için elde edilen sistem performansları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 5G iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinden olan OFDM, f-OFDM, WOLA, FBMC ve UFMC sistemlerin performansları araştırılmıştır. Performans analizleri gerçekleştirilirken ETSI tarafından 5G araştırmaları için önerilmiş bir kanal modeli olan TDL-A kanal modeli kullanılmıştır. Bahsedilen iletim tekniklerinin TDL-A kanal modeli üzerindeki performans analizleri ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin kapsamlı ve adil olmasını sağlayabilmek için farklı senaryolar göz önünde bulundurulmuş olup, bu senaryolarda alıcı ve verici birimlerin hem sabit hem de hareketli olduğu durumlar değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yine ETSI tarafından tanımlanan farklı kanal gecikme yayılım değerleri dikkate alınmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları kanal şartlarının aşırı yıkıcı olduğu durumlarda FBMC iletim tekniğinin diğer aday iletim tekniklerinden daha iyi performans sunduğunu ve kararlı olduğunu göstermiştir. FBMC haricindeki sistemler değerlendirildiğinde ise, OFDM, WOLA ve UFMC tekniklerini kullanan iletişim sistemlerinin performanslarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu üç teknik kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, OFDM sistemlerdeki OOB emisyon değerinin yüksek olması bu tekniği diğer teknikler arasında geri plana itmektedir. WOLA tekniğinin OOB emisyonunu düşürerek OFDM kadar iyi performans sunması, sistem karmaşıklığının FBMC ve UFMC sistemlerinden daha düşük olması bu tekniğin enerji verimliliğinin önemli olmadığı aşağı yönlü bağlantılar için iyi bir aday olabileceğini göstermiştir. FBMC ve UFMC sistemler kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, OOB emisyonunu düşürerek iyi performans sunma avantajlarına karşın dezavantajları sistem karmaşıklığının artması olarak değerlendirilmiştir. Bu noktada önemli bir bulgu ise performansı değerlendirilen iletişim sistemlerinde daha düşük BHO elde edebilmek için mutlaka kanal kodlama tekniklerinin kullanılması gerektiğidir. Bu durumun gelecekteki çalışmalar için iyi bir araştırma konusu olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Y. Kabalci, "5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies", içinde *Smart Grids and Their Communication Systems*, E. Kabalci ve Y. Kabalci, Ed. Singapore: Springer Singapore, 2019, ss. 329-359.
- [2] J. G. Andrews vd., "What Will 5G Be?", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 32, sy 6, ss. 1065-1082, Haz. 2014.
- [3] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, ve K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", içinde 2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring), 2013, ss. 1-5.
- [4] A. Li, Y. Lan, X. Chen, ve H. Jiang, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G", *China Communications*, c. 12, sy Supplement, ss. 28-37, 2015.
- [5] Z. Ding, P. Fan, ve H. V. Poor, "Random Beamforming in Millimeter-Wave NOMA Networks", *IEEE Access*, c. 5, ss. 7667-7681, 2017.
- [6] B. Wang, L. Dai, X. Gao, ve L. Hanzo, "Beamspace MIMO-NOMA for millimeter-wave communications using lens antenna arrays", içinde 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2017, ss. 1-5.
- [7] X. Liu, P. Wang, Z. Lan, ve B. Shao, "Biological characteristic online identification technique over 5G network", *IEEE Wireless Communications*, c. 22, sy 6, ss. 84-90, 2015.
- [8] D. Jiang ve G. Liu, "An overview of 5G requirements", içinde *5G Mobile Communications*, Springer, 2017, ss. 3-26.
- [9] A. Osseiran vd., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project", *IEEE Communications Magazine*, c. 52, sy 5, ss. 26-35, May. 2014.
- [10] P. Cerwall, A. Lundvall, P. Jonsson, ve others, "Ericsson mobility report: On the pulse of the networked society", içinde *Mobile World Congress Edition*, 2015.
- [11] T. O. Olwal, K. Djouani, ve A. M. Kurien, "A Survey of Resource Management Toward 5G Radio Access Networks", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, c. 18, sy 3, ss. 1656-1686, thirdquarter 2016.
- [12] A. de la Fuente, R. P. Leal, ve A. G. Armada, "New technologies and trends for next generation mobile broadcasting services", *IEEE Communications Magazine*, c. 54, sy 11, ss. 217-223, 2016.
- [13] A. Al Amin, D. Basak, T. Khadem, M. D. Hossen, ve M. S. Islam, "Analysis of modulation and coding scheme for 5th generation wireless communication system", içinde 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2016, ss. 1545-1549.
- [14] M. Kim ve D. Y. Kwak, "Generalized OFDM for 5th Generation Mobile Communications", içinde 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2017, ss. 1-5.
- [15] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. ten Brink, ve J.-F. Frigon, "Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE", içinde 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013, ss. 223-228.

5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

- [16] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, M. M. Molu, ve R. Tafazolli, “Filtered OFDM systems, algorithms, and performance analysis for 5G and beyond”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 66, sy 3, ss. 1205–1218, 2017.
- [17] J. Zeng vd., “Investigation on evolving single-carrier NOMA into multi-carrier NOMA in 5G”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 48268–48288, 2018.
- [18] 3GPP Radio Access Network Working Group ve others, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15)”, 3GPP TR 38.901, 3GPP TR 38.901 version 15.0.0 Release 15, 2018.
- [19] R. W. Chang, “Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission”, *Bell System Technical Journal*, c. 45, sy 10, ss. 1775–1796, 1966.
- [20] R. Chang ve R. Gibby, “A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme”, *IEEE transactions on Communication Technology*, c. 16, sy 4, ss. 529–540, 1968.
- [21] R. W. Chang, “Orthogonal frequency multiplex data transmission system”, U.S. Patent No. 3,488,445., Oca-1970.
- [22] S. Weinstein ve P. Ebert, “Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform”, *IEEE transactions on Communication Technology*, c. 19, sy 5, ss. 628–634, 1971.
- [23] A. Peled ve A. Ruiz, “Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms”, içinde ICASSP’80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980, c. 5, ss. 964–967.
- [24] C. Balint ve G. Budura, “OFDM-Based Multi-Carrier Waveforms Performances in 5G”, içinde 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), 2018, ss. 1–4.
- [25] X. Zhang, M. Jia, L. Chen, J. Ma, ve J. Qiu, “Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks”, içinde 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015, ss. 1–6.
- [26] J. Abdoli, M. Jia, ve J. Ma, “Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems”, içinde 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2015, ss. 66–70.
- [27] A. D. Dominguez-Garcia, C. N. Hadjicostis, ve N. H. Vaidya, “Resilient networked control of distributed energy resources”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 30, sy 6, ss. 1137–1148, 2012.
- [28] M. B. Mabrouk, M. Chafii, Y. Louet, ve F. Bader, “A precoding-based PAPR reduction technique for UF-OFDM and filtered-OFDM modulations in 5G systems”, içinde European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference, 2017, ss. 1–6.
- [29] W. Yang vd., “Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective”, *IEEE Wireless Communications*, c. 24, sy 3, ss. 138-145, 2017.
- [30] D. Wu vd., “A field trial of f-OFDM toward 5G”, içinde 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016, ss. 1-6.





EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

Alper Sefa ÇAĞIŞLAR¹ , Hasan TİRYAKİ^{2,*} , Nevra BAYHAN³ 

^{1,2,3}Istanbul University - Cerrahpaşa, Electrical and Electronics Engineering Department, 34320, Istanbul, Turkey

ABSTRACT

While electric vehicles happen to be today's transportation vehicles, big R&D investments are being made by automobile manufacturers. Outer and inner rotor motors are used for electric vehicles. Considering the fact that the transmission systems make the structure more complex, outer rotor motors come into prominence in applications requiring small power. This study includes the design of outer rotor brushless direct current motor for electric vehicle prototypes. In addition, the effects of the number of turns of the armature winding selected, especially on efficiency, input power and torque parameters, were analyzed in detail.

Keywords: Brushless direct current motor, Design, Turns, Efficiency, Power, Torque

ARMATÜR SARGISININ SARIM SAYISININ BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ PROTOTİPİ İÇİN TASARLANAN DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNA ETKİLERİ

ÖZET

Elektrikli araçlar günümüzün ulaşım araçları olarak yerini alırken otomobil üreticileri tarafından bu konuda büyük Ar-Ge yatırımları yapılmaktadır. Elektrikli araçlar için dışsal ve içsel rotorlu motorlar kullanılmaktadır. Aktarım organlarının yapıyı daha karmaşıklaştırdığı göz önünde bulundurulduğunda dışsal rotorlu motorlar küçük güç gerektiren uygulamalarda verimlilikleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu çalışma prototip elektrikli araçlar için dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru tasarımı içermektedir. Ayrıca yapılan analizler ile seçilen armatür sargısının sarım sayısının özellikle verimlilik, giriş gücü ve tork parametrelerine olan etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fırçasız doğru akım motoru, Tasarım, Sarım sayısı, Verimlilik, Güç, Moment

1. INTRODUCTION

The transportation sector continues to evolve in different ways with today's technology. High-efficiency electric vehicles, which are increasing in use and which do not harm the environment, are being preferred by the technology developing day by day. Electric cars, motorcycles, skateboards and many other technological vehicles are attracting worldwide attention and are moving rapidly towards becoming the indispensable technology of the future. The motor to be selected under all these conditions is really important.

Direct current motors are widely used in industrial applications. Limited use of brushed models in some areas has enabled Brushless DC motors to stand out. Need for continuous maintenance of brushed-type motors provides disadvantage in variable conditions and in the areas of continuous use. For this reason, brushless DC motors have a wide range of applications. Brushless DC motors come to the forefront with performance values such as high efficiency and high torque.

Direct current motors are motors in which the magnetic field is produced by means of magnets. The magnet can be an electromagnet or a permanent magnet. When a permanent magnet is used to create a magnetic field in a direct current motor, the motor is called a permanent magnet direct current motor or a permanent magnet brushless direct current (BLDC) motor [1].

Brushless direct current motor is in fact configured as a rotating magnet through a series of coil-carrying conductors. Current in the conductors and the magnets that are arranged in order for the torque to be in one direction need to be positively positioned

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasan.tiryaki@istanbul.edu.tr

Geliş / Received: 14.02.2020 Kabul / Accepted: 16.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.689396

as the rotation takes place. Direct current is carried out by the pole switching commutator and brushes in commutator motor. Since the commutator is fixed to the rotor, switching events are automatically synchronized with the alternating polarity of the magnetic field through which the conductors pass. Polarity of the brushless DC motor is carried out by the power transistors which must be switched in synchronous with the rotor position. The commutation process is similar in two machines, and the resulting performance equations and speed / torque concepts are almost identical.

Brushless DC motors with outer rotor type are used for applications requiring high torque and inertia. This type of motors are used in many areas such as vehicle wiper motor, automatic windows, robotic, generator, electric vehicles, unmanned aerial vehicles, white goods sector [2]. Although there are various disadvantages such as motor protection and resistance to shocks in outer rotor applications, it is preferable that applications do not need any transfer components because they provide direct drive of the moment. In addition, the motor drives used for brushless DC motors have a more complex structure than other motors. Due to the high torque values of outer rotor brushless direct current motors, they are used in electric vehicles in particular [3].

Rahim et al. have designed a brushless direct current motor design and prototype manufacturing for electric vehicles with a weight of less than 150 kg, operating in axial structure at 300V high voltage and small in volume [4].

Shrivastava and Brahmin have designed a outer rotor brushless direct current motor in two different three-phase slot / pole combinations for use in electric vehicle applications, and examined the design results. The motor design they have made is a motor that operates at 300V high voltage and is large in volume [5].

Durmus and Solmaz, similar to the activities carried out in this study, have performed a brushless DC motor design and finite element analysis with typical methods. In their study, an motor design, which operates at 60V voltage, 1100 rpm, but cannot provide sufficient power and torque values for passenger cars, has been obtained. Torque charts, flux lines, speed and efficiency parameters were examined in finite element analysis of the resulting motor design and they suggested the use of the motor in hybrid cars that can operate in parallel structure [6].

In the electric vehicle prototypes, direct drive brushless direct current motors are preferred due to their higher efficiency. However, in order to keep efficiency in the maximum range, the motors must be designed and manufactured in accordance with the vehicle and its features. It is very important to determine the correct number of turns of armature winding, as well as many parameters during the design phase.

In this study, an outer rotor brushless DC motor is designed for an electric vehicle prototype. While designing, the effects of the number of turns of armature winding used in the desired speed ranges on the efficiency, power and torque parameters to be considered in the design of the brushless DC motor are examined comparatively and the optimal number of turns of armature winding has been determined for design.

2. MATERIALS AND METHODS

Since the effects of the number of turns of armature winding to be used in this study will be examined in the motor design, a detailed study has been done in this section. The other parameters are described below.

2.1. Determination of Power and Torque Parameters for Motor Design

The motor to be designed will be the BLDC motor with outer rotor. In the case of outer rotor motor applications, a design can be realized without the need of any transferring systems and ignoring the losses of this transfer organ. The greatest advantage of these motors is the direct transfer of torque [7]. Figure 1 shows the forces affecting the vehicle.

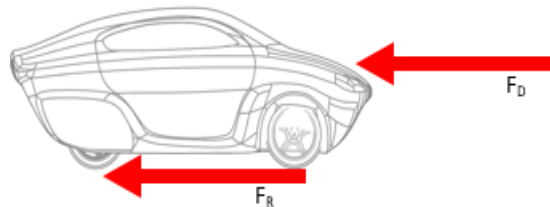


Figure 1. The forces affecting the vehicle.

Design requirements for the outer BLDC can be defined using following equations:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \quad (1)$$

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

Drag Force (DF) formed by air on an object is shown in (1). F_D drag force, ρ air density, v object velocity, A is the object's cross-sectional surface area and C_D is the object's aerodynamic friction coefficient.

Another force to be calculated for the vehicle is the Rolling Resistance Force (RRF).

$$F_R = f_s mg \tag{2}$$

where F_R is defined as friction force. f_s is the coefficient of friction of the tire used and g is the force of gravity.

The forces of F_D and F_R , which constitute the fundamental forces of the vehicle, are involved in the determination of torque and power requirements as motor parameters. Considering Figure 1, the necessary moment calculations related to these forces are calculated by considering the force and force arm rule.

$$\tau_D = F_D r_D \tag{3}$$

The amount of torque required to resist wind is given in (3). τ_D represents the amount of torque required and r_D represents the distance from the center of the surface density center of the vehicle to the center of the wheel.

$$\tau_R = F_R r_R \tag{4}$$

The required torque calculation against rolling resistance is given in (4). τ_R represents the amount of torque required and the distance between the r_R ground and the center of the wheel.

$$\tau_{motor} = \tau_D + \tau_R \tag{5}$$

When (3) and (4) are combined, the amount of torque that the motor must produce at a certain speed, as in (5), arises.

$$w_{rpm} = \frac{1000v}{60.2\pi R} \tag{6}$$

(6) represents the speed of the w_{rpm} wheel in rpm. v is the radius of the wheel in km / h as speed and R meter.

$$w_{motor} = \frac{2\pi w_{rpm}}{60} \tag{7}$$

In (7), w_{motor} as an angular velocity its in radial/sec.

$$P_{motor} = \tau_{motor} w_{motor} \tag{8}$$

In the light of the necessary calculations, the equation of power in (8), which we can describe in general, emerges. P_{motor} refers to the rated power of the motor [7].

The parameters of the vehicle to be applied should be determined within the framework of high engineering and analysis. The vehicle planned to be implemented is the AZAK prototype electric racing vehicle produced by the MilAT 1453 R&D Society and the most efficient vehicle record ever made in the Alternative Energy Vehicle Races organized by the TUBITAK.

The information about the AZAK vehicle, which has been produced by the Department of Electrical and Electronics Engineering, Istanbul University - Cerrahpasa, is given in Table 1.

Table 1. Parameters of the vehicle AZAK

VEHICLE INFORMATION	VALUES
Reference velocity	$v = 56 \text{ km/h} = 15.51 \text{ m/sn}$
Weight of the vehicle	$m = 215 \text{ kg}$
Radius of the tire used	$R = 0.279 \text{ metre}$
Friction Coef. Of the tire used	$C = 0.009$
Front surface of the vehicle subject to friction	$A = 1.18 \text{ m}^2$
Friction coefficient of the vehicle (The result of aerodynamic analysis)	$C_D = 0.07$
Air Density	$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
The distance from the center of the vertical section of the vehicle to the wheel hub	$r_D = 0.32 \text{ metre}$

A. S. Çağışlar, H. Tiryaki, N. Bayhan

Depending on motor usage and load, varying power and torque values must be determined [3]. Calculations according to the weight of the vehicle to be used and the speed required to determine the nominal values are described above.

The nominal speed of the motor to be used for the electric vehicle varies depending on the wheel diameter and the rated speed. 56 km/hour value is calculated for the vehicle planned to be done and the number of rotations were determined. The calculations were made assuming that the forces to be defeated were DF and RRF.

As shown in Table 2, the torque required to move the BLDC motor at 56 km/h was 9.2Nm and the rated power was 512.9W.

The torque required to reach a speed of 56 km / h in 30 seconds is set at 28.93 Nm and the maximum power required is approximately 1.5 kW [8].

Table 2. Calculated design values

Calculated Values	Results
Drag Force	$F_D = 12.17 N$
Rolling Resistance Force	$F_R = 18.98 N$
Acceleration Force	$F_m = 94 N$
Total Needed Torque	$\tau_{motor} = 9.2 Nm$
Revolution of Tires	$w_{rpm} = 532.42 d/d$
Angular Speed	$w_{motor} = 55.75 rad/sn$
Nominal Power	$P_{motor} = 512.9 W$

2.2. Determination of Battery Voltage

One of the features that should be determined during the design phase is the determination of the slot-pole combination of the motor. This parameter fundamentally affects the stator and rotor design of the motor.

Increasing the number of poles means increasing the number of magnets, which increases the torque generated. When the studies corresponding to the number of slots corresponding to the number of poles are examined, the winding factor should be considered [9].

The winding factor is calculated using electromotive force phasors. For this purpose, the number of poles and slots of the motor with winding factor must be determined [10]. Battery features are given in Table 3.

Table 3. Battery features

Features	Values
Operating voltage	48 V
Parallel Number	12
Serial Number	12
Total Power	1632 Watt

2.3. Determination of Slot-Pole Combination

One of the features that should be determined during the design phase is the determination of the slot-pole combination of the motor. This parameter fundamentally affects the stator and rotor design of the motor.

When the studies corresponding to the number of slots corresponding to the number of poles are examined, the winding factor should be considered [9].

The image of the relative angular deviation of the coils of the motor is shown in Figure 2.

The expression of the angle is as in (9).

$$\theta_k = (k - 1) \frac{N_m}{N_s} 180^\circ E \tag{9}$$

θ_k , refers to the relative angular deviation of coil k . N_m is shown as the number of poles and N_s is the number of slots.

$$K_{wn} = \frac{1}{N_{cph}} \sum_{k=1}^{N_{cph}} e^{-jn\theta_k} \tag{10}$$

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

(10) is the equation of the winding factor. Here the K_{wn} represents winding factor, N_{cph} is the number of slots per phase. n is the harmonic index, and θ is the relative angular deviation of the coil k [1].

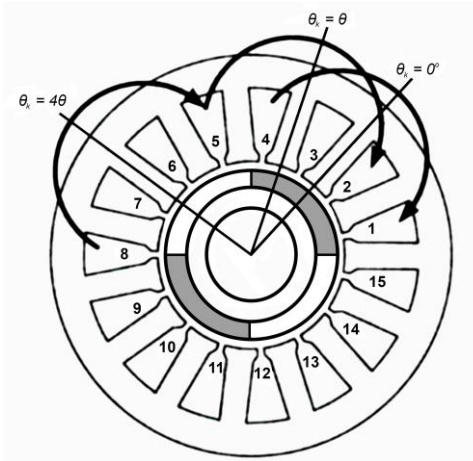


Figure 2. Motor with four poles and fifteen slots [1].

		Pole Number																			
		4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
Slot Number	6	0.866	0.866	0.866	0.500	0.500	0.866	0.866	0.500	0.866	0.500	0.500	0.866	0.866	0.500	0.500	0.866	0.866	0.500	0.500	0.866
	9	0.617	0.866	0.866	0.866	0.866	0.617	0.328	0.328	0.617	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.617	0.328	0.328	0.617	0.866	0.866
	12	1	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	15	0.621	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.621	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	18	1	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	21	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	24	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	27	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	30	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	33	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	36	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	39	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866
	42	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866

	$k_{w1} = 0.945$
	$k_{w1} = 0.951$
	Not Allowed
	$k_{w1} = 0.902$
	$k_{w1} = 0.933$

Figure 3. Winding factor values corresponding to the slot-pole combination [1].

The winding factor responses corresponding to the slot-pole combinations are shown in Figure 3. k_{w1} refers to the first harmonic winding factor. The winding factor refers to the ability of the electrical power applied to the motor to be converted to torque [11].

The values shown in Figure 4 affects the determination of the output power, operating temperature, slot fill factor and air gap constant determined at the beginning of the design [12].

As described below, a slot-pole combination should be chosen to keep the winding factor high [13]. In terms of cost, it is aimed to provide the need of application with high power density by making a selection that keeps the number of permanent magnets higher, since there is no obstacle in the prototype based studies.

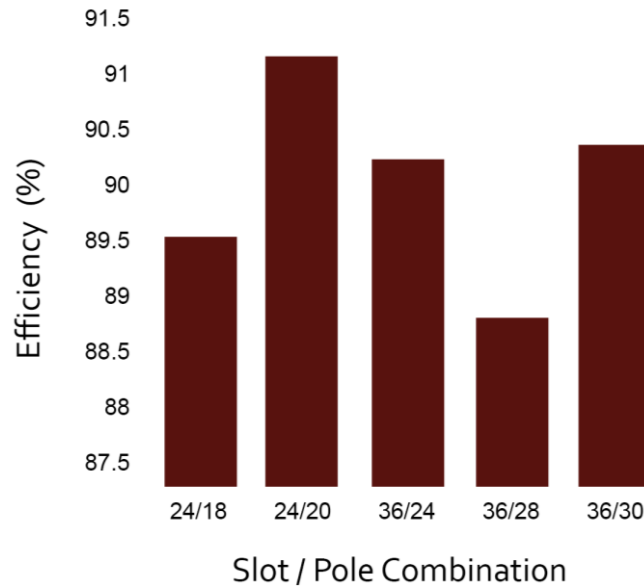


Figure 4. The effect of slot-pole combination on maximum efficiency [14].

The slot-pole combination was determined as 36/32 the most suitable for the prototype determined. The slot-pole combination to be selected can vary and the selected value affects the design in different ways.

2.4. Winding Layer

Winding layer refers to the coil surface per slot. It can be used as two types. It is called single and double layer winding model. If the winding is made so that two different coil sides per slot are made, it is called double layer winding, if there is one coil side per slot, it is called single layer winding [14].

2.4.1. Single layer winding

All conductors in this winding type in slot are connected in series with coils in the other slot to form a single-layer winding. The number of coils is half a half compared to the double layer type. There is no need for isolation between layers. Therefore, slot fill factor may be higher. It is widely used in small capacity machines. An example of a 3-phase stator with 36 slots of a single-layer winding is shown in Figure 5 [14].

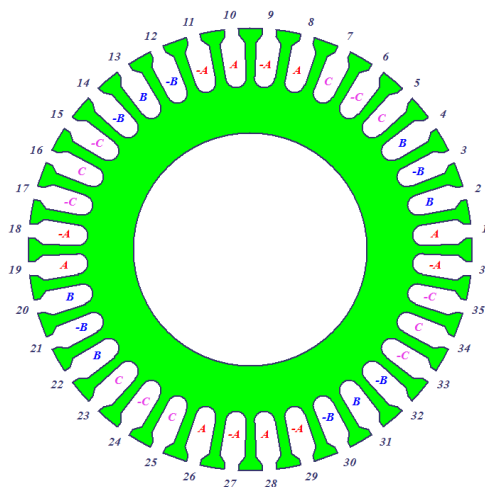


Figure 5. Single layer winding.

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

2.4.2. Double layer winding

In this winding-type, in slot there are two layers called lower and upper. One side of each coil is embedded in a slot on the lower side and the other on the upper side in another slot. The number of coils is doubled according to the single layer winding type. Since the insulation material is placed between the layers, the slot fill factor is lower. The electrical stress between phases is higher. It is used in high power applications. An example of a 3-phase stator with 36 slots of double-layer winding is given in Figure 6, [14].

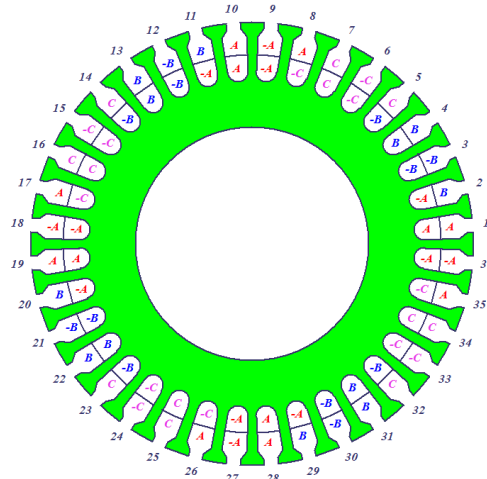


Figure 6. Double layer winding.

2.5. Coil Connection Type

The coil connection is made in two different ways. These types of connections are called Whole Coiled and Half Coiled [15].

2.5.1. Whole coiled type

The motor windings represent the type of connection to occur as the connection of a plurality of coils per phase corresponding to the poles. This type of winding is called the Whole Coiled Type and shown in Figure 7 [15].

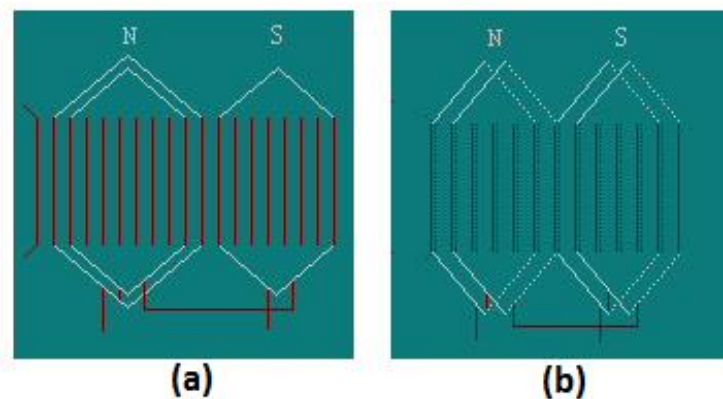


Figure 7. Types of whole coiled according to layers
(a) Single layered, (b) Double layered.

2.5.2. Half coiled type

When the motor windings are connected, they represent the type of connection that will occur in the form of corresponding to only one coil per pole pair per phase. This type of winding is called Half Coiled Type and shown in Figure 8 [15].

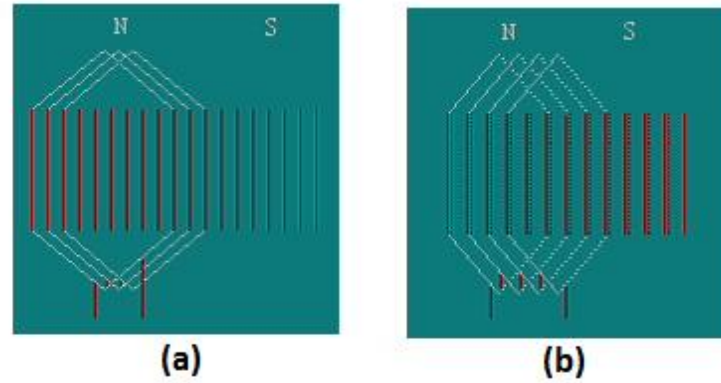


Figure 8. Types of half coiled according to layers
(a) Single layered, (b) Double layered.

2.6. Coil Range

The distance between the two sides of a coil of the motor winding is expressed as the coil spacing. The coil is called Full Range Coil (FRC) when the angular distance between the two sides of a coil is equal to the angular distance between adjacent field poles. The winding formed using FRC is called Full Range Winding.

If the number of coil spacing is less than the ratio of the total number of slots to the number of poles, the shorter coil spacing is called the longer coil spacing. The long coil range is used in variable speed applications. Furthermore, increasing the coil spacing will be more effective in terms of efficiency as it will produce eddy current in the larger area [15]. Figure 9 shows the motor windings with coil spacings 1, 2 and 3, respectively.

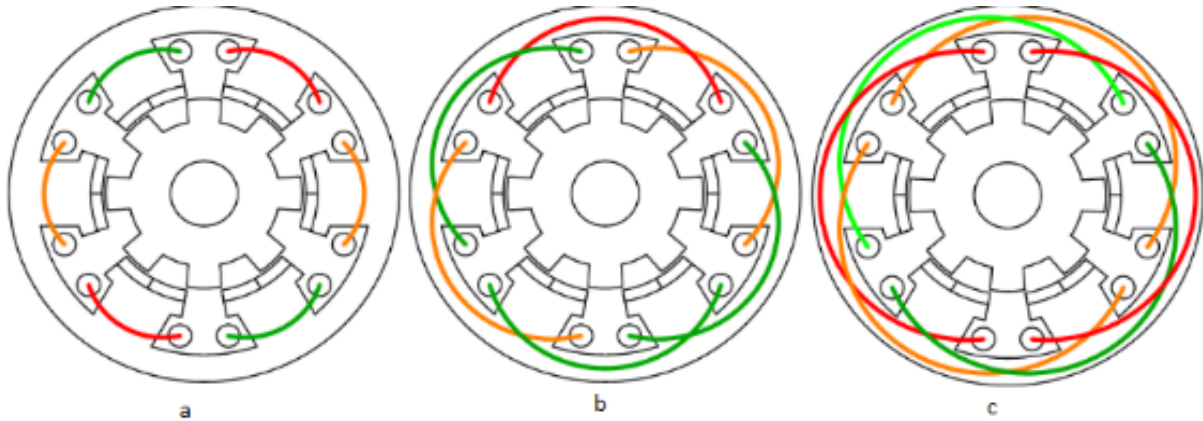


Figure 9. Winding ranges of motors (a) 1 spaced, (b) 2 spaced, (c) 3 spaced.

In the motor designs created using FRC, it has been seen in the literature studies that it has increased the inverse electromotive force and it has been seen that the motor efficiency is affected negatively by causing the vibration caused by the motor called cogging [16, 17].

2.7. Determination of Motor Dimensions and Structural Parameters

In terms of motor design, the location of the motor is the pioneer in determining many parameters such as stator and rotor dimensions of the motor, determination of slot-pole combination and magnet dimensions.

The dimensions to be chosen here are determined according to the space behind the wheel in AZAK vehicle. These dimensions of the motor are composed of stator and rotor.

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

2.7.1. Stator parameters

The dimensions of the stator of the motor and the properties of the materials in the stator part are given in Table 4.

Table 4. Stator features [1]

Features	Values/Types
Outer Radius	240 mm
Inner Radius	180 mm
Width	30 mm
Sheet Type	Steel_1010
Stacking Factor	0.95
Tilt Width	0

The inclination width represents the slope of the stator slots. With this feature, different designs are provided. At the design stage, this value will be 0 and there will be no slope.

Figure 10 shows the laminated ferromagnetic material. The stacking factor range, which is also found in the stator parameters, is typically chosen in the range of 0.8 to 0.99 [1].

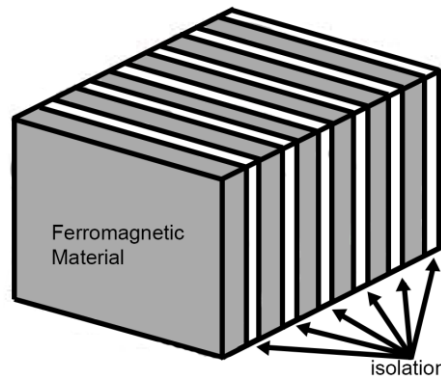


Figure 10. Laminated ferromagnetic material.

The parameters determined when we consider the motor's winding type are shown in Table 5.

Table 5. Winding parameters

Features	Values/Types
Winding Layer	2
Connection Type	Half Coiled
Parallel Winding Nr.	1
Coil Range	1
Slot Occupancy Ratio	0.6

The value referred to as coil spacing indicates that the next conductor wire of a coil will come out of the slot. The slot fill factor gives the ratio of the volume of conductive and insulating materials in a slot to the volume of the entire slot.

2.7.2. Rotor parameters

The dimensions of the rotor of the motor that is designed as an outer rotor and the information contained in the rotor part are given in Table 6.

The metal material used to reduce the effect of eddy currents is laminated as thin as possible and covered with insulating material. The flow permeability of the material is not lost here, but the eddy currents that will occur are reduced. The stacking factor refers to the loss of lamination resulting from the material when calculating the flux of the material. It is available from

the manufacturer's catalogs. This factor in stator sheet metal produced by lamination method is considered to be 1 for the rotor planned to be made from one piece [18].

Table 6. Rotor features [1]

Features	Values/Types
Outer Radius	260 mm
Inner Radius	244 mm
Width	30 mm
Sheet Type	Steel_1010
Stacking Factor	1
Pole Frequency	0.96
Magnet Type	N45-M
Magnet Thickness	2.8 mm

Pole frequency often encountered in polar design is the value indicating how often the magnets to be placed on the rotor are placed in the rotor frame.

3. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

Finite element method is an emerging technique to solve the problems expressed by partial differential equations. This method which takes place in the field of engineering in the solution of these problems day by day is biomechanical, heat transfer, stress, electromagnetic, aerodynamic and so on are used in many areas.

The analysis of the parameters with the parameters will be carried out by ANSYS Maxwell Electromagnetics Suite 16.0.0 [19]. The results of this method will be examined.

In the analyses to be performed, the speed will be targeted and the design analysis for the determined speed value will be examined. The most effective factor on the basis of design is the number of turns properties will be examined and the differences in motor design against these features will be examined. In order to perform objective evaluation, all other parameters except this important parameters will be kept constant as shown above [20].

3.1. Effects of Number of Turns of Armature Winding

In this section, the results will be examined by changing the number of turns of armature winding around the specified number. In order to make an objective evaluation, the same values were used for all parameters except number of turns of armature winding in each simulation and especially the working voltage was kept at 48 V and the wire diameter was kept constant at 1.29 mm. With corresponding turns of 10, 11, 12, 13, 14 effects will be determined.

3.1.1. Effect of number of turns of armature winding number to efficiency

When Figure 11 is examined, it is seen that the maximum speed value decreases with increasing number of turns of armature winding. From here it can be deduced that it is inversely proportional to the number of turns of armature winding. When the number of turns of armature winding is 12, the reference speed value is 532.42 rpm as indicated in Table 2. Table 7 shows the efficiency values corresponding to the number of turns of armature winding.

Table 7. Efficiency values corresponding to the number of turns of armature winding

Number of Turns of Armature Winding	10	11	12	13	14
Efficiency Value (%)	82	85	84	2	-

When the efficiency value corresponding to the 13 turns design is examined in Table 7, it is observed that it is 0.02. This value cannot be considered as a suitable value for design. When the efficiency-speed graph of the 14 turns design is examined in Figure 11, it is observed that the reference speed value is outside this graph.

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

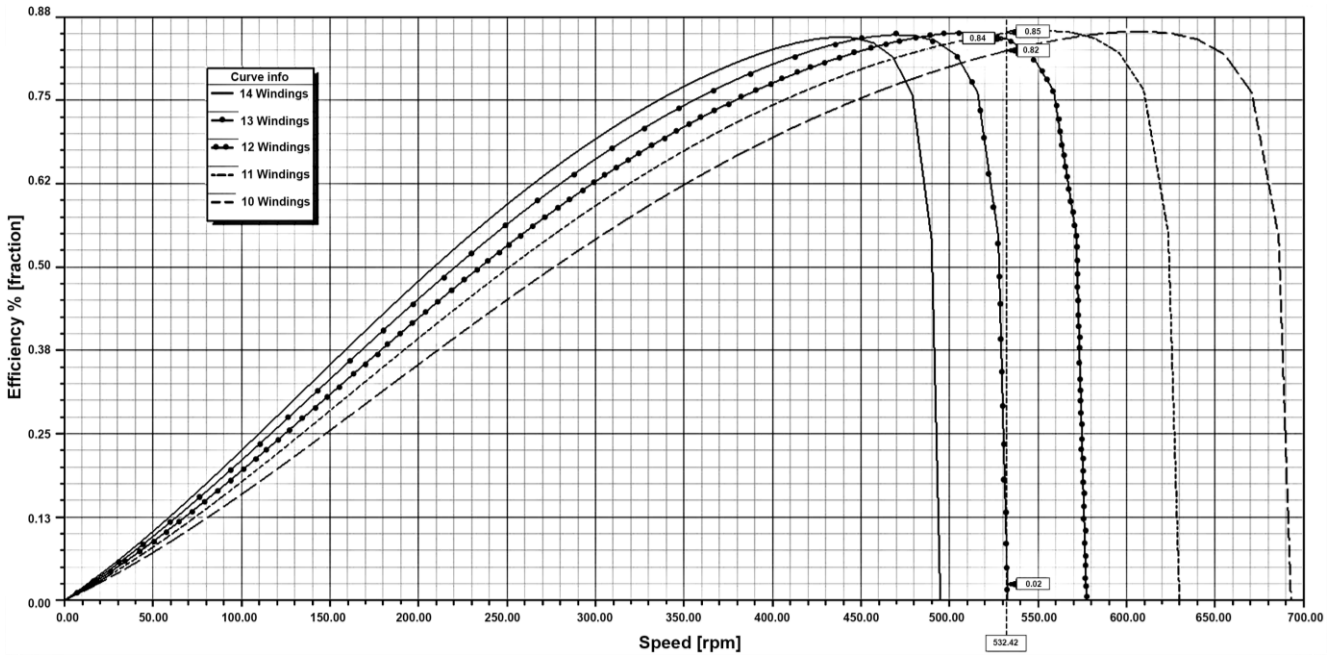


Figure 11. Effect of number of windings on efficiency-speed graph.

3.1.2. Effect of number of turns of armature winding to power

As shown in Figure 12, when the number of turns of armature winding is increased, it is observed that the power curve is reduced. According to the results obtained in the 12 turns design, the reference speed value is 532.42 rpm as indicated in Table 2 and the corresponding value for the specified speed value was 590 W. It is seen that it is met with a value close to the calculated design value of power indicated in Table 2.

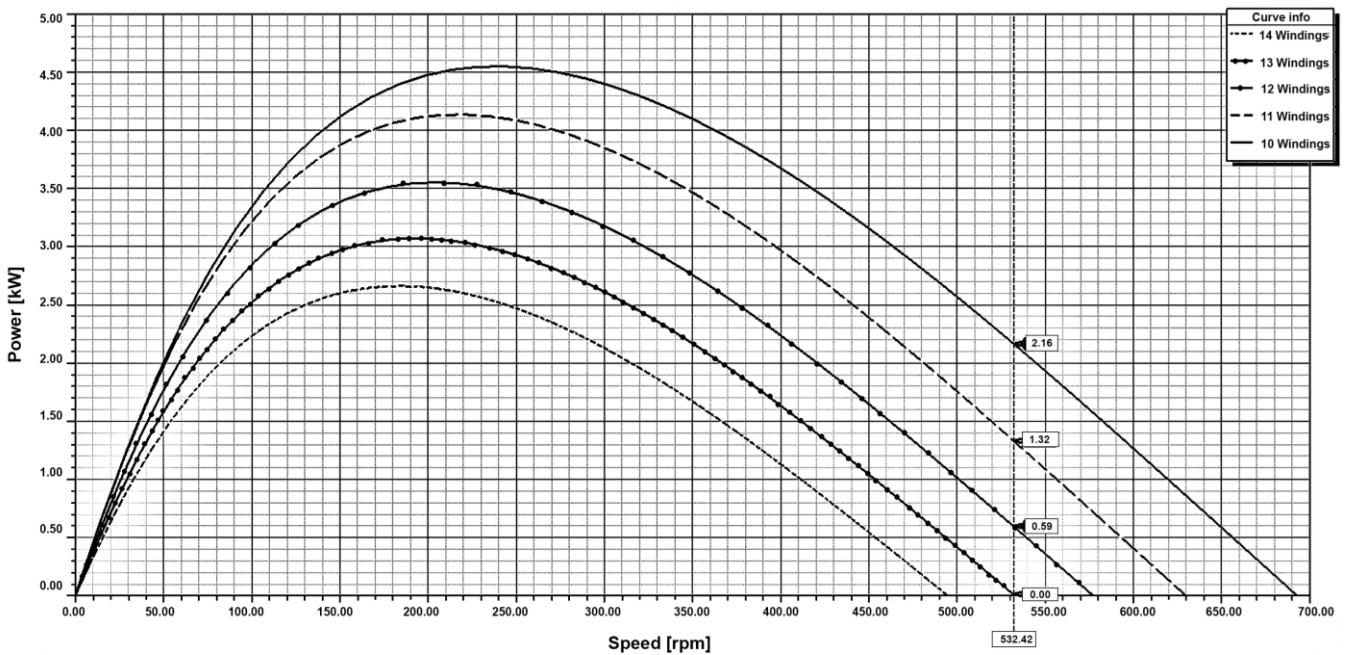


Figure 12. Effect of number of turns of armature winding on power-speed graph.

A. S. Çağışlar, H. Tiryaki, N. Bayhan

Table 8 shows the power values corresponding to the number of turns for the reference speed value of 532.42 rpm.

Table 8. Power values corresponding to the number of turns of armature winding

Number of Turns of Armature Winding	10	11	12	13	14
Power (kW)	2.16	1.32	0.59	0	-

As shown in Table 8, with these values 13 and 14 turns designs were not suitable for prototype. In addition, when the power-speed graph of 14 turns design is examined in Figure 12, it is observed that the reference speed value is outside this graph.

3.1.3. Effect of number of turns of armature winding to torque

As shown in Figure 13, it is observed that the number of turns of armature winding decreases when the same speed value is taken into consideration and the torque value decreases. In Table 2, the specified torque value for 532.42 rpm is shown as 9.2 Nm. Referring to the graph in Figure 13, the torque value corresponding to the 12 turns design is shown in Table 9 to 10.56 Nm. In addition, when the torque-speed graph of 14 turns design is examined in Figure 13, it is observed that the reference speed value is outside this graph.

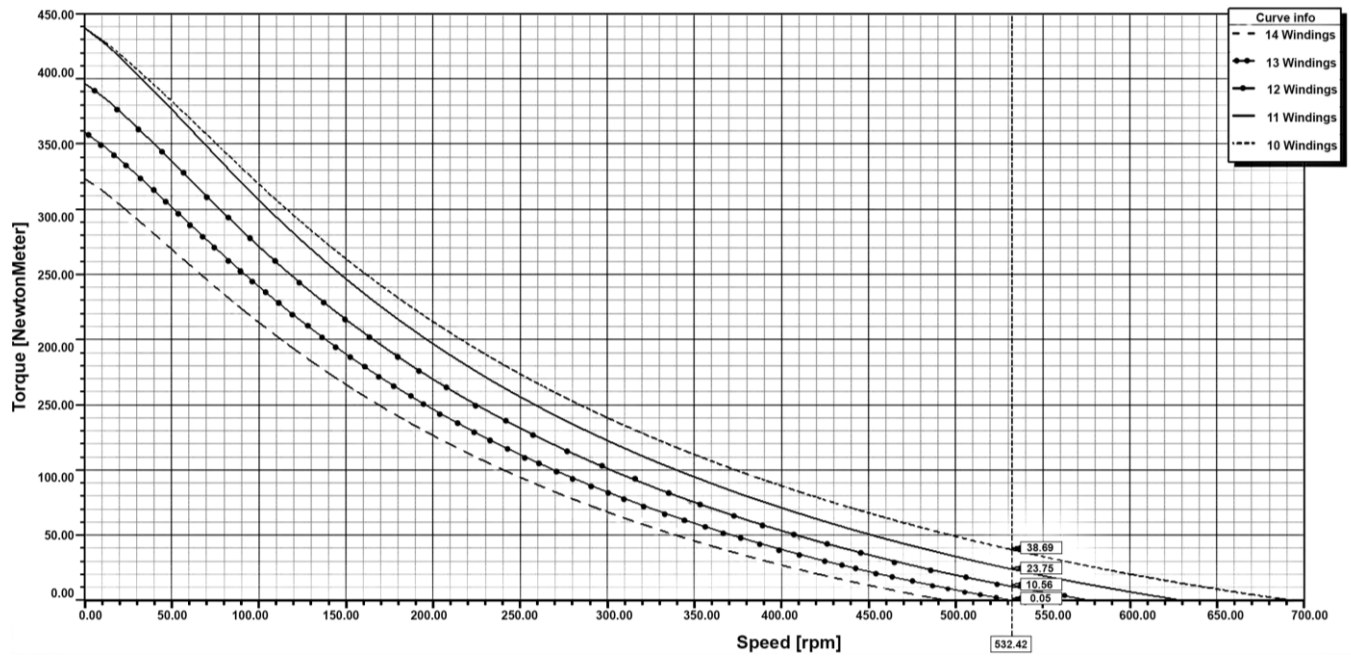


Figure 13. Effect of number of turns of armature winding on torque-speed graph.

Table 9 shows the torque values corresponding to the number of turns of armature winding for the reference speed value 532.42 rpm.

Table 9. Torque values corresponding to the number of turns of armature winding.

Number of Turns of Armature Winding	10	11	12	13	14
Torque (Nm)	38.69	23.75	10.56	0.05	-

As shown in Table 9, the torque value corresponding to the 12 turns design is shown in Table 9 to 10.56 Nm.

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

3.1.4. Magnetic and electrical effects of number of turns of armature winding

When the number of turns of armature winding is taken into account when analyzing the design, the change of this parameter affects many parameters in the analysis.

While examining the effects of the number of turns of armature winding in this section, the parameters of Armature Current Density, Copper Losses and Average Input Current will be examined. Armature Current Density refers to the ratio of the current flowing through the unit area on the luminaire. In the literature, it is observed that the heat density on the luminaire increases if this value is high. It is known that keeping the internal temperature of the motor low, as well as increasing the efficiency, will increase the motor efficiency and provide a more useful motor design [21].

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (11)$$

The expression of the self-resistance of the material is given in (11). ρ is self resistance and the unit is ohm-meter. R is the resistance, A is the cross section and l is the length of the material. The current capacity of the wire depends on the cross-sectional area and the thermal environment. The expression that the heat density in a resistor is I^2R is equal to the expression ρJ^2 where J is the current density. According to experience and studies, current density should be between 1 and 10 A/mm² [1].

The main factors affecting copper losses are the flow through the copper and the total resistance of the copper through which it flows. The analysis values corresponding to the change in the number of turns of armature winding in the light of all this information are shown in Table 10.

Table 10. Armature current density, copper losses and input current according to the number of turns of armature winding

Number of Turns of Armature Winding	Armature Current Density (A/mm ²)	Copper Losses (W)	Average Input Current (A)	Efficiency Value (%)
10	9.4	198.71	51.74	82
11	5.07	63.70	29.82	85
12	2.10	10.58	12.25	84
13	0.45	0.47	-0.72	2
14	2.97	19.63	-10.86	-

As shown in Table 10, the flow values of the 13 and 14 turns designs were found to be less than 0. This means that the designs corresponding to the number of turns of armature winding are considered inappropriate. Turns 10 and 11 designs were not preferred because they had a negative effect on the design of the motor.

3.1.5. Flux densities

The space between the teeth and the rotor and the stator is called the air gap. The flux density in this area is considered as a research topic in itself. As a result of the studies carried out, the value of the flux density in this area, the value of an external magnetic field and the permanent point of the magnets acts as a magnetic field. The flux density in the air gap causes an impact that causes vibrations, which leads to vibrations called cogging and reduces motor performance. Figure 14 shows the magnetic flux densities of the motor generated according to the design parameters determined.

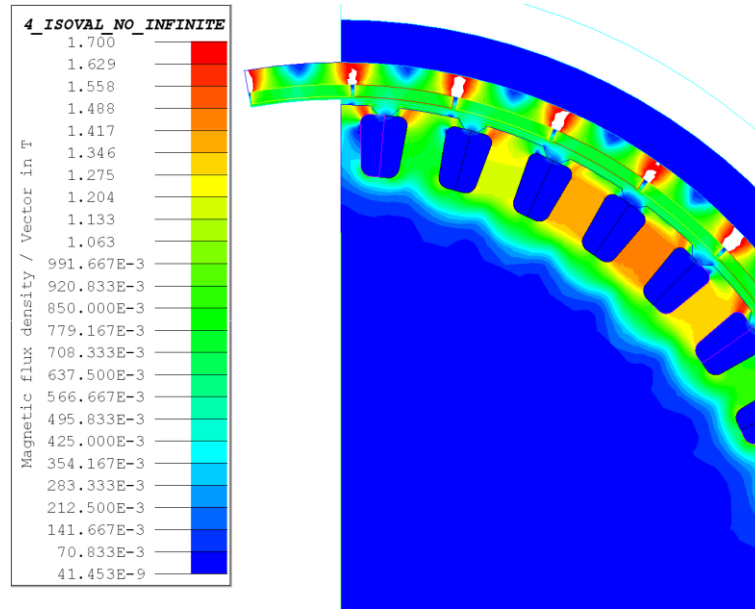


Figure 14. Display of magnetic flux densities [22].

When considering the flux density on the stator, there should be stator teeth since the place to be observed is exposed to more flux density than the area per unit. This case increases the importance of the selection of the correct number of turns of armature winding.

3.1.6. Transition to production

As a result of the analysis studies carried out for the design, the mechanical drawings shown in Figure 15 were made in order to produce the motor.

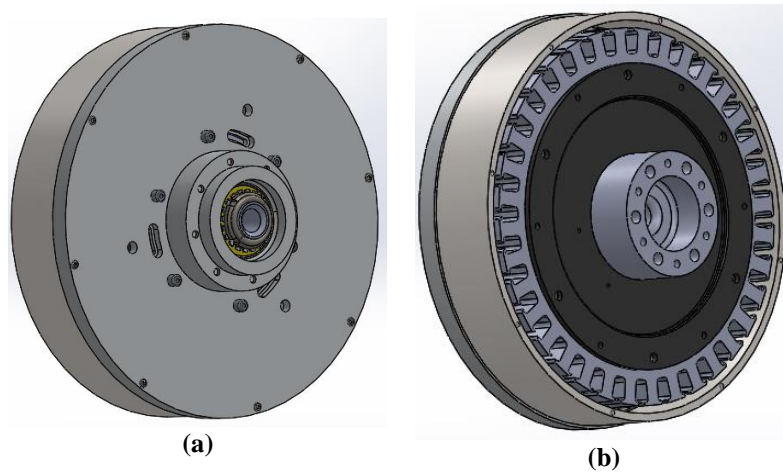


Figure 15. Mechanical drawings used for transition to production
(a) Rotor side, (b) Stator side.

It was decided to use the mechanical drawings shown in Figure 15 for the transition to production. After the completion of the production studies, the images of the motor designed in this study are presented in Figure 16.

EFFECTS OF NUMBER OF TURNS OF ARMATURE WINDING ON OUTER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGNED FOR AN ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE

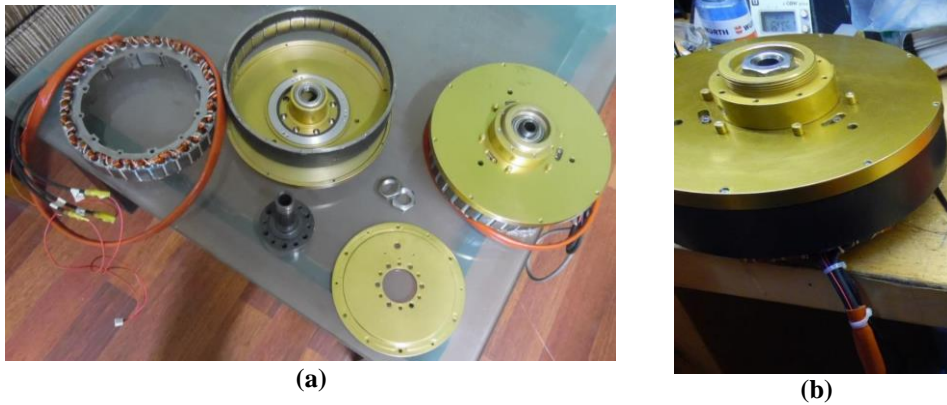


Figure 16. Mechanical drawings used for transition to production
(a) Rotor side, (b) Stator side.

The motor shown in Figure 16 is used without any problems for Alternative Energy Vehicle Races organized by the TUBITAK in electric vehicle prototypes of MilAT 1453 R&D Society of Istanbul University - Cerrahpaşa.

4. CONCLUSION

In the electric vehicle prototypes, direct drive brushless direct current motors are desired because of their higher efficiency. However, with a purpose to preserve effectivity in the highest variety, the motors have to be designed and manufactured in response to the vehicle and its elements. It is vitally fundamental to determine the right quantity of turns of armature winding, as well as many parameters for the period of the design segment. It is rather major to examine all motor parameters targeted to the vehicle to which the motor might be applied in the course of the design segment.

In this study, the design parameters determined according to the physical, electrical and magnetic constraints of the motor, which constitute the design input parameters, were obtained. These parameters include a number of substances, such as values and physical measurements, determined by the aerodynamic analysis of the vehicle to be used. In order to calculate the input parameters of the motor which is designed in the light of these values, necessary information has been realized with the help of many articles and academic studies.

The study includes the design of the BLDC motor for the electric vehicle prototypes. In addition, the effects of the number of turns of armature winding on the design were analyzed in detail. As a result of these investigations, it was concluded that the optimum number of turns of armature winding is 12 for the motor design.

In the near future, it is planned to start the production from the motor design and to make analyzes based on experimental results and to contribute to the literature.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by Scientific Research Projects Coordination Unit of İstanbul University-Cerrahpasa. Project numbers: 33416 and 52033.

REFERENCES

- [1] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Magna Physics Publishing, 9nd ed. ISBN: 1-881855-15-5, Lebanon, 2003.
- [2] P. Yedemale, “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”, Microchip Technology Inc, App. Note: DS00885A, pp. 1-20, USA, 2003.
- [3] M.R.A. Pahlavani, Y.S. Ayat and A. Vahedi, “Minimisation of torque ripple in slotless axial flux BLDC motors in terms of design considerations”, *IET Electric Power Applications*, vol.11, no.6, pp. 1124-1130, 2017.
- [4] N. A. Rahim, H. W. Ping and M. Tadjuddin, “Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle”, Proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007.

- [5] N. Shrivastava and A. Brahmin, “Design of 3-Phase BLDC Motor for Electric Vehicle Application by Using Finite Element Simulation”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 140–145, 2014.
- [6] D. Uygun and S. Solmaz, “Design and Dynamic Study of a 6 kW External Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Drivetrains”, Proc. 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, Latvia, 2015.
- [7] H. Tiryaki, A. Akgundoğdu, G. Erdogan, O. Karadeniz, U. Sahin, M.Y. Yılmaz, Y. Durak and I. Kocaarslan, “Implementation of an Electromobile for Efficiency Challenge”, Proc. Int. World Electro Mobility Conference (WELMO’17), Izmir, Turkey, 2017. (In Turkish)
- [8] Car Acceleration, Available: https://www.engineeringtoolbox.com/car-acceleration-d_1309.html [Accessed: Sept. 03, 2019].
- [9] M. Jafarboland and M.M. Sargazi, “Analytical modelling of the effect of pole offset on the output parameters of BLDC motor”, *IET Electric Power Applications*, vol.12, no.5, pp.666-676, 2018.
- [10] Y. Luo, Y. Zhu, Y. Yu and L. Zhang, “Inductance and force calculations of circular coils with parallel axes shielded by a cuboid of high permeability”, *IET Electric Power Applications*, vol.12, no.5, pp.717-727, 2018.
- [11] F. Libert and J. Soulard, “Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings”, Proc. Int. Conf. on Electric Machines (ICEM’04), 2004.
- [12] A.S. Cabuk, Ş. Sağlam, G. Tosun and O. Ustun, “Investigation of Different Slot-Pole Combinations of An In-Wheel BLDC Motor for Light Electric Vehicle Propulsion”, Proc. Int. Conf. on ELECO’17, 2017.
- [13] C. Ma, Q. Li, H. Lu H, Y. Liu and H. Gao, “Analytical model for armature reaction of outer rotor brushless permanent magnet DC motor”, *IET Electric Power Applications*, vol.12, no.5, pp.651-657, 2018.
- [14] P. Kohnke, ANSYS Theory Reference for The Mechanical APDL and Mechanical Applications, SAS IP, Canonsburg, 2009.
- [15] P.M. Dusane, Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D, Master Thesis, Czech Technical University, 2016.
- [16] W. Fei and P.C.K. Luk, “A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent Magnet Brushless Machines”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.46, no.4, pp.1332-1340, 2010.
- [17] Z. Wu and Z.Q. Zhu, “Influence of stator/rotor-pole combination on electromagnetic performance in all/alternate poles wound partitioned stator doubly salient permanent magnet machines”, *J Eng*, vol.6, pp.237–245, 2017.
- [18] Stacking Factor, Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stacking_factor, [Accessed Sept. 03, 2019].
- [19] ANSYS Maxwell Electromagnetics Suite 16.0.0, Reference Manual, 2015.
- [20] A.S. Çağışlar, Brushless Direct Current Motor Design For Electric Vehicles, Master Thesis, Istanbul University, 2018. (In Turkish)
- [21] L. Tang, J. He, L. Chen, S. Xia, D. Feng, J. Li and P. Yan, “Study of Some Influencing Factors of Armature Current Distribution at Current Ramp-Up Stage in Railgun”, *IEEE Transactions On Plasma Science*, vol.43, no.5, pp.1585-1591, 2015.
- [22] Flux, Reference Manual, 2018.





AUTOMATIC CONTROL OF WHEEL SLIP IN SOIL TILLAGE

Serhat SOYLU^{1,*} , Kazım ÇARMAN² 

¹ Selcuk University, Akoren Ali Rıza Ercan Vocational School, Department of Electronic Technology, Konya, Turkey

² Selcuk University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering, Konya, Turkey

ABSTRACT

In this study, a control system that automatically adjusts the working depth of the tractor tillage equipment has been developed in order to keep the wheel slip occurring in agricultural tractors during the tillage activities at the determined limit value. The developed automatic control system continuously measured the wheel slip on the tractor drive wheels and reduced the tillage depth adjusted for the wheel slip increase. While the amount of wheel slip was at the allowed level, the tillage equipment worked at the set depth value. In the study, a driver warning system is also designed to alert the driver to reduce the tillage depth when the amount of wheel slip exceeds the specified limit value. The driver warning system warns the driver visually with the help of colored LEDs and audibly with a buzzer according to the measured wheel slip value. The developed automatic control system was compared separately with the designed driver warning system and the operator's own control. The wheel slip value was calculated by comparing the forward speed of the tractor with the speed of the drive wheels. The automatic control system and driver warning system were installed on a New Holland TD110 agricultural tractor and trials were carried out in real field conditions. As a result of the trials, according to the driver warning system and operator control, it was determined that there was a 3-29% reduction in wheel slip and a 22-30% reduction in fuel consumption in soil tillage activities carried out with automatic control system. On the other hand, the draft force decreased by more than 5% compared to the operator control in the automatic control system. However, it was observed that there was almost no change in the average tillage depth between the control methods.

Keywords: Agricultural tractors, Automatic control systems, Fuel efficiency, Plowing depth, Wheel slip

TOPRAK İŞLEMEDE PATİNAJIN OTOMATİK KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmada, toprak işleme faaliyetleri esnasında tarım traktörlerinde oluşan patinajı, belirlenen sınır değerinde tutmak için, traktöre bağlı toprak işleme ekipmanının çalışma derinliğini otomatik olarak ayarlayan bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen otomatik kontrol sistemi traktör tahrik tekerleklerinde oluşan patinajı sürekli olarak ölçmüş ve patinaj değerindeki artış miktarına göre ayarlanan toprak işleme derinliğini azaltmıştır. Patinaj miktarı izin verilen seviyede iken toprak işleme ekipmanı ayarlanan derinlik değerinde çalışmıştır. Çalışmada ayrıca, patinaj miktarı belirlenen sınır değeri aştığında, sürücüyü toprak işleme derinliğini azaltması için uyarı bir de sürücü uyarı sistemi tasarlanmıştır. Sürücü uyarı sistemi, ölçülen patinaj değerine göre sürücüyü renkli LED (Light Emitting Diode)'ler yardımıyla görsel olarak ve bir siren yardımıyla da sesli olarak uyarılmaktadır. Geliştirilen otomatik kontrol sistemi, tasarlanan sürücü uyarı sistemi ile ve operatörün kendi kontrolü ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Patinaj değeri, traktörün gerçek ilerleme hızı ile tahrik tekerleklerinin dönüş hızı karşılaştırılarak hesaplanmıştır. Otomatik kontrol sistemi ve sürücü uyarı sistemi New Holland TD110 model bir tarım traktörüne monte edilmiş ve gerçek tarla koşullarında denemeler yapılmıştır. Denemeler sonucunda, sırasıyla sürücü uyarı sistemi ve operatör kontrolüne göre, otomatik kontrol sistemi ile gerçekleştirilen toprak işleme faaliyetlerinde, patinaj değerlerinde %3-29 ve yakıt tüketiminde %22-30 azalma olduğu belirlenmiştir. Traktörle toprak işleme ekipmanı arasında oluşan çeki kuvvetinde ise, otomatik kontrol sisteminde operatör kontrolüne göre %5'ten fazla azalma olduğu görülmüştür. Bununla beraber, toprak işleme derinliğinde, kontrol yöntemleri arasında neredeyse hiç değişiklik olmadığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Otomatik kontrol sistemi, Patinaj, Tarım traktörleri, Toprak işleme derinliği, Yakıt verimliliği

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: serhatsoylu@selcuk.edu.tr

Geliş / Received: 07.04.2020 Kabul / Accepted: 02.07.2020 doi: 10.28948/ngumuh.722088

1. INTRODUCTION

Tillage operations are main farm operations required to prepare soil conditions for seed germination. Operations play a very important role in the production of agricultural products. Incorrect tillage operations lead to reduced productivity and, consequently, increased production costs [1].

In tillage operations, differences in soil conditions of the field lead to changes in draft force required to pull implement within soil in any forward speed and plowing depth. Lack of draft force in a certain soil condition results in decrement of tractive efficiency. This also increase the wheel slip and fuel consumption. Therefore, to obtain the optimum draft force, a draft control system was considered for tractors. The available draft control systems regulate draft force in a specific bound on the basis of the first adjustment of plowing depth by operator. The control procedure is continuously performed by plowing depth changes. Therefore, variations in plowing depth are obtained in primary tillage operations [1].

The efficiency of traction depends mainly on tractor related factors (weight of the tractor, number of driven axles, kind of tire, inflation pressure) and soil related factors (surface hardness, soil moisture content) [2]. The requirement of drawbar power in soil tillage depends mainly on the working depth. Approximately 100 m³ or 150 tons (soil density: 1.5 kg/dm³) of soil per hectare is moved if 1 cm soil is ploughed. Depending on soil constitution the fuel consumption increases per cm ploughing depth between 0.5 and 1.5 L/ha [3].

Wheel slip was defined as the difference between the actual forward speed of the tractor and the drive wheel speed [4]. The maximum tractive efficiency occurs at a lower wheel slip and starts decreasing with an increase in the slip [5, 6]. If the wheel slip is maintained within an optimum range the tractor operates at maximum efficiency [7]. In previous studies, it has been proposed to optimize the tractor's wheel slip range in the range of 10-15% for better traction performance. It also stated that, wheel slip less than 7% is undesirable because the draft efficiency is reduced, and the power is wasted. However, it has been observed that wheel slip greater than 20% results in inefficiency [8, 9].

Agricultural tractors generally have a hydro-mechanical draft control system where the draft is sensed mechanically, and a hydraulic valve is actuated for operational depth control.

The draft control systems engaged in tractors are found to be inefficient in keeping the draft control in line with the slip [10-15]. Researchers have also concluded that commercial draft control systems force the operator to control the depth control lever frequently for achieving the optimum draft, resulting in poor efficiency [13, 16]. The frequency of operation of hydraulic control lever has been found to be 3 times/min [17] and about 40% of such adjustments were to prevent excessive slip [18, 19]. However, the utilization of this information depends upon operator's experience and fatigue level [11].

In Turkey, 15.5 million ha area is used for the field-agriculture. Depending on tillage methods, 620 million liters of fuel are consumed annually. Approximately \$6.2 million will be saved with a 1% saving in fuel consumption. [20].

It is therefore an absolute necessity to measure and indicate slip for getting maximum drawbar output from the tractor.

In this study, it is aimed to develop an embedded system with simple, cheap and reliable materials to digitally measure and display the wheel slip. If the wheel slip exceeds the optimum values, the system is aimed to give audible and visual warnings. In addition, an automatic wheel slip control system for optimum tractive efficiency by altering the depth of tillage was developed and compared with warning system.

2. MATERIAL AND METHOD

The developed warning system and the automatic control system consist a slip measurement unit, a fuel measurement unit, a hydraulic lever adjustment mechanism, a Bluetooth communication unit, a SD card data logger, a draft force measurement unit, a depth measurement unit, and a data collection/processing unit.

In order to determine the actual forward speed, and speeds of the rear driving wheels, hall effect sensors and magnets were used. Magnets placed to left front wheel and rear wheels. The hall effect sensors that would detect magnets were fixed to the apparatus mounted on the tractor (Fig. 1) [21, 22, 32].

The magnets passed in front of the hall effect sensors is counted by using the Arduino Due microcontroller. The actual forward speed, and the speeds of the rear driving wheels were calculated as:

$$V = \frac{a * C * 3.6}{n} \quad (1)$$

where V - Tractor forward speed, [km/h]; a - The number of magnets counted in one second; C - Wheel circumference, [m]; n - The number of magnets found in the wheel [32].

Amount of the slip occurring on the wheels was calculated as:

AUTOMATIC CONTROL OF WHEEL SLIP IN SOIL TILLAGE

$$\%S = \frac{V_r - V_f}{V_r} * 100 \quad (2)$$

where %S - Slip [%]; Vr - Rear wheel speed [km/h]; Vf - Front wheel speed [km/h] [29]



Figure 1. Hall effect sensors and neodymium magnets

Two flowmeters (Sea YF-S201) were used to determine the fuel consumption (Fig.2). The first flowmeter was mounted on the fuel line leading from the tank to the engine, and the second was mounted on the fuel line going back to the tank from the engine [2, 31]. An Arduino Nano microcontroller was used to calculate fuel consumption in L/ha. Finally, calculated values were transferred to the Arduino Due microcontroller board via serial communication ends.



Figure 2. Flowmeter mounted on fuel line

Three 30-kN force-measuring pins (Lorenz Messtechnik GmbH K-2562) were used to measure the draft forces (Fig. 3). The pins were connected to the 3-point hitch system [33]. HX711 modules designed for Arduino microcontrollers were used to convert signals, and then the outputs were transferred to the Arduino Due microcontroller board.



Figure 3. Force-measuring pins to measure the draft forces

To measure the tillage depth, a moving wheel was attached to the plough. A potentiometer (1 kΩ) was placed between the plough and moving wheel (Fig. 4). When the wheel contacts with the soil, the potentiometer rotates according to the sinking amount of the plough into the soil. Thus, the resistance of the potentiometer changes and the tillage depth is calculated by Arduino Due microcontroller board [23-25].



Figure 4. Depth control wheel and potentiometer

In the designed automatic control system, the movement of the hydraulic control lever is ensured by a servo motor (12V, 380kg.cm) mounted on the control lever at the back of the tractor (Fig. 5). For the hydraulic control lever's level setting, the servo motor was controlled between 0-100°. 12V DC voltage for servo motor was taken from the tractor battery and the control pin was connected to the digital output of the Arduino Due microcontroller board.

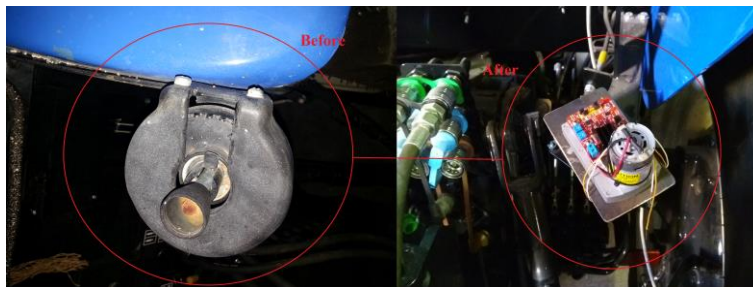


Figure 5. Servo motor mounted on the control lever

AUTOMATIC CONTROL OF WHEEL SLIP IN SOIL TILLAGE

The warning system is provided with three LEDs, namely red, yellow, green. A buzzer is also provided to alert the operator. The green led glows continuously to indicate the working of developed system and show that slip value is less then %15. Yellow led glows when the slip value exceeds %15. Red led glows and buzzer starts when the slip value exceeds the value 25%. The flow diagram of the developed warning system is shown in Fig. 6. In the studies carried out with the warning system, the operator was asked to adjust the depth according to the information from the LEDs and buzzer.

For the designed warning system, the amount of slip occurring on the left and right rear wheels was averaged, and LEDs were glowed according to this average slip value. The average slip amount was calculated as:

$$S_{avg} = \frac{S_{lr} + P_{rr}}{2} \tag{3}$$

where S_{avg} - Average amount of slip, [%]; S_{lr} - Left rear wheel slip amount, [%]; S_{rr} - Right rear wheel slip amount, [%].

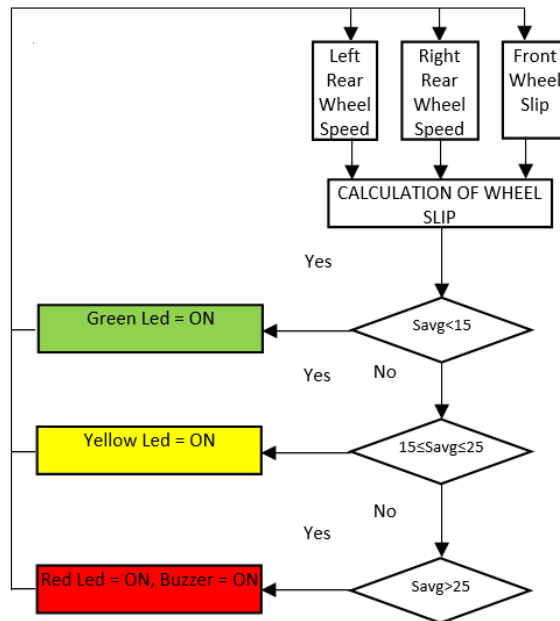


Figure 6. Developed warning system

In this study, an on-off based automatic control system was also developed to compare it with the warning system. A servo motor is added to control hydraulic control lever and the software on the Arduino Due microcontroller board was updated. For the designed automatic control system, the position of the hydraulic control lever was set according to average slip value.

An Android application was developed to set the tillage depth of the tillage equipment. The communication between phone/tablet and the Arduino Due microcontroller card was done via Bluetooth. With the application, the tillage equipment can be lifted up and down with an accuracy of 1cm (+/-). There are also buttons for the tillage equipment to be lifted up and down completely (Lift UP/Lift DOWN). With this application the desired depth of tillage can also be directly set (Fig. 7).

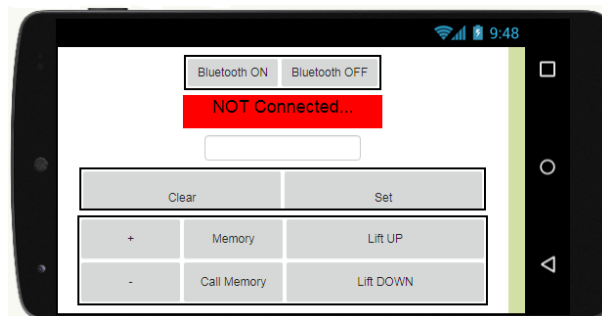


Figure 7. Screen of Android App

The flow diagram of the automatic control system is given in Fig. 8. The rules that are valid for the operation of the automatic control system were established as follows:

IF $S_{avg} < 15$, THEN Depth=SAME
 IF $S_{avg} \geq 15$, THEN Depth=REDUCE by 50%

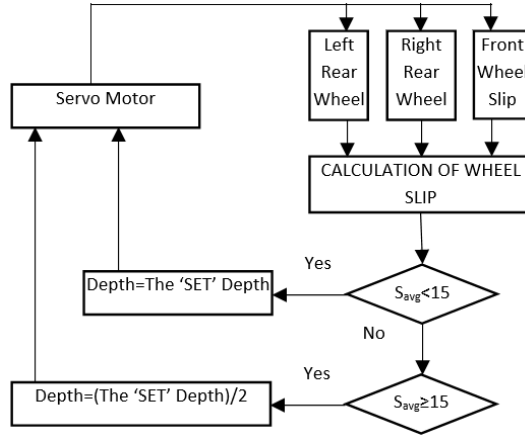


Figure 8. Developed automatic control system

The field tests were conducted at the Sarıcalar Application Farmland of the Faculty of Agriculture of Selçuk University (41°82'27"N ve 45°60'15"E). A New Holland TD110D model tractor was used and the tillage equipment was a 5-furrow plough. The operating width was 1.66 m.

A HC-06 Bluetooth module for Bluetooth communication and a MicroSD card module for data recording were also added to designed systems.

In the trials, the average slip amounts, fuel consumption, total draft force, and tillage depth values were measured. These data were recorded on a SD card (Fig. 9). To reduce experimental errors, trials were conducted in the form of three repetitions.

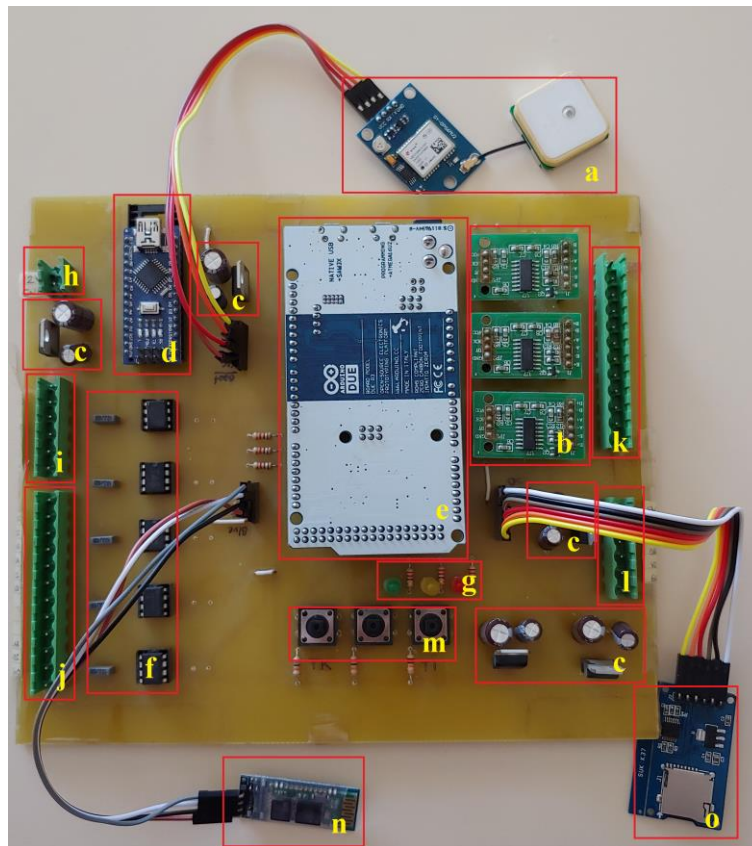


Figure 9. Electronic control board (a. Neo-6M GPS Module, b. HX711 modules, c. 7805 Voltage Regulators, d. Arduino Nano fuel measurement unit, e. Arduino Due data collection/processing unit, f. LM741 OPAMPs for filtering, g. LEDs for warning, i. JST connectors, h. capacitors, j. resistors, k. JST connectors, l. JST connectors, m. push buttons, n. JST connectors, o. MicroSD card module)

AUTOMATIC CONTROL OF WHEEL SLIP IN SOIL TILLAGE

h. +12V Power connection, i. flow meter connection pins, j. Hall effect sensor connection pins, k. Loadcell connection pins, l. Servo motor connection pins, m. Shortcut program buttons, n. Bluetooth module, o. MicroSD card module)

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

A total of nine tests were carried out to compare the results; three repetitions for warning system, three repetitions for automatic control system and three repetitions for the operator's own control. Forward speed was set to 4.6 km/h and the tillage depth was set to 25 cm.

The result graphics obtained from automatic control system are given in Figure 10. In studies conducted with the automatic control system, the actual forward speed varied between 3.7 and 4.6 km/h. The drop in actual forward speed can be explained by the increased amount of wheel slip. Wheel slip was changed between %4 and %32 and fuel consumption was changed between 8 and 13.7 L/ha. The minimum draft force was 20 kN while the maximum draft force was 28 kN. The minimum tillage depth measured was 20.5 cm. Similar results have been reported in past studies [1, 8, 26].

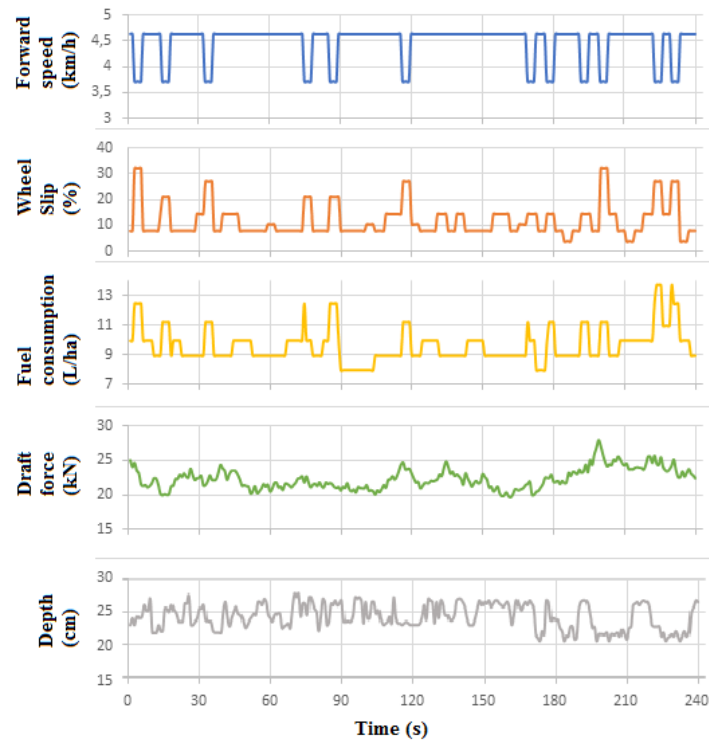


Figure 10. Results of automatic control system

The result graphics of warning system are given in Figure 11. The actual forward speed varied between 3.7 and 5.5 km/h in this study. The minimum wheel slip was %4 and the maximum wheel slip was %37. Fuel consumption was changed between 7.5 and 12.5 L/ha. Draft force changed between 14 – 29 kN. The minimum tillage depth measured was 18 cm. Researchers reported similar results with the warning systems they designed [28, 29].

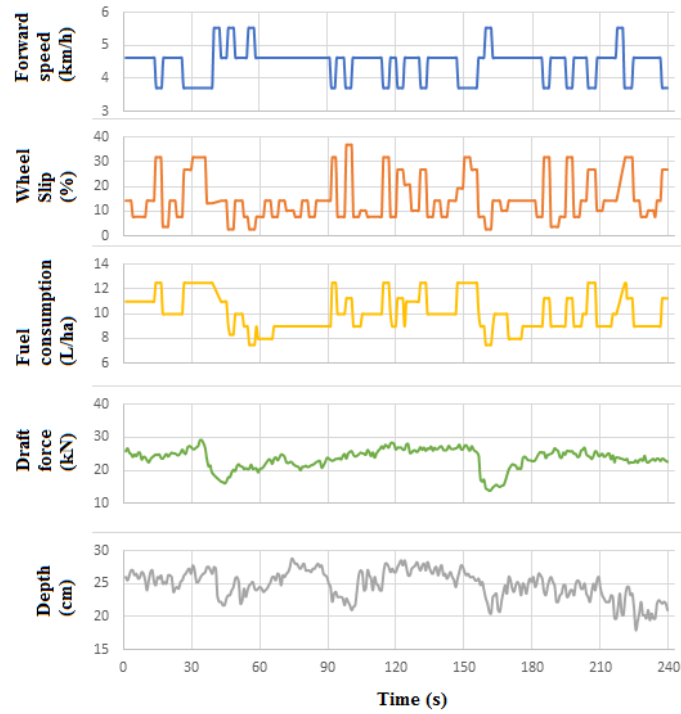


Figure 11. Results of warning system

The result graphics of operator control are given in Figure 12. The minimum actual forward speed was 2.8 and the maximum forward speed was 4.6 km/h. The wheel slip was changed between %4.5 and %53. Minimum fuel consumption was measured as 9 L/ha and maximum fuel consumption was measured as 23 L/ha. Draft force changed between 20 – 29 kN. The minimum tillage depth measured was 19 cm. Similar results have been reported by researchers in previous studies [11, 32, 33].

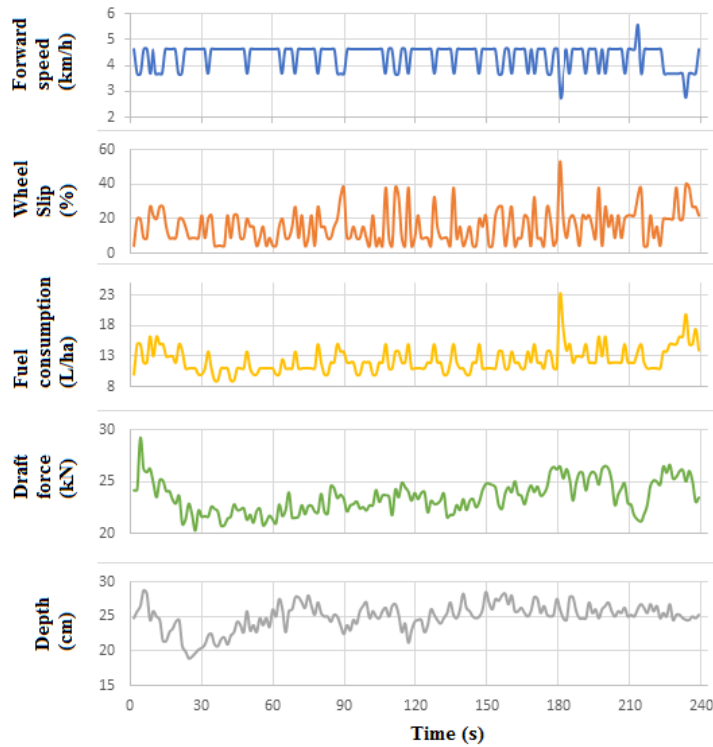


Figure 12. Results of operator control

AUTOMATIC CONTROL OF WHEEL SLIP IN SOIL TILLAGE

In all control methods, the minimum and maximum slip values obtained according to operating conditions were found to be above the 10-15% optimum value range. In the trials conducted with the automatic control system, the average slip values remained within the optimum operating range.

Table 1. Average value table for different control methods

	Slip (%)			Fuel consumption (L/ha)			Total draft force (kN)			Tillage depth (cm)		
	Min	Max	Avr	Min	Max	Avr	Min	Max	Avr	Min	Max	Avr
Warning System	3.0	37.0	15.20	7.48	12.47	10.05	13.92	29.27	23.77	18.00	28.75	24.93
Automatic Control System	4.0	32.0	12.09	7.98	13.73	9.45	19.66	28.04	22.38	20.50	27.75	24.27
Operator	4.5	53.0	15.60	8.96	23.23	12.31	20.26	29.25	23.53	19.00	28.75	24.97

When the results of the trials were examined, it was seen that the minimum average wheel slip (12.09%) was in the trial conducted by the automatic control system and the maximum average wheel slip (15.60%) was in the trial performed by operator control. When the values were compared, it was observed that the average wheel slip values decreased by 2.6% in the warning system and by 29.03% in the automatic control system compared to the trials conducted in operator control.

Minimum average fuel consumption (9.45 L/ha) has measured in the trial conducted by the automatic control system and the maximum average fuel consumption (12.31 L/ha) was in the trial performed by operator control. When the values were compared, it was observed that the fuel consumption values decreased by 22.49% in the warning system and by 30.26% in the automatic control system compared to the trials conducted in operator control.

It was seen that the minimum average total draft force (22.38 kN) and the maximum average total draft force (23.77 kN) was in the trial performed by warning system. It was observed that the total draft force values were almost same in warning system and operator control. But the total draft force decreased by 5.14% in the automatic control system compared to the trials conducted in operator control.

When the results of the tillage depth are analyzed, the values of minimum 18.00 cm (in the experiments carried out with the warning system) and maximum 28.75 cm (in the experiments carried out with the automatic control system and by the operator when no system was active) are obtained. Values below 25 cm seen here were caused by the tillage implement being lifted in case of strain. On the other hand, values over 25 cm emerged when the depth measuring wheel connected to the tillage machine encountered a protrusion (stone, clod, grass cluster, etc.) on the soil surface. When the average soil tillage depth values obtained were compared, it was observed that almost equal values appeared in all different control methods.

4. CONCLUSION

When the data obtained were analyzed, it was seen that the operator could not feel the small values of the wheel slip that occurred during the tillage activities. They could feel the wheel slip after the value %30-35. With the warning system that informs operator about the magnitude of wheel slip, it was observed that the operators intervened more in the tillage depth during the tillage activities, but the time for their interventions was quite long. In the experiments carried out with the automatic control system, it was observed that the automatic control system intervened with the tillage depth as soon as the wheel slip value rises above the optimum value. The intervention to the tillage depth of the automatic control system was faster than the operator and it did not miss the excess of optimum wheel slip. In the tillage operation carried out by the automatic control system, the operator did not need to make any additional effort. In addition, the parts of the tractor, especially tires, will suffer less damage and increase their lifetime.

In the trials carried out with the automatic control system, the fuel consumption decreased, but the average tillage depth values almost did not change. When all these are evaluated, it can be said that automatic control system performed more efficiently according to the warning system and the operator's own control.

REFERENCES

- [1] S.M. Shafaei, M. Loghavi, S. Kamgar, "A practical effort to equip tractor-implement with fuzzy depth and draft control system," *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 12, 191-203, 2019.
- [2] G. Moitzi, H. Weingartmann, J. Boxberger, "Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption," *Energy Efficiency and Agricultural Engineering – International Scientific Conference* 7. – 9. 2006, Rouse, Bulgaria, 2006.

- [3] G. Moitzi, Kraftstoffeffizienz in der Pflanzenproduktion. Kraftstoffkosten sparen in der Landwirtschaft. ÖKL-Kolloquium 2005 an der Universität für Bodenkultur, Wien, 2005.
- [4] ASAE Standard, "Uniform Terminology for Traction of Agricultural Tractors, Self-Propelled Implements, and Other Traction and Transport Devices," S296.2, ASABE Standards, St Joseph, MI, 1983.
- [5] R.D. Wismer, H.J. Luth, "Off-road traction prediction for wheeled vehicles," ASABE Paper No. 72-619, 1972.
- [6] W.W. Brixius, "Traction Prediction Equations for Bias Ply Tires," ASAE Paper No. 871622. ASABE St. Joseph. MI 49085, 1987.
- [7] F.M. Zoz, "Predicting tractor field performance," Trans. ASAE 15 (2), 249-255, 1972.
- [8] C. Gupta, V.K. Tewari, A.A. Kumar, P. Shrivastava, "Automatic tractor slip-draft embedded control system," Computers and Electronics in Agriculture 165, 104947, 2019.
- [9] S. Ekinçi, K. Çarman, "Effects Of Some Properties Of Drive Tires Used In Horticultural Tractors On Tractive Performance," Journal of Agricultural Sciences. 23 (1), 84-94, 2017.
- [10] P.A. Cowell, S.C. Len, "Field performance of tractor draught control systems," J. Agric. Engng Res. 12 (3), 205-221, 1967.
- [11] P.K. Pranav, K.P. Pandey, V.K. Tewari, "Digital wheel slipmeter for agricultural 2WD tractors," Computers and Electronics in Agriculture 73, 188-193, 2010.
- [12] N. Singh, G. Singh, V.M. Salokhe, "Cyclic variation in moldboard plow draft and its effect on implement control systems," Soil Tillage Res. 21, 273-286, 1991.
- [13] M.J. Dwyer, D.A. Crolla, G. Pearson, "An investigation of the potential for improvement of tractor draught controls," J. Agric. Engng Res. 19, 147-165, 1974.
- [14] P.A. Sánchez, S.K. Upadhyaya, K. Sakai, "Variability in Draft Data Observed During Tillage," An ASAE Meeting Presentation. Paper No. 031121, 2003.
- [15] P.K. Pranav, "Development of slip sensing and control system for two wheel drive tractors," Unpublished Ph.D thesis, IIT Kharagpur, 2011.
- [16] P.A. Cowell, M.J. Milne, "An implement control system using pure draught sensing and modified linkage geometry," J. Agric. Engng Res. 22, 353-371, 1977.
- [17] V.G. Arude, D.T. Pacharne, V.K. Tewari, "Location of controls and operator's activities in Indian tractors," Agric. Mech. Asia Afr. Lat. Am. 30 (3), 19-22, 1999.
- [18] S.M. Ismail, G. Singh, D. Gee-Clough, "Preliminary investigation of a combined slip and draught control for tractors," J. Agric. Engng Res. 26, 293-306, 1981.
- [19] S.M. Ismail, G. Singh, D. Gee-Clough, "Comparison of the field performance of three implements control systems for a tractor," J. Agric. Engng Res. 28 (6), 521-536, 1983.
- [20] T. Marakoğlu, K. Çarman, "Energy balance of direct seeding applications used in wheat production in middle Anatolia," African Journal of Agricultural Research, 5(10), 988-992, 2010.
- [21] A.A. Al-Janobi, S.A. Al-Suhaibani, "Draft of primary tillage implements in sandy loam soil," Appl. Eng. Agric. 14 (4), 343-348, 1998.
- [22] H. Raheman, S.K. Jha, "Wheel slip measurement in 2WD tractor," Journal of Terramechanics 44, 89-94, 2007.
- [23] A. Al-Janobi, "A Data-acquisition System to Monitor Performance of Fully Mounted Implements," J. Agric. Engng Res. 75, 167-175, 2000.
- [24] A. Yahya, M. Zohadie, A.F. Kheiralla, S.K. Giew, N.E. Boon, "Mapping system for tractor-implement performance," Comput. Electron. Agric. 69 (1), 2-11, 2009.
- [25] S.A. Al-Suhaibani, A.E. Ghaly, "Comparative study of the kinetic parameters of three chisel plows operating at different depths and forward speed in a sandy soil," Int. J. Eng. Sci. 2 (7), 42-59, 2013.
- [26] P.K. Pranav, V.K. Tewari, K.P. Pandey, K.R. Jha, "Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors," Computers and Electronics in Agriculture 84, 1-6, 2012.
- [27] G. Moitzi, H. Wagenristl, K. Refenner, H. Weingartmann, G. Piringer, J. Boxberger, A. Gronauer, "Effects of working depth and wheel slip on fuel consumption of selected tillage implements," Agricultural Engineering International, The CIGR e-journal 16(1), 182 - 190, 2014.
- [28] A.A. Kumar, V.K. Tewari, C. Gupta, C.M. Pareek, "A device to measure wheel slip to improve the fuel efficiency of off road vehicles," Journal of Terramechanics 70, 1-11, 2017.
- [29] A.A. Kumar, V.K. Tewari, B. Nare, "Embedded digital draft force and wheel slip indicator for tillage research," Computer and Electronics in Agriculture 127, 38-49, 2016.
- [30] S.M. Shafaei, M. Loghavi, S. Kamgar, "Development and implementation of a human machine interface-assisted digital instrumentation system for high precision measurement of tractor performance parameters," Engineering in Agriculture, Environment and Food 12, 11-23, 2019.
- [31] S. Karparvarfard and H. Rahmanian-Koushkaki, "Development of a fuel consumption equation: Test case for a tractor chisel-ploughing in a clay loam soil", Biosystems engineering, 130, 23-33, 2015.

AUTOMATIC CONTROL OF WHEEL SLIP IN SOIL TILLAGE

- [32] Y. Dilay, K. Sabancı, A. Özkan and C. Aydın, Traktörlerde Patinajın Sensör Yardımıyla Hesaplanması, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 12 (1), 45-50, 2016.
- [33] E. Gülsoylu and T. Günhan, “Traktör ve Tarım Makinaları Tarla Performansının Belirlenmesinde Kullanılan Bir Veri Toplama Sistemi”, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 3 (4), 225-231, 2007.





POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Esra DİLMEN¹ , Tahsin ÇETİNYOKUŞ^{2,*} 

¹ Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

ÖZET

Hava taşımacılığı talebindeki değişim ve hava ulaşımına olan talebin yıldan yıla büyük artışlar göstermesi, havalimanının artan talebi karşılama zorlanması havalimanı sistemini daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle; havalimanlarının yerleşimi, kapasitesi ve beklenen büyüme gibi konularının değerlendirilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmada Ankara ilinde mevcut durumda sivil hava trafiğine hizmet veren Esenboğa Havalimanının yanı sıra ikinci bir havalimanı potansiyeli değerlendirilmektedir. Sosyo-ekonomik göstergelerle birlikte, mekânsal planlama, ulaştırma gelişimi, çevresel koruma ve finansal sürdürülebilirlik gibi kriterler havalimanı gelişiminde öne çıkmaktadır. Literatür taraması ve uzmanlarla yapılan görüşmeler sonrasında kriterler uzman anketleri ile belirlenmiş ve ağırlıklandırılmıştır. Anketlerden elde edilen verilere dayanarak çok kriterli karar verme tekniklerinden (ÇKKV) AHP, TOPSIS ve ELECTRE kullanılarak hangi trafik seviyesine kadar Ankara ilinin hava ulaşım talebini mevcut havalimanı ile karşılayabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), Çoklu Havalimanı Sistemi (ÇHS), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS, ELECTRE

ASSESSMENT OF POTENTIAL MULTI-AIRPORT SYSTEMS BY USING MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING METHODS

ABSTRACT

Changes in increasing demand for air transport from year to year-forced airports to meet the demand and makes airport system more complicated. Therefore; it becomes compulsory to assess the issues such as location and capacity of airports and expected growth. In this study, a second airport potential is evaluated as well as Esenboğa Airport that currently serves civil air traffic in Ankara. Criteria such as socio-economic indicators, spatial planning, transport development, environmental protection and financial viability stand out in airport development. After literature review and interviews with experts, the criteria were determined and weighted with expert questionnaires. Based on the data obtained from the questionnaires, it was evaluated by using AHP, TOPSIS AND ELECTRE methods from multi-criteria decision making techniques (MCDM) to which traffic level Ankara can meet the air travel demand with the existing airport.

Keywords: Multi Criteria Decision Making (MCDM), Multi Airport System (MAS), AHP, TOPSIS, ELECTRE

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ekonomi, ekonomik büyümeye dayanmakta olup birçok çalışma, ekonomik büyümenin veya küçülmenin hava yolcu trafiğinde değişime yol açtığını göstermiştir. [1]-[3].

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) verilerine göre; 2018 senesinde gerçekleşen toplam yolcu sayısı 2017 yılına göre %6,1'lik bir artış göstererek 4,3 milyar yolcuya ulaşmıştır [4]. Uluslararası Havalimanı Konseyi (ACI), 2019 yılında; havayoluyla seyahat eden yolcu sayısının 4,6 milyar kişi, havacılık sektörünün toplam net kârının ise 2018 yılına göre %9,9'luk bir artışla 35,5 milyar dolar olacağını ve hava yoluyla taşınan kargo miktarının ise 2018 yılındaki kargo miktarına göre %3,6'luk bir artışla bu değer 2019 yılında 65,9 milyon ton olacağını öngörmektedir [5].

Son 10 yılda yapılan çalışmalar; havalimanı faaliyetlerinin sadece yapısal karakteristikler veya ekonomik faaliyetler ile sınırlı olmadıklarını bunların yanında artan bölgesel rekabet koşullarında çok önemli bir rol oynadığını da göstermektedir [6]-

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tahsinc@gazi.edu.tr

Geliş / Received: 22.04.2020 Kabul / Accepted: 07.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.689887

E. Dilmen, T. Çetinyokuş

[8]. Ayrıca; havalimanları iki farklı cephe üzerinde ekonomik ve sosyal değerler ortaya koymaktadır. Bunlar iş ile ilgili faaliyetler ve bölgesel ekonominin gelişimi için yapısal faaliyetler olarak tanımlanabilmektedir [9].

Havalimanları; hem havayolu ağları içindeki önemli unsurları hem de yolcular için değişim noktalarını temsil etmeleri nedeniyle hava taşımacılığında önemli bir merkez konumundadırlar. Son yıllarda havalimanlarının fonksiyonları karmaşık hale gelmiştir ve havalimanlarının rolü aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [10];

- i. Seyahat edenler için hem hava ulaşımı açısından çok fazla bağlantı sağlaması hem de havalimanlarına erişim konusunda çok çeşitli ulaşım modu imkânı sunması nedeniyle çok modlu taşımacılık terminalleri haline gelmiştir.
- ii. Oteller, toplantı salonları, spor merkezleri ve birçok ticari faaliyeti içeren birçok büyük havalimanı ekonomik merkez haline gelmiştir.
- iii. Yerel yönetimler tarafından sistematik bir şekilde yönetilen havalimanları, belirli bir bölge için ekonomik büyümenin itici gücü haline gelmiştir.

Havalimanlarının fonksiyonlarının daha karmaşık hale gelerek farklı roller üstlenmesi, metropol bölgelerde hava ulaşım talebini karşılamak için ikincil bir havalimanının değerlendirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Hava ulaşım talebindeki büyüme ve mevcut havalimanları üzerindeki kapasite kısıtlamaları göz önüne alındığında, dünyadaki hava taşımacılığı sistemlerinde gelecekteki talebi karşılamada çoklu havalimanı sisteminin (ÇHS) kilit bir mekanizma olduğu görülmektedir. Çoklu havalimanı sisteminin ortaya çıkabilmesi için; mevcut durumda az kullanılan bir havalimanının geliştirilmesi veya yeni bir havalimanının inşa edilmesi gibi iki yol bulunmaktadır [11].

2019 yılı itibarıyla Türkiye’de İstanbul, Muğla ve Antalya illerinde çoklu havalimanı sistemi ile hava ulaşım talebi karşılanmaktadır. Türkiye’de 2019 yılında İstanbul ilinde yer alan havalimanlarından; birincil havalimanı olan ve yeni hizmete açılan İstanbul Havalimanında 52 milyon yolcu trafiği, ikincil havalimanı olan İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanında ise 35,5 milyon yolcu trafiği ve 2019 yılının Nisan ayına kadar hizmet veren İstanbul Atatürk Havalimanında ise 16,1 milyon yolcu trafiği gerçekleşmiştir. Ayrıca; Muğla ilinde 2019 yılında; Muğla Dalaman Havalimanı yolcu trafiği 4,9 milyon yolcu, Muğla-Milas Bodrum Havalimanı yolcu trafiği ise 4,3 milyon yolcu olarak gerçekleşmiştir. Antalya ilinde ise 2019 yılında; Antalya Havalimanı tarafından 35,6 milyon yolcuya, Gazipaşa Alanya Havalimanı tarafından ise 1,08 milyon yolcuya hizmet verilmiştir.

Ulaştırma problemlerine yönelik literatür çalışmaları incelendiğinde ÇKKV metotlarının son yıllarda sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Zietsman ve Vanderschuren çalışmalarında, potansiyel çoklu havalimanı gelişiminin değerlendirilmesi analizinde AHP yönteminin uygulanmasını ele almışlardır. Mevcut durumda Cape Town’da, Cape Town Uluslararası Havalimanı tarafından hizmet verilmektedir. Çalışmalarında Sosyo-ekonomik gelişmelerle birlikte, mekânsal planlama, ulaşımın gelişimi, çevresel koruma ve finansal sürdürülebilirlik havalimanı gelişiminde temel kriterler olarak ele alınmıştır. Temel paydaşlar ile gerçekleştirilen bir anket ile bu kriterlerin AHP’deki ilişkisel ağırlıkları tespit edilmiştir. Cape Town şehrinde ikinci bir havalimanına geçiş potansiyeli ile ilgili çok kriterli karar verme ile değerlendirme yapılmıştır [12]. Wei çalışmalarında havalimanının genişletilmesinin ardından; havayolu şirketlerinin havalimanına adaptasyonunun ve hizmet seviyesinin geliştirilmesinin; yolculara olan etkilerini ölçecek fayda temelli bir yöntem sorgulamışlardır. Ekonomik ve diğer yerel ve küresel değişikliklerden dolayı meydana gelen hava ulaşım talebindeki dalgalanmalar nedeniyle havalimanlarının yapısının ve boyutlarının ele alınması gerektiğini değerlendirmişlerdir [13]. Özcan; çalışmasında yeni destinasyon seçimi problemi için çok kriterli karar verme yaklaşımlarından bulanık analitik hiyerarşi prosesi ve gri ilişki analizi metodolojileri bütünleştirilerek önermiştir. Önerilen yaklaşımda, Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile her bir kriterin ağırlığı belirlenmiş ve alternatif destinasyonların performansını sıralamada gri ilişki analizi kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği ve uygulanabilirliği Türkiye’deki bir havayolu şirketinden alınan verilerle gerçekleştirilen bir vaka çalışması ile sunulmuştur [14]. Bakır ve Atalık çalışmalarında hizmet kalitesinin havayolu taşımacılığında oldukça önemli bir unsur olmasından hareketle 2016 yılında en fazla yolcu taşıyan 11 havayolu işletmesinin hizmet kalitesi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda havalimanı hizmetleri, lounge hizmetleri, uçak içi hizmetler ve kabin ekibi unsurlarına ilişkin yolcu görüşleri değerlendirme kriteri olarak ele alınmıştır. Öncelikle Entropi yöntemi ile kriter ağırlıkları elde edilmiş, ardından ARAS yöntemi ile havayolu işletmeleri hizmet kalitesine göre değerlendirilerek sıralanmıştır [15]. Altın, Karaatlı ve Budak çalışmalarında Avrupa’nın yolcu sayısı bakımından en büyük 20 havalimanının performanslarını Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile sıralamış ve Veri Zarflama Analizi yöntemiyle de etkinliklerini değerlendirmişlerdir [16].

Yapılan literatür incelemesi sonrasında; ÇHS’nin değerlendirilmesinde önerilmesi, eldeki veri kümesinin uygun olması ve uzman görüşlerinin dahil edilebilmesine elverişli olması nedeniyle ÇKKV yöntemlerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Ankara Esenboğa Havalimanının son 10 yılda uçak trafiği yaklaşık olarak 2 katına, yolcu trafiği ise 3 katına ulaşmıştır. Bu nedenle bu gelişimle ilgili etkileri değerlendirme ihtiyacı ön plana çıkmıştır. Mevcut durumda Ankara ilinin ticari hava ulaşım talebine Ankara Esenboğa Havalimanı tek başına karşılamaktadır. 2018 yılında yaklaşık 16,5 milyon yolcu trafiği gerçekleşmiş olup Türkiye’de sivil hava trafiğine açık havalimanları arasında yolcu ve uçak trafiği açısından 4. sırada yer almaktadır. Mevcut durumda Esenboğa Havalimanı (ESB) 20 Milyon yolcu/yıl terminal kapasitesiyle yıllık 16 Milyon yolcu talebini karşılayabilecek düzeydedir. Ancak DHMİ tarafından yapılan tahminlerde öngörülen yolcu talebi mevcut kapasitenin üzerindedir.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu nedenle bölgenin hava ulaşım talebini tek havalimanı olarak mı karşılamalı yoksa çoklu havalimanı sistemi olarak mı hareket edilmeli sorusu ortaya çıkmıştır. Bu makale Ankara ilindeki havalimanı sistemine ilişkin bir değerlendirme çalışmasının bulgularını özetlemektedir. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı değerlendirme yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

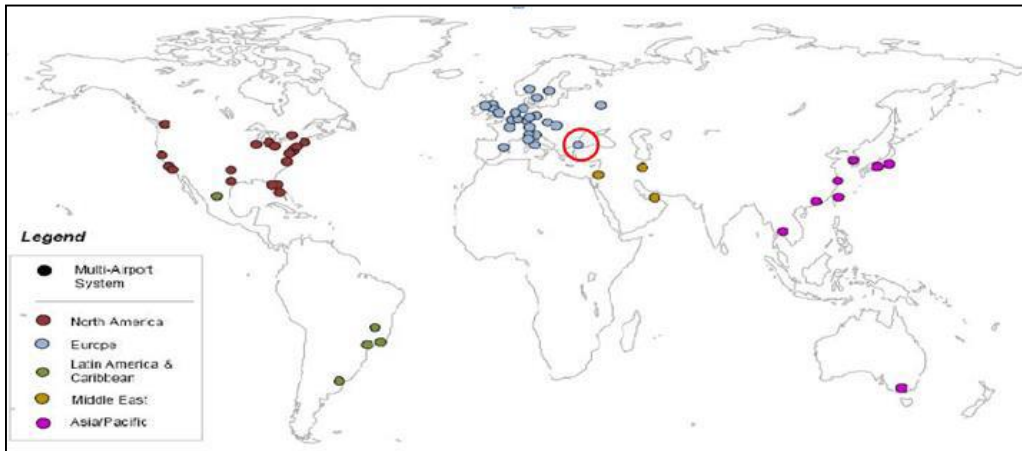
2.1. Çoklu Havalimanı Sistemi (ÇHS)

Yapılan literatür incelemesinde çoklu havalimanı sisteminin havalimanı endüstrisinde önemli bir yere sahip olduğu görülmüştür. Bir ÇHS, her bir havalimanının mülkiyeti veya politik kontrolüne bakılmaksızın metropol bölgede ticari taşımaya hizmet etmek için rekabet eden önemli havalimanları kümesi olarak tanımlanmaktadır [17].

Başarılı çoklu havalimanı sistemlerinin yüksek uçak ve yolcu trafiği seviyesine sahip metropol şehirlerde var olma olasılığı yüksektir. Trafiğin artmasına paralel olarak ikinci bir havalimanı ihtiyacı ve çoklu havalimanı sistemi ortaya çıkmaktadır. Ancak; yüksek bir yolcu trafiği seviyesi tek başına yeterli değildir. Amsterdam çoklu havalimanı sistemini ele alan çalışmada verilen bilgiye göre Atlanta ve Frankfurt Havalimanları kendi kıtalarında ki en yoğun trafiğe sahip havalimanları arasında olmasına rağmen ikisi de çoklu havalimanı sisteminin bir parçası değildir [17],[18]. Bununla birlikte, hem hava talebi seviyesinin hem de düşük maliyetli (low-cost) hava taşıyıcılarının artması, giderek daha önemli bir pazar payı kazanan sözde bölgesel havalimanlarının kullanımını yoğunlaştırmaktadır. Birçok durumda, hizmet alanlarının(catchment area) bir bölümünü paylaşan ve aynı coğrafi bölgeye hizmet veren bazı bölgesel havalimanları vardır, ancak bunların ana merkezinin bir şehir olma zorunluluğu yoktur. Bu tür kümelerdeki havalimanları bölgesel birçok havalimanı sistemini temsil eder. Yolcuya ve yük trafiğine hizmet veren çoklu havalimanı sistemi, havayolu şirketi ve yolcular tarafından belirli bir ölçüde kullanıldığında başarılı olarak kabul edilmektedir. Birincil havalimanı: Çoklu havalimanı sisteminde trafiğin yüzde 20'sinden fazlasına hizmet vermektedir. İkincil havalimanı ise çoklu havalimanı sisteminde toplam trafiğin yüzde 1 ile yüzde 20 arasındaki hizmet vermektedir. İkincil havalimanı hava hizmetlerine kolay erişim sağlandığında, yolcular için cazip olmaktadır [10],[11]. Ancak; transfer yolcular ikinci havalimanları için büyük bir pazar oluşturmaz bu nedenle ikinci havalimanı tek bir bölgede ki yolcu üzerine odaklanmaktadır [17].

Talepteki büyüme ve mevcut havalimanları üzerindeki kapasite kısıtlamaları göz önüne alındığında, ÇHS'nin dünyadaki hava taşımacılığı sistemlerinde gelecekteki talebi karşılamada kilit bir mekanizma olduğu görülmektedir. Tipik olarak, bir ÇHS'nin evrimleşebileceği iki yol, mevcutta az kullanılan bir havalimanının geliştirilmesi veya yeni bir havalimanının inşası yoluyla [11].

Türkiye'de çoklu havalimanı sistemine örnek olarak İstanbul ili verilebilir. İstanbul ilinde İstanbul Havalimanı ve Sabiha Gökçen Havalimanı olmak üzere ticari sivil hava trafiğine açık 2 havalimanı bulunmaktadır. 2018 yılında İstanbul Atatürk Havalimanı yaklaşık 68 Milyon yolcu trafiğine hizmet verirken İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı ise yaklaşık 34 Milyon yolcuya hizmet vermiştir. Küresel ölçekte büyük çoklu havalimanı sistemi örnekleri Şekil 1'de açıkça gösterilmiştir.



Şekil 1. Çoklu havalimanı sistemi

E. Dilmen, T. Çetinyokuş

Genel olarak, iyi bir çoklu havalimanı sisteminin, koordineli bir yönetim yaklaşımı ile desteklenmesi durumunda havalimanının hem işletme hem de altyapı olarak sürdürülebilirliğinin sağlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilmektedir. Bu anlamda, ÇHS, ekonomik ve finansal açıdan daha iyi bir performans sergilemek ve altyapısal rekabetçiliği artırmak için faydalı olabilir [9].

Sonuç olarak, karmaşık ve doğrusal olmayan bir yolun sonucunu temsil eden çoklu havalimanı sisteminin, sürdürülebilir havalimanı modeline yönelik mevcut olan tek alternatif veya geçerli olan benzersiz bir çözüm olarak kabul edilmemesi de gerekmektedir [9]. Uygun çözümlerin irdelenebilmesi adına AHP ve alternatif olarak diğer iki çok kriterli karar verme yöntemiyle karar vericiye destek olacak bir çözüm önerisi ortaya konmuştur.

2.2. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemleri

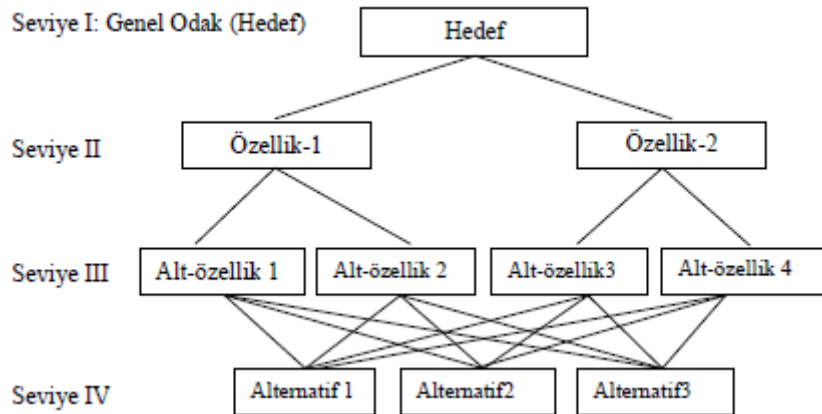
Günümüzde karar verme prosesi mümkün alternatif sayılarının artması, göz önünde bulundurulacak karar kriterlerinin çelişmesi ve değerlerinin birbirine yakınlığı dolayısıyla oldukça karmaşık ve zor bir görev haline gelmiştir. ÇKKV, genellikle çelişen kriterler içeren değerlendirme ve sıralama problemleri için sıklıkla başvurulan güçlü bir araçtır [19].

Ele alınan karar probleminde; karar vericilerin beklentileri, alternatiflerin ve kriterlerin sayısı, verinin miktarı, belirsizlik türü gibi birçok faktör dikkate alınarak hangi yöntemin kullanılacağı belirlenmektedir. Çeşitli amaç ile kullanılan ÇKKV tekniklerinin kullanım alanlarından birisi de ulaştırma problemleridir. Literatürde ulaştırma problemlerinde sıklıkla kullanılan ÇKKV yöntemleri ise AHP, TOPSİS ve ELECTRE yöntemleridir.

2.2.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), ilk olarak 1968 yılında Myers ve Alpert tarafından ortaya atılmış ve 1977 yılında ise Saaty tarafından bir model olarak geliştirilerek karar verme problemlerinin çözümünde kullanılabilir hale getirilmiştir [20]. AHP, belirlilik ve belirsizlik altında çok sayıda alternatif arasından seçim yaparken, çok sayıda karar vericinin bulunduğu, çok faktörlü, çok amaçlı bir karar verme durumunda kullanılır. AHP ayrıca, karar seçeneklerinin değerlendirilmesi ve seçilmesi sürecinde nitel ve nicel karar faktörlerinin de kullanılabilmesini sağlayan bir yöntemdir [21].

Bir karar probleminin yapısını oluşturmada en basit yöntem, üç basamaklı hiyerarşik yapıdır. Bu hiyerarşik yapının en üstünde ana hedef yer alır. Bir alt seviye, kararın kalitesini etkileyecek kriterlerden oluşur. Bu kriterlerin ana hedefi etkileyebilecek özellikleri varsa hiyerarşiye başka kademeler de eklenebilir. Hiyerarşinin en altında alternatifler yer alır. Hiyerarşinin oluşturulmasında seviye sayısı, problemin karmaşıklığına bağlıdır basit bir hiyerarşi yapısı görülmektedir [22]. AHP'nin hiyerarşik yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir [23].



Şekil 2. AHP'nin hiyerarşik yapısı

AHP'de öncelikler üretmek ve organize bir şekilde karar vermek için aşağıdaki adımları izlemek gerekir [24]:

- Karar verme problemi tanımlanır ve istenen bilgi türü belirlenir,
- Daha sonra; en üstte karar amacı, orta seviyede kriterler ve en düşük seviyede alternatifler kümesi olacak şekilde karar hiyerarşisi üst seviyeden en alt seviyeye doğru yapılandırılır,
- Bir dizi ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Üst düzeydeki her öğeyi, bir alt düzeydeki öğelerle karşılaştırmak için kullanılır.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

- Karşılaştırmalardan elde edilen öncelikleri, aşağı seviyedeki öncelikleri ağırlıklandırmak için kullanılır. Bu her eleman için yapılır. En alt seviyedeki alternatiflerin nihai öncelikleri elde edilinceye kadar devam edilir.

Şekil 2 'de Hiyerarşik yapısı gösterilen AHP'de, öncelikle amaç belirlenir ve bu amaç doğrultusunda seçimi etkileyen kriterler ortaya konur. Daha sonra kriterler göz önüne alınarak potansiyel alternatifler belirlenir. Sonuçta karar için hiyerarşik bir yapı oluşturulmuş olur. Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra her bir kriter temelinde alternatiflerin karşılaştırılması ve kriterlerin kendi aralarında karşılaştırılması için ikili karşılaştırma karar matrisleri oluşturulur. Bu matrislerin oluşturulmasında Saaty tarafından önerilen 1-9 önem skalası Tablo 1 'de gösterilmiştir [25].

Tablo 1. Saaty'nin 1-9 Skalası

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önemde	İki kriter amaca eşit katkıda bulunuyor.
3	Biraz Önemli	Deneyimler ve yargılar bir kriteri diğerine karşı biraz önemli kılmaktadır.
5	Fazla Önemli	Deneyimler ve yargılar bir kriteri diğerine karşı güçlü şekilde önemli kılmaktadır.
7	Çok Fazla Önemli	Kriter diğerine göre çok güçlü şekilde üstündür.
9	Son Derece Önemli	Eldeki bilgiler ve deneyimler bir kriterin diğerine göre çok büyük oranda üstün olduğunu belirtmektedir.
2,4,6,8	Ara Önem Dereceleri	Ara değerler (Uzlaşma gerektiğinde)

Önem derecesinde yer almayan 2, 4, 6, 8 gibi değerler ara değerlerdir. Örneğin karar verici 1 ve 3 arasında kararsız kalırsa 2 değerini kullanabilir. İkili karşılaştırmalar, AHP'nin en önemli aşamasıdır. İkili karşılaştırmaları elde etmek için göreceli veya mutlak ölçümler kullanılır. Bunlardan elde edilen bilgilere göre AHP'de yargılar bir matrise dönüştürülür. a_{ij} , i. özellik ile j. özelliğin ikili karşılaştırma değeri olarak gösterilecek olursa, $a_{ji} = 1 / a_{ij}$ eşitliğinden elde edilir [25].

İkinci adımda; ikili karşılaştırma matrisleri (A) ve üstünlükler belirlenir. Amaç, kriterler ve alt kriterler belirlendikten sonra kriterlerin ve alt kriterlerin kendi aralarında önem derecelerinin belirlenmesi için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Karar verici kriter matrisi veya alternatif matrisi için kriterleri veya alternatifleri ikili olarak karşılaştırır [26].

Üçüncü adım ilişki matrislerinin normalleştirme işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu işlem her bir matris sütununun toplamının bütün sütun elemanlarının değerlerine bölünmesiyle sağlanır. Normalleştirilmiş matris kullanılarak her bir kriter için yüzde önem ağırlıkları belirlenir. AHP sürecinin son adımı kriterlerin önem ağırlıkları ile alternatiflerin önem ağırlıklarının çarpımı ve her bir alternatife ait öncelik değerinin bulunmasıdır. En yüksek değeri alan alternatif, karar problemi için en iyi alternatiftir [27].

2.2.2. ELECTRE Yöntemi

ELECTRE yöntemi alternatiflerin yani karar verme birimlerinin (KVB) birbirleri ile kıyaslanması ve en iyi tercihin belirlenmesi özellikleri ile öne çıkan yöntemdir. Yapılan bu işlem kıyaslama sonucunda bir sıralama işlemidir ve bütün alternatifler kriter değerlerine ve ağırlıklarına göre birbirleri ile karşılaştırılır ve göreceli olarak en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Böylece alternatifler birbirlerine sağladıkları üstünlük sonucunda diğerlerine göre tercih edilme sıralaması elde edilmiş olur. Bu şekilde ELECTRE yönteminin aşamaları sonucunda en uygun alternatife ulaşılabilecektir [28].

ELECTRE yöntemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır [29]:

Adım1.Karar matrisinin normalleştirilmesi:

Bu adımda aşağıdaki denklemi kullanarak karar matrisindeki çeşitli birimler boyutsuz karşılaştırılabilir birimlere dönüştürülür.

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M a_{ij}^2}} \quad (1)$$

Bu nedenle, normalleştirilmiş X matrisi Eş.2'deki gibi tanımlanır:

E. Dilmen, T. Çetinyokuş

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada M, alternatiflerin sayısını, N, kriterlerin sayısını ve x_{ij} , j'inci kriter açısından "i" alternatifinin yeni ve boyutsuz tercih ölçüsüdür.

Adım2. Normalleştirilmiş karar matrisinin ağırlıklandırılması

Karar verici öncelikle değerlendirme faktörlerinin ağırlıklarını (w_i) belirlemelidir. Daha sonra normalize edilmiş X matrisinin her bir sütunundaki elemanlar ilgili w_i değeri ile çarpılarak ağırlıklı normalize matris (Y) oluşturulur. Y olarak belirtilen ağırlıklı matris Eş.3'te yer almaktadır [30]:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 x_{11} & w_2 x_{12} & K & w_n x_{1n} \\ w_1 x_{21} & w_2 x_{22} & K & w_n x_{2n} \\ M & M & M & M \\ w_1 x_{m1} & w_2 x_{m2} & K & w_n x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım3. Uyum ve uyumsuzluk setlerinin belirlenmesi:

Uyum ve uyumsuzluk kümelerinin belirlenebilmesi için W matrisinden yararlanılır. Bu aşamada alternatifler birbirleriyle kriterler açısından karşılaştırılır. Uyum kümesi C, uyumsuzluk kümesi D ile gösterildiğinde, tüm alternatifler için oluşturulan uyum ve uyumsuzluk kümeleri Eş.4 ve Eş.5'den yararlanarak belirlenir [28].

$$C_{kl} = \{v_{kj} \geq v_{ij}\}, \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

$$D_{kl} = \{v_{kj} < v_{ij}\}, \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (5)$$

Adım4. Uyum ve uyumsuzluk kümelerinin oluşturulması

Uygunluk matrisindeki C elemanların bağlı değeri uygunluk endeksi vasıtasıyla hesaplanır. Uygunluk indeksi C_{kl} , uyumluluk kümesinde yer alan kriterlerle ilgili ağırlıkların toplamıdır. C_{kl} uygunluk indeksi aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$C_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} W_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (6)$$

Uyumluluk matrisi ise Eş.7'deki gibi gösterilmektedir [28].

$$C = \begin{bmatrix} - & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & - & c_{23} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \dots & - \end{bmatrix} \quad (7)$$

Uyumsuzluk matrisi D; A_k belirli alternatiflerin rakip alternatif A_l 'ye göre önemsizlik derecesini açıklamaktadır. Uyumsuzluk matrisinin d_{kl} değerleri Eş.8 yardımıyla hesaplanmaktadır [28].

$$d_{kl} = \frac{\max_{j \in D_{kl}} |v_{kj} - v_{ij}|}{\max_j |v_{kj} - v_{ij}|} \quad (8)$$

Adım5. Uyum ve uyumsuzluk baskınlık matrislerini belirleme

Alternatif A_k 'nın alternatif A_l 'ye üstünlük sağlaması için, uyum değeri C_{kl} 'nin en az eşik değere eşit olması gerekmektedir ($c_k \geq c$). Eşik değeri c ortalama uyum indeksi olarak belirlenebilir Eş.9 yardımıyla hesaplanabilir.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

$$\underline{c} = \frac{1}{M(M-1)} \times \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M c_{kl}^* \quad (9)$$

Eşik değeri temel alan uygunluk baskınlığı matrisi F aşağıdaki gibi belirlenir:

$$f_{kl} = 1, \text{ ise } c_{kl} \geq \underline{c} \quad f_{kl} = 0, \text{ ise } c_{kl} < \underline{c} \quad (10)$$

Benzer şekilde, uyumsuzluk baskınlığı matrisi G, bir eşik değeri d kullanılarak tanımlanır, d aşağıdaki gibi ifade edilir [29].

$$\underline{d} = \frac{1}{M(M-1)} \times \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M d_{kl}^* \quad (11)$$

Uyumsuzluk üstünlük matrisi G'nin elemanları (g_{kl}), 0 ya da 1 değerlerini alır (köşegen değerleri aynı alternatifleri gösterdiğinden tanımlanamaz) ve bu değerler Eş.12 kullanılarak belirlenir [28].

$$g_{kl} = 1, \text{ ise } d_{kl} \geq \underline{d} \quad g_{kl} = 0, \text{ ise } d_{kl} < \underline{d} \quad (12)$$

Adım6. Toplam üstünlük matrisini belirleme

Sonuç olarak F ve G matrisleri yardımıyla tkl elemanlarından oluşan T toplam baskınlık matrisi bulunur [31]:

$$t_{kl} = f_{kl} \times g_{kl} \quad (13)$$

Adım7. Daha az uygun alternatifleri ortadan kaldırma

Toplam baskınlık matrisinden, alternatiflerin kısmi tercih sırasını alabiliriz. $t_{kl} = 1$ ise, bu hem uyum hem de uyumsuzluk kriterleri kullanılarak A_k 'nin A_l 'ye tercih edildiği anlamına gelir. Toplam baskınlık matrisinin herhangi bir sütununda 1'e eşit en az bir element varsa, bu sütuna karşılık gelen satırın egemen olduğu "ELECTREally" dir. Bu nedenle, 1'e eşit bir elemana sahip tüm sütunları kaldırırız. O zaman, en iyi alternatif, diğer tüm alternatifleri bu şekilde baskın olandır [29].

2.2.3. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS (Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution) yöntemi, karar vericiler tarafından sıkça kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise, sınırlı sayıda öznel girdiye ihtiyaç duymasıdır. Yöntemde kullanılan tek öznel değişken faktör ağırlıklarıdır. Basit ve anlaşılabilir olması ve iyi bir hesaplama etkinliğine sahip olması bu yöntemin temel özellikleridir [32].

Adım1. Karar matrisinin (A) oluşturulması

Karar matrisinin satırlarında üstünlükleri sıralanmak istenen karar noktaları, sütunlarında ise karar vermede kullanılacak değerlendirme faktörleri yer alır. A matrisi karar verici tarafından oluşturulan başlangıç matrisidir. Karar matrisi Eş.14'teki gibi gösterilir:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A_{ij} matrisinde m karar alternatifi sayısını, n ise problemde yer alan kriter sayısını belirtir.

Adım 2. Normalize edilmiş karar matrisinin (r) oluşturulması

Normalize Edilmiş Karar Matrisi, A matrisinin elemanlarından yararlanarak ve Eş.15 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, p) \quad (15)$$

R matrisi aşağıdaki gibi elde edilir:

E. Dilmen, T. Çetinyokuş

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mp} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Adım3. Ağırlıklı normalize karar matrisinin (v) oluşturulması

Öncelikle değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlık değerleri (w_i) belirlenir.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (17)$$

Daha sonra R matrisinin her bir sütunundaki elemanlar ilgili w_i değeri ile çarpılarak V matrisi oluşturulur. V matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$V_{ij} = r_{ij} \times w_{ij} \quad (18)$$

Değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlıklar W₁,W₂,... W_n şeklinde belirlenir. Oluşturulacak ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi için, R matrisinin sütunlarındaki değerler ilgili değerlendirme faktörü ağırlık değerleri ile çarpılmış ve V matrisinin sütunları hesaplanmaktadır.

Adım 4. İdeal (A^{*}) ve negatif ideal (A⁻) çözümlerin oluşturulması

TOPSIS yöntemi, her bir değerlendirme faktörünün monoton artan veya azalan bir eğilime sahip olduğunu varsaymaktadır. İdeal çözüm setinin oluşturulabilmesi için V matrisindeki ağırlıklandırılmış değerlendirme faktörlerinin yani sütun değerlerinin en büyükleri (ilgili değerlendirme faktörü minimizasyon yönlü ise en küçüğü) seçilir. İdeal çözüm setinin bulunması aşağıdaki formülde gösterilmiştir.

- Pozitif ideal çözüm için:

$$A^* = \{(max_i v_{ij} \mid j \in J), (min_i v_{ij} \mid j \in J')\} A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (19)$$

- Negatif ideal çözüm için:

$$A^- = \{(min_i v_{ij} \mid j \in J), (max_i v_{ij} \mid j \in J')\} A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (20)$$

Adım 5. Ayırım Ölçülerinin Hesaplanması

TOPSIS yönteminde her bir karar noktasına ilişkin değerlendirme faktör değerinin İdeal ve negatif ideal çözüm setinden sapmalarının bulunabilmesi için Euclidian Uzaklık Yaklaşımından yararlanılmaktadır. Buradan elde edilen karar noktalarına ilişkin sapma değerleri ise İdeal Ayırım (S_i⁺) ve Negatif İdeal Ayırım (S_i⁻) Ölçüsü olarak adlandırılmaktadır. İdeal ayırım (S_i⁺) ve negatif ideal ayırım (S_i⁻) ölçüleri aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (21)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (22)$$

Burada hesaplanacak S_i⁺ ve S_i⁻ sayısı doğal olarak karar noktası sayısı kadar olacaktır.

Adım 6.İdeal çözüme göreli yakınlığın hesaplanması

Her bir karar noktasının ideal çözüme göreli yakınlığının (C_i⁺) hesaplanmasında ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinden yararlanılır. Burada kullanılan ölçüt, negatif ideal ayırım ölçüsünün toplam ayırım ölçüsü içindeki payıdır. İdeal çözüme göreli yakınlık değerinin hesaplanması Eş.23'te gösterilmiştir.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (23)$$

Burada C_i⁺ değeri 0 ≤ C_i⁺ ≤ 1 aralığında değer alır ve C_i⁺ = 1 ilgili karar noktasının ideal çözüme, C_i⁺ = 0 ilgili karar noktasının negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını gösterir.

Adım 7. Her bir alternatifin göreceli sıralamasının ve puanının bulunması

Bir önceki adımda elde edilen değerler, büyüklük sırasına göre dizilerek karar noktalarının (alternatiflerin) önem sıraları belirlenmektedir.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Havalimanları yaşadığımız dünya üzerinde önemli bir etkiye sahip olan havacılık endüstrisinin önemli bir bileşenidir. Dünyada hava ulaşımına olan talebin yıldan yıla büyük artışlar göstermesi havalimanlarının şehir havalimanı konseptine dönüşerek bu endüstrideki rollerinin giderek artması havalimanının kapasitesi, beklenen büyümesi gibi konularının değerlendirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Dünyada birçok metropol bölgede hava ulaşım talebi çoklu havalimanı sistemi ile karşılanmaktadır. Ülkemizde de İstanbul ili ÇHS sistemine örnek gösterilebilir. Bununla birlikte; Esenboğa Havalimanının artan hava ulaşım talebi, büyüme hızı, ülkemizdeki konumu ve hub olma potansiyeli gibi faktörler de Ankara ilinde çoklu havalimanı sisteminin değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle çalışmada; Ankara ilinin gelecekteki talebi ikinci bir havalimanı inşa ederek çoklu havalimanı sistemi ile karşılamasının bölge için mevcut havalimanının genişlemesinden daha faydalı olup olmadığı değerlendirilmektedir.

3.1. Havalimanı Gelişiminde Kriter Seçimi ve Ağırlıklandırma

Kriter seçimi, bir projenin değerlendirilmesinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Kriterler veya performans ölçüleri bir sistemin belirli bir hedefe göre performansını gösteren değişkenlerdir [33]. Seçilen kriterler nihai kararı yönlendirmektedir:

Havalimanının gelişimiyle ilgili kriterler hakkında bilgi toplamak ve rehberlik için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucu havalimanı gelişiminde tanımlanan 5 tema; sosyo-ekonomik gelişim, mekânsal – kentsel planlama, ulaşımın iyileştirilmesi ve etkinliği, çevresel koruma ve finansal yapılabirlik olarak kategorize edilmiştir. Literatür araştırmaları, uzman görüşleri ve paydaşlardan faydalanılarak havalimanının gelişiminde rol oynayan toplamda 5 ana kriter tanımlanmıştır. Tanımlanan 5 ana kriter aşağıda ifade edilmiştir [34]:

Sosyo-ekonomik gelişim: Toplumun sosyo-ekonomik hedeflerine ulaşmasına atıfta bulunmaktadır. İstihdamın, iş faaliyetlerinin ve ekonomik verimliliğin artması gibi hedefleri içermektedir [35],[36].

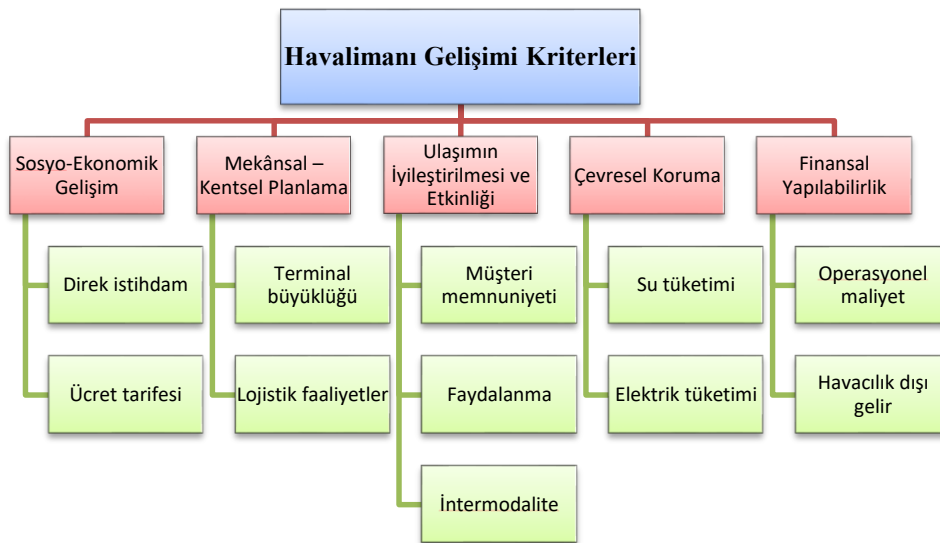
Mekânsal – kentsel planlama: Çeşitli ölçekte alanların, faaliyetlerin ve insanların dengeli dağılımı ile ilişkilidir. Mekânsal planlama; toplumun ekonomik, kültürel, sosyal ve ekolojik politikalarını coğrafik olarak açıklamaktadır [37].

Ulaşımın iyileştirilmesi ve etkinliği: Önerilen projede mobilitenin sağlanması hedeflenmektedir. İnsanların ve malların taşınmasının yanı sıra faaliyetlere erişilebilirlik de önem arz etmektedir [35].

Çevresel koruma: Havalimanının gelişimi ve havacılıkla ilgili çevresel etkiler; gürültü, hava kirliliği, karbon emisyonu, su ve elektrik tüketimiyle ilişkili olup vahşi hayatın ve doğal kaynakların korunması önem arz etmektedir [38].

Finansal yapılabirlik: Havalimanının gelişimi veya yeni havalimanının inşa maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle finansal yapılabirlik işletmecilerin kararlarında ön planda yer almaktadır. Finansal yapılabirlik; bir işletmenin hedeflerine ve uzun vadede misyonuna ulaşmak için maliyetlerini karşılayacak yeterli gelir elde etmeyi ifade eder [39].

Bu kapsamda havalimanı sisteminin ÇKKV yöntemiyle değerlendirilmesinde kullanılan ana ve alt kriterler Şekil 3'te gösterilmektedir.

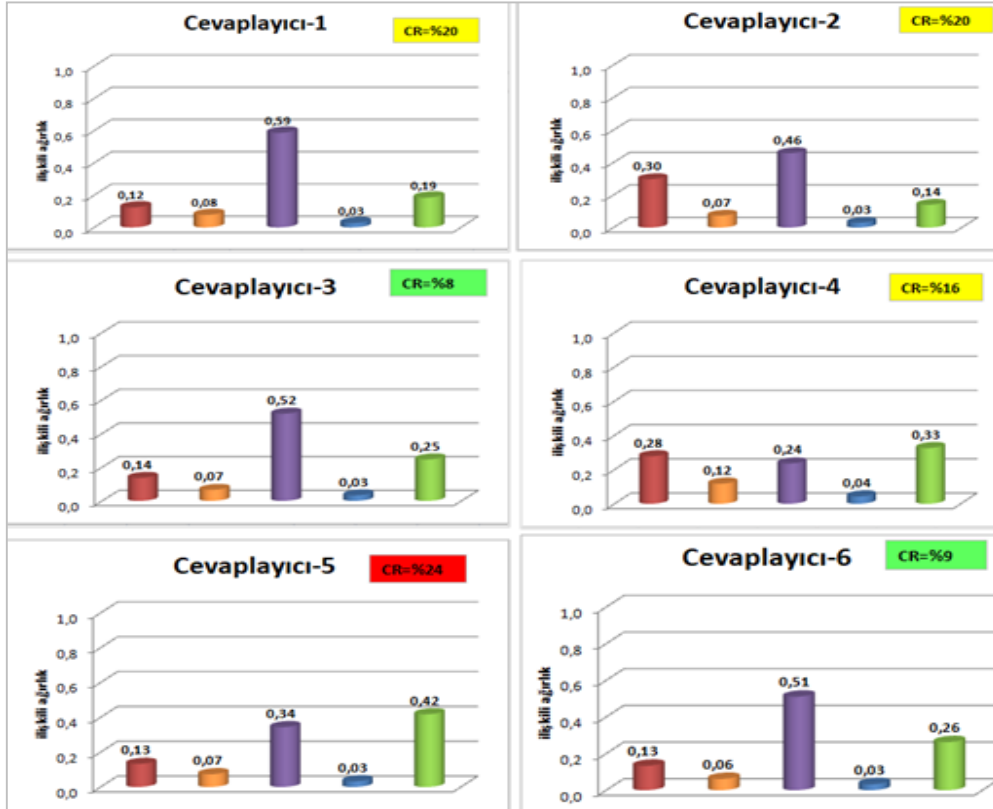


Şekil 3. Havalimanı gelişimi için seçilen kriterler

E. Dilmen, T. Çetinyokuş

Kriterlerin ve alt kriterlerin hiyerarşik gösterimi Şekil 3'te sunulmuştur. 5 kriter ve 11 alt kriterden oluşmaktadır. İkili karşılaştırmalar için gerekli veriler anket yoluyla elde edilmiştir. Anketin anlaşılabilirliğini arttırmak için uzman görüşlerinin alınması öncesinde kriterler ve anket formu hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Anket çalışması, havacılık konusunda tecrübe sahibi ve havalimanının gelişimi konusunda görev alan farklı birimlerdeki uzmanlara uygulanmıştır.

Birden fazla karar verici bulunması nedeniyle sonuçları tek değere dönüştürmek için aritmetik ortalama yöntemi kullanılmıştır. Uzmanlara yapılan anketlerin öncelikle tutarlılık indeksi ardından da tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Tutarlılık oranı için renk kodlaması yapılmıştır. Tutarlılık oranı yüzde on veya altında ise yeşil (kararlar arasında iyi tutarlılık), yüzde on ile yirmi arasında ise sarı (kararda daha az kabul edilebilirlik), yüzde yirminin üzerinde ise kırmızı (tutarsız bu nedenle güvenilir) olarak tanımlanmıştır. Tutarsız olan anketler uzmanlara verilerek yeniden puanlamaları istenmiştir. Anket yapılan uzmanlar gruplandırılmış olup 6 gruba ilişkin tutarlılık oranları Şekil 4'te gösterilmektedir. Anket sonucunda kriterlere ilişkin hesaplanan ağırlıklar aşağıda yer almaktadır.



Şekil 4. Tutarlılık oranları

Anket sonucu elde edilen ana kriterlerin ağırlıkları Tablo 2 'de yer almaktadır.

Tablo 2. Kriter Ağırlıkları

$$\begin{pmatrix} \text{Sosyo – Ekonomik Gelişim} \\ \text{Kentsel – Mekansal Planlama} \\ \text{Ulaşımın İyileştirilmesi} \\ \text{Çevresel Koruma} \\ \text{Finansal Yapılabilirlik} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,197 \\ 0,115 \\ 0,355 \\ 0,077 \\ 0,256 \end{pmatrix}$$

3.2. Alternatiflerin Sıralanması

Ele alınan ilk alternatif "ALT 0: THS" (tek havalimanı sistemi), ikinci alternatif ise "ALT 1: ÇHS" (çoklu havalimanı sistemi) olarak ifade edilmektedir. Bu analizin limiti olarak toplam hava trafiği talebi 24 milyon yolcu seçilmiştir. 24 milyon yolcu trafiğinin eşik olarak seçilme nedenleri aşağıda yer almaktadır.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

- DHMİ tarafından yapılan Master Planda Esenboğa Havalimanının 24 milyon yolcu öngörüsü 2025 yılı için yapılmıştır. Havacılık teknolojisinin değişmesi, hava seyahatindeki değişimler, havalimanı kavramının şehir havalimanları kavramına dönüşmesi, yolcu talebinin itici güçleri nedeniyle çalışmayı yönlendiren varsayımların en az 5 yılda bir değiştirilmesi gerekmektedir.
- Esenboğa Havalimanının 2018 yılı yolcu trafiğinin 16,7 milyon olarak gerçekleşmesi nedeniyle bu analiz de 18 milyon ile 24 milyon yolcu trafik aralığı test edilmektedir. Başlangıç noktası olan 18 Milyon yolcu trafiği ESB'nin mevcut kapasitesini göstermektedir. Yapılan çalışma ile Ankara ilinin hava ulaşım talebini ESB ile mi yoksa ikinci bir havalimanı ile mi karşılamaya devam edeceği değerlendirilmiştir.

3.2.1. AHP metodu ile çoklu havalimanı sisteminin değerlendirilmesi

Çoklu havalimanı sisteminde her bir havalimanının bölgesel bir ÇHS'deki rolünü/sıralamasını belirlemede ÇKKV yöntemleri kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem ise puanlama yöntemi ve AHP'dir [40]. AHP her alternatif için puanları ikili karşılaştırmalar temelinde hesaplar [41].

Baskınlık hiyerarşisine yani iki veya daha fazla katmandan oluşan bir ağaç yapısına dayanır. İlk katman genel olarak değerlendirme sürecinin genel hedefine karşılık gelirken ikinci katman (ve varsa diğerleri) hedefin içeriğini ve anlamını belirleyen farklı kriterleri ifade eder [40].

Çalışmada aşağıdaki AHP adımları sırasıyla izlenerek performans puanları oluşturulmuştur.

Adım1: Değerlendirme için alternatiflerin tanımlanması:

Değerlendirilen alternatifler Şekil 5'de gösterilmektedir. Bunlar ALT0 da 24 milyon yolcu trafiğine THS ile hizmet vermek ve ALT1 de 12'şer milyon yolcu trafiğinde iki havalimanını ile (ESB ve İkinci Havalimanı) hizmet verilmesi olarak tanımlanmıştır. Esenboğa Havalimanının 2018 yılı yolcu trafiğinin 16,7 milyon yolcu olarak gerçekleşmesi ve 2019 yılı için yapılmış olan projeksiyonlar da yolcu trafiğinin bu değer üzerinde yaklaşık 17 milyon yolcu olarak gerçekleşeceği ihtimaliyle, gerçekleşmesi öngörülen trafiğin üzerindeki yolcu trafiği aralığına hizmet verilme durumları sorgulanmıştır. Bu sebeple çalışmada 18 milyon ile 24 milyon yolcu trafik aralığı testi yer almıştır.

Adım2: Her alternatifler için kriterlerin niteliksel ve niceliksel değerlendirmesi:

Niceliksel değerlendirme ESB ve potansiyel ikinci havalimanı için ayrı ayrı yapılmaktadır. Bu çalışmada potansiyel yeni havalimanı ikinci havalimanı olarak adlandırılacaktır. Daha önce oluşturulan ilişki denklemleri kullanılarak her bir alternatif için elde edilen etki tablosu Şekil 5'de gösterilmektedir. Aşağıda verilen maddeler iki alternatif için etki tablosunun niceliğinin belirlenmesinde yol gösterici olarak kullanılmıştır.

ALT0:Kurulan ilişki denklemleri kullanılarak her bir göstergenin niceliğini belirleyin (Not: Terminal büyüklüğü; ESB'nin terminal büyüklüğünden daha az olmalıdır).


ALT 1: Her iki havalimanının da 12 milyon yolcu trafiğine hizmet verdiği düşünülerek her göstergenin niceliğini belirleyin. Her göstergenin ALT1 durumunda niceliksel değerlendirmesi aşağıdaki gibidir [34].

Her iki durumda da;

- Çalışan sayısını toplayın.
- Minimum ücret tarifelerini seçin.
- Terminal büyüklüklerini toplayın.
- Lojistik faaliyetleri toplayın.
- Minimum uçtan uca işlem süresini seçin.
- Minimum faydalanmayı seçin.
- Maksimum mod seçeneği sayısını seçin.
- Su tüketimini toplayın
- Elektrik tüketimini toplayın.
- Operasyonel giderlerini toplayın.
- Her iki durumda da havacılık dışı gelirler toplayın.

Kurulan ilişkiler sonucu elde edilen denklemler kullanılarak her iki alternatif için indikatörlerin niceliksel değerleri bulunmuştur. Her iki alternatif için de etki tablosu oluşturulurken ilişki denklemleri kullanılmıştır. Etki tablosu oluşturulurken aynı yolcu trafiğine tek havalimanı ile hizmet verildiği durumdaki alt kriter değerleri ile iki havalimanının olduğu ve her iki havalimanının da eşit trafiğe hizmet verdiği durumdaki alt kriter değerleri oluşturulmuştur.

ALT1'de ESB ve ikinci havalimanı için ayrı ayrı 12 milyon yolcu trafiği dikkate alınarak indikatörlerin değerleri hesaplanarak her bir havalimanı için elde edilen değerler toplamı her bir indikatör için Şekil 5'de gösterilmektedir. Şekil 5'deki değerlere bakıldığında iki havalimanı ile hizmet verirken istihdama katkı daha fazlayken havacılık dışı gelir daha az olarak hesaplanmış operasyonel maliyet, elektrik ve su tüketimi ise tek havalimanı sistemine göre daha fazla hesaplanmıştır.

İndikatörler	ALT 0	ALT 1
		
1) Çalışan Sayısı	1.198,91	1.425,47
2) Bilet Fiyatları (TL) (minimum)	293,00	173,00
3) Terminal Büyüklüğü (m ²)	238,65	162,29
4) 20 km Yarıçapındaki Lojistik Faaliyet	22	28
5) Müşteri Memnuniyeti (dk.)	0,0204	0,0077
6) Faydalanma (%) (minimum)	0,47	0,36
7) İntermodalite	5,00	4,00
8) Su Tüketimi (m ³)	410.766,96	432.420,48
9) Elektrik Tüketimi (1.000.000 kWh yıllık)	46,92	46,04
10) Operasyonel Maliyet (bin TL)	141.410,54	151.234,49
11) Havacılık Dışı Gelir Potansiyeli (milyon TL/yıl)	255,84	202,70

Şekil 5. ALT0 ve ALT1 için örnek olay etki tablosu

Adım3:Saaty'nin 9'lu ölçeği kullanılarak alternatiflerin performanslarının karşılaştırılması:

Her ne kadar her bir ikili karşılaştırmayı değerlendirmek için Şekil 5'deki etki tablosunda verilen nicel değerler derecelendirmeyi yönlendirmek için kullanılsa da hala bir öznellik bulunmaktadır. Bu adımda indikatörleri standartlaştırmak için Saaty'nin 9 skalası kullanılmıştır. Performans değerlendirmesinde kullanılan derecelendirme ölçeği Tablo 3'te verilmiştir [34].

Tablo 3. Değerlendirmede kullanılan Saaty'nin ölçeği

Önem Ölçeği	Tanım	Açıklama	$\frac{\text{İndikatör ALT}_i}{\text{İndikatör ALT}_j}$
1	Eşit önem derecesi	Amaç için iki seçenek eşit derecede öneme sahiptir	$1.0 \leq x < 1.1$
2	Ara değer	Uzlaşmış ortalama değerler	$1.1 \leq x < 1.2$
3	Orta derece önemli	Deneyim ve tecrübe bir kriteri değerine karşı biraz üstün kılmaktadır	$1.2 \leq x < 1.3$
4	Ara değer	Uzlaşmış ortalama değerler	$1.3 \leq x < 1.4$
5	Kuvvetli derecede önemli	Deneyim ve tecrübe bir kriteri değerine karşı oldukça üstün kılmaktadır	$1.4 \leq x < 1.5$
6	Ara değer	Uzlaşmış ortalama değerler	$1.5 \leq x < 1.6$
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Birinin diğerine olan üstünlüğü pratikte gösterilmiştir	$1.6 \leq x < 1.7$
8	Ara değer	Uzlaşmış ortalama değerler	$1.7 \leq x < 1.8$
9	Aşırı derecede önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıtlar vardır	$x \geq 1.8$

Tablo 3 'te yer alan skala kullanılarak alternatifler her bir indikatöre göre karşılaştırılmıştır. Toplamda 11 indikatör için ikili karşılaştırma yapılmıştır.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Adım4: Her indikatöre göre alternatiflerin önceliklerinin hesaplanması [34]:Her alternatifin her indikatöre göre ağırlıklarının önceliklendirilmesi için ağırlık vektörünün hesaplanması $AW=\lambda \max W$ ve $|\lambda \max I-A|=0$; gerekmektedir. Şekil 6'da alt kriterlerin her iki alternatifte göre değerleri yer almaktadır. Söz konusu değerler Tablo 2'de yer alan karşılaştırma ölçeği kullanılarak her 2 alternatifin alt kriter bazında karşılaştırmaları yapılmış ve sonucunda alternatiflerin önceliklendirme ağırlıklarının yer aldığı Tablo 4 elde edilmiştir.

Tablo 4. Alternatiflerin önceliklendirme ağırlıkları

	İndikatörler										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ALT 0	67%	13%	17%	75%	10%	80%	75%	50%	50%	50%	75%
ALT 1	33%	88%	83%	25%	90%	20%	25%	50%	50%	50%	25%

11 numaralı indikatöre göre alternatiflerin ağırlıkları hesaplandığında Tablo 4'te görüldüğü üzere ALT0'ın öncelik değeri %75 iken ALT1 'in değeri ise %25'tir. 11 numaralı indikatöre göre değerlendirilmede ALT0'ın ALT1'den daha güçlü bir önem derecesine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Adım 5: Bütün puanlamalara göre alternatiflerin önceliklerinin değerlendirilmesi: Alternatiflerin genel sıralamasının belirlemek için aşağıdaki adımlar izlenmelidir. İlk olarak indikatörlerin göreceli ağırlığının belirlenmesi gerekir. Bunu yapmak için indikatörlerin ağırlığı 5 farklı ana kriterin genel ağırlığı ile çarpılmalıdır. Kriterlerin göreceli ağırlıkları Tablo 5'te yer almaktadır. İkinci olarak; doğrusal alternatiflerin önceliklendirme ağırlığı (Bkz. Tablo 4) ile her bir indikatörün göreceli ağırlığı ile matris çarpımı yapılarak alternatiflerin performans puanı hesaplanır. Bu hesaplamının sonucu Şekil 6'da gösterilmektedir.

Tablo 5. Kriterlerin göreceli ağırlıkları

Havalimanı Gelişimi	İlişkili Ağırlık	İndikatörler	İndikatör Ağırlıkları	Göreceli Ağırlık
Sosyo Ekonomik Gelişim	19,74%	Direk işçilik/Doğrudan İstihdam	50%	10%
		Ücret Tarifesi	50%	10%
Mekânsal/Kentsel Planlama	11,45%	Terminal Büyüklüğü	50%	6%
		20 km yarıçapındaki lojistik faaliyet	50%	6%
Ulaşımın İyileştirilmesi ve Gelişimi	35,54%	Müşteri memnuniyeti (uçtan uca erişim) (dk.)	33%	12%
		Faydalanma/Kullanma	33%	12%
		İntermodallık	33%	12%
		Su Tüketimi (m3)	50%	4%
Çevresel Koruma	7,70%	Elektrik Tüketimi (1.000.000kwh)	50%	4%
		Operasyonel maliyet	50%	13%
Finansal Yapılabilirlik	25,57%	Havacılık dışı gelir potansiyeli (Milyon TL/yıl)	50%	13%

İNDİKATÖRLER												İndikatör	Göreceli Ağırlık	=	S _i	
ALT 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				ALT 0	ALT 1
	67%	13%	17%	75%	10%	80%	75%	50%	50%	50%	75%	1	10%			
	33%	88%	83%	25%	90%	20%	25%	50%	50%	50%	25%	2	10%			
												3	6%			
												4	6%			
												5	12%			
												6	12%			
												7	12%			
												8	4%			
												9	4%			
												10	13%			
												11	13%			
														ALT 0	52,4%	
														ALT 1	47,6%	

Şekil 6. Alternatiflerin performans değerleri

E. Dilmen, T. Çetinyokuş

ÇKKV yöntemlerinde en yüksek sıralamaya sahip alternatif tercih edilmektedir. Bu çalışmada ALT0 için Si değeri 0,524 iken ALT1 için Si değeri 0,476 olarak hesaplanmıştır. AHP metodunda Si değerinin toplamı 1 olmalıdır. Sonuç olarak; Şekil 6'da da görüldüğü üzere ALT0 tercih edilen alternatif olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmanın hedefleri doğrultusunda her alternatif ve farklı yolcu trafiği talepleri için daha önceki bölümde incelenen ilişkiler ve ağırlıklar kullanılarak performans puanları Excel'de hesaplanmıştır. Analiz 1 milyon yolcu trafiği aralığında 18 milyondan 24 milyona kadar farklı yolcu talepleri için yapılmıştır. Performans puanları; 1) toplam yolcu talebinin mevcut havalimanı tarafından verildiği ALT0 ve 2) toplam yolcu talebinin çoklu havalimanı sisteminde paylaştırıldığı ALT1 olarak iki alternatif içinde hesaplanmıştır.

Tablo 6. Performans puan sonuçları özeti

		TOPLAM YOLCU TALEBİ (MİLYON YOLCU /YIL)													
		18		19		20		21		22		23		24	
		ALT 0	ALT 1	ALT 0	ALT 1	ALT 0	ALT 1	ALT 0	ALT 1	ALT 0	ALT 1	ALT 0	ALT 1	ALT 0	ALT 1
ALTI-ÇHS'de mevcut havalimanı tarafından karşılanan trafik hacmi (milyon yolcu/yıl)	16	0,5476	0,4524	0,5296	0,4704	0,5131	0,4869	0,5023	0,4977	0,5048	0,4952	0,5044	0,4956	0,5015	0,4985
	17	0,5387	0,4613	0,5333	0,4667	0,5189	0,4811	0,5131	0,4869	0,5023	0,4977	0,5065	0,4935	0,5044	0,4956
	18			0,5196	0,4804	0,5333	0,4667	0,5189	0,4811	0,5025	0,4975	0,5023	0,4977	0,5113	0,4887
	19					0,5196	0,4804	0,5333	0,4667	0,5189	0,4811	0,5025	0,4975	0,5143	0,4857
	20							0,5167	0,4833	0,5333	0,4667	0,5024	0,4976	0,5131	0,4869
	21									0,5167	0,4833	0,5333	0,4667	0,5179	0,4821
	22											0,5167	0,4833	0,4906	0,5094
	23													0,4741	0,5259

Tablo 6'da yalnızca ÇHS alternatifinde mevcut havalimanı (ESB) tarafından karşılanacak trafik bölümünü içermektedir ve 18 ile 24 milyon yolcu/yıl arasında değişen toplam yolcu talebine yönelik analiz sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere talebi dengelemek için geriye kalan yolcu trafik ÇHS'deki potansiyel ikinci havalimanı tarafından karşılanmaktadır. Yapılan AHP değerlendirilmesinde Ankara ilinin hava ulaşım talebinin 24 milyon yolcu trafiğine kadar Esenboğa Havalimanının tek başına talebi karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. 24 milyon yolcu trafiğini aştığı durumda ise ikinci bir havalimanı potansiyeli o zamanın şartlarına göre yeniden değerlendirilmelidir.

3.2.2. Alternatif ÇKKV yöntemleri ile değerlendirmenin yapılması

Çok boyutlu kriterler ile analiz yapılırken standartlaştırma işlemi ve final puanı hesaplamının birçok yolu vardır. Bu çalışma da performans puanlarının belirlenmesinde alternatif yöntemler olarak ELECTRE ve TOPSIS yöntemi kullanılmaktadır. Bu iki ÇKKV yöntemi AHP ye alternatif olması açısından seçilmiştir. Çünkü bu iki yöntemin son etki tablosunda nitel kriterleri içeren proje değerlendirmeleri için uygun olduğu düşünülmektedir. Daha önceki diğer tüm girdileri kullanarak toplam yolcu talep aralığı 18 ile 24 milyon yolcu/yıl arasında değerlendirme yapılmıştır. Karşılaştırmalı analizde ALT0 mevcut havalimanının toplam talebi karşılamasını ifade ederken ALT1 çoklu havalimanı sistemini ifade etmektedir. AHP ile yapılan değerlendirmede (Bkz. Tablo 6) Ankara ilinin toplam yolcu talebinin 24 milyon yolcu/yıl olduğu durumda ALT1 performans skoru daha yüksek çıkmıştır. Bu nedenle analizde Esenboğa Havalimanının tek başına 23 milyon yolcu/yıl trafiğini karşılaması durumu ve Ankara ilinin 24 milyon yolcu/yıl hava ulaşım talebinin 23 milyonunun ESB tarafından 1 milyonunun ise ikinci havalimanı tarafından karşılanma durumu test edilmiştir. Bu durumun test edildiği aşamada amaç; Ankara ilinin yolcu talebi yıllık 24 milyon yolcu olduğunda, ÇHS ile mi yoksa THS ile mi devam edildiğinde fayda kriterleri maksimum maliyet kriterleri minimum olur. Değerlendirmesini yapmaktadır. Yapılan karşılaştırmalı analizde 3 alternatif ÇKKV yönteminde de kullanılan ve Şekil 6 da ki uygun değerlerin toplamından elde edilen başlangıç matrisi Tablo 7'de yer almaktadır.

Tablo 7. Karşılaştırma için başlangıç matrisi

Alternatif/ Kriter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ALT 0	1.166	293	225	22	0,043	0,46	5	394.737	45	135.683	242
ALT 1	1.259	173	293	26	0,028	0,14	5	428.388	46	156.629	242

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

3.2.2.1. ELECTRE metodu ile ÇHS'nin değerlendirilmesi

Başlangıç matrisi (Bkz. Tablo 7) çoklu havalimanı sisteminin ELECTRE yöntemi ile değerlendirilmesinde kullanılmıştır. ELECTRE yönteminin hesaplanmasında SANNA programı kullanılacaktır. SANNA programı Excel tabanlı bir programdır. Başlangıç matrisi EXCEL programının SANNA eklentisine girilerek ELECTRE III yönteminin uygulama sonucu elde edilmiştir. Şekil 6 ve Tablo 4 deki ağırlıklarla birlikte ELECTRE metoduna göre oluşturulan karşılaştırma matrisi Şekil 7'de yer almaktadır.

	ALT 0	ALT 1
ALT 0	0,00000	0,38057
ALT 1	0,37311	0,00000

Şekil 7. Karşılaştırma matrisi raporu ekran çıktısı

Karşılaştırma matrisi ve kriterlerin ağırlıkları kullanılarak elde edilen alternatiflerin uygunluk sıralamasını gösteren EXCEL Sanna çıktısı Şekil 8'de yer almaktadır.

Ind. Třıda	Varianta
1.	ALT 0
2.	ALT 1

Şekil 8. Uygunluk sırası raporu ekran çıktısı

Bu sonuca göre ELECTRE III yönteminde ALT0 en iyi alternatif olarak çıkmıştır. Buna göre Ankara ilinin hava ulaşım talebinin 24 milyon yolcu/yıl olduğu durumda Esenboğa Havalimanının tek havalimanı olarak yolcu talebini karşılamasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

3.2.2.2. TOPSIS metodu ile ÇHS'nin değerlendirilmesi

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) Yöntemi, Hwang ve Yoon (1981) tarafından çok kriterli karar verme tekniği olarak geliştirilmiştir. Yöntemin temeli Pozitif İdeal çözüme en kısa mesafe ve Negatif İdeal çözüme en uzak mesafedeki alternatifi seçmeye dayanmaktadır [42].

Şekil 5'te verilen kriter ağırlıkları ve Tablo 7'te yer alan başlangıç matrisi kullanılmıştır. Şekil 9'da yer alan EXCEL programının Sanna eklentisi ile elde edilen pozitif ve negatif çözüme olan uzaklıklar kullanılarak alternatiflerin ideal çözüme göreceli yakınlıkları hesaplanmış ve alternatif sıralamaları bulunmuştur. Buna göre ALT0 olarak belirtilen Esenboğa Havalimanının tek havalimanı olarak devam etmesi durumu TOPSIS yöntemi tarafından en iyi alternatif olarak sunulmuştur.

	di+	di-	ci
ALT 0	0,05903	0,08019	0,57597
ALT 1	0,08019	0,05903	0,42403

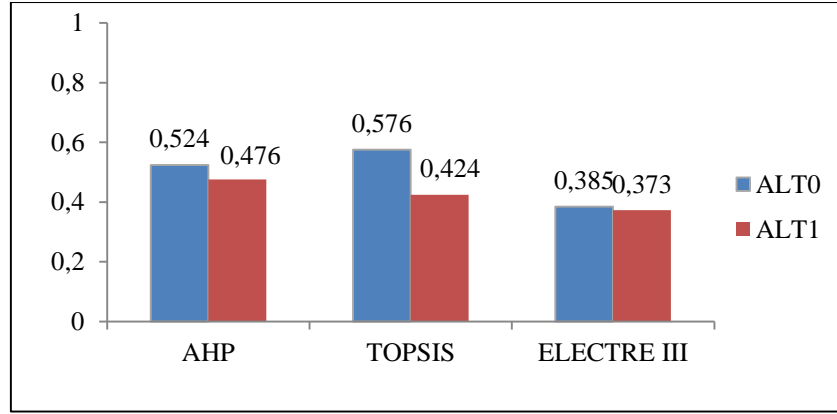
Şekil 9. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm vektörleri raporu ekran çıktısı

3.2.2.3. Yöntemlerle elde edilen puana bağlı sıralama ve karşılaştırılması

ÇKKV yöntemlerinden üç yöntem kullanılarak Ankara ilinde potansiyel çoklu havalimanı sistemi değerlendirilmesi yapılmıştır. Üç ÇKKV yönteminin (AHP, TOPSIS ve ELECTRE) uygulanmasıyla elde edilen nihai sonuçlar Tablo 8 'de gösterilmektedir. Öncelikle AHP ile değerlendirme yapılmış ve sonrasında diğer iki yöntem ile karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Alternatiflerin önceliği ile ilgili olarak farklı yöntemlerin nerede aynı şekilde hareket ettiğini kolayca göstermek için alternatiflerin öncelik sırası Şekil 10'da gösterilmektedir.

Tablo 8. Farklı ÇKKV yöntemlerine göre alternatif puanları

Yöntem	Alternatifler	
	ALT0	ALT1
AHP	0,524	0,476
TOPSIS	0,576	0,424
ELECTRE III	0,385	0,373

**Şekil 10.** Farklı ÇKKV yöntemlerine göre alternatiflerin puanları

ÇKKV yöntemlerinden AHP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri seçilerek karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde AHP yönteminde THS olarak tanımlanan ALT0 performans skoru 0,524 olarak hesaplanırken ÇHS olarak tanımlanan ALT1 performans skoru ise 0,476 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde diğer yöntemlerle yapılan değerlendirmede de ALT0'ın performans skoru ALT1'den daha yüksek çıkarak tercih edilen alternatif olmuştur. Karşılaştırmalı yapılan analizler birbirini destekler nitelikte sonuç vermiştir.

Buna göre, tüm ÇKKV yöntemlerinde tutarlı bir şekilde en uygun alternatifin Ankara ilinin hava ulaşım talebinin mevcut durumda var olan Ankara Esenboğa Havalimanı ile karşılaşmasının uygun olduğu sonucuna varılmış ve Esenboğa Havalimanının artan hava ulaşım talebine göre genişleme yatırımları yaparak hava ulaşım talebini karşılayabileceği değerlendirilmiştir. Fakat koşulların değişmesi durumunda ortaya çıkacak sonucun da değişmesi söz konusu olacaktır.

4. SONUÇLAR

Dünyanın dört bir yanındaki büyük havalimanları kapasite sınırlarına ulaşmış hale geldikçe mevcut ve az kullanılan havalimanlarından ikincil havalimanları ortaya çıkmakta veya yeni yüksek kapasiteli havalimanları inşa edilmektedir. Mevcut büyük havalimanları üzerindeki kapasite kısıtları göz önüne alındığında, dünyada hava taşımacılığı talebini karşılayabilmek için çoklu havalimanı sistemlerinin geliştirilmesi kilit bir mekanizma olmaktadır.

Bu kapsamda Ankara ilinin artan hava ulaşım talebi, trafik artış hızı, konumu ve hub olma potansiyeli gibi faktörler Ankara ilindeki Esenboğa Havalimanının kapasitesinin talebi karşılama durumunun ele alınarak çoklu havalimanı sisteminin değerlendirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Analizde 24 milyon yolcu/yıl eşiğine kadar çoklu havalimanı sisteminin uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak; 24 milyon yolcu/yıl eşiğinin üzerine çıktığında ise ÇHS'nin düşünülmesi durumunda talebin büyük bir kısmının yine mevcut havalimanı tarafından karşılanacağı ve ikinci havalimanının büyüklüğünün ise 1 milyon yolcudan az olabileceği değerlendirilmektedir. Bu durum; çalışmada 24 milyon yolcu/yıl eşiğinin seçilmesinin makul bir seçim olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizde orta vadede; bir ÇHS'nin gelişiminin Ankara'da düşünülmemesi gerektiği tüm yatırımların ve operasyonel faaliyetlerin mevcut havalimanında yoğunlaştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Yapılan değerlendirmede yıllık 24 milyon yolcu eşiğine kadar Ankara ilinin hava ulaşım talebini THS ile karşılaşmasının seçilen sosyo-ekonomik, finansal, çevre, ulaşım kriterleri açısından Ankara iline katkısının daha fazla olacağı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte uzun vadede ise en az 24 milyon yolcu talebi eşiğine ulaşıldığında yolcu talebini desteklemek için ikinci bir havalimanı açılmasının çalışmada ele alınan değerlerin güncellenerek ve geliştirilerek yeniden değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

POTANSİYEL ÇOKLU HAVALİMANI SİSTEMİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan literatür incelemesinde ülkemizde çoklu havalimanı sisteminin değerlendirilmesi üzerine çalışmalara rastlanılmamıştır. Finansal, çevresel, ulaşım, kentsel gelişim ve sosyo-ekonomik faktörler gibi havalimanının gelişimini etkileyen kriterler, ÇKKV yöntemleri ile çoklu havalimanı sisteminin değerlendirilmesinde kullanılarak havalimanı gelişimi konusunda farklı bir yaklaşım ele alınmıştır. Daha sonraki çalışmalarda; havalimanı gelişimini etkileyen ana kriterlerin ve alt kriterlerin revizyonu yapılarak ve yeni yöntemler ilave edilerek çalışmanın hassasiyetinin artırılacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın ileride havacılık sektöründe yapılacak çalışmalara ve karar vericilerin havalimanı yatırım kararı süreçlerinde havalimanının sosyo-ekonomik, çevresel, finansal açıdan bölgeye katkısını ölçmelerine katkıda bulunabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Graham, "Demand for leisure air travel and limits to growth", *Journal of Air Transport Management*, vol. 6, no. 2, pp.109-118, 2000.
- [2] M. Brons, E. Pels, P. Nijkamp, and P. Rietveld, "Price elasticities of demand for passenger air travel: a meta-analysis", *Journal of Air Transport Management*, vol.8, no. 3, pp.165-175, 2002.
- [3] N. Njegovan, "Elasticities of demand for leisure air travel: a system modeling approach", *Journal of Air Transport Management*, vol.12, no. 1, pp. 33-39, 2006.
- [4] International Civil Aviation Organization (ICAO), "Solid passenger traffic growth and moderate air cargo demand in 2018". [Online]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx> . [Accessed Apr.25, 2018].
- [5] International Air Transport Association (IATA), "Cautious optimism extends into 2019 – airlines heading for a decade in the black, 2019. [Online]. Available: <https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2018-12-12-01.aspx>. [Accessed Apr. 25, 2018].
- [6] L.Senn and R. Zucchetti, "Metodologie per valutare l'impatto economico prodotto dagli aeroporti sulla regione di appartenenza, in: Sinatra, A.(ed) Aeroporti e sviluppo regionale. Guerini, Italy, 2001, pp- 50-125.
- [7] G. Siciliano and R. Zucchetti, "L'impatto economico degli aeroporti per il proprio territorio. Il caso di Orio al Serio", *Trasporti & Cultura*, vol. 14, pp. 6-25, 2006.
- [8] M. Percoco, "Airport activity and local development: evidence from Italy," *Urban Studies*, vol. 47, no.11, pp.2427-2443, 2010.
- [9] V. Fasone, T. Giuffrè, and P. Maggiore, "Multi-airport system as a way of sustainability for airport development: evidence from an Italian case study", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 53, no 3, pp. 96-105, 2012.
- [10] M.N. Postorino and F.G. Pratico, "An application of the multi-criteria decision making analysis to a regional multi-airport system", *Research in Transportation Business & Management*, vol. 4, pp. 44-52, 2012.
- [11] P.A. Bonnefoy, R. de Neufville and R.J Hansman, "Evolution and development of multi-airport systems: A worldwide perspective", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, pp. 1021–1029, 2010.
- [12] D. Zietsman and M. Vanderschuren, "Analytic hierarchy process assessment for potential multi-airport systems- The case of Cape Town", *Journal of Air Transport Management*, vol. 36, pp. 41-49, 2014.
- [13] W. Wei, "A new approach to quantify the benefit to air travelers resulting from airport capacity expansion", *Journal of Air Transport Management*, vol. 14, no. 1, pp. 47-49, 2008.
- [14] T. Özcan, "A hybrid multi-criteria decision making approach for new destination selection in aviation industry", *The Journal of Operation Research, Statistics, Econometrics and Management Information Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 1-12, 2018.
- [15] M. Bakır ve Ö. Atalık, "Entropi ve Aras yöntemleriyle havayolu işletmelerinde hizmet kalitesinin değerlendirilmesi", *Journal of Business Research Turk*. vol. 10(1), pp. 617-638, 2018.
- [16] F.G. Altın, M. Karaatlı, ve İ. Budak, "Avrupa'nın en büyük 20 havalimanının çok kriterli karar verme yöntemleri ve veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 22, no.4, pp. 1049-1064, 2017.
- [17] R. Neufville, "Management of multi-airport systems: A development strategy," *Journal of Air Transport Management*, vol. 2, no. 2, pp. 99-110, 1995.
- [18] R. Neufville, "Amsterdam Multi-airport System Policy Guidelines", Cambridge, U.S.A: Massachusetts Institute of Technology, pp. 6-10, 1995.
- [19] B.Yılmaz, "Ekipman Seçimi Problemi İçin Bulanık PROMETHEE Ve 0-1 Hedef Programlama Yöntemlerinin Bütünleşik Kullanımı," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, pp.34.
- [20] K. Yaraloğlu, "Performans değerlendirmede analitik hiyerarşi prosesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol.16, no.1, pp. 129-142, 2001.

- [21] M. Saat, “Çok amaçlı karar vermede bir yaklaşım: analitik hiyerarşi yöntemi”, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 2, no.2, pp. 149-162, 2000.
- [22] B.E. Hacıköylü, “Analitik hiyerarşi karar verme süreci ile Anadolu Üniversitesinde beslenme ve barınma yardımı alacak öğrencilerin belirlenmesi,” Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2006, pp.21-38.
- [23] J. Razmi, H. Rahnejat, and M.K Khan, “The new concept of manufacturing “DNA” within an analytic hierarchy process-driven expert System”, *European Journal of Innovation Management*, vol. 3, no. 4, pp. 199-211, 2002.
- [24] T.L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process,” *International. Journal of Services Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83-98, 2008.
- [25] M. Dağdeviren ve T. Eren, “Tedarikçi firma seçiminde analitik hiyerarşi prosesi ve 0-1 hedef programlama yöntemlerinin kullanılması,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 16, no. 2, pp. 41-52, 2001.
- [26] A.A. Supçiller ve O. Çapraz, “Ahp-Topsis yöntemine dayalı tedarikçi seçimi uygulaması,” *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, vol.13, pp.1-22, 2011.
- [27] M. Toksarı, “Analitik hiyerarşi prosesi yaklaşımı kullanılarak mobilya sektörü için Ege Bölgesi’nde hedef pazarın belirlenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 14, no. 1, pp. 172-180, 2007.
- [28] F. Urfaloğlu, T. Genç, “Çok kriterli karar verme teknikleri ile Türkiye’nin ekonomik performansının Avrupa birliği üye ülkeleri ile karşılaştırılması”, *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, vol. 35, no. 2, pp. 329-360, 2013.
- [29] E. Triantaphyllou, B. Shu, S. Nieto Sanche and T. Ray, “Multi-criteria decision making: An Operations research approach,” *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, (J.G. Webster, Ed.), John Wiley&Sons, New York, vol. 15, pp.175-186, 1998.
- [30] İ. Ertuğrul ve N. Karakaşoğlu, “Electre ve bulanık AHP yöntemleri ile bir işletme için bilgisayar seçimi,” *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 25, no. 2, pp. 23-41, 2010.
- [31] M. Karacasu, “Kent içi toplu taşıma yatırımlarının değerlendirilmesinde karar destek modeli (Electre yöntemi) kullanımı,” In Proc. 7. Ulaştırma Kongresi, 2007, pp.155-164.
- [32] N. Ömürbek, M. Karaatlı ve T. Yetim, “Analitik hiyerarşi sürecine dayalı TOPSIS ve VIKOR yöntemleri ile adım üniversitelerinin değerlendirilmesi”, *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, Dr. Mehmet YILDIZ Özel Sayısı, pp. 189-207, 2014.
- [33] J.S. Miller and L.D. Evans, “Divergence of potential state-level performance measures to assess transportation and land use coordination,” *Journal of Transport and Land Use*, vol. 4, no. 3, pp. 81–103, 2011.
- [34] D. Zietsman, “*Western Cape Airport analysis – A multi-criteria assessment of the development of a new airport versus the expansion of an existing airport in a major metropolitan area*, Thesis, Faculty of Engineering and The Built Environment Centre for Transport Studies, University of Cape Town, 2013.
- [35] Victoria Transport Policy Institute, “*Victoria Transport Policy Institute: Transportation cost and benefit analysis.*” (Second edition). Canada: VTPI, 2011, pp.5.
- [36] The World Bank Social Development Department, “*Social analysis in transport projects: Guidelines for incorporating social dimensions into bank-supported project*”. Washington: The World Bank, 2006, pp.4-38.
- [37] Council of Europe, “*The European conference of ministers responsible for regional/spatial planning (CEMAT)*”. Slovenia: Council of Europe, 2003, pp.401-410.
- [38] E. Fleuti, “Local air quality: A growing concern to airport management,” *Journal of Airport Management*, vol. 2, no. 2, pp. 115-119, 2008.
- [39] International Civil Aviation Organisation (ICAO), “*Airport Planning Manual*. (Second edition, part 1)”.Canada: ICAO, 1987, pp. 42.
- [40] M.N. Postorino, F.G. Praticò, “An application of the multi-criteria decision making analysis to a regional multi-airport System”, *Research in Transportation Business & Management*, vol. 4, no. 1, pp. 44–52, 2012.
- [41] T.L. Saaty, K.P. Kearns, *Analytical Planning: The Organization of Systems*. Oxford: Pergamon, 1985.
- [42] S. Dumanoğlu ve E. Nuray, “İMKB’de işlem gören teknoloji şirketlerinin mali performans ölçümü”, *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, vol. 48, pp. 101-111, 2010.





MALTODEKSTRİN-NOHUT PROTEİNİ İZOLATI MATRİSİNDE KARABİBER TOHUMU YAĞININ PÜSKÜRTMELİ KURUTMA METODU İLE ENKAPSÜLASYONU

Nadiye Pelin MANSUROĞLU¹ , Ebru YAZICI² , Sümeyra ÖNDER³ , Aşlı CAN KARAÇA^{4,*} 

^{1,2,3,4}İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada karabiber tohumu yağının maltodekstrin ve yerel üreticiden temin edilen Kabuli çeşidi nohuttan alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme metodu ile elde edilen protein izolatu kullanılarak püskürtmeli kurutma metodu ile enkapsülasyonunun incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yalnızca maltodekstrin içeren kontrol numunesi ve farklı oranlarda (%1-4) nohut proteini izolatu ve %8 oranında karabiber tohumu yağı içeren emülsiyonlar hazırlanmış ve püskürtmeli kurutma metodu ile kurutulmuştur. Elde edilen karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin nem içeriği 4,7-6,5 g/100 g arasında; su aktivitesi ise 0,22-0,27 arasında değişmiştir. Formülasyonda kullanılan nohut proteini izolatu oranı arttıkça elde edilen toz ürünün nem içeriğinin düştüğü, renginin ise koyulaştığı görülmüştür. Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin yüzey yağı %0,2-1,3 arasında; enkapsülasyon verimi ise %74,1-99,3 arasında değişmiştir. Nohut proteini izolatu kullanılarak elde edilen karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinde protein kullanılmayan kontrol numunesine göre enkapsülasyon verimi artmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen bulgular, maltodekstrin ve nohut proteini izolatının karabiber tohumu yağı gibi hassas uçucu yağların enkapsülasyonunda taşıyıcı matris olarak kullanılabilmesini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nohut protein izolatu, Karabiber tohumu yağı, Püskürtmeli kurutma

ENCAPSULATION OF BLACK PEPPER SEED OIL IN MALTODEXTRIN-CHICKPEA PROTEIN ISOLATE MATRIX WITH SPRAY DRYING METHOD

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the use of maltodextrin and alkali extracted and isoelectric-precipitated protein isolate obtained from Kabuli type local chickpeas in encapsulation of black pepper seed oil. A control sample with only maltodextrin and four different emulsions containing chickpea protein isolate (1-4%) and 8% black pepper seed oil were spray-dried. Moisture content of black pepper seed oil microcapsules changed between 4.7-6.5 g/100 g whereas their water activity ranged between 0.22-0.27. An increase in the chickpea protein isolate ratio resulted in a decrease in moisture content, however darker colour in the microcapsules increased. Surface oil of the microcapsules changed between 0.2-1.3% whereas encapsulation efficiency ranged between 74.1-99.3%. Encapsulation efficiency of microcapsules containing chickpea protein isolate was found to be higher than the control. Findings of the present study indicate that maltodextrin and protein isolate obtained from Kabuli type local chickpeas can be utilized as a matrix for encapsulation of sensitive essential oils such as black pepper seed oil.

Keywords: Chickpea protein isolate, Black pepper seed oil, Spray drying

1. GİRİŞ

Karabiber (*Piper nigrum* L.) gıdalarda yaygın olarak kullanılan, aromatik ve biyoaktif bileşenleri ile ön plana çıkan, ticari açıdan önemli bir baharattır [1]. Karabiber tohumlarından çeşitli yöntemlerle elde edilen uçucu yağlarda 300'den fazla bileşen saptanmıştır [2]. Karabiber tohumu yağının antioksidan ve antimikrobiyal etkisi ve bu etkiden sorumlu olan uçucu bileşenler rapor edilmiştir [3], [4]. Bununla birlikte, sıcaklık, ışık, oksijen gibi çevresel faktörlere karşı hassas olmaları ve hidrofobik yapıda olmaları nedeniyle uçucu yağların doğal formları ile son ürünlerde kullanımları kısıtlıdır. Bu nedenle, uçucu yağlar stabilitelelerini ve kullanım alanlarını artırmak amacıyla genellikle enkapsüle edilmektedir. Yağ bazlı bileşenlerin enkapsülasyonunda ilk basamak emülsiyon oluşturmaktır. Enkapsülasyonda kullanılan ideal bir taşıyıcı malzemenin en önemli özelliklerinden biri stabil

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cankaraca@itu.edu.tr

Geliş / Received: 22.11.2019 Kabul / Accepted: 21.05.2020 doi: 10.28948/ngmuh.649969

N. P. Mansuroğlu, E. Yazıcı, S. Önder, A. Can Karaça

bir emülsiyon oluşturma özelliğidir [5], [6]. Proteinler emülsiyon, film ve jel oluşturma gibi fonksiyonel özellikleri sayesinde enkapsülasyon sistemlerinde taşıyıcı malzeme olarak kullanılmaktadırlar.

Son yıllarda bitkisel bazlı beslenme tercihlerine yönelik eğilimin artması ve bitkisel kaynaklı hammaddelerin daha ulaşılabilir ve düşük maliyetli olması nedeniyle gıda endüstrisinde bitkisel kaynaklı proteinlere yönelik ilgi artmıştır. Baklagillerden elde edilen proteinler de gösterdikleri çeşitli fonksiyonel özellikler ile bu alanda ön plana çıkmaktadır. Nohut (*Cicer arietinum* L.), ülkemizde sıklıkla tüketilen, tohumunda %16,4-31,1 oranında protein içeren kaliteli ve ucuz protein kaynakları içerisinde yer almaktadır [7]. Ülkemizde 2018 yılında nohut 630 bin ton üretilerek toplam baklagil üretimi içerisinde en büyük payı almıştır [8]. Nohuttan asit veya alkali ile ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme, tuz ile ekstraksiyon/misel çöktürme, ultrafiltrasyon gibi çeşitli yöntemlerle elde edilen proteinlerin fizyokimyasal ve fonksiyonel özellikleri çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir [9-15]. Bu çalışmanın amacı, nohuttan alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme yöntemi ile elde edilen protein izolatının karabiber tohumu yağının püskürtmeli kurutma metodu ile enkapsülasyonunda taşıyıcı malzeme olarak kullanımının incelenmesidir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan nohut unu, Eskişehir Tepebaşı Tarım ve Orman Müdürlüğü'nden temin edilen Kabuli çeşidi nohudun laboratuvar ölçekli öğütücüsünde öğütülmesi ile elde edilmiştir. Karabiber tohumu yağı BOS Natural Flavors (P) Ltd. (Kerala, Hindistan) firmasından, maltodekstrin DE12 ise Tate & Lyle PLC (Londra, Birleşik Krallık) firmasından temin edilmiştir. Analizlerde kullanılan kimyasallar analitik saflıktadır.

2.2. Nohut Proteini İzolatı Eldesi

Nohut proteini izolatı, nohut unundan alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme yöntemi [13] ile elde edilmiştir. Nohut unu, içeriğindeki yağın uzaklaştırılması amacıyla 1:1 oranında hekzan ile 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Ardından filtre kağıdından geçirilmiş ve bu işlem dört kez tekrarlanmıştır. Yağı uzaklaştırılan nohut unu bir gece çeker ocakta bekletilerek kalan hekzan uçurulmuştur. Yağı alınmış una 1:10 oranında distile su eklenmiş ve ardından 1 M NaOH çözeltisi ile karışımın pH'ı 9,0'a ayarlanmıştır. Manyetik karıştırıcıda 1 saat süre ile karıştırıldıktan sonra karışım santrifüj tüplerine konularak, 4°C'de 8000 rpm'de 15 dakika süreyle santrifüj edilmiştir. Süpernatant alınarak pH'ı 1 M HCl ile 4,5'e ayarlanmış ve santrifüj tüplerine konularak, 4°C'de 8000 rpm'de 15 dakika süreyle tekrar santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonrasında sıvı faz uzaklaştırılırken çöken faz petri kaplarına konarak -18°C'de dondurulduktan sonra liyofilizatörde (Alpha 1-2 LD plus, Almanya) kurutulmuştur. Elde edilen toz formdaki protein izolatı sıkıca kapalı bir kap içerisinde hava almayacak şekilde 4°C'de muhafaza edilmiştir.

2.2. Besin Öğeleri Kompozisyonu

Çalışmada kullanılan nohut unu ve bu undan elde edilen nohut proteini izolatının besin öğeleri kompozisyonunun belirlenmesinde AOAC (2003) resmi metotları [16] esas alınmıştır. Toplam nem (Metot No: 925.10) ve kül içeriği (Metot No: 923.03) gravimetrik yöntemle, toplam yağ içeriği (Metot No: 920.85) Soxhlet cihazı ile, toplam protein içeriği ise (N×6.25) (Metot No: 920.87) Keldahl cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Karbonhidrat içeriği kompozisyon 100 g'a tamamlanacak şekilde farktan hesaplanmıştır.

2.3. Emülsiyonların Hazırlanması

Çalışma kapsamında Tablo 1'de belirtilen malzemeleri içeren beş farklı emülsiyon hazırlanmıştır. Nohut proteini izolatı kullanımının enkapsülasyon verimi üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla emülsiyonun yağ ve kuru madde içeriği sabit tutulmuş; yalnızca nohut proteini izolatı değişen oranlarda (%0-4) kullanılmıştır. Emülsiyonlar hazırlanırken öncelikle maltodekstrin ve nohut proteini izolatı çözeltisi hazırlanmış, pH değeri 0.1 M NaOH ile 7,0'ye ayarlanarak 1 saat süre ile manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Ardından karabiber tohumu yağı eklenerek Ultra-Turrax T18 homojenizatör (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Almanya) ile 7200 rpm'de 5 dakika boyunca homojenize edilmiştir.

MALTODEKSTRİN-NOHUT PROTEİNİ İZOLATI MATRİSİNDE KARABİBER TOHUMU YAĞININ PÜSKÜRTMELİ KURUTMA METODU İLE ENKAPSÜLASYONU**Tablo 1.** Karabiber tohumu yağının püskürtmeli kurutma ile enkapsülasyonunda kullanılan emülsiyon formülasyonları.

Deney	Karabiber Tohumu Yağı (%)	Protein (%)	Maltodekstrin (%)	Su (%)
1	8	0	30	62
2	8	1	29	62
3	8	2	28	62
4	8	3	27	62
5	8	4	26	62

2.4. Püskürtmeli Kurutma İşlemi

Emülsiyon numuneleri 1kg h⁻¹ su evaporasyon kapasitesine sahip laboratuvar ölçekli Büchi B-290 (Büchi, Flawil, İsviçre) püskürtmeli kurutucu ile kurutulmuştur. Hava giriş sıcaklığı 140°C, çıkış sıcaklığı 80 ± 3°C, akış hızı ise 12 g dk⁻¹ olacak şekilde ayarlanmıştır. Beher içerisinde bulunan emülsiyon püskürtmeli kurutucuya bir peristaltik pompa vasıtasıyla beslenmiş ve akış hızı pompa ayarı ile kontrol edilmiştir. Püskürtmeli kurutma işlemi süresince homojen yapının korunması için emülsiyon manyetik karıştırıcı yardımı ile karıştırılmıştır. Toplama kabında biriken ve kurutma haznesinden fırçalanarak alınan toz ürün birleştirilerek hava almayacak şekilde paketlenmiş ve analiz edilene dek 4°C’de muhafaza edilmiştir.

2.5. Karabiber Tohumu Yağı Mikrokapsüllerinin Karakterizasyonu

Püskürtmeli kurutma işlemi ile elde edilen karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin nem içeriği Shimadzu infrared nem tayini cihazı (Shimadzu, Kyoto, Japonya) ile, su aktivitesi ise Protimeter su aktivitesi ölçüm cihazı (Protimeter, Amphenol Thermometrics, St. Mary's, ABD) ile ölçülmüştür. Renk ölçümü Konica Minolta Chroma Meter CR-400 renk ölçüm cihazı (Konica Minolta, Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin yüzey yağı Liu ve diğ. [17]’nin metoduna göre belirlenmiştir. Yaklaşık 2 g mikrokapsül 30 mL heksan içerisinde disperse edilmiş ve 30 sn süreyle hızlıca karıştırılmıştır. Ardından solvent Whatman No. 1 filtre kağıdı ile bir behere süzülüş ve döner buharlaştırıcı ile uzaklaştırılmıştır. Beher kalan solventi uzaklaştırmak için 60°C’de sabit ağırlığa gelene dek tutulduktan sonra geride kalan yağ miktarı gravimetrik olarak ölçülmüştür. Toplam yağ Klinkesorn ve diğ. [18]’nin metoduna göre belirlenmiştir. Yaklaşık 2 g mikrokapsüle 8 mL distile su eklenmiş ve 300 rpm’de 2 dk süreyle karıştırılmıştır. Ardından karışıma 40 mL heksan/2-propanol (3:1) eklenmiş, 300 rpm’de 15 dk süreyle karıştırılmış ve 3000 rpm’de 2 dk süreyle santrifüj edilmiştir. Temiz organik faz ayrılmış ve su fazı tekrar solvent karışımı ile ekstrakte edilmiştir. Santrifüj sonrasında organik fazlar birleştirilmiş, susuz Na₂SO₄ ile filtre edilmiş ve solvent uzaklaştırılmıştır. Beher 60°C’de sabit ağırlığa gelene dek tutulduktan sonra toplam yağ gravimetrik olarak ölçülmüştür. Enkapsülasyon verimi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [19]:

$$\text{Enkapsülasyon Verimi (\%)} = \frac{\text{Toplam yağ} - \text{Yüzey yağı}}{\text{Toplam yağ}} \times 100 \quad (1)$$

2.6. İstatistiksel Analiz

Tüm ölçümler üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz için SPSS (Versiyon 15, IBM, ABD) programı kullanılmıştır. Gruplar arasındaki farklılıklar Tek-Yollu ANOVA ve Scheffe Testi ile $p < 0.05$ önem düzeyinde belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmamızda yerel üreticilerden temin edilip öğütülerek elde edilen nohut ununun ve bu undan alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme metodu ile elde edilen nohut proteini izolatının besin öğeleri kompozisyonu Tablo 2’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan nohut ununun protein içeriği (~%22,1), literatürde nohut için belirtilen protein oranlarına (%14,9-24,6) benzer bulunmuştur [20]. Nohut unundan alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme metodu ile elde edilen protein izolatının protein içeriği ise ~%86,8 olarak bulunmuştur (Tablo 2). Kaur ve Singh [11] alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme metoduyla elde ettikleri nohut proteini izolatlarının protein içeriğini %89,9-94,4 arasında bulmuşlardır. Öte yandan, Can Karaca ve diğ. [13] yine aynı metotla elde edilen nohut proteini izolatının protein içeriğini %85,4 olarak rapor etmiştir. Baklagillerden protein ekstraksiyonunda ekstraksiyon verimi çalışılan hammadde türü, ekstraksiyon metodu, un:solvent oranı, sıcaklık, pH, süre

gibi çeşitli faktörlerden etkilenmekle beraber; çalışmamızda elde edilen nohut proteini izolatının protein içeriğinin literatürdeki çalışmalarda rapor edilen değerlere benzer olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Nohut unu ve nohut proteini izolatının besin öğeleri kompozisyonu¹.

	Nem (g/100 g)	Protein (g/100 g)	Yağ (g/100 g)	Karbonhidrat ² (g/100 g)	Kül (g/100 g)
Nohut unu	10,5 ± 0,2	22,1 ± 0,1	5,7±0,0	58,8	2,9 ± 0,1
Nohut proteini izolatu	3,8 ± 0,4	86,8 ± 0,9	0,9 ±0,1	5,2	3,3 ± 0,1

¹ Sonuçlar üç ölçümün ortalaması ± standart sapma şeklinde rapor edilmiştir.

² Karbonhidrat içeriği farktan hesaplanmıştır.

Çalışmamızda nohut protein izolatu kullanımının karabiber tohumu yağının enkapsülasyonu üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla beş farklı emülsiyon (Tablo 1) hazırlanmış ve püskürtmeli kurutma metodu ile kurutulmuştur. Karabiber tohumu yağı emülsiyonlarında yağ ve kuru madde içeriği sabit tutulmuş; yalnızca nohut proteini izolatu değişen oranlarda (%0–4) kullanılmıştır. Püskürtmeli kurutma metodu ile elde edilen toz formdaki karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin nem içeriği, su aktivitesi değerleri ve renk parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur. Çalışmamızda elde edilen karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin nem içeriğinin 4,7-6,5 g/100 g arasında; su aktivitesi değerlerinin ise 0,22-0,27 arasında değiştiği görülmüştür. Emülsiyonda kullanılan nohut proteini izolatu oranı arttıkça elde edilen toz ürünün nem içeriği düşerken ($p<0,05$); su aktivitesi değerleri ise protein oranından etkilenmemiştir ($p>0,05$).

Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin renk ölçümünde kullanılan CIE renk parametreleri L^* ($L^* = 0$; koyu ve $L^* = 100$; parlak), a^* ($-a^*$; yeşillik ve $+a^*$; kırmızılık) ve b^* ($-b^*$; mavilik ve $+b^*$; sarılık) değerleridir [21]. Çalışmamızda elde edilen mikrokapsüllerin L^* değerleri 76,43 ila 83,07 arasında değişmektedir. Formülasyonda kullanılan nohut proteini izolatu oranı arttıkça L^* değerinin düştüğü; dolayısıyla koyuluğun arttığı görülmüştür. Özellikle %3 ve 4 oranında nohut proteini izolatu içeren numunelerin L^* değeri protein içermeyen kontrol numunesinden düşük bulunmuştur ($p<0,05$). Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin a^* ve b^* değerleri sırasıyla -3,44 ila -2,35 ve 10,67 ila 17,32 arasında değişmektedir. Nohut proteini izolatu oranı arttıkça a^* ve b^* değerlerinin de arttığı; bir başka deyişle yeşil renk görünümünün azaldığı ve ürünün daha sarımsı bir görünüm aldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin nem içeriği, su aktivitesi ve renk parametreleri¹.

Protein (%)	Nem (g/100 g)	Su aktivitesi	L^*	a^*	b^*
0	6,5 ± 0,3 ^a	0,22 ± 0,01 ^a	83,07 ± 2,10 ^a	-3,44 ± 0,02 ^b	10,67 ± 0,40 ^d
1	5,6 ± 0,3 ^{ab}	0,23 ± 0,02 ^a	79,30 ± 2,77 ^{ab}	-3,27 ± 0,28 ^b	14,90 ± 0,14 ^{bc}
2	5,3 ± 0,4 ^b	0,26 ± 0,03 ^a	80,11 ± 1,26 ^{ab}	-2,68 ± 0,06 ^a	14,22 ± 0,67 ^c
3	4,7 ± 0,2 ^b	0,22 ± 0,02 ^a	76,79 ± 0,42 ^b	-2,73 ± 0,06 ^a	17,32 ± 0,20 ^a
4	4,7 ± 0,5 ^b	0,27 ± 0,02 ^a	76,43 ± 0,68 ^b	-2,35 ± 0,08 ^a	16,30 ± 1,05 ^{ab}

¹ Sonuçlar üç ölçümün ortalaması ± standart sapma şeklinde rapor edilmiştir.

Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin yüzey yağı ve enkapsülasyon verimi değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Yağ bazlı gıda bileşenlerinin enkapsülasyonunda ürün stabilitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri de yüzey yağıdır. Ürün yüzeyindeki serbest yağ ortam koşullarına maruz kaldığında çok daha kolay okside olarak ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [22]. Bu nedenle yüzey yağının mümkün olduğunca düşük, enkapsülasyon veriminin ise yüksek olması enkapsülasyon işleminin başarılı olduğunu gösteren parametrelerden biridir. Çalışmamızda karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin yüzey yağı %0,2-1,3 arasında; enkapsülasyon verimi ise %74,1-99,3 arasında değişmiştir. Nohut proteini izolatu kullanılarak elde edilen karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinde protein kullanılmayan kontrol formülasyonuna göre yüzey yağı azalmış ve enkapsülasyon verimi artmıştır ($p<0,05$). Buna ek olarak, emülsiyonda kullanılan protein oranı arttıkça enkapsülasyon veriminin de arttığı görülmektedir. Nohut proteini izolatının enkapsülasyon verimini artırıcı etkisi emülsiyon oluşturma özelliklerinin iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Keten tohumu yağının nohut veya mercimek proteini kullanılarak püskürtmeli kurutma metodu ile enkapsüle edildiği bir çalışmada nohut proteini kullanılarak elde edilen mikrokapsüllerin enkapsülasyon veriminin ortalama %86,3 olduğu bildirilmiştir [23]. Nohut proteini ve yüksek metoksilli pektin kullanılarak *buriti* (*Mauritia flexuosa*) yağının püskürtmeli kurutma metodu ile enkapsüle edildiği bir diğer çalışmada ise enkapsülasyon verimi %81,9-91,6 aralığında değişmiştir [24]. Püskürtmeli kurutma işleminde taşıyıcı malzeme olarak protein kullanıldığında kurutma işleminde gözlenen verim artışı, protein moleküllerinin kısmi denatürasyonu ile hidrofobik etkileşimlerin artması sonucu partikül yüzeyinde oluşan proteince zengin koruyucu film sayesinde partiküllerin birbirlerine ve kurutma odasının iç yüzeyine yapışmasının engellenmesine bağlanmaktadır [25], [26].

MALTODEKSTRİN-NOHUT PROTEİNİ İZOLATI MATRİSİNDE KARABİBER TOHUMU YAĞININ PÜSKÜRTMELİ KURUTMA METODU İLE ENKAPSÜLASYONU**Tablo 4.** Karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinin yüzey yağı ve enkapsülasyon verimi¹.

Protein (%)	Yüzey yağı (%)	Enkapsülasyon verimi (%)
0	1,3±0,1 ^a	74,1±0,5 ^c
1	0,4±0,2 ^b	90,6±0,4 ^b
2	0,3±0,1 ^b	98,6±0,5 ^a
3	0,2±0,1 ^b	98,9±0,3 ^a
4	0,3±0,1 ^b	99,3±0,4 ^a

¹ Sonuçlar üç ölçümün ortalaması ± standart sapma şeklinde rapor edilmiştir.**4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada, maltodekstrin ve yerel üreticiden temin edilen Kabuli çeşidi nohuttan alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme metodu ile elde edilen protein izolatının karabiber tohumu yağının püskürtmeli kurutma metodu ile enkapsülasyonunda taşıyıcı malzeme olarak kullanımı araştırılmıştır. Karabiber tohumu yağı emülsiyonlarında kullanılan nohut proteini izolatı oranı arttıkça toz ürünün nem içeriğinin düştüğü, renginin ise koyulaştığı görülmüştür. Nohut proteini izolatı kullanılarak elde edilen karabiber tohumu yağı mikrokapsüllerinde protein kullanılmayan kontrol numunesine göre enkapsülasyon verimi artmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen bulgular, maltodekstrin ve nohut proteini izolatının uçucu yağ gibi hassas ürünlerin püskürtmeli kurutma metodu ile enkapsülasyonunda taşıyıcı malzeme olarak kullanılma potansiyelini ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin sağladığı destekle (Proje No: 41568) gerçekleştirilmiştir. Püskürtmeli kurutma deneylerinde verdiği destek için Gıda Yük. Müh. Evren DEMİRCAN'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] M. Abukawsar, M. Saleh-e-In, A. Ahsan, M. Rahim, N. H. Bhuiyan, S. K. Roy, A. Ghosh and S. Naher, "Chemical, pharmacological and nutritional quality assessment of black pepper (*Piper nigrum* L.) seed cultivars", *Journal of Food Biochemistry*, vol. 42, pp. 1-21, 2018.
- [2] Z. L. Cardeal, M. D. R. G. da Silva and P. J. Marriott, "Comprehensive two-dimensional gas chromatography/mass spectrometric analysis of pepper volatiles", *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, vol. 20, pp. 2823-2836, 2006.
- [3] H. J. D. Dorman and S. G. Deans, "Antimicrobial agents from plants: antibacterial activity of plant volatile oils", *Journal of Applied Microbiology*, vol. 88, pp. 308-316, 2000.
- [4] G. Singh, P. Marimuthu, C. Catalan and M. P. deLampasona, "Chemical, antioxidant and antifungal activities of volatile oil of black pepper and its acetone extract", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 84, pp. 1878-1884, 2004.
- [5] K. G. H. Desai and H. J. Park, "Recent developments in microencapsulation of food ingredients", *Drying Technology*, vol. 23, pp. 1361-1394, 2005.
- [6] D. J. McClements, E. A. Decker and J. Weiss, "Emulsion-based delivery systems for lipophilic bioactive components", *Journal of Food Science*, vol. 72, pp. 109-124, 2007.
- [7] S. Şehirli, *Yemeklik Tane Baklagiller*, Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 1988.
- [8] Türkiye İstatistik Kurumu, "Bitkisel Üretim İstatistikleri". [online]. Erişim: www.tuik.gov.tr [erişim tarihi 15.11.2019].
- [9] A. L. Romero-Baranzini, G. A. Yanez-Farias and J. M. Barron-Hoyos, "A high protein product from chickpeas (*Cicer arietinum* L.) by ultrafiltration, preparation and functional properties", *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 19, pp. 319-329, 1995.
- [10] R. Sanchez Vioque, A. Clemente, J. Vioque, J. Bautista and F. Millan. "Protein isolates from chickpea (*Cicer arietinum* L.): chemical composition, functional properties and protein characterization", *Food Chemistry*, vol. 64, pp. 237-243, 1999.

- [11] M. Kaur and N. Singh, “Characterization of protein isolates from different Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars”, *Food Chemistry*, vol. 102, pp. 366-374, 2007.
- [12] J. I. Boye, S. Aksay, S. Roufik, S. Ribéreau, M. Mondor, E. Farnworth and S. H. Rajamohamed, “Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques”, *Food Research International*, vol. 43, pp. 537-546, 2010.
- [13] A. Can Karaca, N. Low and M. Nickerson, “Emulsifying properties of chickpea, faba bean, lentil and pea proteins produced by isoelectric precipitation and salt extraction”, *Food Research International*, vol. 44, pp. 2742-2750, 2011.
- [14] L. Y. Aydemir and A. Yemenicioglu, “Potential of Turkish Kabuli type chickpea and green and red lentil cultivars as source of soy and animal origin functional protein alternatives”, *LWT-Food Science and Technology*, vol. 50, pp. 686-694, 2013.
- [15] A. M. Ghribi, I. M. Gafsi, C. Blecker, S. Danthine, H. Attia and S. Besbes, “Effect of drying methods on physico-chemical and functional properties of chickpea protein concentrates”, *Journal of Food Engineering*, vol. 165, pp. 179-188, 2015.
- [16] AOAC, Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA., USA, 2003.
- [17] S. Liu, N. H. Low and M. Nickerson, “Entrapment of flaxseed oil within gelatin-gum Arabic capsules”, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 87, pp. 809-815, 2010.
- [18] U. Klinkesorn, P. Sophanodora, P. Chinachoti, E. A. Decker and D. J. McClements, “Characterization of spray-dried tuna oil emulsified in two-layered interfacial membranes prepared using electrostatic layer-by-layer deposition”, *Food Research International*, vol. 39, pp. 449-457, 2006.
- [19] S. H. Anwar and B. Kunz, “The influence of drying methods on the stabilization of fish oil microcapsules: Comparison of spray granulation, spray drying, and freeze drying”, *Journal of Food Engineering*, vol. 105, pp. 367-378, 2011.
- [20] J. A. Duke, “Handbook of legumes of world economic importance”, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Plenum Press, N.Y., 52-57, 1981.
- [21] R. Baixauli, A. Salvador and S. Fiszman, “Textural and colour changes during storage and sensory shelf life of muffins containing resistant starch”, *European Food Research and Technology*, vol. 226, pp. 523-530, 2008.
- [22] S. Quispe-Condori, M. D. Saldaña and F. Temelli, “Microencapsulation of flax oil with zein using spray and freeze drying”, *LWT-Food Science and Technology*, vol. 44, pp. 1880-1887, 2011.
- [23] A. Can Karaca, N. Low and M. Nickerson, “Encapsulation of flaxseed oil using a benchtop spray dryer for legume protein-maltodextrin microcapsule preparation”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 61, pp. 5148-5155, 2013.
- [24] P. Moser, S. Ferreira and V. R. Nicoletti, “Buriti oil microencapsulation in chickpea protein-pectin matrix as affected by spray drying parameters”, *Food and Bioprocess Processing*, vol. 117, pp. 183-193, 2019.
- [25] B. Adhikari, T. Howes, B. R. Bhandari and T. A. G. Langrish, “Effect of addition of proteins on the production of amorphous sucrose powder through spray drying”, *Journal of Food Engineering*, vol. 94, pp. 144-153, 2009.
- [26] Z. X. Fang, B. Bhandari, “Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice”, *Food Research International*, vol. 48, pp. 478-483, 2012.





SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

Münevver Gizem GÜMÜŞ^{1,*} , Süleyman Savaş DURDURAN² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42060, Konya Türkiye

ÖZET

Sürdürülebilir arazi yönetiminde, mevcut arazilerin potansiyellerine uygun olarak verimli kullanımı ve planlanması oldukça önemlidir ve arazi kullanım politikalarının temel atılığını oluşturmaktadır. Bu planlama işlemi için karar vericilerin tüm kriterleri göz önüne alarak birçok alternatifini bir arada değerlendirmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojilerini bütünleşmiş bir şekilde kullanarak Beyşehir-Kaşaklı alt havzasına ait arazi kaynaklarının optimum kullanım yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yer seçiminde literatür taraması yapılarak 6 ana 22 alt kriter belirlenmiştir. Uygulamada Arazi Kullanımı/Örtüsü, Topografik Özellikleri, İklim Faktörü, Toprak Özellikleri, Erişilebilirlik ve Sulama ana kriter olarak kullanılmıştır. Parametrelerin birbirine göre önem derecelerinin belirlenmesinde uzman görüşlerine başvurulmuştur. Yapılan tüm analizler sonucunda 7329 km² lik çalışma alanının % 14.84'nün tarımsal üretim için yüksek derecede uygun, % 14.98'nün orta derecede uygun ve % 15.54 'nün ise düşük derecede uygun olduğu, % 35.62'lik alanın tarımsal üretim için uygun olmadığı, % 19.00 'lük alanın ise tamamen uygun olmayan alan olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: AHP, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Uygunluk analizi, Sürdürülebilir arazi yönetimi, Tarım.

USING MULTIPLE CRITERIA DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR DETERMINATION OF OPTIMAL AGRICULTURAL LANDS IN SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT: BEYŞEHİR-KAŞAKLI SUB-BASIN EXAMPLE

ABSTRACT

The efficient usage and planning, which is suitable for the potential of existing land, is very important and constitutes the basis of land use policies in sustainable land management. The decision-makers should evaluate many the alternative together considering all the criteria for this planning process. In this study, it is aimed to determine the optimum usage areas of agricultural land of Beyşehir-Kaşaklı sub-basin using the integrated form of Analytical Hierarchy Process (AHP) method and Geographic Information Systems (GIS) technologies. The six major and twenty-two sub-criteria were determined by searching literature in the choice of location. Land Use / Cover, Topographic Properties, Climate Factor, Soil Properties, Accessibility, and Irrigation were used as the major criterion in Application. The expert opinions have been used in determining the importance of parameters according to each other. As a result of all analyses, it was determined that 14.84% of the 7329 km² study area is highly suitable for agricultural production, 14.98% is moderately suitable and 15.54% is low-suitable, 35.62% is not suitable for agricultural production and 19.00% is completely unsuitable.

Keywords: Agriculture, AHP, Geographic Information Systems, Suitability analysis, Sustainable land management.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gizemkisaaga@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 13.04.2020 Kabul / Accepted: 03.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.719391

1. GİRİŞ

Yeryüzündeki sınırlı doğal kaynaklarımıza karşı sınırsız büyüme hedefleri ile doğal ilerleyişe ters düşen sınırlı gelişimler ve politikalar yüzünden arazi örtüsü ciddi deformasyonlara maruz kalmaktadır. 19. Yüzyıl ve sonrasında gelişen teknolojiyle birlikte sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı, vahşi tarımsal sulama faaliyetleri, su varlığı ve arazilerde meydana gelen kirlilikler, tarımda kullanılan bilinçsiz ve aşırı ilaçlama faaliyetleri, aşırı otlatmalar ve ormanlarda meydana gelen yangınlar gibi sınırlı doğal kaynaklar üzerindeki baskılar artmıştır. Özellikle bu baskıların doğanın kendini yenileme dengesini aşması durumunda tüm canlı ve cansız doğa, geri dönüşü olmayan ekolojik bozulma sürecini beraberinde getirmektedir. 21. yüzyılda yani günümüzde toprak ve arazi kullanımı küresel boyutta tüm insanlığı ilgilendiren önemli bir konu olmaya devam etmektedir. Son yıllarda meydana gelen artan tarımsal sulama faaliyetleri ve bilinçsiz su kullanımı başta olmak üzere yağış ve sıcaklıklardaki ani değişimler ve bunun bir getirisi olarak kuraklık dalgalarının artması, taşkınlar, artan evsel ve sanayi atıklarının göle deşarjı sonucu oluşan kirlilik, gölde bulunan biyolojik çeşitliliğin azalması, artan kıyı erozyonları gibi doğal çevrede yaşanan tahribatlar plansız kentleşme ve yanlış alınan arazi kullanım politikalarının bir ürünüdür [1].

Sürdürülebilir arazi yönetiminde, mevcut arazilerin potansiyellerine uygun olarak verimli kullanımı için farklı kriterlerinde sürece dahil ederek arazi kullanım planlamaları gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Karar vericilerin, tüm kriterleri göz önüne alarak en uygun yeri belirlemek için birçok alternatifi değerlendirmesi gerekmektedir. Günümüzde arazinin belli bir kullanım türü için uygunluğunu ve uygunluk düzeyini belirleme işlemi yapılırken CBS ve mekânsal Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri etkin bir şekilde kullanılmaktadır [2]-[6]. Tarıma uygun alanların optimal kullanım yerlerinin belirlenmesine yönelik yapılan literatür çalışmalarında birbirinden farklı ana ve alt kriterlerin kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi çalışılan arazinin spesifik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, ilgili verilere erişimde yaşanan engeller de kriter seçiminde etken olduğu düşünülmektedir. Akıncı ve ark. [7] tarafından yapılan bir çalışmada büyük toprak grubu (BTG), diğer toprak özellikleri (DTO), arazi kullanım kabiliyeti (AKK), arazi kullanım kabiliyeti alt sınıfı, toprak derinliği, erozyon derecesi, eğim, bakı ve yükseklik parametrelerini kullanmıştır. Bandyopadhyay ve ark. [8], çalışmasında toprak dokusu, organik madde içeriği, toprak derinliği, eğim ve arazi kullanım/arazi örtüsü parametrelerini kullanmıştır. Bozdağ ve ark. [9], çalışmasında ana kriter olarak: toprak özellikleri, topografik özellikler, iklim ve yeraltı suyu parametrelerini, alt kriter olarak ise toprağın uygunluğu, arazi kullanımı, yağış, bakı, eğim, yükseklik, tuzluluk tehlikesi (ECw), sodyum tehlikesi (SAR), klorür (Cl), su tablasının derinliği (DTW) parametrelerini kullanmıştır. Akten [10], yaptığı doktora çalışmasında tarım sektörü için arazi kullanımını etkileyen parametre seti olarak: arazi kullanım yetenek sınıfları, toprak derinliği, sınırlayıcı toprak özelliği, drenaj, erozyon, eğim, bakı, su varlığı, yağış ve sıcaklık kriterlerini kullanmıştır. Demir ve ark. [11], çalışmasında arazi kullanım yetenek sınıfları, sınırlayıcı toprak özellikleri, toprak derinliği, bitki örtüsü, eğim, erozyon, sıcaklık, yağış, yükseklik ve bakı parametrelerini kullanmıştır.

Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden AHP ve CBS tekniklerini kullanarak Beyşehir-Kaşaklı alt havzasına ait ekolojik yapının korunması adına arazi kaynaklarının optimum kullanım yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Arazi uygunluk analizi ile gerçekleştirilecek yer seçim analizi için literatür kaynakları ve arazinin spesifik özellikleri temel alınarak 6 ana 22 alt kriter belirlenmiştir [7]-[15]. Uygulamada Arazi Kullanımı/Örtüsü, Topografik Özellikleri, İklim Faktörü, Toprak Özellikleri, Erişilebilirlik ve Sulama ana kriterleri kullanılmıştır. Parametrelerin birbirine göre önem derecelerinin belirlenmesinde anket uygulaması yapılarak uzman görüşlerine başvurulmuş ve Expert Choice (EC) yazılımı ile nispi önem derecelerine göre ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ağırlıklandırılmış kriterler ArcGIS yazılımında işlenerek yer seçimine yönelik mekânsal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygunluk analizleri ve değerlendirmeler sonucunda Beyşehir-Kaşaklı alt havzasına ait arazi kaynaklarının optimum kullanım yerleri Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)'nın arazi uygunluk sınıflandırmasına göre kategorize edilmiştir [16]. Bu çalışma ile birlikte tarımsal üretim bakımından Türkiye'nin büyük bir bölümünü içine alan Konya Kapalı havzasına (KKH) ait çalışma alanının gelişmiş teknolojik yöntemlerin kullanılmasıyla yanlış yer seçim kararlarından doğan olası zararların önlenmesi hedeflenmektedir.

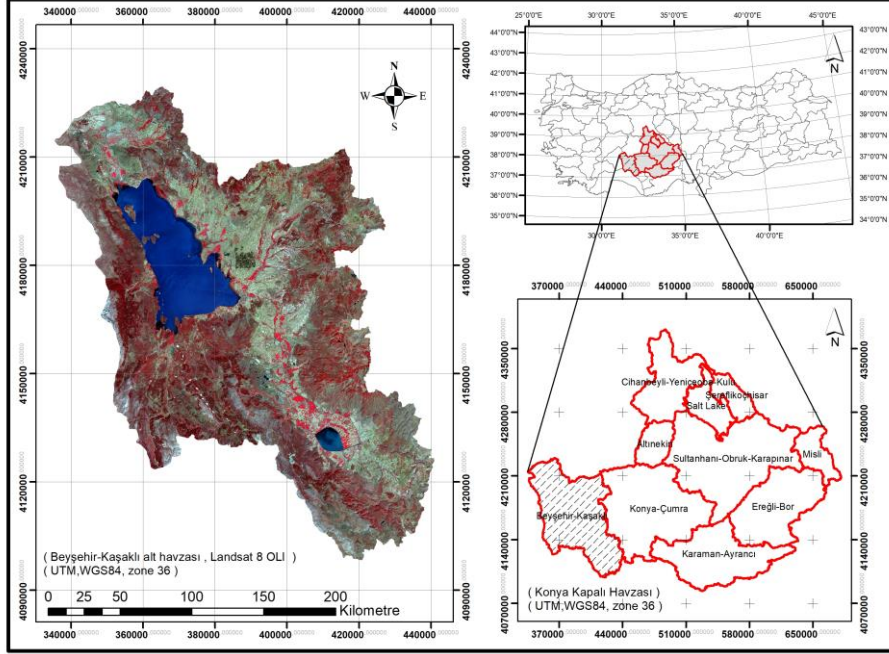
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Türkiye'nin en büyük kapalı havzası olan KKH'nda gerçekleştirilmiştir. KKH, en büyük kapalı havza olmasının yanı sıra tarımsal üretim bakımından ülkemizin arazi potansiyelinin %14 ünü oluşturmaktadır. Tarımsal açıdan oldukça verimli olan bu havza Devlet Su İşleri (DSİ) Konya IV. Bölge Müdürlüğüne yeraltı suyu beslenme alanı, jeolojik, hidrojeolojik ve akifer yapıları gibi çeşitli özellikler dikkate alınarak 9 alt havzaya ayrılmıştır [17]. Bunlar Beyşehir-Kaşaklı, Konya-Çumra, Karaman-Ayrancı, Ereğli-Bor, Aksaray-Karapınar, Altınekin, Cihanbeyli-Kulu, Şereflikoçhisar, Niğde Misli alt havzalarıdır. Bu çalışmada arazi uygunluk analizlerinin gerçekleştirilmesinde KKH'nın batısında konumlanan Beyşehir-Kaşaklı alt havzası seçilmiştir. Havza, Konya, Isparta illeri ve Antalya ilinin yerleşik olmayan bölgelerini içine alan yaklaşık 7329 km² lik geniş bir alana yayılmaktadır. Havza 37° 26'- 38° 03' kuzey enlemleri ile 31° 15' - 31° 46' doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1).

SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

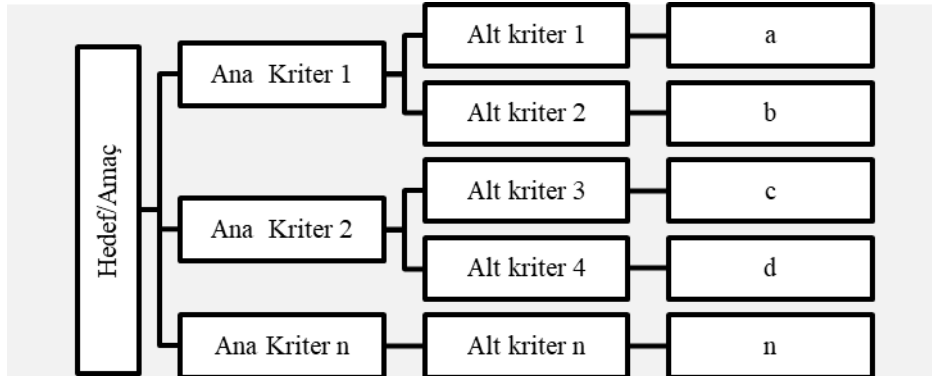
Havzanın batısında Anamas, Kartız ve Dedegül dağları, güneyinde güney doğu kuzey batı doğrultusunda uzanan Seyran ve Seydişehir Dağları, doğusunda Sultan, Alaca ve Erenkilit Dağı, kuzeyinde ise Sultan ve Anamas Dağları arasında kalan Şarkikaraağaç Ovası bulunmaktadır [18]. Alt havza alanı olan bu bölge, güney ve batısında Antalya Havzası, Kuzeyinde Akarçay Havzası, Doğusunda Çumra alt havzası, Kuzey doğusunda ise Sakarya havzası ile çevrilidir.



Şekil 1. Çalışma alanı (Beyşehir-Kaşaklı alt havzası)

2.2. Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) Yöntemi

AHP yöntemi, 1970'lerde Saaty tarafından geliştirilen karmaşık karar problemlerini çözmek için tasarlanmış, çoklu senaryo ve kriterleri basitleştiren öznel ve nesnel ölçüleri birlikte değerlendirmeye olanak tanıyan matematiksel tabanlı ÇKKV yöntemidir [19]. Yöntem ikili karşılaştırmalar yaparak, karar vericinin probleme geniş açıdan bakmasını sağlar [20]. Saaty'nin [19], AHP yöntemi için hazırladığı ilk metodoloji; modelleme, değerlendirme, önceliklendirme ve sentez aşamalarından oluşan bir formülasyondur. Çalışmada bu metodolojiyi kullanarak 4 temel aşamada (ana kriterler, alt kriterler, nitelikler ve karar alternatifleri) temsil edildiği bir hiyerarşi oluşturulmuştur (Şekil 2). Burada hedeflenen ve amaçlanan karar verme problemi, oluşturulan hiyerarşinin en üstünde bulunur. Problemin çözümüne götürecek diğer ana ve alt kriterler ise kalan seviyelere yerleştirilerek sistem oluşturulur [21].



Şekil 2. AHP yöntemi hiyerarşik yapısı

AHP yöntemi hiyerarşik yapının oluşturulması, ikili karşılaştırmaların yapılması ve ağırlıkların hesaplanması olarak özetlenebilir [22], [23]. Hiyerarşik olarak sıralanan öznel ölçütler (ana ve alt kriter çiftleri) arasında ikili karşılaştırılma işlemi yapılır. İkili karşılaştırmalar yapılırken “bir kriter diğer bir kritere göre ne kadar önemlidir?” sorusunun cevabının aranması yöntemin temelini oluşturmaktadır. Bu karşılaştırmada Tablo 1 den anlaşılacağı gibi 1’den 9’a kadar giden bir değerlendirme ölçeği kullanılır [19].

Tablo 1. AHP yöntemi değerlendirme ölçeği [24].

Önem Derecesi	Açıklama
1	Öğeler eşit önemde veya aralarında kayıtsız kalınıyor
3	Öğe 2.’ye göre biraz daha önemli veya biraz daha tercih ediliyor
5	Öğe 2.’ye göre fazla önemli veya tercih ediliyor
7	Öğe 2.’ye göre çok fazla önemli veya çok fazla tercih ediliyor
9	Öğe 2.’ye göre aşırı derecede önemli veya aşırı derecede tercih ediliyor
2,4,6,8	Ara değerler (uzlaşma gerek durumlarda kullanılır).

İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulduktan sonra göstergelerin ağırlıklandırılması bu ölçeğe göre yapılır ve ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu matris $n*(n-1)/2$ adet karşılaştırmadan oluşur ve oluşan matris $A = [E_{ij}]_{n \times n}$ şeklindedir [25], [26].

$$A = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada oluşturulan matris için ‘i’ satır ‘j’ sütun sayısı olduğu düşünülürse $a_{ji}=1/a_{ij}$, $a_{ij} \neq 0$ olur. Eğer $i=j$ ise $a_{ij}=1$ ’dir [27]. Tüm ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulduktan sonra, Saaty’nin öz vektör metoduna göre ağırlıklar, $w = [w_1, w_2, w_3 \dots w_n]$ hesaplanır ve alternatiflere göre derecelendirilir [28], [29]. Ağırlıklandırma işleminde ikili karşılaştırma matrisinde bulunan her eleman sütun toplamına bölünerek normalleştirilmiş değerler bulunur ve bu matriste satır ortalamaları alınarak işlem gerçekleştirilir. Kullanılan ağırlıklar 0’dan 1 değerine kadar ölçeklendirilir ve tüm ağırlıkların toplamı 1’e eşittir [20], [21]. Uzman görüşleri sonucunda belirlenen kriterler arasında kıyaslama yaparken anketlerin tutarlı olup olmadığını değerlendirmek için tutarlılık oranı hesaplanır. Karar vericilerin verdikleri kararların tutarlı çıkmaması durumunda ilgili anketlerin ve ağırlıklandırma işleminin yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bu hesaplamada kriter sayısına bağlı olarak rastgele indeks sayıları kullanılır (Tablo 2) [30]. Tutarlılık indeksinin karşılaştırılan kriterlerin sayısına bağlı olarak değişen rastgele indeks göstergesine bölünmesiyle tutarlılık oranı elde edilmektedir [31].

Tablo 2. Rastgele indeks göstergesi, RI: Rastgele indeks [24]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Burada tutarlılık Katsayısının kabul edilebilir düzeyde olması için maksimum 0,10 olmalıdır. Hesaplamalar sonucunda bulunan değer 0,10’un altında ise oluşturulan karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu; 0,10’un üzerinde ise karar matrisinin tutarsız olduğu ve bu sonucun yeniden düzenlenmesi gerekmektedir [32], [33].

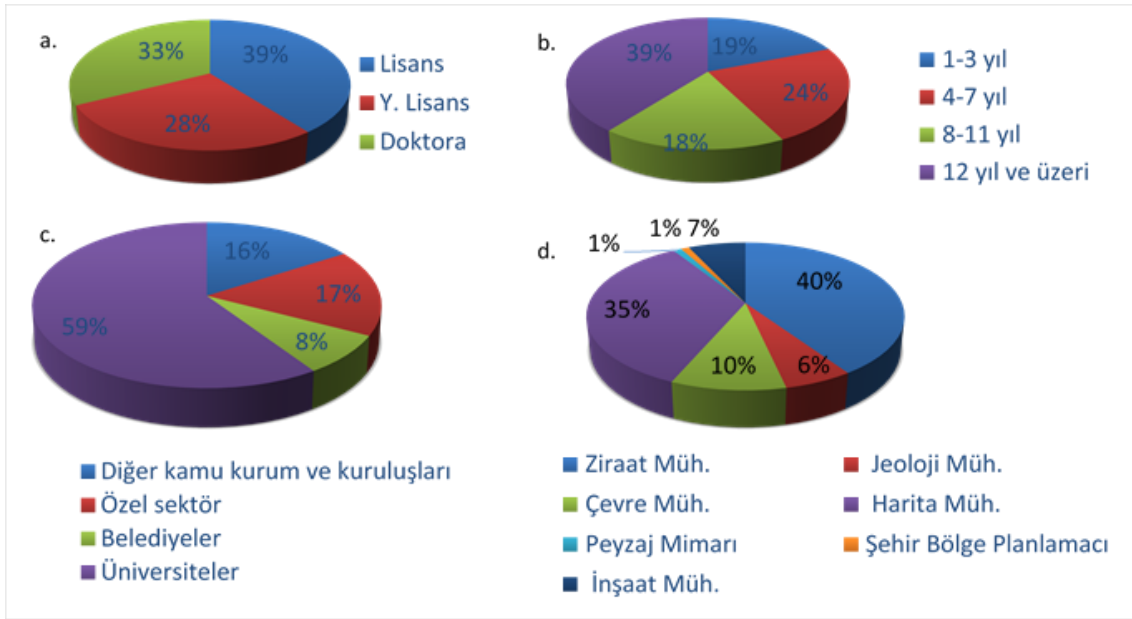
2.3. Uzman Görüşlerinin İrdelenmesi ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Sürdürülebilir arazi yönetiminde optimal tarım arazilerinin belirlenebilmesi için öncelikle konu ile ilgili geçmişte yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir. Literatürde tarıma uygun alanların optimal kullanım yerlerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda birbirinden farklı ana ve alt kriterlerin kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi çalışılan arazinin spesifik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, ilgili verilere erişimde yaşanan engeller de kriter seçiminde etken olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada literatür araştırmaları sonucu potansiyel tarım alanları için olması gerektiği düşünülen 6 temel

SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

gösterge oluşturulmuştur. Bunlar; Arazi Kullanımı/Örtüsü, Topografik Özellikleri, İklim Faktörü, Toprak Özellikleri, Erişilebilirlik, Sulama parametreleridir.

İlgili kriterler belirlendikten sonra anket uygulaması yapılarak kriterlerin birbirine göre önem dereceleri belirlenmiştir. Anket uygulaması, toplam 100 uzman görüşü alınarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada katılımcıların profillerini belirlemeye yönelik ve optimal tarım arazileri yer seçimleri için hazırlanan kriterlerin ikili karşılaştırmalarını yapan çeşitli sorular sorulmuştur. Anket bulgularına göre uzmanlar; Ziraat Mühendisliği (41), Jeolog(6), Çevre Mühendisliği (10), Harita Mühendisliği (35), Peyzaj Mimarı (1), Şehir Bölge Planlamacı (1) ve İnşaat Mühendisliği (7) meslek gruplarından oluşmaktadır. Katılımcıların meslek dağılımlarını üniversiteler (60), belediyeler (8) ve özel sektör çalışanları (17) ve diğer kamu kurum kuruluşları çalışanları (16) oluşturmaktadır. Katılımcıların % 39 u lisans mezunu, %28 i yüksek lisans mezunu ve %33 ü ise doktora mezunudur. Çalışanların meslekteki deneyimlerinin %19'u 1-3 yıl, %24'ü 4-7 yıl, %18'i 8-11 yıl ve kalan %39 u ise 12 yıl ve üzerini oluşturmaktadır (şekil 3).



Şekil 3. Yapılan anket sonuçları; a. Eğitim düzeyleri, b. Meslekteki deneyimleri, c. Çalışılan kurum, d. Meslek dağılımları.

Anketin ikinci aşamasında hiyerarşik olarak sıralanan öznel ölçütler arasında ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. Anket uygulaması ile toplanan veriler EC programında işlenerek her bir sütun değerinin ayrı ayrı ilgili sütun toplamına bölünmesi ile matrisin normalleştirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Değerlerin toplamı 1'e eşitlenip her bir satırın ortalaması alınarak elde edilen bu değerler, her bir ölçüt için yüzde nispi önem ağırlıkları hesaplanmıştır (Tablo 3).

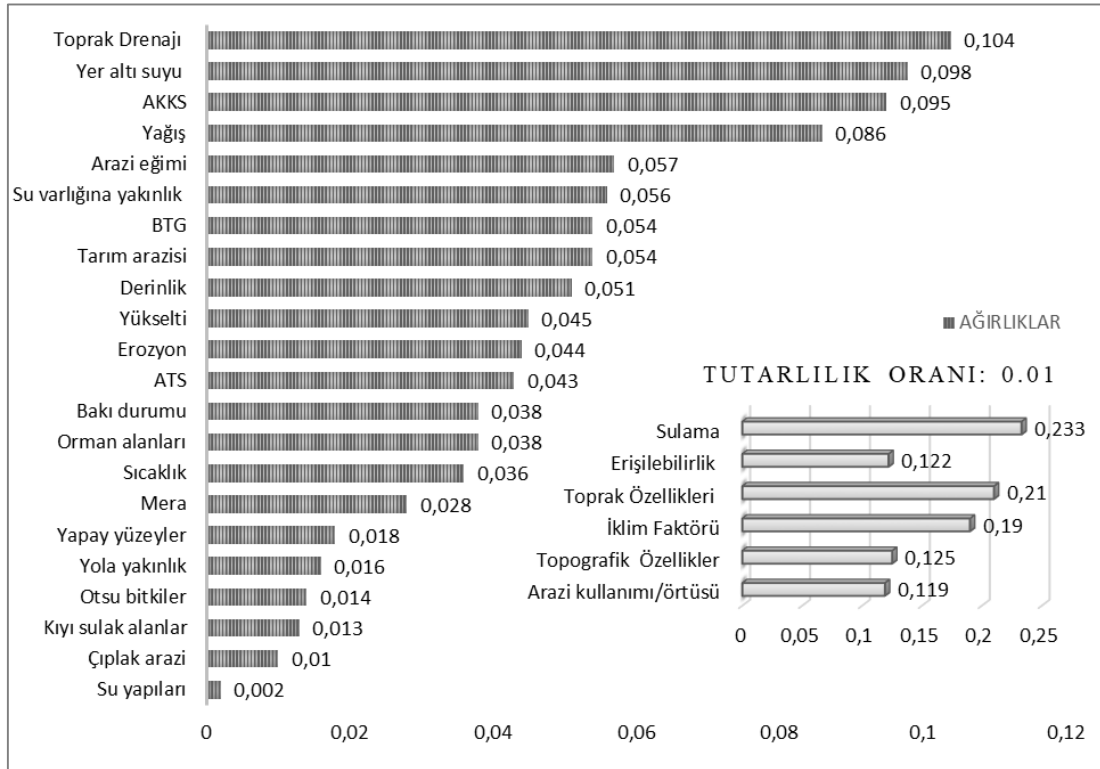
Tablo 3. Uygunluk analizi kriterleri ve nispi önem derecelerinin gösterimi

TEMEL KRİTERLER	AĞIRLIK	KRİTERLER	AĞIRLIK	ALT KRİTERLER	AĞIRLIK
Arazi kullanımı/ örtüsü	0.119	Tarım arazisi	0,281	Yüksek uygun	0.575
		Otsu bitkiler	0,070	Uygun	0.394
		Mera	0,143		
		Çıplak arazi	0,047	Uygun değil	0.031
		Yapay yüzeyler	0,092		
		Orman alanları	0,195		
		Kıyı sulak alanlar	0,061		
Su yapıları	0,111				
Topografik Özellikler	0.125	Bakı durumu	0,266	G,GB, GD, Zemin	0.389
				B, D	0.277
				KB, KD	0.195
				K	0.139

SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

		VII	0.124		
		VIII	0.01		
Erişilebilirlik	0.122	Yola yakınlık	0,220	0-300	0.515
				300-1000	0.249
				1000-2000	0.192
				2000-5000	0.023
				>5000	0.021
				0-300	0.535
Su varlığına yakınlık	0,780	Su varlığına yakınlık	0,780	300-1000	0.273
				1000-2000	0.187
				2000-5000	0.005
				>5000	0.000
				Var	1.000
				Yok	0.000
Sulama	0.234	Toprak Drenajı	0,518	0-300	0.537
				300-1000	0.283
				1000-2000	0.154
				2000-5000	0.019
				>5000	0.007

Çalışma sonucunda oluşturulan grafikler incelendiğinde 6 ana kriter karşılaştırmasında önem derecesi en yüksek kriterin Sulama parametresi (0.234) olduğu görülmektedir. Sonraki sıralama Toprak özellikleri (0.210), İklim faktörü (0.190), Topografik özellikler (0.125), Erişilebilirlik (0.122) ve Arazi kullanımı/örtüsü (0.119) olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Öznel yargıların tutarlılığının kontrol edilmesi aşamasında ise hesaplanan tutarlılık oranı 0.01 olarak çıkmıştır. Böylelikle, yapılan tüm işlem adımları için matrisin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Nispi önem derecelerinin belirlenmesi ve tutarlılık oranına ait tüm veriler Expert Choice programından elde edilerek şekil 4 de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

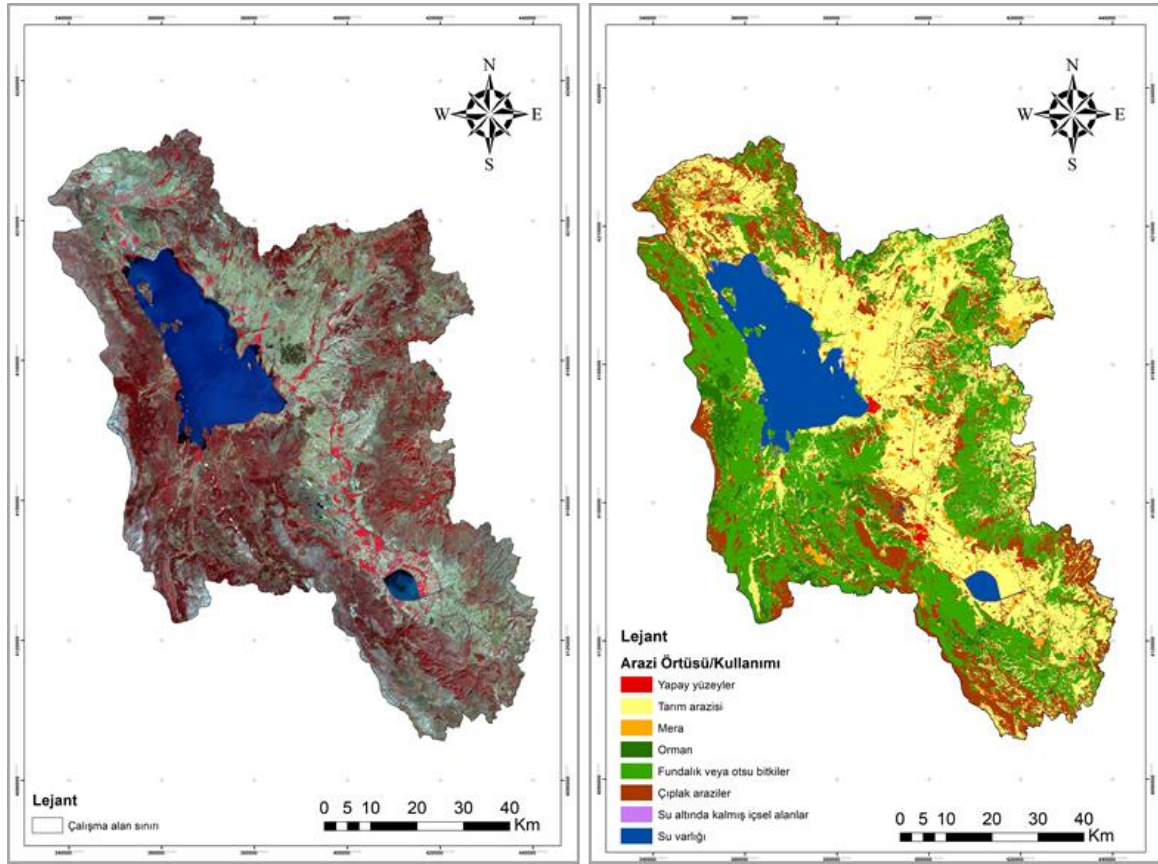


Şekil 4. Ağırlıklandırma tablosu (ideal mod) ve tutarlılık oranının gösterilmesi (Expert Choice program çıktıları)

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Arazi kullanımına etki eden tüm elemanların ana-alt kriter bağlamında ayrıntılı olarak ele alınması gerekmektedir. Çalışmada uygunluk analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için gereken 6 ana ve 22 alt kriterler belirlenmiştir. Elde edilen tüm kriterler somutlaştırılarak görselleştirilmesi amacıyla haritalandırılmıştır (Şekil 5:10). Çalışmadaki tüm görselleştirme ve uygun yer seçim analizlerinin gerçekleştirilmesi için ArcGIS 10.5 yazılımından faydalanılmıştır.

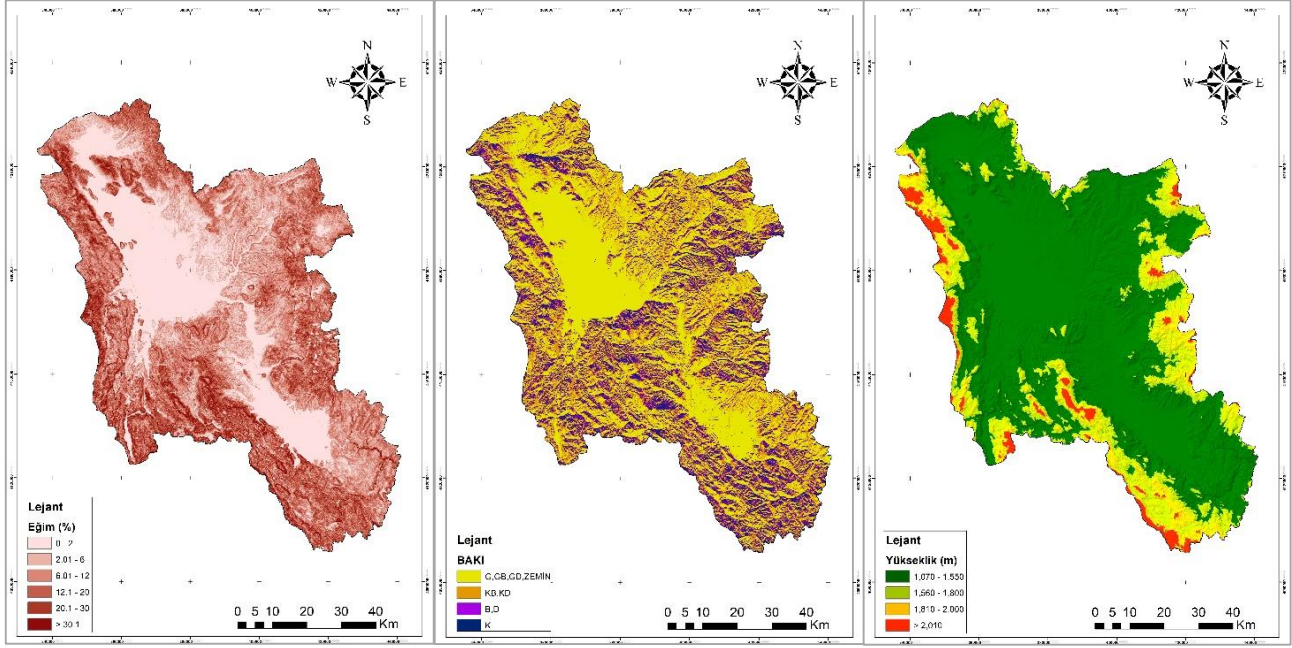
Çalışmada belirlenen ilk ana kriter olan Arazi kullanımı/ örtüsü kriterine ilişkin veri seti (Tarım arazisi, Yerleşim alanı/Yapay yüzeyler, Orman alanları, Otsu bitkiler/Fundalıklar, Çıplak arazi/Kayalık, Mera, Kıyı sulak alanlar/Bataklıklar, Su yapıları) Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) sitesinden ücretsiz olarak temin edilen Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) multispektral uydu görüntülerinin [34] geometrik ve radyometrik düzeltilmesi ile ön işlenerek kontrollü sınıflandırılması sonucu üretilmiştir (Şekil 5). İlgili ana kriter uzman görüşleri sonucu 0.119 ağırlık oranı ile en düşük ana kriter olarak belirlenmiştir. Alt kriterler incelendiğinde ise Tarım arazisi kriterinin 0.281 ağırlık oranı ile en önemli alt kriter olduğu bölgede bulunan Su yapıları kriterinin ise en düşük önem derecesine sahip alanlar olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. a) Landsat 8 OLI uydu görüntüsü, b) Arazi örtüsü/kullanımı haritası

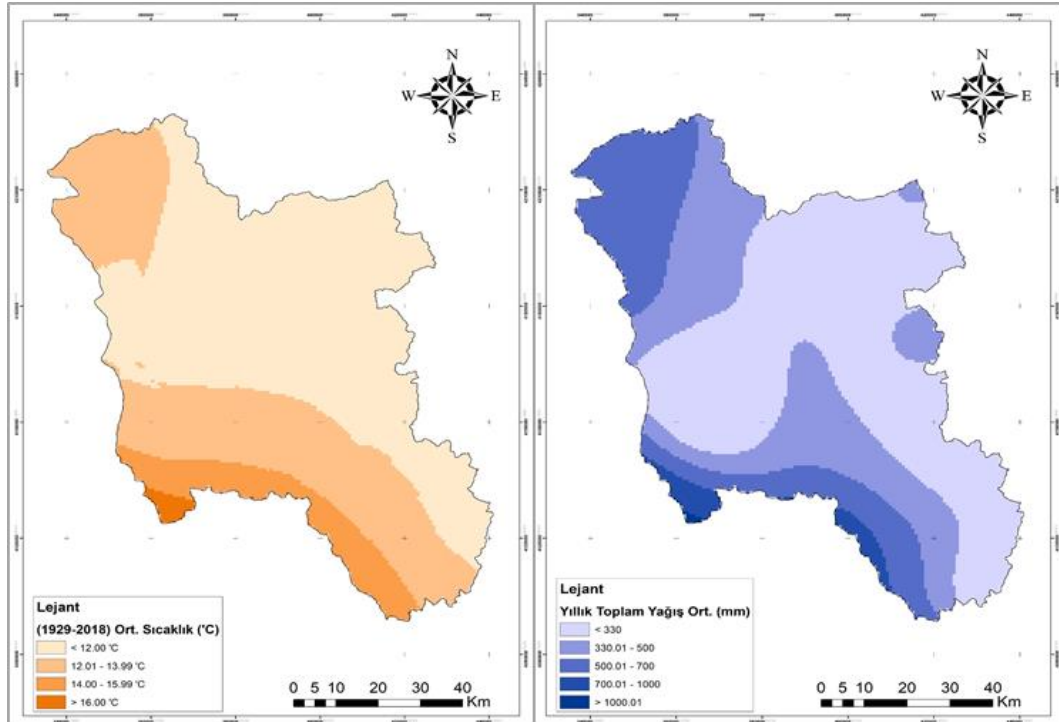
İkinci kriter olan Topografik parametreler (Arazi eğimi, Bakı durumu, Yükselti) ise Harita Genel Müdürlüğü (HGM)'nce temin edilen 2nci Düzey DTED (DTED-2) Sayısal Arazi Modeli (SAM) verisi üzerinden üretilmiştir (Şekil 6). HGM tarafından üretilmiş ülke genelini kapsayan DTED-2 verileri, 1:25.000 ölçekli haritalar üzerindeki (10 m aralıklı) eş yükseklik eğrilerinden üretilmiştir. Veri 1" x 1" (yaklaşık 30 m x 30 m) grid aralıklıdır. İlgili ana kriter uzman görüşleri sonucu 0.125 ağırlık oranı ile üçüncü derecede önemli kriter olduğu belirlenmiştir. Alt kriterler incelendiğinde ise Arazi eğimi kriterinin 0.409 ağırlık oranı ile en önemli alt kriter olduğu, bu kriteri yükselti (0.325) ve bakı durumunun (0.266) takip ettiği belirlenmiştir.

SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ



Şekil 6. Topografik özellikler kriter analizleri; a) eğim, b) bakı ve c) yükseklik haritası

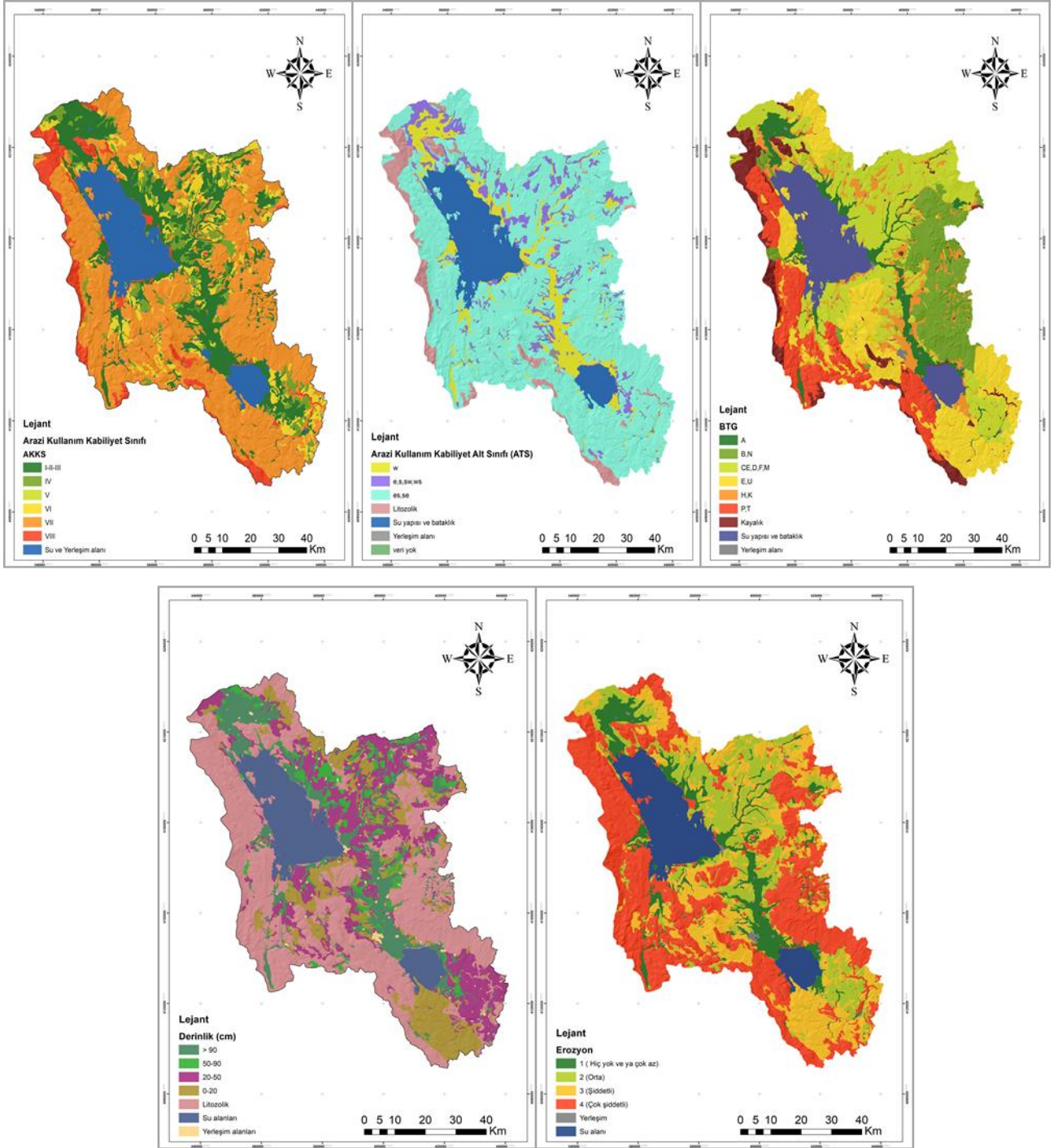
İklim Faktörü parametre seti (Yağış, Sıcaklık) ise 4. Antalya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü ve 8. Konya Meteoroloji Bölge Müdürlüğüne temin edilen Beyşehir (1742), Seydişehir (17898), Hadim (17928), Hüyük (18497), Derebucak (18492), Doğanhisar (18493) ve Şakirkaraağaç (17863) meteoroloji istasyonuna ait ortalama sıcaklık ve yağış değerlerinden enterpolasyon yöntemi ile üretilmiştir (Şekil 7). İlgili ana kriter uzman görüşleri sonucu 0.190 ağırlık oranı ile üçüncü en önemli kriterdir. Burada yağış parametresi (0.710) sıcaklık parametresine (0.290) daha öncelikli bir kriter olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7. İklim faktörü kriter analizleri; a) Sıcaklık ve b) yağış haritaları

M. G. Gümüş, S. S. Durduran

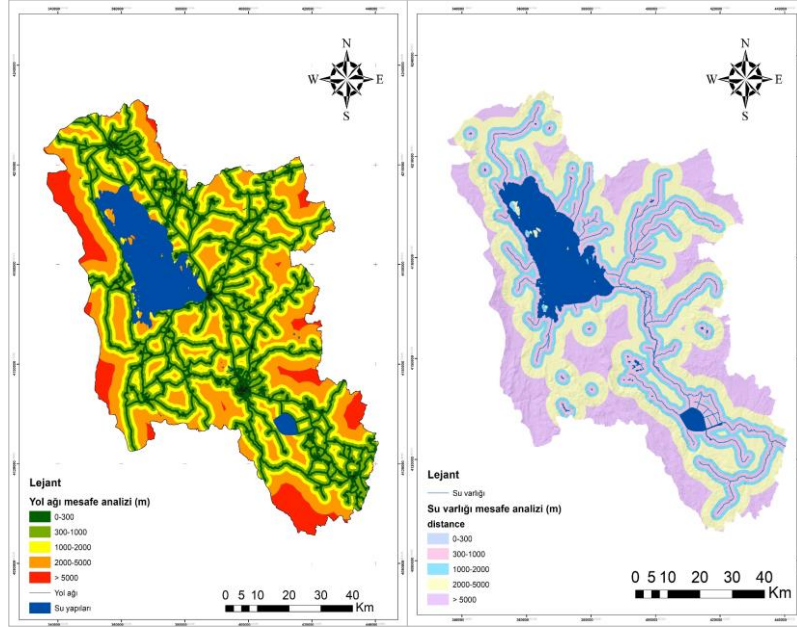
Çalışmada kullanılan bir diğer parametre seti olan toprak verileri (Derinlik, Büyük Toprak Grubu (BTG), Arazi kullanım kabiliyet sınıfı (AKKS), Erozyon, Arazi Kullanım Kabiliyeti Alt Sınıfı (ATS)) ise Tarım Reformu Genel Müdürlüğü (TRGM)'den elde edilen ".shp" formatlı sayısal altlıklardan yararlanılarak üretilmiştir (Şekil 8). İlgili ana kriter uzman görüşleri sonucu 0.210 ağırlık oranı ile ikinci en önemli kriter olduğu belirlenmiştir. Alt kriterler arasında ise AKKS parametresinin (0.333) en önemli alt kriter olduğu ve devamında BTG (0.189), Derinlik (0.179), Erozyon(0.151) ve ATS (0.148) parametreleri geldiği belirlenmiştir.



Şekil 8. Toprak özellikleri kriter analizleri; a)AKKS, b) ATS, c)BTG, d) Derinlik, e) erozyon haritaları

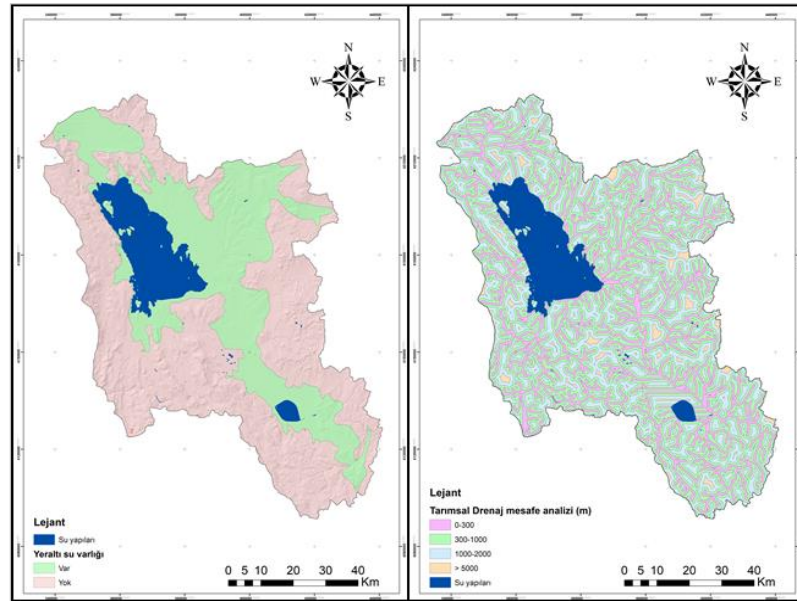
SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

Son iki kriter olan Erişilebilirlik, Sulama parametrelerine ait haritalar mesafe analizi (Buffer) gerçekleştirilerek üretilmiştir. Yola yakınlık, Su varlığına yakınlık, Toprak Drenajı alt kriterlerine ait göstergeler 0-300, 300-1000, 1000-2000, 2000-5000 ve 5000 metreden daha büyük mesafeler olmak üzere 5 farklı göstergede kategorize edilmiştir (Şekil 9-10). İlgili ana kriter uzman görüşleri sonucu 0.122 ağırlık oranı ile beşinci derecede önemli kriter olduğu ve alt kriterler incelendiğinde ise Su varlığına yakınlık parametresinin (0.780) yol ağına mesafe parametresine (0.220) göre daha öncelikli bir kriter olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Erişilebilirlik kriteri mesafe analizleri; a) yol ağı mesafe analizi b)su varlığı mesafe analizi

Toprak drenajı belirlemek için HGM'den elde edilen DTED-2 SAM verisi kullanılmıştır. Tarımsal drenaj hatları, ArcGIS yazılımı üzerinden Hidroloji modülü kullanılarak üretilmiştir. İlgili ana kriter uzman görüşleri sonucu 0.233 ağırlık oranı ile önem derecesi en yüksek kriter olduğu ve alt kriterler incelendiğinde ise toprak drenajı parametresinin (0.518) yer altı su varlığı parametresine (0.482) göre daha öncelikli bir kriter olduğu belirlenmiştir.

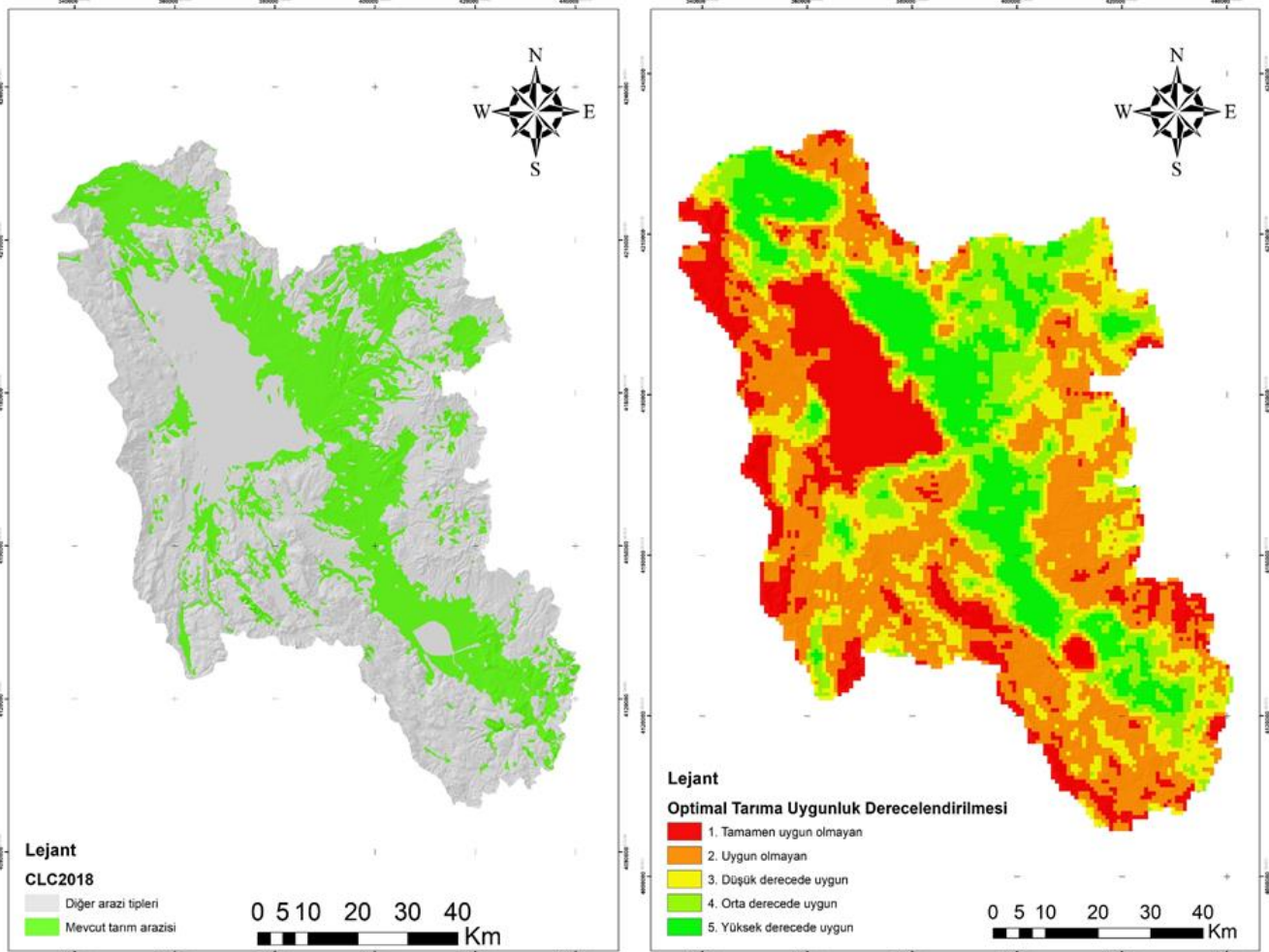


Şekil 10. Sulama kriteri analizleri; a) yer altı suyu varlığı ve b)Tarımsal drenaj mesafe analizi haritaları

Hazırlanan sonuç haritalar CBS ortamında raster formata çevrilerek yeniden sınıflandırma (Reclassify) işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlem ile ilgili tüm kriterler uzman görüşleri sonucu belirlenen ağırlık derecelerine göre ağırlıklandırılmış ve “Raster calculator” modülü ile ağırlıklı olarak çakıştırılarak nisbi önem derecelerine göre arazi uygunluk haritası oluşturulmuştur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden AHP yöntemi ve CBS teknolojilerini entegre bir şekilde kullanarak Beyşehir-Kaşaklı alt havzasına ait ekolojik yapının korunması adına arazi kaynaklarının optimum kullanım yerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada literatür taraması yapılarak mevcut kriterler belirlenmiştir. İlgili kriterler belirlendikten sonra uzman görüşleri alınarak kriterlerin birbirine göre nisbi önem dereceleri belirlenerek kriterler ağırlıklandırılmıştır. Elde edilen ağırlıklandırılmış tüm veriler somutlaştırılarak görselleştirilmesi amacıyla haritalandırılmıştır. Hazırlanan sonuç haritalar CBS ortamında raster formata çevrilerek yeniden sınıflandırma (Reclassify) işlemine tabii tutulmuştur. Elde edilen raster haritalar CBS ortamından ağırlıklı olarak çakıştırılarak tarım arazileri için uygunluk haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan sonuç harita, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)’nün arazi uygunluk sınıflandırmasına göre 5 kategoriye ayrılmıştır. Sınıflandırma; Yüksek Derecede Uygun, Orta Derecede Uygun, Düşük Derecede Uygun alanlar ile Uygun Olmayan ve Tamamen Uygun Olmayan alanlar şeklindedir (Şekil 11).



Şekil 11. a) CORINE 2018 mevcut tarım arazisi kullanım haritası ve b) optimum tarım arazisi kullanım haritası

Çalışmada üretilen arazi kullanımı uygunluk haritasına göre, 7329 km² havza alanının 1097 km² (% 14.84) lik alanının tarımsal üretim için yüksek derecede uygun, 1107 km² (% 14.98) lik alanının orta derecede uygun, 1149 km² (% 15.54) lik alanın

SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

ise düşük derecede uygun olduğu, 2633 km² (% 35.62) lik alanın tarımsal üretim için uygun olmadığı, 1405 km² (% 19.00) lik alanın ise tamamen uygun olmayan alan olduğu belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Yer seçim kriterleri ve ağırlıkları

Uygunluk sınıflandırması	Alan (km ²)	Yüzde (%)
Yüksek Derecede Uygun	1097	14.842
Orta Derecede Uygun	1107	14.977
Düşük Derecede Uygun	1149	15.546
Uygun Olmayan	2633	35.624
Tamamen Uygun Olmayan	1405	19.009
Toplam alan	7391	100.00

Şekil 11’ de gösterilen havza alanına ait CORINE 2018 arazi örtüsü/kullanımı verileri incelendiğinde 7391 km²’lik havzanın 2807 km²’lik alanının tarım arazisi olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan uygunluk analizi sonuçları ve CORINE 2018 arazi örtüsü/kullanımı verileri ile karşılaştırıldığında;

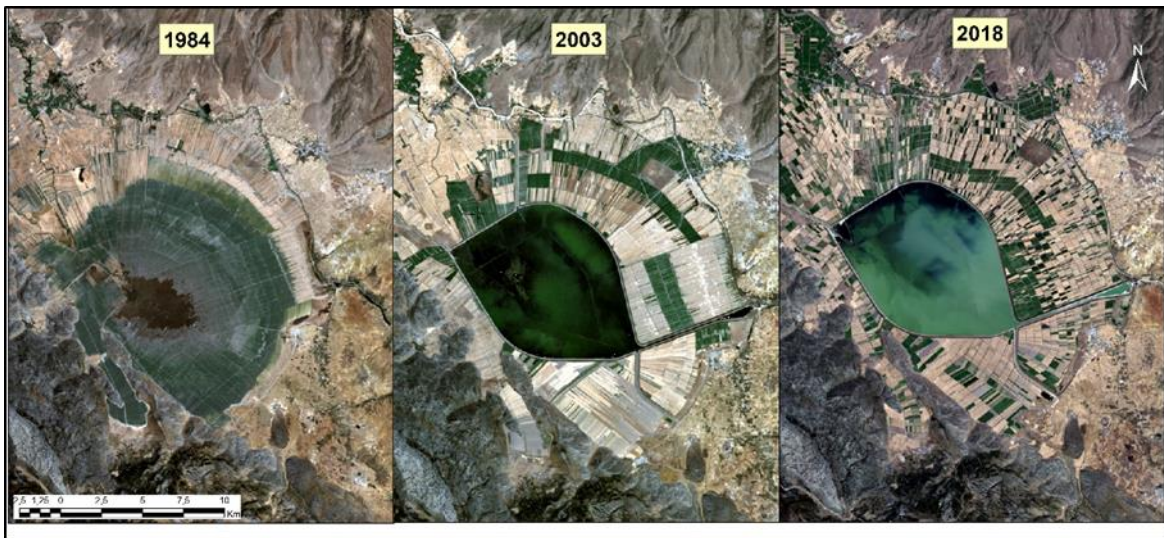
1097 km²’lik yüksek derecede uygun alanların %94.35 (1035km²)’lik kısmının tarım amaçlı kullanıldığı belirlenmiştir. Tarım dışı kullanılan 62 km²’lik alanda ise orman ve otsu bitkiler sınıfı (%2.91) ve şehirleşme sebebiyle oluşan yapay yüzeylerin (%2.09) bulunduğu tespit edilmiştir.

1107 km²’lik orta derecede uygun alanların %69.11 (765km²)’lik kısmının tarım amaçlı kullanıldığı belirlenmiştir. Tarım dışı kullanılan 342 km²’lik alanda ise yapay yüzeyler (%2.53), Orman ve otsu bitkiler (%24.83), çıplak alan/kayalık (%3.52) alan sınıfının bulunduğu belirlenmiştir.

1149 km²’lik düşük derecede uygun alanların %27.29 (313 km²)’lik kısmının tarım amaçlı kullanıldığı belirlenmiştir. Tarım dışı kullanılan 835 km²’lik alanda ise yapay yüzeyler (%1.81), Orman ve otsu bitkiler (48.56), çıplak alan/kayalık (%9.07), kıyı ve su yapıları (%3.26) alan sınıfının bulunduğu belirlenmiştir.

Tarım için uygun olmayan 2633 km²’lik alan üzerinde %7.27 (191.39 km²) ‘lik kısmının tarım amaçlı kullanıldığı belirlenmiştir. Tarım için tamamen uygun olmayan 1405 km²’lik alan üzerinde ise sadece %0.73 (10.26 km²) ‘lik küçük bir alanda tarımsal üretim yapıldığı tespit edilmiştir.

Genel olarak tüm analiz sonuçlarına bakıldığında mevcut arazi kullanımında %90 oranında doğru ve nitelikli tarım yapıldığı belirlenmiştir. Burada %90 oranında arazinin etkin ve verimli kullanılmasında, 1999 yılında yapımına karar verilen Beyşehir ve Apa Barajlarından su salımına destek vermek ve Konya-Çumra projelerine su sağlamak için DSİ tarafından 2003 yılında projesi tamamlanan Suğla depolama gölünün oluşturulması son derece etkili olmuştur. (Şekil 12).



Şekil 12. Suğla gölü zamansal değişimi (1984/2003/2018 Landsat uydu görüntüleri) [29]

M. G. Gümüş, S. S. Durduran

Gölün en büyük avantajı, tarımsal arazilere su sağlamak amacıyla oluşturulmasıdır. Havzanın güneybatı kesiminde yer alan (Seydişehir ilçesinde bulunan) gölün kuruyan alüvyonlu göl tabanı ve çevresi düzenlenerek iyi ve nitelikli bir tarım alanı oluşturulmuştur. Gölün tek dezavantajı bol yağış aldığı mevsimlerde göl arazinden tarım arazisine çevrilen tarım alanlarında taşkınlar yaşanması sebebiyle tarım arazisine zarar vermesidir.

Ülkemizde alan kullanımına yönelik karşılaşılan en büyük problemin planlama aşamasında yaşandığı görülmektedir. Alan kullanımında yapılan planlamalarda bilimsel ve teknik kriterler dikkate alınarak uzman görüşlerine başvurulmalıdır. Bu görüşler temel alınarak uygun alan kullanım planlamaları ve politikalar hazırlanmalıdır. Eğimli, sığ toprakları tarım alanı kullanarak ya da birinci sınıf arazi kullanım sınıfına sahip tarım toprakları üzerine yapılan sırf rant sağlamak amaçlı imar planlarının oluşturulması sınırlı doğal kaynaklarımızda geri dönüşü olmayan ekolojik bozulma sürecini de beraberinde getirmektedir. Bu sebeple uygun alan planlamaları yapılırken yerel yönetimler ve paydaşlar arasında koordinasyon oluşturularak etkili bir mekanizma geliştirilmelidir. Ayrıca yanlış alan kullanımlarına yönelik halkın daha da bilinçlenmesi sağlanmalıdır. Ayrıca bu kapsamda havzaya yönelik daha detaylı araştırmaların yapılması gerektiği ortadadır. Böyle bir çalışma aynı zamanda yerel yönetimlerce alınacak karar ve politikalar adına ve bölgede yapılacak diğer çalışmalarda dikkate alınacak altlık bir envanter olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma devam etmekte olan “Sürdürülebilir Arazi Yönetiminin Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Teknikleri Kullanılarak Beyşehir-Kaşaklı Alt Havzasında İncelenmesi” isimli doktora tezinden türetilmiştir ve 191419002 Proje Kodu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan Landsat uydu görüntülerinin ücretsiz temini için Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumuna (USGS) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] A. A. Babalık, “İsparta yöresinde arazi kullanımına ilişkin sorunlar,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, seri.A, sayı.1, s.63-81, 2002.
- [2] N.B. Chang, G. Parvathinathan, and J. B. Breeden, “Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region,” *Journal of Environmental Management*, vol. 87(1), pp. 139-153, 2008.
- [3] M. G. Gümüş, M. Ö. Balta, ve S.S. Durduran, “Coğrafi Bilgi Sistemlerine dayalı Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile alışveriş merkezi kuruluş yeri seçimi: Niğde örneği,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, sayı. 8(1), ss.134-146, 2019.
- [4] G. Rybarczyk, and C. Wu, “Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis,” *Applied Geography*, vol. 30(2), pp. 282-293, 2010.
- [5] M. Ö. Balta and H. Ü. Yenil, “Multi criteria decision making methods for urban greenway: The case of Aksaray, Turkey,” *Land Use Policy*, vol. 89, p. 104224, 2019.
- [6] J. M. Sánchez-Lozano, J. Teruel-Solano, P. L. Soto-Elvira, and M. S. García-Cascales, “Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 544-556, 2013.
- [7] H. Akıncı, A. Y. Özalp, and B. Turgut, “Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique,” *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 71-82,2013.
- [8] S. Bandyopadhyay, R. K. Jaiswal, V. S. Hegde, and V. Jayaraman, “Assessment of land suitability potentials for agriculture using a remote sensing and GIS based approach,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30(4), pp. 879-895, 2009.
- [9] A. Bozdağ, F. Yavuz, and A. S. Günay “AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) County,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 75(9), p. 813, 2016.
- [10] M. Akten, “İsparta ovasının optimal alan kullanım planlaması üzerine bir araştırma,” Dötra Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [11] M. Demir, N. D. Yıldız, Y. Bulut, S. Yılmaz, and S. Özer, “Alan kullanım planlamasında potansiyel tarım alanlarının ölçütlerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yöntemi ile belirlenmesi (İspir Örneği),” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 1(3), ss.77-86, 2011.
- [12] D. Dağlı ve A. Çağlayan, “Analitik hiyerarşi süreci ile optimal arazi kullanımının belirlenmesi: Melendiz Çayı havzası örneği,” *Türk Coğrafya Dergisi*,sayı (66), ss.83-92, 2016.

SÜRDÜRÜLEBİLİR ARAZİ YÖNETİMİNDE OPTİMAL TARIM ARAZİLERİNİN BELİRLENEBİLMESİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR DESTEK SİSTEMLERİNİN KULLANIMI: BEYŞEHİR-KAŞAKLI ALT HAVZASI ÖRNEĞİ

- [13] S. G. Yalew, A. van Griensven, M. L. Mul, and P. van der Zaag, “Land suitability analysis for agriculture in the Abbay basin using remote sensing, GIS and AHP techniques,” *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 2(2), p. 101, 2016, doi 10.1007/s40808-016-0167-x.
- [14] R. B. Zolekar and V. S. Bhagat, “Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 118, pp. 300-321, 2015.
- [15] B., Feizizadeh and T. Blaschke, “Land suitability analysis for Tabriz County, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS,” *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 56(1), pp. 1-23, 2013.
- [16] FAO, *A Framework for Land Evaluation, Soils Bulletin 32*, FAO and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1976.
- [17] İ. K. Tunçok and O. Ç. Bozkurt, “Bütüncül havza yönetimi: Konya kapalı havzası uygulaması,” *Su Yapıları Sempozyumu*, 19-20, 2015.
- [18] K. Özkan, “Relationships between physiographic site factors and distribution of Crimean pine (*Pinus nigra* Arnold) in Beyşehir watershed,” *Suleyman Demirel University, J. Fac. Forest. Vol. 2*, pp. 30-47 (in Turkish), 2004.
- [19] T. L. Saaty, “How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process,” *Interface*, vol. November-December, pp.19-43, 1994b.
- [20] L.G. Vargas, “An overview of the analytic hierarchy process and its applications,” *European Journal of Operational Research*, vol. 48: pp. 2-8, 1990.
- [21] V. D. Patil, R. N. Sankhua and R. K. Jain, “Analytic hierarchy process for evaluation of environmental factors for residential land use suitability,” *Int J Comput Eng Res* vol. 2(7), pp. 182-189, 2012.
- [22] E. G. Kadak, “Türkiye’de ahp tekniğinin performans değerlendirmedeki yeri ve ilaç dağıtım sektöründe uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, 1-90, Adana, 2006.
- [23] E. Forman, S. I. GASS, “The Analytic Hierarchy Process-An Exposition”, *Operations Research*, vol. 49(4), pp. 469-486, 2001.
- [24] T. L. Saaty, *Analytical Planning*, RSW Publications, 1985.
- [25] J. Malczewski, *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1999.
- [26] D. Öztürk ve F. Batuk, “Konumsal karar problemlerinde analitik hiyerarşi yönteminin kullanılması,” *Yıldız Teknik Üniversitesi Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, sayı 28, ss.124-137, 2010.
- [27] A. de Montis, P. de Toro, B. Droste-Franke, I. Omann, and S. Stagl, “Assessing the Quality of Different MCDA Methods”, *In Alternatives for Environmental Valuation*, vol. 4, pp.99-133, 2004.
- [28] N. Bhushan, K. Rai, *Strategic Decision Making: Applying The Analytic Hierarchy Process*. Springer-Verlag, New York, 2004.
- [29] J. A. Carrion, A.E. Estrella, F. A. Dols, M. Z. Torob, M. Rodriguez, and A. R. Ridaou AR, “Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: optimal siteselection for grid-connected photovoltaic power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 12(9), pp. 2358-2380, 2008.
- [30] T. L. Saaty, How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process, *Interface*, November-December, s.19-43, 1994a.
- [31] M. Gül, E. Çelik, A. F. Güneri, ve A. T. Gümüş, “Simülasyon ile bütünlük çok kriterli karar verme: bir hastane acil departmanı için senaryo seçimi uygulaması,” *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, sayı 11(22), ss.1-18, 2012.
- [32] E. Söylemez, “GIS-Based Search Theory Application for Search and Rescue Planning,” Doctoral dissertation, Middle East Technical University (METU), The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2007.
- [33] S. Chakraborty and D. Banik, “Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process,” *Int J Adv Manuf Technol* vol. 28, pp. 1237-1245, 2006.
- [34] United States Geological Research Institute (USGS). [Online]. Available: <https://Earthexplorer.usgs.gov/>. [Accessed: January. 10, 2020].





YAPISAL TASARIM BAĞLAMINDA 2007 VE 2019 DEPREM YÖNETMELİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI, NİĞDE ÖRNEĞİ

Hakan KARACA^{1,*} , S. Merve ORAL² , Merve ERBİL³ 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir University, Mimarlık Bölümü, 51240, Niğde, Turkey

³ Niğde Belediyesi, 51100, Niğde Türkiye

ÖZET

01.01.2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2019) ile mevzuatımız halihazırda Dünyada kullanımda olan benzerleri ile daha uyumlu hale getirilmiş olup, yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarını daha gerçekçi bir yaklaşımla modellemede akademik bilgi ile uygulama arasındaki farkı giderme amacıyla yenilikçi bir yaklaşımla hazırlanmıştır. Bu yeni yaklaşımların yapı tasarımına olan etkisini incelemek ve daha iyi anlaşılmasını sağlamak üzere, Niğde İl Merkezinde; TBDY-2019'a göre tasarlanan 5 adet binanın, 2007 tarihli Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'e (TDY-2007) göre çözümlenmeleri gerçekleştirilerek kullanılan malzeme miktarı ve performansları açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, mimarileri aynı kalmak üzere, TDY-2007'ye göre uyarlanan yapıların, kullanılan malzeme miktarlarının ve performanslarının değişimi izlenmiştir. Böylelikle, yönetmeliklerin yapı tasarımına olan etkisi, mimarisi aynı yapılarda kullanılan malzeme miktarlarının, malzeme verimliliğinin ve yapısal performanslarının karşılaştırılması ile irdelenmiş, maliyetlere de yansımaları kaçınılmaz olan farklılıklar derlenmiştir. Çalışma sonunda, malzemenin verimli kullanımı açısından dayanım sınırlarına göre yapılan boyutlandırma sonrasında, yeni yönetmeliğe göre tasarlanacak bir yapı da daha fazla beton kullanılması gerekeceği, ancak donatı miktarının da genelde azalma eğilimi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Deprem yönetmeliği, Dayanıma göre tasarım, Tasarım ivme spektrumu, Yapı maliyeti

COMPARISON OF 2007 AND 2019 TURKISH EARTHQUAKE CODES IN TERMS OF DESIGN OF STRUCTURES, A CASE STUDY IN NIGDE

ABSTRACT

By the new Turkish Earthquake Code, 2019 (TEC-2019) which went into effect on 01.01.2019, the differences between the Turkish earthquake codes and similar codes enforced in many other countries are diminished. The new code is prepared with a new approach that aimed minimizing the academic knowledge and the practice by introducing a more realistic modeling techniques. In order to investigate the effects of the these new approaches and better understanding of the code updates about the design of structures, structures that were designed by TEC-2019 were analyzed and monitored for their performance by using previous Turkish Earthquake Code, 2007 (TEC-2007). Thensame structures were modified structurally according to TEC-2007 and analyzed for evaluation purposes. Accordingly, the influences of the codes over the design of structures are monitored through the comparison of the amount of materials used, the material efficiency which indeed is directly reflected to the overall cost and the lateral performances of the architecturally same but structurally different buildings. At the end of the study, it is concluded that, the new structures designed according to the new code would require more concrete whereas lesser reinforcement would be sufficient.

Keywords: Earthquake code, Strength design, Design acceleration spectrum, Building cost

1. GİRİŞ

TBDY-2019 [1] yönetmeliği yapılan yeni düzenlemelerin, TDY-2007'yi [2] yalın bırakacak kadar kapsamlı ve detaylı olması açısından dikkat çekicidir. Zemin büyütme katsayılarının ilk defa uygulanacak olmasının yanı sıra, sismik tehlike haritasının değiştirilerek [3], yenilenme periyotlarına bağlı olarak dört sınıfta değerlendirilen tasarım depremleri kavramının kullanılması ve performans dayalı tasarım yaklaşımının kısmen kullanılacak olması hem malzeme hem de boyutlandırma da getirilen yenilikler ile öteleme ve yer değiştirme kısıtları, yapı tasarımı yaklaşımının değişmesine ve hatta bazı yapı çeşitlerinin de daha çok veya az tercih edilmesine neden olabilir [4]. Ancak yapılan önemli değişikliklere rağmen, şurası bir gerçek ki,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakan.karaca@ohu.edu.tr

Geliş / Recieved: 30.12.2019 Kabul / Accepted: 09.06.2020 doi: 10.28948/ngumuh.667365

H. Karaca, S. M. Oral, M. Erbil

özellikle deprem tehlikesinin daha az olduğu bölgelerde, yapıların büyük bir kısmında TDY-2007'de ana tasarım yaklaşımı olarak kullanılan Dayanım Göre Tasarım (DGT) esasları çerçevesinde yaklaşımın egemen olacağı açıktır. Hele konutların tasarımında, sadece DGT yaklaşımına göre tasarım yapılacak olması, 2007 ve 2019 yönetmeliklerinde tanımlanan DGT esasları arasında ki farkların önemle ele alınmasını gerektirmektedir.

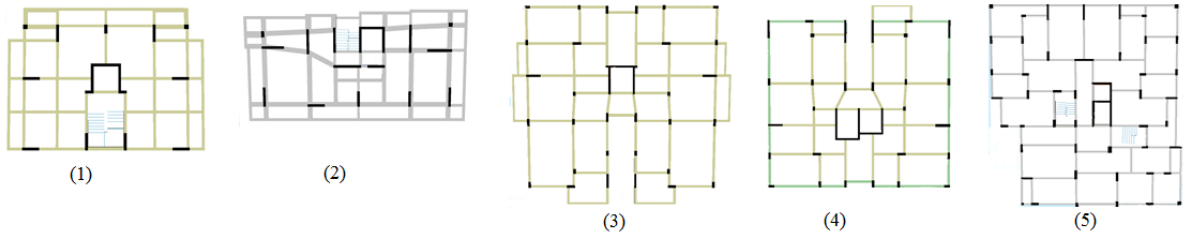
Literatür taraması yapıldığında, TBDY-2019 ve TDY-2007 yönetmeliklerinin tasarım ivme değerleri, etkin kesit rijitlikleri, zemin parametreleri açısından irdelendiği ve bu bağlamda yapıların performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği bir çok çalışmanın mevcut olduğu görülmüştür [5-17]. Konunun yeni olması nedeniyle çalışmaların büyük bölümü bildiri seviyesinde olmakla birlikte, makalelerde mevcut olup çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

Çalışmada, bu iki yönetmelik arasında ki farklılıkların irdelenmesi amacıyla, derlenen yapıların her iki yönetmeliğe göre tasarımı yapılmış ve özellikle sismik tehlike yaklaşımı ve DGT esasları arasındaki farkların yapı tasarımına etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, Niğde İlinde TBDY-2019 yönetmeliğine göre tasarlanmış beş adet yapının öncelikli olarak tasarımında kullanılan malzeme miktarını en aza indirebilmek için sınır durumlarına göre yeniden boyutlandırma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, aynı yapılar TDY-2007'ye göre çözümlenmiş ve en son adım olarak TDY-2007'ye göre uyarlanarak mimarisi değiştirilmeden yeniden çözümlenmesi yapılmıştır.

Çalışmanın en önemli katkısı, yeni yönetmelikle birlikte değişen ölçüt ve kısıtların yapıların tasarımına olan etkisini göstermek olmuştur. Çalışma kapsamında, özellikle DGT yaklaşımı bağlamında yönetmeliklerin yapı tasarımına olan etkisi görselleştirilmiş olup, ayrıca hangi değişikliğin kullanılan malzeme miktarına ve yapıların yanal performansına olan etkisinin boyutları irdelenmiş ve yapıların bahsi geçen değişikliklere karşı duyarlılıkları araştırılmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmada Niğde İl merkezinde sıklıkla görülmeye başlanan yüksek yapılar ile orta yükseklikteki yapılardan 5 tanesi karşılaştırma amaçlı olarak çözümlenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında TBDY-2019 uyarınca tasarlanan yapıların öncelikle TDY-2007'ye göre çözümlenmeleri yapılmış ve kullanılan donatı miktarları karşılaştırılarak malzeme verimliliği ile ilgili bilgiler edinilmiştir. Daha sonra TDY-2007 uyarınca gerekli değişiklikler yapılarak aynı şartnameye göre tekrar çözümlenen yapıların performansı ve kullanılan malzeme miktarları ile ilgili veriler elde edilmiştir. Yapısal çözümlenme programı olarak STA4CAD v14 [18] kullanılmış, programın hem de TBDY-2019'a göre de çözümlenmeye olanak vermesi sayesinde istenilen işlemler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Kapsamında Değerlendirilen Yapıların Kat Planları

Karşılaştırma amaçlı olarak derlenen yapıların geometrik verileri ve toplam ağırlıkları Tablo 1'de verilmiştir. En az 8 kat ve en fazla 18 kat olarak tasarlanan yapıların alanları ve yüksekliklerine göre ağırlık dağılımları da aynı tabloda verilmiştir. Bütün yapılarda C25/30 betonu ile B420C donatısı kullanılmış ve bu malzeme uyumunun sayesinde de karşılaştırma yapmak daha kolay olmuştur. Yapılar çalışma kapsamında değerlendirmeye tabi tutulmadan önce boyutları açısından değerlendirilmiş ve bütün yapıların düşey elemanları olabildiğince sınır durumlara göre uyarlanarak boyut değişikliği gerçekleştirilmiştir. Bu değişiklikler yapılırken kapasite tasarımı ilkelerinin yanısıra, güçlü kolon-zayıf kiriş, görelî çerçeve rijitlikleri, kuşatılmış kolon kısıtı ve kiriş-kolon sürekliliği gibi ölçütler de gözönüne alınmıştır. Böylelikle, tasarımcının inisiyatifi ile gereğinden bir miktar da olsa daha güçlü tasarlanan düşey yapı elemanları optimize edilerek, oluşturulan fazla kapasitenin çalışma sonucunu etkilememesi bağlamında gerekli uyarlamalar gerçekleştirilmiştir.

Yapısal uyarlamalardan en önemlisi, eş zemin sınıfları için ön bir kabul yapmak yerine, her bir yapının ada ve parsel bazında derlenen zemin etüt raporları tek tek incelenmiş ve etüt sonucunda belirlenen zemin parametreleri, TDY-2007 kapsamında değerlendirilerek, TDY-2007'ye göre zemin sınıfları ve zemin emniyet gerilmeleri belirlenmiştir. TBDY-2019'a göre tasarlanan yapıların zemin sınıfları ZC ile ZE arasında değişirken, zemin taşıma gücü tasarım gerilme değerleri de 15.0 t/m² ile 93 t/m² arasında değişim göstermektedir. Çalışmanın kapsamında olmaması nedeniyle temel tasarımı değerlendirme dışı tutulmuş ve yapıların tamamı radye temel olarak tasarlanan temel üzerine oturtularak çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir.

YAPISAL TASARIM BAĞLAMINDA 2007 VE 2019 DEPREM YÖNETMELİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI, NİĞDE ÖRNEĞİ

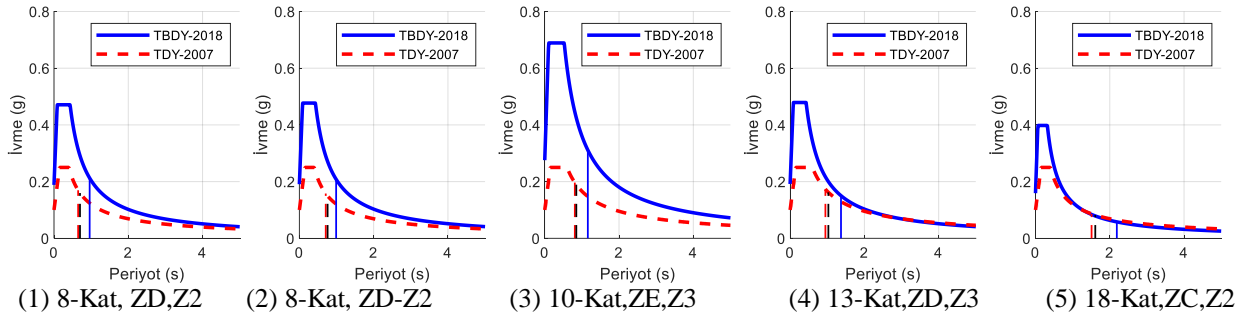
Tablo 1. Çalışma Kapsamında Değerlendirilen Yapıların Temel Verileri

Yapı No	1	2	3	4	5
Kat Sayısı	8	8	10	13	18
Toplam Yükseklik	25.40	24.50	31.30	39.30	54.29
Toplam Kat Alanı	1546.8	1760	3367	4460	9800
Zemin Sınıfı (TDY-2007)	Z2	Z2	Z3	Z3	Z2
Zemin Sınıfı (TBDY-2019)	ZD	ZD	ZE	ZD	ZC

*TBDY-2019'a göre Yapılan Çözümleme Sonucunda Elde Edilen Değerler

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Yapılara etki ettirilecek deprem yüklerinin belirlenmesi için, tasarım ivme değerlerinin elde edilmesi ve yapıya etki ettirilecek yatay kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda TDY-2007 deprem bölgeleri haritası ile TBDY-2019 ile kullanılmaya başlanan yeni sismik tehlike haritaları kullanılarak, tasarım spektrum ivme eğrileri elde edilmiştir (Şekil 2).

**Şekil 2.** Çalışma Kapsamında Değerlendirilen Yapılar için Geçerli Tasarım İvme Eğrileri ve Hakim Salınım Periyotları (TDY-2007 ve TBDY-2019)

Şekilde gösterildiği üzere, TDY-2007'de zemin sınıflarının tasarım ivme spektrumuna olan etkisi, TBDY-2019'a göre kısıtlıdır. Şöyle ki TDY-2007'de maksimum tasarım ivmesi bütün zeminler için aynı olup, yapıların ana salınım periyodunun belirli bir değerden az olması durumunda da, bütün yapılar bütün zemin koşulları için aynı tasarım ivmesi ile yüklenir.

Tablo 2. Yapıların Hâkim Salınım Periyotlarında ve Tasarım İvmelerindeki Değişim

	Salınım Periyodu (s)						Tasarım Spektrum İvmesi (g)					
	T_x			T_y			S_{ax}			S_{ay}		
	2019	2007	2007*	2019	2007	2007*	2019	2007	2007*	2019	2007	2007*
1	0.96	0.65	0.70	0.87	0.62	0.66	0.213	0.170	0.160	0.235	0.176	0.168
2	0.99	0.71	0.76	0.84	0.68	0.72	0.208	0.158	0.150	0.245	0.164	0.156
3	1.16	0.81	0.85	1.04	0.71	0.74	0.311	0.197	0.189	0.347	0.219	0.211
4	1.37	0.95	1.03	1.40	0.97	1.01	0.151	0.173	0.162	0.147	0.170	0.165
5	2.19	1.51	1.61	1.98	1.36	1.41	0.058	0.086	0.082	0.064	0.094	0.091

Şekil 2'den ve Tablo 2'den de izlenebileceği üzere, TBDY-2019'a göre harita spektral ivme katsayılarının aynı olduğu beş yapıda da, spektral ivme değerlerinin hem zemin koşulları ve hem de yapının ana salınım periyoduna göre değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi bütün yapılar için oluşturulan spektrum eğrileri karşılaştırıldığında, TBDY-2019'a göre yapılan analiz sonucunda elde edilen değerlerin hemen hemen bütün periyotlar için yüksek olduğu görülmüştür. Burada, şunu da belirtmek gerekir ki, yapıların ana salınım modu kütle katılım oranlarının minimum %69 seviyelerinde olduğu göz önüne alınırsa, yapılara etkiyen yüklerin ve dolaylı olarak da yapı performansının değerlendirilmesi bağlamında, öncelikle ana salınım periyotlarının karşılaştırılarak değerlendirilmesi temelsiz değildir.

Ayrıca, tablo 2'den de anlaşıldığı üzere, TBDY-2019 kapsamında tasarlanan her bir yapı için her iki yönde de olmak üzere elde edilen hakim mod salınım periyotlarının, TDY-2007 kapsamında yapılan değerlendirmelerde kısılacığı açıktır. Bu kısılma, ortalama %42 civarında gerçekleşmiş, böylelikle etkin kesit rijitlik katsayıları ile azaltılan yapı rijitliğinin yapı salınım periyoduna ve dolayısıyla da yapılara etki ettirilecek tasarım ivmelerine etkisi de gözler önüne serilmiştir. Buna ek olarak, TDY-2007'nin minimum kolon boyutlarıyla ilgili olan kısıtlarına ve dayanım sınırına göre uyarlanan yapıların periyotlarında bir miktar

uzama meydana gelse de, uyarlanan yapıların periyotlarının da TBDY-2019'a göre tasarlanan yapıların salınım periyotlarına göre %34 daha kısa olduğu belirtilmelidir. Diğer çalışmalarda da özellikle Keskin vd.'de [12] elde edilen sonuçlar daha yakın olmakla birlikte, bu değerler Öztürk vd.'de [15] ve Başaran'da [10] %50'den daha büyüktür. Aslında perde ve kolonların oranları ve konumları itibarıyla de değişken olabilecek bu oranın, kesin bir değer olmamakla birlikte yapısal açıdan etkileri kestirilebilir. Ana salınım periyotlarına denk gelen tasarım ivme değerleri incelendiğinde ise, hem Tablo 2'den hem de Şekil 2'den rahatlıkla anlaşılacağı üzere, yeni yönetmelikle birlikte Niğde İl merkezinde zayıf zeminler üzerine yapılacak yapıların çok yüksek ivme değerleriyle tasarımlarının gerçekleştirilmek zorunda kalacağı anlaşılmaktadır [6].

TBDY-2019'da tanımlanan zemin büyütme katsayılarının ZA ve ZB hariç diğer zemin koşullarında tasarlanacak yapılar için tasarım ivmelerinde artışa neden olacağı ve özellikle zayıf zeminlerde çok daha büyük tasarım ivmeleri ile tasarım yapılması gerektiği açıktır. Bu artışın yeni yapıların tasarımına doğrudan etki edeceği ve hatta konut maliyetleri açısından düşünüldüğünde de zayıf zeminler için tasarlanan yapıların daha güçlü yapılması gerekeceği göz önüne alınarak zemin zayıfladıkça konutların da maliyetinin TDY-2007 kapsamında gerçekleşecek olası artışlardan çok daha fazla olacağı öngörülebilir.

Tablo 3. Şartnameler Arası Değerlendirilen Yapılarda Periyot Daralmaları ve Zemin Sınıfları Değerlendirmeleri Sonucunda Meydana Gelen Donatı Değişimleri (Temel Üstü)

Yapı No		1	2	3	4	5	
Kat Sayısı		8	8	10	13	18	
2019	Beton	428	487,5	900,2	1245,1	2721,2	
	Donatı Ağırlığı (t)	φ8-φ12	34,5	51,9	60,8	92,2	183,3
		φ14-φ50	8,3	10,1	28,3	35,7	99,9
		Toplam	42,8	62,0	89,1	127,9	283,2
2007 - MODİF	Beton (m ³)	405,1	456,8	872,1	1181,6	2596,4	
	Donatı Ağırlığı (t)	φ8-φ12	34,5	51,9	64,3	89,5	188,2
		φ14-φ50	7,7	10,5	28,3	34,3	97,9
		Toplam	42,2	62,4	92,6	133,8	286,1
2007	Beton (m ³)	428,0	487,7	900,0	1245,6	2721,2	
	Donatı Ağırlığı (t)	φ8-φ12	36,6	52,2	65,1	92,7	187,1
		φ14-φ50	12,2	11,1	30,3	38,8	108,9
		Toplam	48,8	63,3	95,4	131,5	296,0

Bu bağlamda, TBDY-2019'a göre tasarlanmış yapıyı TDY-2007 koşullarına göre değerlendirmek için, yapının hiçbir kesitinde değişiklik yapılmaksızın, sadece zemin koşullarının değerlendirilerek TDY-2007 tasarım ivme spektrumu ivmeleri elde edilmiş ve yapıya etki ettirilmiştir. Tablo 3'den de izlenebileceği üzere, aynı boyutlara sahip yapının donatı oranlarına bakıldığında, bütün yapılar için önemli oranda artışlar olduğu görülmektedir. Yapıya etki ettirilen ivme değerlerinin değişimi ile paralellik olmadığı anlaşılan bu durumun, yapı elemanlarının rijitliklerinin şartnamelere göre farklı kabul edilmesiyle oluştuğu anlaşılmaktadır. TDY-2007'ye göre çatlamamış kesit rijitliklerinin yüksek olması, daha fazla yükün eleman tarafından yüklenilmesine neden olmakla birlikte, donatı oranlarının da artışına neden olmaktadır.

Malzeme miktarlarındaki değişimin izlenmesine ek olarak, yönetmeliklerin yapı performansına olan etkisini irdelemek amacıyla en üst kat ötelemeleri derlenmiştir. Tablo 4'te sunulan öteleme miktarları incelendiğinde, TBDY-2019'a göre tasarlanan yapıların ötelemelerinin çok daa yüksek olduğu anlaşılır. TBDY-2019'a göre çözümlenen yapıların en üst kat ötelemeleri aynı yapıların TDY-2007'ye göre çözümlenmesinden elde edilen ötelemelere göre ortalama 2.82 kat ($\sigma=0.63$) daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, TDY-2007'ye göre uyarlanan yapıların ötelemeleri de asıl haliyle TDY-2007'ye göre çözümlenen yapıların ötelemelerine göre 1.06 kat ($\sigma=0.02$) daha fazla olduğu görülmüştür. Bu değerlerin Keskin vd. [12] ve Tunç ve Tanfener [16] ile karşılaştırılması aslında zemin ve sismik tehlike gibi koşulların aynı olmaması nedeniyle verimli olmayabilir, ancak etkin kesit rijitliklerinin tanımlanması birçok koşulda ötelemelerde artışa neden olmaktadır. Bu bağlamda değerlendirmek gerekirse, TBDY-2019'un TDY-2007'e göre 2.82 kat daha fazla ötelemeye neden olmasının, hem de tasarım ivmeleri ile ilgili kesin bir artış ya da azalış eğilimi bulunmamasına rağmen böyle bir durumun oluşmasının; sadece ve sadece kesit rijitliklerinin etkin kesit rijitliği katsayıları ile çarpılarak (TBDY-2019, Tablo 4) perdeler için %50 (eşdeğer çubuk) ve çerçeve kolonları için ise %30 azaltılması nedeniyle oluştuğu çıkarımı yapılabilir.

Bir başka yönden değerlendirildiğinde, TDY-2007'de maksimum çatı ötelemesinin yüksekliğe oranı 0.020 ile sınırlandırılmışken, TBDY-2019'da maksimum görel kat ötelemeleri kısıtlarından yapılan çıkarıma göre bu oran betonarme ve dolgu duvarları derzle ayrılmış yapılar için $0.016/\lambda$ olarak belirlenmiştir. λ katsayısının da deprem düzeylerine göre etkileyen tasarım ivmeleri arasındaki oran olarak yaklaşık 1.5 civarında olacağı tahmin edilirse, maksimum çatı ötelemesinin yeni yönetmelikle yaklaşık olarak yarı yarıya azaltıldığı anlaşılır. Kolon boyutlarındaki artışın TDY-2007'ye göre tasarlanan yapılara göre rijitliği artıracak bariz olmakla birlikte, yapıların genel olarak TDY-2007'ye göre tasarlanan yapılardan daha rijit olması gerektiği açıktır. Her ne kadar elde edilen öteleme değerleri sınırlar içerisinde kalsa da, Tablo 4'teki sonuçlar da bu çıkarımı

YAPISAL TASARIM BAĞLAMINDA 2007 VE 2019 DEPREM YÖNETMELİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI, NİĞDE ÖRNEĞİ

destekler nitelikte olup, yeni yönetmelikte şekil değiştirme ölçütlerinin daha ön plana çıkarıldığı gerçektir. TDY-2007'nin ise şekil değiştirme bağlamında daha toleranslı olup hem bu bağlamda hem de genel anlamda TBDY-2019'a göre dayanım kısıtlarına uyum açısından daha muhafazakâr olduğu da belirtilmelidir.

Tablo 4. Yapıların Performansı, Deprem Etkisiyle Çatı Katı Yanal Ötelemesi (mm)

Yapı No	1	2	3	4	5	
Kat Sayısı	8	8	10	13	18	
R*	5,60	5,00	6,00	7,00	7,00	
Zemin	ZD,Z2	ZD,Z2	ZE,Z3	ZD,Z3	ZC,Z2	
2019	18,26	23,28	30,48	17,80	32,25	
2007 – MODİF	x	7,31	8,31	9,70	10,79	12,60
2007		6,75	7,86	9,25	10,00	11,68
2018		12,25	20,77	27,90	20,60	27,45
2007 - MODIF	y	5,05	7,70	8,26	10,68	11,18
2007		4,77	7,14	8,09	10,33	10,81

* çalışılan yapıların R katsayıları her iki yönetmelik için aynıdır

Ayrıca, TBDY-2019 kapsamında değerlendirilen yapıların kendi aralarındaki dikkat çekici derecede değişken ötelemelerinin, zemin koşulları ve R katsayıları bağlamında beklenebilir olduğu belirtilmelidir. TDY-2007'ye göre çözümlenen yapılarda zemin ve R katsayısı hassasiyetinin aynı derecede olmadığı da göz önüne alınarak, TBDY-2019'un özellikle zemin sınıfı hassasiyeti vurgulanmalıdır.

4. SONUÇ

Çalışmada, yönetmeliklerin yapı tasarımına olan etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla iki aşamalı bir yöntem benimsenmiş, ilk aşamada TBDY-2019'a göre tasarlanan yapıların, elemanlarının ve taşıyıcı sisteminin hiç değiştirilmeden TDY-2007'ye göre çözümlenmesi yapılmıştır. Bu yaklaşımla, TDY-2007 kapsamında değerlendirilen yapıda taşıyıcı sistem değiştirilmeden yapılan çözümlenmede yapıya etki edecek yüklerin değişmesinden dolayı sadece donatının değişeceği açıktır. Böylelikle, özellikle yük taşıyıcı $\phi 14$ - $\phi 50$ aralığındaki donatıların değişimi izlenmiş ve malzeme verimliliği ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, TDY-2007'ye göre yapılan analizde aynı kesitlerde donatının arttığı gözlemlenmiş, bu durumun nedeni olarak, enkesit rijitlikleri azaltılmadan yapılan çözümlenmeye göre daha fazla yüklenen kesitlerin daha fazla donatılandırılması olduğu anlaşılmıştır. Aynı yapıların TDY-2007 kapsamında değerlendirilerek yeniden boyutlandırılması sonrasında bile kullanılan beton miktarındaki belirgin azalmaya rağmen donatılarda meydana gelen göreceli azalma yapının donatı miktarını, TBDY-2019 seviyesine indirememiştir. Bu durum sadece deprem hesabı için kullanılan etkin kesit rijitliklerinin küçültülmesinin, kesitlerin tasarımında ve donatılandırmasında ne kadar etkili olduğunun da bir göstergesidir.

Çalışmanın beklenen sonuçlarından biri olarak, yeni yönetmelikle birlikte yapılarda belirgin periyot uzamalarının gerçekleşeceği görülmüştür. Ancak, etkin kesit rijitliklerinin azaltılmasına paralel olarak meydana gelen bu uzama nedeniyle yapılara etki ettirilecek yükler bakımından kestirim yapabilmeyen olanaklı olmadığı da görülmüştür. Şöyle ki, hem sismik tehlike haritasında hem de zemin parametrelerin de gerçekleştirilen değişikliklerin periyot uzamalarından dolayı tasarım ivmesinin artacağı yada artıp artmayacağı kestirilemez olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Bu durum karşısında tasarım ivmelerinde artış ya da azalış meydana gelip gelmeyeceği sadece istatistiksel olarak değerlendirilebilir ve yapı bazında değerlendirmeler yapılması daha anlamlı olacaktır.

Kat ötelemeleri açısından incelendiğinde de etkin kesit rijitliklerinin azaltılmasının yapının ötelemelerini çok fazla etkilediği de anlaşılmıştır. TDY-2007'ye göre neredeyse 3 kata varan öteleme miktarı sınırlar içerisinde kalmakla birlikte dikkat çekicidir. Şöyle ki, TDY-2007'ye göre uyarlanan taşıyıcı sistemle bile çok az ötelenen yapının, TDY-2007 kapsamında izin verilen sınırlara çok uzak olduğu, bununla dayanıma göre gerçekleştirilen tasarımın halihazırdaki öteleme sınır durumlarına uymakta hiç zorlanmayacağı anlaşılmaktadır. Bu durum, TBDY-2019 tasarım yaklaşımında değiştirilmiş ve öteleme sınırlarının, dayanım sınırlarına göre tasarlanan yapılar için daha anlamlı olduğu anlaşılmıştır.

Sonuçta, çalışmanın da gösterdiği gibi, TBDY-2019'un zorunlu kıldığı yapıların tasarımına en önemli derecede etki edecek yeniliklerden bir tanesi, sismik tehlike haritasının güncellenmesi ise diğeri de zemin etkisinin tasarım ivme değerlerine olan etkisinin tanımlanarak tasarım denklemlerine sokulmasıdır. Amacı, zayıf zeminlerde yapıların maruz kaldığı büyük deprem yüklemelerini doğru modellemek olan yeni yaklaşım, özellikle şehirleşmesinin zayıf zeminler üzerinden sürdüren birçok kentimizin yeniden şekillenmesi için belki de başat bir rol oynayacaktır. Bu bağlamda yönetmeliklerin zemin parametrelerinde ve DGT yaklaşımlarındaki farklılıklar nedeniyle meydana gelen farkların daha detaylıca anlaşılması için, daha fazla örnekler daha kapsamlı davranış analizleri ve maliyet çalışmalarına gerek vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Ankara, 2019
- [2] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Ankara, 2007
- [3] AFAD Deprem Daire Başkanlığı, "Türkiye Deprem Tehlike Haritasının Güncellenmesi", , –Ankara, 2018
- [4] Prof. Erdem Canbay ile kişisel görüşme(Şubat 2019)
- [5] K.B. Afacan ve E. Güler, "Yeni Deprem Yönetmeliği Performansının Zemin Büyütme Analizi ile Belirlenmesi", 5. *International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ankara, Turkey, 8-11 October 2019,
- [6] V.H. Akansel, B.F. Soysal, K. Kadaş ve P. Gülkan, "An evaluation of the 2019 seismic hazard map of Turkey on the basis of spectrum intensity", *5th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ankara, Turkey, October 8-11, 2019,.
- [7] M.M. Erdem ve M. Bikçe, "Maksimum Azaltılmış Görelî Kat Ötelemelerinin Güncel (DBYBHY2007) ve Yeni Yönetmelik Taslağına (TBDY2016) Göre Mukayesesi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 32, Sayı 2, s. 253-262, 2017.
- [8] K. Kadaş, B.F. Soysal, V.H. Akansel, L. Mazılıgüney ve A. Yakut, "Comparison of 2007 and 2019 Seismic Hazard Maps Based on Spectrum Intensities and Corresponding Engineering Demands - A Case Study with RC School Buildings in Istanbul", *5th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ankara, Turkey, 8-11 October 2019,
- [9] M.K. Koçkar, H. Akgün, " Comparison of 2007 and 2018 Turkish Building Code of Site Classification Procedure for Seismic Design Based on Seismic Site Characterization Studies, A Case Study for Ankara", *5th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ankara, Turkey, 8-11 October 2019
- [10] V. Başaran, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY2019) Göre Afyonkarahisar İçin Deprem Yüklerinin Değerlendirilmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı 18, s. 1028-1035, 2018
- [11] G. Burnazoğlu, N. Mert ve H. Kasap, "Betonarme Yapısal Perde Yeri Seçiminin Yapısal Davranışa Etkisinin TBDY2018 ve BDYBHY 2007 Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırılması", *3rd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Turkey, 23-27 Oct 2019
- [12] E. Keskin ve K.B. Bozdoğan, "2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi", *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, Cilt 4, Sayı 1, s. 74-90, 2018
- [13] A. Demir ve A.H. Kayhan, "Deprem Yönetmeliği 2007 ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile Uyumlu Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması", *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Eskişehir, Turkey, 2017.
- [14] M. Koçer, A. Nakipoğlu., B. Öztürk, M.G. Al-Hagri, M.H. Arslan, Deprem Kuvvetine Esas Spektral İvme Değerlerinin TBDY2018 ve TDY2007'ye göre Karşılaştırılması, *Selçuk Teknik Dergisi*, Cilt 17, Sayı 2, s. 43-58, 2018
- [15] H. Öztürk, A. Demir, G. Dok, H. Güç, "Betonarme Kolonların Etkin Kesit Rijitlikleri Üzerine Yönetmeliklerin Yaklaşımı", *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Eskişehir, Turkey, 2017
- [16] P. Gülkan, A. Koçyiğit, M.S. Yüçemen, V. Doyuran ve N. Başöz, "En son verilere göre hazırlanan Türkiye deprem bölgeleri haritası", ODTÜ, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Rapor No: 93-01, Ankara, Türkiye, Ocak 1993
- [17] G. Tunç ve T. Tanfener, "2007 ve 2016 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi", *3. Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişebilirlik*, TMMOB Mimarlar Odası Ankara Şubesi, Ankara, Turkey, 2016.
- [18] Sta4CAD v.14 . [CD-ROM] İstanbul, Türkiye: STA Bilg. Müh. Müş. Ltd. Şti., 2019





KALSİNE EDİLMİŞ BENTONİTİN BETON AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

Cenk KARAKURT^{1,*} , Turgut KAYA² , Salih YAZICIOĞLU³ 

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 11210, Bilecik Türkiye

² Batman Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Programı, 72060, Batman Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara Türkiye

ÖZET

İnşaat mühendisliği uygulamalarında yapı malzemesi olarak betonun kullanımı ülkemizde oldukça yaygındır. Özellikle beton üretiminin ve malzeme temininin kolaylığı bu husus üzerinde etkili rol oynamaktadır. Genellikle dış ortam koşullarında ve dinamik etkiler altında kalacak olan betonlarda aşınma problemleri ile karşılaşmaktadır. Bu çalışmada; kalsine bentonit katkılı betonların mekanik davranışı ve aşınma dirençleri incelenmiştir. Beton karışımlarında çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında 900 °C de 90 dk süreyle kalsine edilmiş bentonit kullanılarak 4 farklı numune serisi üretilmiştir. Taze betonun işlenebilirliği çökme deneyi ile belirlenmiştir. Basınç dayanımları için 150x150x150 mm ve aşınma deneyleri için 70x70x70 mm boyutlarında küp beton numuneleri üretilmiştir. Numunelerin 7, 28, 56 ve 180 günlük basınç dayanım değerleri ve Böhme aşınma dirençleri tespit edilmiştir. Beton karışımında kullanılacak en uygun kalsine bentonit oranının % 10 olduğu basınç ve aşınma deneyi sonuçlarına göre belirlenmiştir. Sonuç olarak; B10 numunesinin R numunesine oranla % 3,7 dayanım artışı ve aşınma direnci davranışı üzerinde % 10.6 daha az aşınma kaybı ile betona olumlu kazanımlar sağladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bentonit, Kalsinasyon, Beton, Basınç dayanımı, Aşınma direnci

EFFECT OF CALCINED BENTONITE ON THE ABRASION BEHAVIOR OF CONCRETE

ABSTRACT

The use of concrete as a building material in civil engineering applications is quite common in our country. In particular, the ease of production and supply of concrete plays an important role in this fact. Abrasion problems are encountered especially in concrete that will be exposed to external conditions and dynamic effects. In this study; mechanical behavior and abrasion resistance of calcined bentonite used concretes were investigated. In concrete mixtures, 4 different specimen series were produced by using bentonite calcined for 90 minutes at 900 °C at 5%, 10% and 15% by weight against of cement. The workability of the fresh concrete was determined by the slump test. Two different types of specimens are prepared in dimension with 150x150x150 mm for compressive strength test and 70x70x70 mm for abrasion test. The compressive strength and Bohme abrasion resistance of the mixtures were determined at 7, 28, 56, and 180 days cured specimens. The most suitable calcined bentonite content to be used in the concrete mixture is determined as 10% according to the compressive and abrasion resistance test results. Consequently; it has been observed that B10 specimen showed benefits on concrete with 3.7 % strength increase and 10.6 % less abrasion loss than R specimen.

Keywords: Bentonite, Calcination, Concrete, Compressive strength, Abrasion resistance

1. GİRİŞ

Beton elemanlarının kullanım yüzeylerine çarpma veya sürtünmeye sebep olabilecek kuvvetler, beton elemanlarının yüzeylerinde deformasyonlar oluşturmakta ve yüzeylerin aşınma ile tahrip edilmesine yol açmaktadır. Malzemelerdeki aşınma olayı fiziksel ve mekanik bir olay olarak nitelendirilebilir. Yapısal uygulamalarda zamana ve etkisinde kaldığı kuvvetlere bağlı olarak ortaya çıkmakta ve genellikle, yürüyüş yolları, beton yollar ve akarsular tarafından taşınan aşındırıcı etkilerine maruz kalan su yapılarında görülmektedir [1]. Aşınma ihtimali olan yerlerde, aşınma direnci yüksek agrega ve bağlayıcı malzemelerin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cenk.karakurt@bilecik.edu.tr

Geliş / Recieved: 04.02.2020 Kabul / Accepted: 07.04.2020 doi: 10.28948/ngmuh.684467

kullanılması, beton elemanlarının servis ömrünü uzatacağı ve oluşabilecek şekil değiştirmelerin asgariye indirilebilmesi açısından önemlidir [2].

Beton elemanlarının aşınma direnci; karışımda kullanılan mineral katkı maddelerine, yüzey düzeltme yöntemlerine, yüzeyinin yapısal özelliklerine, kür koşullarına ve dayanım özelliklerine bağlıdır [3], [4]. Dayanımı etkileyen unsurlar incelendiğinde; su/çimento oranı, agrega ve bağlayıcı madde hamuru kalitesi ve agrega-hamur ara fazı gibi faktörler de aşınma direncini etkilemektedir [5]. Bağlayıcı olarak kullanılan çimento ile belirli oranlarda yer değiştirilen ve hidrasyon sonucu meydana gelen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşenler oluşturan puzolanik malzemeler [6], betonda geçirimsizlik, işlenebilirlik ve ileri yaşlarda dayanıma katkı sağlaması gibi önemli kazanımlar sağlamaktadır [7], [8].

Bünyesinde yüksek oranda montmorillonit veya iyon değişimleri ile türemiş olan hektorit, nontronit, berdelit ve saponit gibi kil minerallerini bulduran maddelere bentonit denilmektedir [9]. Bentonit birçok alanda kullanılmaktadır. Bentonitin kullanım alanları incelendiğinde; Alçıda priz süresini kısaltma maddesi olarak değerlendirilir. Döküm sektöründe kalıpların imalatında bağlayıcı malzeme olarak, seramikçilikte katkı maddesi olarak malzemeye dayanım kazandırmak amacıyla kullanılır. İnşaat sektöründe zemin iyileştirme çalışmalarında ve geçirimsizliğin sağlanması amacıyla da kullanılmaktadır. Yangın söndürücü sistemlerde, çeşitli sıvı gıdalarda, boya sanayi sektörlerinde ve birçok kimya sanayisinde katalizör malzeme şeklinde değerlendirilmektedir [10]. Yüksek sıcaklığa maruz kalan bentonitin mineralojik ve kimyasal yapısında değişimler meydana gelmekte olup genellikle sinterleşme sıcaklığı 950-1100 °C arasında değişmektedir [11]. Puzolanik katkı maddesi olarak kalsine edilen bentonitin çimento harçlarında kullanılabilirliğinin araştırıldığı deneysel bir çalışmada, bentonitin %10 oranında mineral katkı malzemesi olarak kullanımının en iyi dayanım performansını sağladığı belirtilmiştir [12]. Kalsine bentonit katkılı harçların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada ise; mineral katkı olarak kalsine edilen bentonit kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde minimum dayanım kayıpları 500 °C'de referans serisinde, 750 ve 1000 °C'lerde ise %10 bentonit katkılı serilerden elde edilmiştir [10]. Ancak literatür incelendiğinde kalsine edilen bentonit katkılı betonların aşınma direnci ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada biri referans karışımı olmak üzere %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile ağırlıkça kalsine edilen bentonit ikame edilerek 4 farklı beton serisi üretilmiştir. Üretilen betonların işlenebilirlik ve birim ağırlık özellikleri ile 7, 28, 56 ve 180 günlük kür süreleri sonundaki basınç dayanımı, aşınma direnci ve sertlik değerleri belirlenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Betonların hazırlanmasında TS EN 197-1'e uygun [13] CEM I 42.5 R Portland çimentosu ve mineral katkı olarak kalsine edilmiş bentonit kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Karışımlarda Bilecik şehir şebeke suyu beton karışım suyu olarak kullanılmıştır. Kalsinasyon işleminde kullanılacak olan bentonit kili Bilecik ilinde faaliyet gösteren seramik fabrikalarından temin edilmiştir. Kalsine edilmiş bentonitin özgül yüzey alanının fazla olması nedeniyle beton karışımlarında kullanım oranındaki artışa bağlı olarak kıvam kayıpları olabilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan çimento özellikleri

Kimyasal Bileşim		Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
Bileşenler	(%)		
SiO ₂	19.96	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.06
Al ₂ O ₃	5.03	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3641
Fe ₂ O ₃	2.88	0.090 mm Elek Kalıntısı (%)	0.1
CaO	63.6	0.045 mm Elek Kalıntısı (%)	4
MgO	1.17	Kıvam Su Miktarı (%)	29.6
K ₂ O	0.8	Priz Başlama Süresi (dk)	190
Na ₂ O	0.27	Priz Sona Erme Süresi (dk)	260
SO ₃	2.79	Genleşme (Le Chatelier) (mm)	1
Cl ⁻	0.005	Mekanik Özellikler	
		Basınç Dayanımı N/mm²	
TiO ₂	-	2 Gün	21.6
Mn ₂ O ₂	-	7 Gün	42.7
Kızdırma Kaybı	3.02	28 Gün	61.5

Bu sorunun önüne geçebilmek için beton karışımlarında BASF Glenium C 303 süper akışkanlaştırıcı katkı bileşeni kullanılmıştır. Beton agregası olarak Bilecik DAĞ-İŞ Madencilik firmasından 0-4, 4-8 ve 8-16 mm boyutlarında temin edilen kalker kırmataş agregaları kullanılmıştır. Bu agregaların özgül ağırlıkları sırasıyla 2.66, 2.67 ve 2.69 olarak belirlenmiştir.

KALSİNE EDİLMİŞ BENTONİTİN BETON AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ**2.2. Yöntem**

Planlanan deneysel süreçlerde dört seri beton numunesi üretilmiştir. Üretilen numunelerden biri referans olmak üzere bağlayıcı olarak kullanılan çimentodan ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında kalsine edilen bentonit ile yer değiştirilip numune karışımları üretilmiştir. Numunelerin kodlanmasında R (Referans numunesi için), B kodu ise katkı (kalsine edilen bentonit kullanılan) numuneler için kullanılmıştır. Kristal yapıları kil minerallerinin hammaddeleri puzolanik özellik göstermez. Killerin kristal yapılarının bozulması, yarı amorf şekle veya bozulmuş alümina silikat yapısına dönüşmeleri ısı işleme tabii tutulmaları ile sağlanmaktadır. Bu malzemelerin 700 - 900 °C arasında kalsine edilmeleri durumunda puzolanik özellik gösterirler [14], [15]. Killerin kalsinasyonu için gerekli olan ısı işlem süresi 60 -120 dk arasındadır. Betonların üretilmesinde kullanılan bentonit Şekil 1-a'da verilen otomatik kül fırınında 20°C/dk kademeli olarak artan sıcaklıkta 900°C'ye ulaşmasının ardından 90 dk pişirilmiştir. Pişirme süresi sonunda yaklaşık 2°C/dk soğutma ile fırın içerisinde ortam sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Kullanılan agregaların ideal tane dağılımının belirlenmesi için her agregaya çeşidi için elek analizi yapılmış ve ideal agregaya karışım granülometrisi elde edilmeye çalışılmıştır. Beton numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir. Kalsine edilmiş bentonitin kimyasal özellikleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Panalytical XRF deney cihazı ile belirlenmiştir. Bentonitin yoğunluğu Micrometrics marka gaz piknometresi ve özgül yüzey alanı ise Micrometrics markalı BET cihazı ile belirlenmiştir. Kalsine edilmiş bentonitin içyapısındaki değişimler ise Zeiss Supra 40 VP marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında yapılan inceleme ile belirlenmiştir.

Tablo 2. 1m³ beton için karışım tasarımı

Karışımlar	Çimento (kg)	Bentonit (kg)	Su (kg)	Agregalar (kg)			Akışkanlaştırıcı (kg)
				0-4 (mm)	4-8 (mm)	8-16 (mm)	
Referans	350	-	175	687.8	613.4	613.4	1.75
B5	332	17.50	175	687.8	613.4	613.4	1.75
B10	315	35.00	175	687.8	613.4	613.4	1.75
B15	297	52.50	175	687.8	613.4	613.4	1.75

Karışım oranlarına uygun olarak Şekil 1-b'de verilen beton mikserinde hazırlanan taze beton karışımlarının kıvamları çökme deneyi yöntemiyle belirlenmiştir. Basınç dayanımlarının belirlenmesinde 150x150x150 mm ve aşınma dirençlerinin belirlenmesi için 70x70x70 mm boyutlarında beton küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numune serileri 20±2 °C sıcaklıkta kirece doymun kür havuzunda şartlandırılmıştır. Numunelerin 7, 28, 56 ve 180 günlük yaşlarda basınç dayanımları ve 28, 56 ve 180 günlük kür yaşlarında aşınma dirençleri belirlenmiştir.

**Şekil 1.** Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar

Basınç dayanım deneyleri TS 12390-3'e [16] uygun olarak Şekil 1-c'de ve Böhme aşınma direnci deneyleri de TS EN 14157'e uygun Şekil 1-d'de gösterilen cihazlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir [17]. Sertleşmiş beton numunelerinden alınan ve parlatılmış beton numune kesitleri üzerinde Sürdürülebilir Doğaltaş Teknolojileri Geliştirme Merkezi Laboratuvarında bulunan Shimadzu HMV-G Knoop Sertlik Cihazı ile yüzey sertliklerindeki değişimler de belirlenmiştir [18] (Şekil 1-e).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

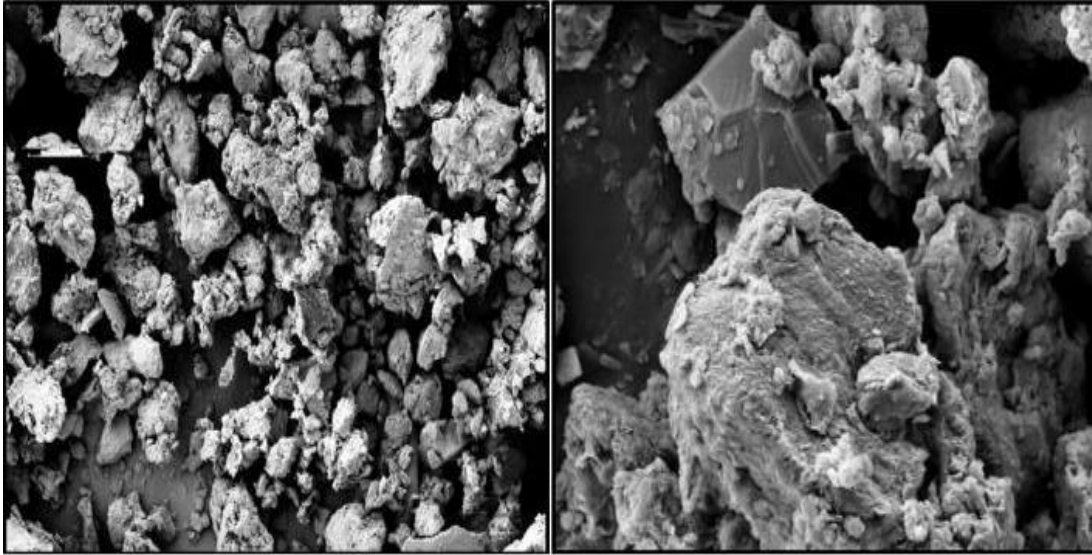
3.1. Bentonitin Karakterizasyonu

Kalsine edilmiş bentonit numuneleri üzerinde özgül ağırlık ve özgül yüzey alanının belirlenebilmesi için gaz piknometresi ve BET analizleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardan kalsine edilmiş bentonitin yoğunluğunda ve özgül yüzey alanında azalma gerçekleştiği görülmüştür. Bu azalma üzerinde kilin kalsine olması sonucunda kümeleneceği ve buna bağlı olarak özgül yüzey alanında azalmaya neden olduğu yapılan çalışmalardan da görülmüştür [19].

Tablo 3. Bentonitin fiziksel özellikleri

Numune türü	Yoğunluk gr/cm ³	Özgül yüzey alanı m ² /gr
Bentonit	2,579	33,643
Kalsine bentonit	2,534	11,261

Kalsine edilmiş bentonit numuneleri üzerinde yapılan elektron mikroskobu incelemeleri ile 1000X ve 5000X büyütme yapıldığında elde edilen görüntüler Şekil 2'de görülmektedir. SEM görüntülerinden kalsine bentonitin iri ve köşeli tanelere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Kalsine edilmiş bentonitin 1000X ve 5000X büyütmedeki içyapı görüntüleri

Beton karışımlarında kullanılan kalsine bentonitin kimyasal özellikleri XRF analizi ile belirlenmiş olup deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Sonuçlardan SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğinin %70 üzerinde olduğu görülmüştür. Böylece kalsine bentonitin puzolanik aktivite için gerekli olan silis ve alümin içeriğine ciddi oranda sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. Kalsine edilen bentonit özellikleri

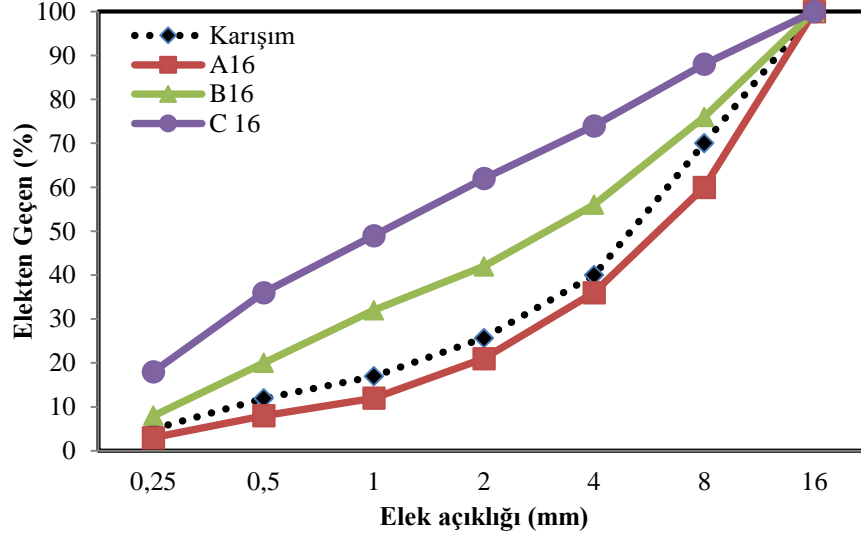
Kimyasal Bileşim	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	ZnO	Na ₂ O	Diğerleri
Bileşenler, %	63,75	15,05	7,69	5,53	1,74	0,56	0,27	0,86	4,55

3.2. Agrega Tane Dağılımı

Agrega tanelerinin granülometri hesaplamaları 0-4, 4-8 ve 8-16 mm tane çapına sahip agrega numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elek analizi deneylerinden elde edilen sonuçlara göre belirlenen agrega granülometrisi Şekil 3'te görülmektedir. İşlenebilirlik kayıplarını azaltmak için en büyük agrega tane boyutu 16 mm olarak belirlenmiştir. Karışımın

KALSİNE EDİLMİŞ BENTONİTİN BETON AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

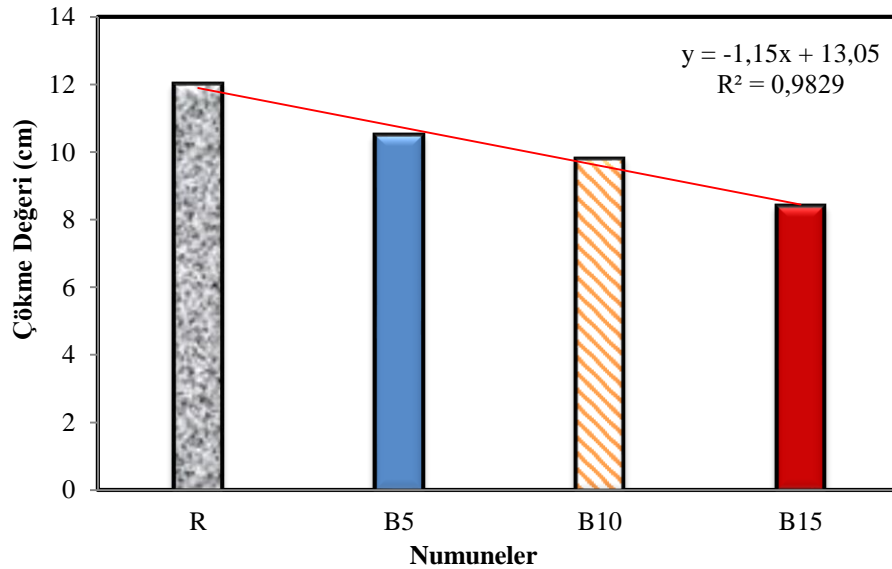
ideal granülometrisinin A₁₆ ve B₁₆ eğrilerinin arasında kalması için gerekli agrega oranlamaları yapılarak beton karışımlarında kullanılacak agrega miktarları hesaplanmıştır.



Şekil 3. Agrega granülometri eğrisi

3.3. Çökme Deneyi

Beton numunelerinin karışımlarında kullanılan malzemelerden çimento ve kalsine bentonit dışında bütün malzeme miktarları sabit tutulmuştur. Taze beton karışımlarının işlenebilirliği TS EN 12350-2'ye uygun çökme deneyi ile belirlenmiştir [20]. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek çökme değerinin referans numunesinden elde edildiği ve kalsine bentonit katkısının çimento yerine kullanım oranının artması ile numunelerdeki işlenebilirliğin azaldığı görülmektedir.

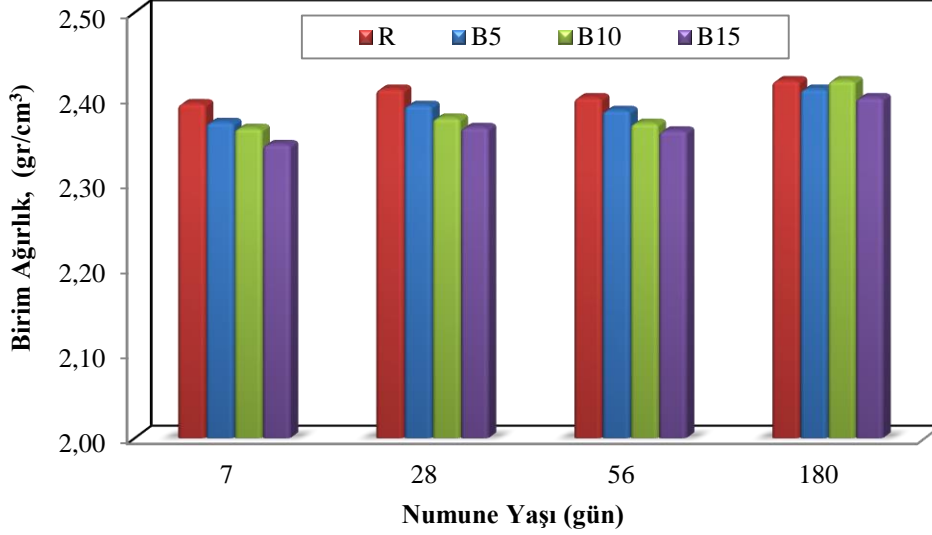


Şekil 4. Beton numunelerinin çökme deneyi sonuçları

Çökme kıvam kaybı %15 kalsine bentonit kullanılan B15 numunesinde akışkanlaştırıcı katkı kullanılmasına rağmen %33 seviyesine kadar ulaşmıştır. İşlenebilirlikteki bu azalma üzerinde, kalsine bentonit inceliğinin çimentoya göre daha yüksek olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

3.4. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

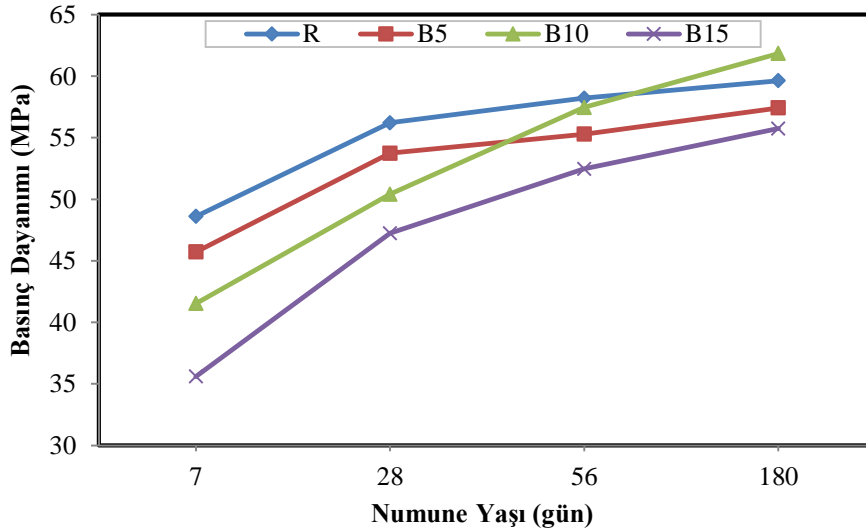
Üretilen beton numunelerinin sertleşmiş birim hacim ağırlıkları Şekil 5'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde bentonit katkısındaki artış oranına bağlı olarak birim ağırlık sonuçlarının azaldığı ancak 180 günlük numunelerde birim ağırlıkların birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 5. Beton numunelerinin birim ağırlık deney sonuçları

3.5. Basınç Dayanımı Deneyi

DeneySEL çalışmada üretilen betonların 7, 28, 56 ve 180 günlük yaşlara ulaşan numunelerin basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Basınç dayanım değerleri Şekil 6'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde 7, 28 ve 56 günlük yaşlarda en yüksek basınç dayanım değeri R numunesinden elde edilirken 180 günlük yaşta ise B10 numunesinden elde edildiği görülmektedir. İlerleyen kür yaşlarında R numunesinin dayanım artış hızı azalırken, B katkılı numunelerin dayanımlarında artışın devamlılığını koruduğu izlenmiştir. B10 numunesinin 56 günlük yaşta R numunesinin basınç dayanımına yaklaştığı ve 180 günlük yaşta ise R numunesi oranla %3,7 dayanım artışı sağladığı görülmüştür.



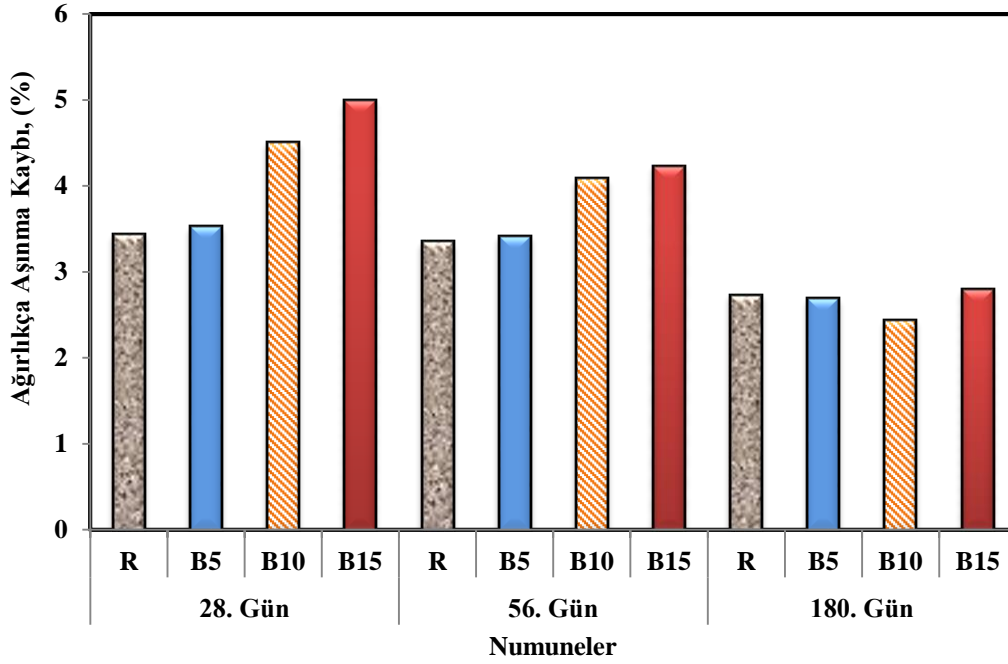
Şekil 6. Beton numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları

KALSİNE EDİLMİŞ BENTONİTİN BETON AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

Beton karışımlarına mineral katkı olarak katılan malzemelerin (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) erken yaş dayanımlarını katkısız referans numuneye göre düşürdüğü, ancak 90 gün ve daha sonraki yaşlarda beton basınç dayanımını artırdığı bilinmektedir [21]-[23]. B katkılı numunelerden elde edilen sonuçlar literatürdeki mineral katkılı betonların basınç dayanımlarıyla uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlardan kalsine edilmiş bentonitin 90 gün ve ötesinde puzolanik aktivite göstererek dayanım gelişimine olumlu yönde katkı sağladığı söylenebilir.

3.6. Aşınma Direnci Deneyi

Üretilen beton numunelerinin 28, 56 ve 180 günlük yaşlardaki ağırlıkça aşınma kayıp yüzdeleri Şekil 7'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde bütün yaşlarda numunelerin aşınma kayıplarının % 2.44 - % 4.99 arasında değiştiği görülmektedir.

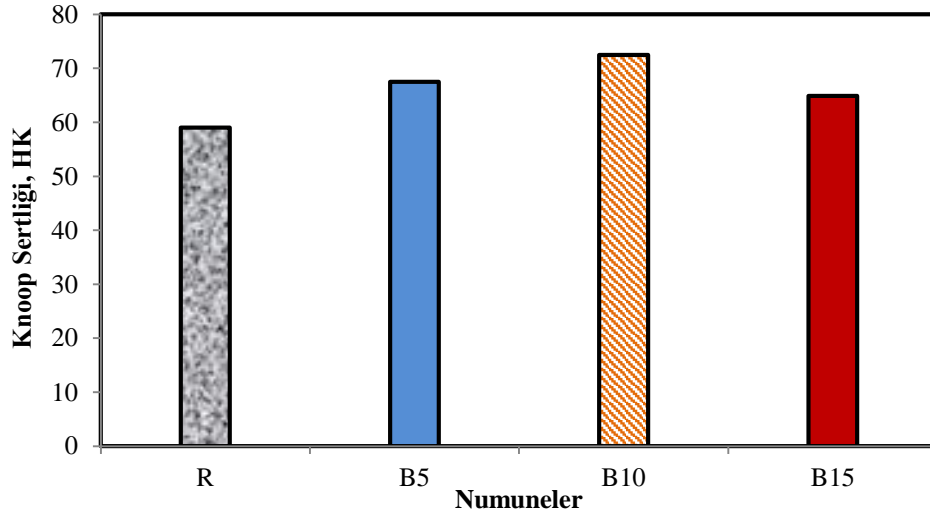


Şekil 7. Beton numunelerinin aşınma direnci deney sonuçları

B katkı oranındaki artışın erken yaşlarda aşınma dirençlerinde R numunesine göre olumsuz etki yarattığı, ancak ilerleyen kür yaşlarında ağırlıkça aşınma kayıplarının azalığı görülmüştür. Bu durumun ilerleyen yaşlarda B katkısının puzolanik aktiviteye bağlı olarak basınç dayanımlarını artırması sonucu, aşınma dirençlerinin de olumlu yönde etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu kül ve zeolit katkısının ileriki yaşlarda aşınma direnci açısından daha avantajlı olduğu literatürden bilinmektedir [2], [24]. Deneysel çalışmadan elde edilen aşınma dirençlerin literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

3.7. Knoop Sertlik Deneyi

Üretilen numunelerin Knoop sertlikleri 180 günlük ve puzolanik aktivitenin etkisini gösterdiği numunelerde betonun hamur fazı üzerinde TS EN 14205'e uygun olarak belirlenmiştir [18]. Böylece iri agreganın etkisi dikkate alınmadan bağlayıcı fazın sertliğindeki değişimin belirlenmesi amaçlanmıştır. Taş yapı malzemelerde kullanıma uygun bir mikro sertlik deneyi olan Knoop sertlik deneyi, 172°30' açılı piramit şekilli batıcı bir ucun 10 N yük etkisi altında eşkenar dörtgen şeklinde bıraktığı izin genişliğinin ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Deney 10 farklı noktaya uygulanarak ortalama değer hesaplanmasıyla neticelendirilir. Beton numunelerinden kesit alındıktan sonra bu kesitlerin yüzeyleri parlatma makinasında parlatılarak düzgün yüzeyler üzerinde deney gerçekleştirilmiştir. Sertlik deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 8'de görülmektedir. Elde edilen deney sonuçlarından kalsine bentonit katkılı tüm serilerin yüzey sertliklerinin referans numunesine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlikteki bu değişim, B10 numunesinin 180 gün sonunda % 22 oranında daha sert bir yapıda ve aşınma direncinin de diğer numune tiplerine göre daha iyi olmasına neden olmuştur.



Şekil 8. Beton numunelerinin Knoop sertliği deney sonuçları

4. SONUÇLAR

Kalsine bentonit katkılı betonların aşınma davranışlarının incelendiği bu çalışmadan aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Numunelerin taze haldeki çökme deneyi sonucunda en yüksek çökme değerinin R numunesinden elde edildiği ve B katkısının artması ile numunelerdeki işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür.
- Üretilen beton numunelerinden elde edilen birim ağırlıklardan en düşük ve en yüksek değerler sırasıyla 2.35 – 2.42 g/cm³ olarak elde edilmiştir. Numunelerin bütün yaşlarda birbirilerine yakın değerler aldığı belirlenmiştir.
- Numunelerin 7, 28 ve 56 günlük yaşlardaki basınç dayanımlarında en yüksek ve düşük değerler sırası ile R ve B15 serilerinden sırasıyla 35.60 ve 58.20 MPa olarak elde edilirken, 180 günlük yaşta en yüksek dayanım değeri B10 serisinden 61.80 MPa olarak elde edilmiştir.
- Böhme deney sonucunda ağırlıkça aşınma kayıplarının ilerleyen yaşlarda düştüğü görülmüştür. En yüksek aşınma oranı 28 günlük B15 serisinden % 4.99 olarak elde edilirken en düşük kayıp ise 180 günlük yaşta B10 serisinden % 2.64 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçların Knoop sertlik deneyi sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.
- Sonuç olarak; basınç dayanımı ve aşınma direnci deney sonuçları incelendiğinde, 180 günlük yaşta betonda çimento yerine optimum olarak % 10 oranında kalsine edilmiş bentonit katkısının kullanılmasıyla R numunesine oranla % 3,7 dayanım artışı ve aşınma direnci davranışı üzerinde % 10.6 daha az aşınma kaybı ile betona olumlu kazanımlar sağladığı görülmüştür. Beton tasarımında kalsine edilmiş bentonit katkısı kullanımıyla hem çevresel etki açısından hem de beton kalıcılığı açısından faydalar elde edileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] S. Pyo, S. Y. Abate, H. K. Kim, "Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 11-16, 2018.
- [2] C. Bilim, "Zeolit katkısının harçların aşınma direncine etkisi", in 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011, pp. 55-58.
- [3] A. A. Ramezani-pour, A. Haghollahi, "Investigation and modelling of abrasion in industrial concrete floors," *Amirkabir Journal of Science and Technology*, vol. 115, pp. 55-61, 2004.
- [4] C. D. Atış, O. Karahan, K. Arı, Ö. Çelik, C. Bilim, "Relation between strength properties (flexural and compressive) and abrasion resistance of fiber (steel and polypropylene) reinforced fly ash concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, pp. 402-408, 2009.
- [5] S. Oymael, A. Yeğinobalı, "Bitümlü şist külü katkısının betonda aşınma dayanımına etkisi", in Proc. 4th National Concrete Conference, 1996, pp. 359-367.
- [6] A. Tironi, M. A. Trezza, A. N. Scian, E. F. Irassar, "Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays," *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 319-327, 2013.

KALSİNE EDİLMİŞ BENTONİTİN BETON AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

- [7] R. E. Rodriguez-Camacho, R. Uribe-Afif, "Importance of using the natural pozzolans on concrete durability," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1851-1858, 2002.
- [8] V. G. Papadakis, S. Tsimas, "Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1525-1532, 2002.
- [9] S. C. Taylor-Lange, E. L. Lamon, K. A. Riding, M. C. G. Juenger, "Calcined kaolinite-bentonite clay blends as supplementary cementitious materials," *Applied Clay Science*, vol. 108, pp. 84-93, 2015.
- [10] T. Kaya, S. Yazıcıoğlu, "Kalsine bentonit katkı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık etkisi," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 150-160, 2015.
- [11] B. İpekoğlu, İ. Kurşun, Y. Bilge, A. Barut, "Türkiye bentonit potansiyeline genel bir bakış," in 2nd Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 1997, pp. 51-57.
- [12] T. Kaya, C. Karakurt, Y. Bayazıt, "Kalsine edilmiş bentonitin çimento harçlarında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilirliği," in 2nd International Sustainable Buildings Symposium, 2015, pp 98-103.
- [13] *Çimento-genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, TS EN 197-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [14] H. H. M. Darweesh, Z. A. Nagieb, "Hydration of calcined bentonite Portland blended cement pastes," *Indian Journal of Chemical Technology*, vol. 14, pp. 301-307, 2007.
- [15] A. Trümer, H. M. Ludwig, M. Schellhorn, R. Diedel, "Effect of calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete," *Applied Clay Science*, vol. 168, pp. 36-42, 2019.
- [16] *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*, TS EN 12390-3, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [17] *Doğal taşlar-aşınma direncinin tayini*, TS EN 14157, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [18] *Doğal taş deney yöntemleri-Knoop sertliğinin tayini*, TS EN 14205, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [19] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, T. Özturan, K. Mermerdaş, "Microstructural properties and pozzolanic activity of calcined kaolins as supplementary cementing materials," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 39, pp. 1274-1284, 2012.
- [20] *Beton- taze beton deneyleri: Çökme deneyi*, TS EN 12350-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [21] M. S. J. Gani, *Fiber Reinforced Cement and Concrete*, *Cement and Concrete*, London: Chapman & Hall, 1997.
- [22] O. Şimşek, *Beton ve Beton Teknolojisi*, Ankara: Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş, 2004.
- [23] H. Yaprak, O. Şimşek, A. Öneş, "Cam ve çelik lifin bazı beton özelliklerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, vol. 7, no. 4, pp. 353-358, 2004.
- [24] B. Felekoğlu, M. Y. Yardımcı, B. Baradan, "Uçucu külün ve taş tozunun kendiliğinden yerleşen betonda aşınma direncine etkileri", *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 11-22, 2006.





PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

Ramazan Gürsel HOŞBAŞ¹ , Atınc PIRTI^{2,*} 

¹YTÜ, Harita Mühendisliği Bölümü, Ölçme Tekniği Anabilim Dalı, İstanbul.

²YTÜ, Harita Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul.

ÖZET

Arazi bölümlendirmeleri ve parsel kırık sınırlarının düzeltilmesinde son zamanlara kadar uygulanan yöntemler genellikle sınama esasına dayanmaktadır. Bu durum, normal olarak geometrik ve trigonometrik elemanların hesaplanmasını gerektirir. Bu çalışmada herhangi bir parsel şekline bağlı olmaksızın uygulanabilecek genel formüller verilmektedir. Böylelikle bölümlendirme sonuçlarını elde etmek mümkün olmaktadır. Bu yöntem arazideki parsellerin dik koordinat sistemindeki koordinatlarını esas almaktadır. Bölümlendirme, belirli bir alanın ayrılmasını ve bölümlendirme çizgisinin istenen bir yerden geçirilmesini sağlamaktadır. Böyle üç gereksinim düşünülebilir; bölümlendirme çizgisinin bir uç noktası sabit olabilir, çizginin yönü sabit olabilir veya çizginin bilinen bir iç noktadan geçmesi istenebilir, [1]. Bunlara ilaveten bazı teknik ve ekonomik gerekçelerle kırık parsel sınırlarının da düzeltilmesi gerekmektedir. Bazı özel durumlar için, yöntem formüller uygulamadan önce dik koordinat eksenlerinin döndürülmesini gerektirmektedir. Sunulan çalışmada, iki uygulama verilerek yöntemin sonuçlarının uygunluğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Parsel, Bölümlendirme (ifraz), Kırık sınır çizgisi, Dik koordinatlar

EXACT SOLUTION BASED ON CARTESIAN COORDINATES FOR LAND DIVISION (SUBDIVISION) AND THE CORRECTION OF PARCEL BROKEN BOUNDARY LINES

ABSTRACT

Until recently, methods of land subdivision and correction of parcel broken boundaries are generally based on testing. In this case, it is normally necessary to calculate the geometric and trigonometric elements. In this study, general formulas are given which can be applied regardless of the shape of a parcel, and thus it is possible to obtain direct subdivision results. This method is based on the coordinates of the parcels in the cartesian coordinate system. The subdividing allows a particular area to be separated and the subdividing line to be traversed to a desired location. Three such requirements can be considered; an end point of the subdividing line may be constant, the direction of the line may be constant, or the line must pass through a desired inner point, [1]. In addition, the boundaries of the broken parcels should be corrected for some technical and economic reasons. For some special cases, the method requires the rotation of the cartesian coordinate axes before applying the formulas. In the presented study, it was given with two applications and the suitability of the results of the method was shown.

Keywords: Parcel, Subdivision, Broken boundary line, Cartesian coordinates.

1. GİRİŞ

Haritacılık bilim dalındaki ölçme işleri arasında yüksek doğruluk ve yüksek duyarlılık isteyen işlemlerden biri de alan bölme işlemidir. Belirli hizmetlerin gerçekleştirilmesi sürecinde genellikle alan hesaplama işlemleri yardımıyla parsellerin bölünmesi işlemi ile karşılaşılır. Örneğin; yeni özellikli sınırların oluşturulması için bir parselin kadastro, imar uygulaması, kamulaştırma, miras, sigortalama ve benzeri nedenlerle bölünmesi veya yeni sınır belirleme işlemlerine ihtiyaç duyulabilir, [2]. Bu durumda yeni sınırın, aplikasyon değerlerinin hesaplanıp arazide işaretlenmesi gerekir, [3]. Parsellerin bölünmesinde alan oranları ya da verilen kenar şartlarına göre iki yöntem uygulanır. Bunlar, kesin yöntem ve yaklaşık yöntemlerdir. Kesin yöntem ancak

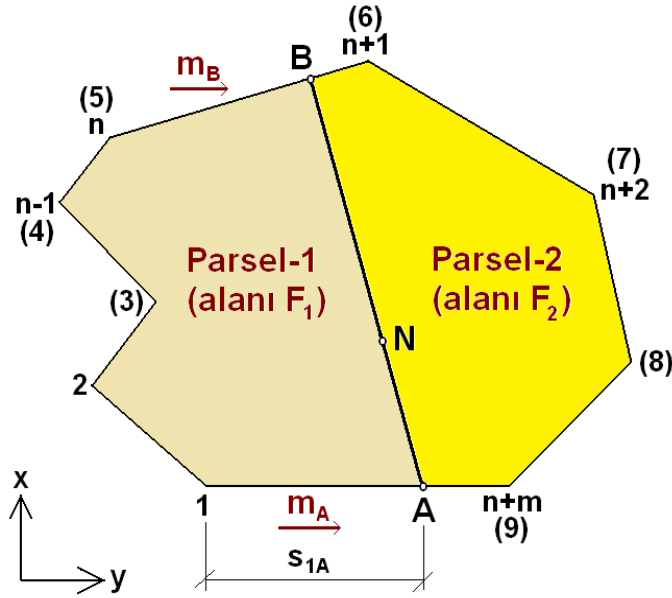
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: atinc@yildiz.edu.tr

Geliş / Recieved: 05.02.2020 Kabul / Accepted: 24.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.685245

uygulanacak olan bağıntıların kolay kavranabilir, yani kolayca sonuç verebilir olması durumunda pratiktir. Aksi durumda yaklaşık yöntem uygulanır. Çokgen şekilli parsellerin bölünmesinde, özellikle parsel köşe noktalarının dik koordinat değerlerinin belli olmaması durumunda, yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır, [4], [5]. Buna karşın parsel köşe noktalarının koordinat değerlerinin bilinmesi durumunda Gauss'un üçgenlerle alan hesabı bağıntısı kullanılabilir. Bu durumda bölme işlemi (ifraz) ve kırık sınırların düzeltilmesi problemleri kesin yöntemle çözülebilir.

2. PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZ) YÖNTEMİ

Şekil 1.'de görülen parsel AB hattı ile iki parsel bölünmek isteniyor. Parselin köşe noktaları, ayırma noktası A noktasından itibaren köşe noktaları sürekli olarak ardışık şekilde saat ibresi yönünde numaralandırılmıştır. n ve m ardışık olarak Parsel-1 ve Parsel-2'nin köşe nokta sayıları olmak üzere, Parsel-1 için 1'den başlayan n'e kadar sayılarla, Parsel-2 için n+1'den başlayan n+m'e kadar numaralandırılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan n+m köşe noktalı parsel ile ayrılması istenen n köşe noktalı parselin alanı bilinmektedir. Tüm parsel köşelerinin bilinen koordinatları $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{n+m}, y_{n+m})$ 'e kadar numaralanarak gösterilmiştir, [1].



Şekil 1. İfrazı yapılacak parselin alanı [1]

2.1. Genel Tasarım Formülleri

Ayrılma probleminin çözümü için belirlenmek istenen ifraz çizgisinin A ve B noktalarının dik koordinatları (x_A, y_A) ve (x_B, y_B) ile gösterilir. Bu değişkenlerden hareketle parseli ikiye bölecek A ve B noktalarının üzerinde bulunduğu sınır çizgilerinin eğimleri için;

$$m_A = \tan \alpha_{1, n+m} = \frac{y_{n+m} - y_1}{x_{n+m} - x_1} = \frac{y_A - y_1}{x_A - x_1} \quad (1)$$

$$m_B = \tan \alpha_{n, n+1} = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} = \frac{y_B - y_n}{x_B - x_n} \quad (2)$$

eşitlikleri yazılabilir. Aslında burada $\alpha_{1, n+m}$ ve $\alpha_{n, n+1}$ A ve B noktalarının üzerinde olduğu (1, n+m) ve (n, n+1) parsel sınırlarının kuzeyle saat ibresi yönündeki açıları yani jeodezik anlamda açıklık açılarıdır. (1) ve (2) eşitliklerinden yararlanarak iki koşul denklemi

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

$$y_A = y_1 + m_A (x_A - x_1) \quad \rightarrow \quad 1. \text{ koşul denklemi} \quad (3)$$

$$y_B = y_n + m_B (x_B - x_n) \quad \rightarrow \quad 2. \text{ koşul denklemi} \quad (4)$$

yazılabilir. Ayrılması öngörülen Parsel-1'in alanı F_1 için;

$$2 F_1 = x_B(y_A - y_1) + x_A(y_1 - y_B) + x_1(y_2 - y_A) + x_2(y_3 - y_1) + \dots + x_n(y_B - y_{n-1}) \quad \rightarrow \quad 3. \text{ koşul denklemi} \quad (5)$$

koşulu yazılır. Görüldüğü gibi (3), (4) ve (5) eşitlikleri dört bilinmeyen içermektedir, [1]. Bu durum ise dört koşul gerektirmektedir. Dördüncü koşul parselin ayırma çizgisini oluşturacak ifraz çizgisi için öngörülen bir isteme göre oluşturulabilir. Aşağıda bu istemlerden üç özel durum ayrı ayrı incelenmiştir.

2.2. A veya B Köşe Noktalarından Birinin Sabit Olması Hali

A köşe noktasının $A(x_A, y_A)$ koordinatlarının verildiğini varsayalım. Bu nokta ifrazı yapılacak parselin köşe noktalarında biri de olabilir. Parsel-1'in alanı F_1 Gauss'un üçgenlerle dik koordinat eşitliğinden yararlanılarak

$$2 F_1 = x_B(y_A - y_n) + x_A(y_1 - y_B) + x_1(y_2 - y_A) + \dots + x_n(y_B - y_{n-1})$$

şeklinde yazılabilir, (2), (3), (5). Bu eşitliğin ikinci teriminden sonraki terimler açılır ve düzenlenirse, (Şekil 1.'deki gibi parselin 9 köşe noktası olduğu varsayılırsa);

$$2 F_1 = x_B(y_A - y_5) + x_A(y_1 - y_B) - x_1 y_A + x_5 x_B + x_1 y_2 + x_2 y_3 - x_2 y_1 + x_3 y_4 - x_3 y_2 + x_4 y_5 - x_4 y_3 + x_5 y_4$$

$$2 F_1 = x_B(y_A - y_5) + x_A(y_1 - y_B) - x_1 y_A + x_5 x_B + \sum_{i=1}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir ve yeni bir düzenleme ile

$$2 F_1 - \sum_{i=1}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) = x_B(y_A - y_5) + x_A(y_1 - y_B) - x_1 y_A + x_5 y_B \quad (7)$$

elde edilir ve

$$2 F_1 - \sum_{i=1}^{n-1} (-x_{i+1} y_i + x_i y_{i+1}) = k_1 \quad (8)$$

denilir ve eşitliğin sağ tarafı yeniden düzenlenirse,

$$k_1 = x_B(y_A - y_5) + x_A y_1 - x_A y_B - x_1 y_A + x_5 y_B$$

$$k_1 = x_B(y_A - y_5) - y_B(x_A - x_5) + x_A y_1 - x_1 y_A$$

$$k_1 - x_A y_1 + x_1 y_A = x_B(y_A - y_5) + y_B(x_5 - x_A) \quad (9)$$

(9) eşitliğinde B noktasına ait iki koordinat değeri de bilinmemektedir. Bu nedenle B noktasına ait x_B değişkenini belirlemek için eşitliğin sağ tarafının ikinci terimindeki y_B 'nin (4) eşitliğindeki karşılığı yerine konularak tekrar düzenlenerek;

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

$$\begin{aligned}
 y_B(x_5 - x_A) &= [y_5 + m_B(x_B - x_5)] \cdot (x_5 - x_A) \\
 &= y_5(x_5 - x_A) + m_B(x_B - x_5)(x_5 - x_A) \\
 &= y_5(x_5 - x_A) + m_B(x_5 - x_A)x_B - m_B(x_5 - x_A)x_5 \\
 &= (x_5 - x_A)(y_5 - m_Bx_5) + m_B(x_5 - x_A)x_B
 \end{aligned} \tag{10}$$

elde edilir. (10) eşitliği (9)'da yerine konularak yapılacak düzenleme ile,

$$\begin{aligned}
 x_B(y_A - y_5) + m_B(x_5 - x_A)x_B &= k_1 - x_A y_1 + x_1 y_A - (x_5 - x_A)(y_5 - m_Bx_5) \\
 x_B &= \frac{k_1 - x_A y_1 + x_1 y_A - (x_5 - x_A)(y_5 - m_Bx_5)}{(y_A - y_5) + m_B(x_5 - x_A)} \quad \text{veya} \\
 x_B &= \frac{k_1 - x_A y_1 + x_1 y_A + (x_A - x_5)(y_5 - m_Bx_5)}{(y_A - y_5) - m_B(x_A - x_5)}
 \end{aligned} \tag{11}$$

eşitliğine ulaşılır. Yine Şekil 1.'e göre 5 numaralı parsel köşesinin Parsel-1'in n'inci noktası olduğu dikkate alınarak (11) eşitliği,

$$x_B = \frac{k_1 - x_A y_1 + x_1 y_A + (x_A - x_n)(y_n - m_Bx_n)}{(y_A - y_n) - m_B(x_A - x_n)} \tag{12}$$

genel bağıntısı belirlenir. y_B koordinatı (4) eşitliğinden hesaplanır.

Benzer şekilde B köşe noktasının $B(x_B, y_B)$ koordinatlarının verilmesi durumunda, x_A (3) ve (5) eşitliklerinden benzer şekilde hesaplanarak,

$$x_A = \frac{-k_1 - x_B y_n + x_n y_B + (x_B - x_1)(y_1 - m_A x_1)}{(y_B - y_1) - m_A(x_B - x_1)} \tag{13}$$

genel eşitlik bağıntısı bulunur. Yine benzer şekilde y_A (3) eşitliğinden hesaplanabilir, [1].

Eğer A ve B noktalarının koordinatları yerine bu noktaların parsel köşe noktalarından olan uzaklıkları verilirse, örneğin Şekil 1.'e göre A noktasının 1 numaralı parsel köşesinden olan uzaklığı s_{1A} verilmiş ise A noktasının koordinatları,

$$x_A = x_1 + s_{1A} \cdot \cos \alpha_{1,n+m} \tag{14}$$

$$y_A = y_1 + s_{1A} \cdot \sin \alpha_{1,n+m} \tag{15}$$

eşitlikleri ile 1. Jeodezik Temel Ödev vasıtası ile hesaplanabilir, [3], [6].

2.3. İfraz Çizgisinin Doğrultusunun Verilmesi Hali

AB ifraz çizgisinin β yöneltmesi ya da α açıklık açısı özel olarak seçilebilir. Eğer β kırılma açısı belirli ise ifraz çizgisinin α açıklık açısı 3. Jeodezik Temel Ödev'e benzer şekilde hesaplanabilir.

Şekil 2.'ye göre eğer ifraz doğrultusunun kırılma açısı β ;

$$1. \text{ Bölgede, kuzey-doğu yönleri arasında ise açıklık açısı} \quad : \alpha_1 = \beta \tag{16a}$$

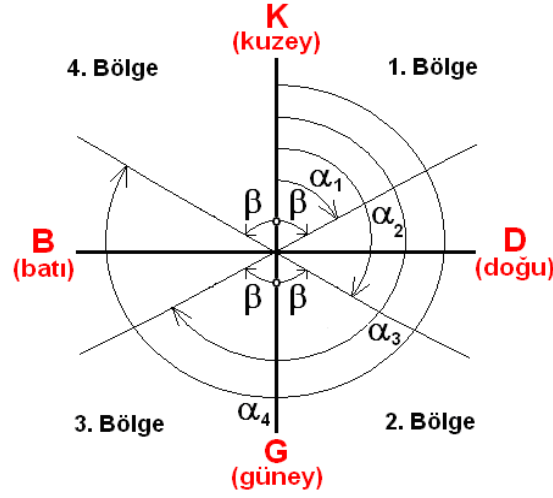
$$2. \text{ Bölgede, doğu-güney yönleri arasında ise açıklık açısı} \quad : \alpha_2 = 200g - \beta \tag{16b}$$

$$3. \text{ Bölgede, güney-batı yönleri arasında ise açıklık açısı} \quad : \alpha_3 = 200g + \beta \tag{16c}$$

$$4. \text{ Bölgede, batı-kuzey yönleri arasında ise açıklık açısı} \quad : \alpha_4 = 400g - \beta \tag{16d}$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir, [3], [6].

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM



Şekil 2. İfraz çizgisinin coğrafi yönler ile yaptığı β kırılma açıları ve α açıklık açıları

AB ifraz çizgisinin açıklık açısının tanjantı

$$T = \tan \alpha$$

ile gösterilebilir. Eğer ifraz çizgisinin doğrultusu, C ve D köşeleriyle tanımlanan bir sınıra paralel belirlenecekse;

$$T = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} \quad (17)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Eğer ifraz çizgisinin doğrultusu CD kenarına dik ise

$$T = \frac{x_D - x_C}{y_D - y_C} \quad (18)$$

şeklinde hesaplanır.

Şimdi, T'yi dört bilinmeyen bakımından hesaplayabiliriz.

$$T = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (19)$$

y_A ve y_B 'nin (3) ve (4) bağıntılarındaki karşılıklarını (19)'da yerine koyarak;

$$T = \frac{y_n + m_B(x_B - x_n) - y_1 - m_A(x_A - x_1)}{x_B - x_A} \quad (20)$$

elde edilir. (20) eşitliği düzenlenerek;

$$T(x_B - x_A) = (y_n - y_1) + m_B x_B - m_B x_n - m_A x_A + m_A x_1$$

$$T x_B - T x_A = (y_n - y_1) + m_B x_B - m_B x_n - m_A x_A + m_A x_1$$

$$T x_B - (y_n - y_1) - m_B x_B + m_B x_n - m_A x_1 = T m_A - m_A x_A$$

$$(T - m_B) x_B + y_1 - y_n - m_A x_1 + m_B x_n = (T - m_A) x_A$$

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

$$x_A = \frac{y_1 - y_n - m_A x_1 + m_B x_n}{T - m_A} + \frac{T - m_B}{T - m_A} x_B \quad (21)$$

eşitliğine ulaşılır. (21) eşitliğinde;

$$k_2 = \frac{y_1 - y_n - m_A x_1 + m_B x_n}{T - m_A} = - \frac{y_n - y_1 + m_A x_1 - m_B x_n}{T - m_A} \quad (22a)$$

$$k_3 = \frac{T - m_B}{T - m_A} \quad (22b)$$

kısaltmaları yapılarak;

$$x_A = k_2 + k_3 x_B \quad (23)$$

eşitliği elde edilir.

$T = \infty$ için ifraz çizgisi ya meridyende ya da meridyen yakınılarındadır. (22a) ve (22b) eşitliklerinin sınırları sırasıyla 0 ve 1'dir. (3), (4), (5) ve (23) eşitlikleri dört bilinmeyenli (x_A, y_A, x_B, y_B) belirlemek için çözülebilir. (5)'de yapılan düzenlemelerle ulaşılan (7)'de (3) ve (4) yerine konularak;

$$\begin{aligned} 2 F_1 - \sum_{i=1}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) &= k_1 = x_B (y_A - y_n) + x_A (y_1 - y_B) - x_1 y_A + x_n y_B \\ -k_1 + x_B [y_1 + m_A (x_A - x_1) - y_n] + x_A [y_1 - y_n - m_B (x_B - x_n)] \\ &\quad - x_1 [y_1 + m_A (x_A - x_1)] + x_n [y_n + m_B (x_B - x_n)] = 0 \\ -k_1 + x_B (y_1 - y_n) + m_A x_B (x_A - x_1) + x_A (y_1 - y_n) - m_B x_A (x_B - x_n) \\ &\quad - x_1 y_1 - m_A x_1 (x_A - x_1) + x_n y_n + m_B x_n (x_B - x_n) = 0 \\ -k_1 + x_B y_1 - x_B y_n + m_A x_A x_B - m_A x_1 x_B + x_A y_1 - x_A y_n - m_B x_A x_B + m_B x_1 x_B \\ &\quad - x_1 y_1 + x_n y_n - m_A x_1 x_A + m_A x_1^2 + m_B x_n x_B - m_B x_n^2 = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

eşitliğine ulaşılır. (24) eşitliğinde,

$$k_4 = k_1 + x_1 y_1 - x_n y_n - m_A x_1^2 + m_B x_n^2 \quad (25)$$

yine (24) eşitliğinin $y_1 (x_A + x_B) - m_A x_1 (x_A + x_B) + m_B x_n (x_A + x_B) - y_n (x_A + x_B)$ kısmında yapılacak düzenlemelerle,

$$k_5 (x_A + x_B) = y_n - y_1 - m_B x_n + m_A x_1 \quad \text{ve} \quad (26)$$

$$k_6 x_A x_B = (m_B - m_A) x_A x_B \quad (27)$$

kısaltmalarının ardından,

$$k_4 + (x_A + x_B) k_5 + x_A x_B k_6 = 0 \quad (28)$$

eşitliğine ulaşılır. x_B 'nin hesabı için (23)'ü (28)'de yerine koyarsak;

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

$$\begin{aligned}
 k_4 + (k_2 + k_3 x_B + x_B)k_5 + (k_2 + k_3 x_B)x_B k_6 &= 0 \\
 k_4 + k_2 k_5 + k_3 k_5 x_B + k_5 x_B + k_2 k_6 x_B + k_3 k_6 x_B^2 &= 0 \\
 k_3 k_6 x_B^2 + [k_5(k_3 + 1) + k_2 k_6]x_B + (k_4 + k_2 k_5) &= 0
 \end{aligned} \tag{29}$$

karesel formuna ulaşılır. Bu eşitliğin çözümü ile iki x_B değeri elde edilir. Bir değer ifraz çizgisi üzerinde A ve B'nin yer aldığı sınır ile kesişme noktasına karşılıktır. Diğer değer ise ifraz çizgisinin alanı çapraz ters taraftaki sınırla kesişmesine karşılıktır, (ki bu değer anlamlı değildir).

Eğer A ve B noktalarının üzerinde bulunduğu sınırlar paralel ise (27) eşitliğindeki k_6 sıfıra eşittir ve bu durumda (29) eşitliği;

$$[k_5(k_3 + 1) + k_2 k_6]x_B + (k_4 + k_2 k_5) = 0$$

halini alır ve,

$$x_B = \frac{k_4 + k_2 k_5}{k_5(k_3 + 1)} \tag{30}$$

eşitliği elde edilir.. Bundan sonra sırasıyla (23), (3) ve (4) bağıntılarından x_A , y_A ve y_B hesaplanır, [1].

2.4. İfraz Çizgisinin Parselin İçindeki Bir Noktadan Geçmesi Hali

Eğer ifraz sınır çizgisinin bir N noktasından geçmesi istenirse, bu koşulu sağlayan birçok doğru olacaktır. Bu nedenle, ölçmeci, A ve B noktalarını o şekilde belirlemedir ki bu noktalar sınır çizgileri üzerinde olsun. N noktası ile A ve B noktaları bilinmeyen koordinatları arasındaki bağıntı;

$$\frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} = \frac{y_N - y_B}{x_N - x_B} \tag{31}$$

şeklinde olacaktır. (3) ve (4) bağıntılarını (31)'de yerlerine konulur, içler dışlar çarpımları yapılır ve çarpımlar açılırsa;

$$\begin{aligned}
 \frac{y_1 + m_A(x_A - x_1) - y_n - m_B(x_B - x_n)}{x_A - x_B} &= \frac{y_N - y_n - m_B(x_B - x_A)}{x_N - x_B} \\
 \frac{y_1 - y_n + m_A x_A - m_A x_1 - m_B x_B + m_B x_n}{x_A - x_B} &= \frac{y_N - y_n - m_B x_B + m_B x_n}{x_N - x_B} \\
 y_1 x_N - y_1 x_B - y_n x_N + y_n x_B + m_A x_N x_A - m_A x_A x_B - m_A x_1 x_N + m_A x_1 x_B \\
 &\quad - m_B x_N x_B + m_B x_B^2 + m_B x_n x_N - m_B x_n x_B = \\
 y_N x_A - y_n x_A - y_N x_B + y_n x_B - m_B x_A x_B + m_B x_B^2 + m_B x_n x_A - m_B x_n x_B
 \end{aligned} \tag{32}$$

eşitliği elde edilir. Gerekli kısaltmaların yapılmasının ardından,

$$\begin{aligned}
 (m_A x_N - m_B x_n - y_N + y_n) x_A + (y_N - y_n + y_n - y_1 + m_A x_1 - m_B x_N) x_B \\
 - (m_A - m_B) x_A x_B + (y_1 x_N - y_n x_N - m_A x_1 x_N + m_B x_n x_N) = 0
 \end{aligned} \tag{33}$$

(33) eşitliğinde yapılacak kısaltmalar,

$$k_6 = -(m_A - m_B) = m_B - m_A$$

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

$$\begin{aligned}k_7 &= m_A x_N - m_B x_n - y_N + y_n \\k_8 &= y_N - y_n + y_n - y_1 + m_A x_1 - m_B x_N \\y_1 x_N - y_n x_N - m_A x_1 x_N + m_B x_n x_N &= (y_1 - y_n - m_A x_1 + m_B x_n) x_N = k_9 x_N\end{aligned}$$

düzenlemeleri neticesinde,

$$k_7 x_A + k_8 x_B + k_6 x_A x_B + k_9 = 0 \quad (34)$$

eşitliğine ulaşılır. (28) ve (34) eşitliklerinin farkı oluşturularak yani (28)-(34) işlemi yapılarak;

$$k_4 + k_5 x_A + k_5 x_B + k_6 x_A x_B - k_7 x_A - k_8 x_B - k_6 x_A x_B - k_9 = 0$$

eşitliğinde kısaltmalar yapılarak,

$$(k_4 - k_9) + (k_5 - k_7) x_A + (k_5 - k_8) x_B = 0 \text{ 'dan}$$

$$x_A = \frac{(k_4 - k_9) + (k_5 - k_8) x_B}{(k_7 - k_5)} \quad (35)$$

(35) eşitliğinin (28)'de yerine konulması ile,

$$\begin{aligned}k_4 + \left[\frac{(k_4 - k_9) + (k_5 - k_8) x_B}{(k_7 - k_5)} + x_B \right] k_5 + \left[\frac{(k_4 - k_9) + (k_5 - k_8) x_B}{(k_7 - k_5)} \right] x_B k_6 &= 0 \\(k_7 - k_5) k_4 + (k_4 - k_9) k_5 + (k_5 - k_8) k_5 x_B + (k_7 - k_5) k_5 x_B & \\+ (k_4 - k_9) k_6 x_B + (k_5 - k_8) k_6 x_B^2 &= 0 \\k_6 (k_5 - k_8) x_B^2 + [k_5 (k_5 - k_8 + k_7 - k_5) x_B + (k_4 - k_9) k_6 x_B] + [k_4 (k_7 - k_5) + k_5 (k_4 - k_9)] &= 0 \\k_6 (k_5 - k_8) x_B^2 + [k_5 (k_7 - k_8) + k_6 (k_4 - k_9)] x_B + [k_4 (k_7 - k_5) + k_5 (k_4 - k_9)] &= 0\end{aligned} \quad (36)$$

eşitliğine ulaşılır. İkinci derece denklem sistemi olan (36) eşitliğinin çözümünden x_B için iki değer elde edilir. Her iki değerde çözüm olabilir. Diğer bilinmeyenler x_A , y_A ve y_B sırasıyla (35), (3) ve (4) eşitliklerinden hesaplanır, [1].

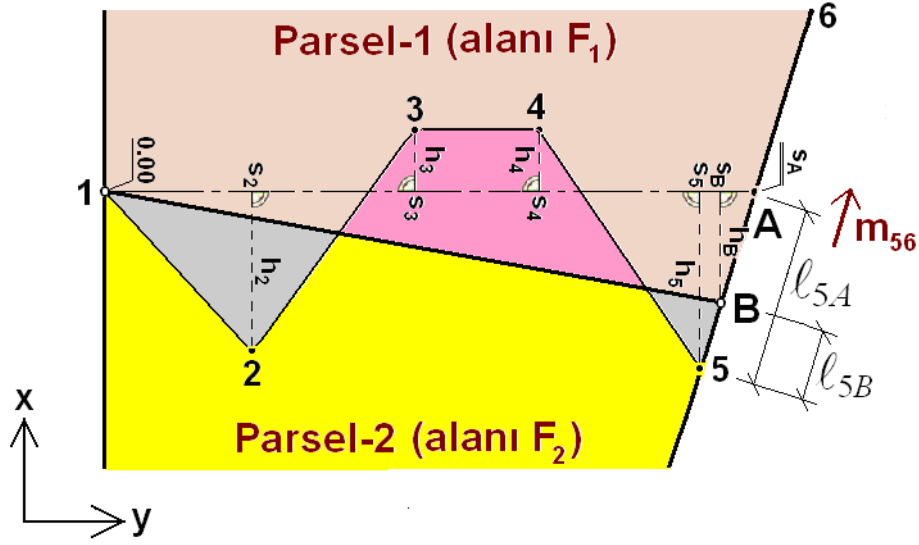
Varsayalım ki N noktası A noktasının üzerinde bulunduğu parsel sınırı üzerinde olsun. O takdirde $x_N = x_A$ ve $y_N = y_A$ konulmasıyla, B noktasının koordinatları, Bölüm 2.3'deki formüllerle elde edildiğinde, Bölüm 2.1.'deki formüllerden elde edilenlerle aynı olacaktır.

3. PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİ

Arazi ve arsa kırık sınırları muhtelif amaçlar için ekonomik olmayan sonuçlar doğurabilir. Örneğin; kırık sınırları olan tarım arazilerinin sürülmesi, ekilmesi ve biçilmesi zordur. Benzer şekilde kent alanlarındaki arsalarda yapılacak bina geometrilerinin düzgün olmaması ise yapıların teknik ve görsel özellikleri bakımından uygun olmayan sonuçlar doğuracağından arzu edilmeyen bir durumdur. Bu nedenlerle mümkün mertebe kırık sınır çizgilerinden kaçınılmalı ve doğru sınır çizgileri oluşturulması hedeflenmelidir, [2]. Burada en önemli ölçüt, kırık sınırın düzeltilmesi işlemi sürecinde sınırın her iki tarafındaki bölgede kalan Parsel-1 'in F_1 ve Parsel-2 'nin F_2 alanlarının aynı kalmasının sağlanmasıdır, (Şekil 3.).

Şekil 3.'e göre Parsel-1 ve Parsel-2 arasındaki dik koordinatları bilinen 1, 2, 3, 4 ve 5 köşe noktalarının oluşturduğu kırık sınır çizgisinin 1B doğru sınır çizgisi ile düzeltilmesi istenmektedir. Koşul, sınır düzeltmesinin sonrasında parsel alanları F_1 ve F_2 'nin değişmemesidir. Çözüm, iki parsel arasındaki bir cephedeki örneğin 1 numaralı sınır köşe noktasının sabit alınarak diğer cephedeki B sınır köşe noktasının konumunun yani dik koordinatlarının belirlenmesidir. Bu amaçla 5 köşe noktasının bulunduğu cephe üzerinde bu noktadan seçilecek ℓ_{5A} uzaklığında bir yardımcı A köşe noktası seçilir.

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM



Şekil 3. İki parsel arasındaki kırık sınırın düzeltilmesi

Ve Parsel-1'in 56 sınır doğrusunun eğimi m_{56} 'dan yararlanılarak XY dik koordinatları

$$m_{56} = \tan \alpha_{56} = \frac{y_6 - y_5}{x_6 - x_5} \quad (37)$$

olmak üzere

$$\begin{aligned} y_A &= y_5 + l_{5A} \cdot \sin(\text{atn } m_{56}) \\ x_A &= x_5 + l_{5A} \cdot \cos(\text{atn } m_{56}) \end{aligned} \quad (38)$$

eşitlileri ile hesaplanır.

1A doğrusu ölçü hattı olarak kabul edilerek ve 1 numaralı parsel köşe noktası başlangıç noktası kabul edilerek iki parsel arasındaki kırık sınır çizgisinin 2, 3, 4 ve 5 numaralı köşe noktalarının ters koordinat hesabı yöntemi uygulanarak s_i dik ayağı ve h_i dik boyu uzunlukları hesaplanır, [7]. Buna göre;

$$a = \sin \alpha_{1A} = \frac{y_A - y_1}{s_{A1}} = \frac{\Delta y_{A1}}{s_{A1}} \quad (39)$$

$$b = \cos \alpha_{1A} = \frac{x_A - x_1}{s_{A1}} = \frac{\Delta x_{A1}}{s_{A1}}$$

$$\Delta y_{li} = y_i - y_1 \quad (40)$$

$$\Delta x_{li} = x_i - x_1$$

olmak üzere,

$$s_i = a \cdot \Delta y_{li} + b \cdot \Delta x_{li} \quad (41)$$

$$h_i = b \cdot \Delta y_{li} - a \cdot \Delta x_{li}$$

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

eşitlikleri ile aranan yerel dik koordinat değerleri hesaplanabilir. Bu hesaplama şekli 1 numaralı parsel köşe noktasına göre olup ara köşe noktalarının yerel dik koordinat hesabı kontrolsüzdür. Eğer hesabın bir önceki noktaya göre kontrollü olarak yapılmak istenirse,

$$\begin{aligned}\Delta y_i &= y_i - y_{i-1} \\ \Delta x_i &= x_i - x_{i-1}\end{aligned}\quad (42)$$

olmak üzere ardışık köşe noktaları arasındaki dik ayağı ve dik boyu farkları

$$\begin{aligned}\Delta s_i &= a \cdot \Delta y_{i,i-1} + b \cdot \Delta x_{i,i-1} \\ \Delta h_i &= b \cdot \Delta y_{i,i-1} - a \cdot \Delta x_{i,i-1}\end{aligned}\quad (43)$$

eşitlikleri ile hesaplanarak her bir köşe noktasının dik ayağı ve dik boyu uzunlukları,

$$\begin{aligned}s_i &= s_{i-1} + \Delta s_i \\ h_i &= h_{i-1} + \Delta h_i\end{aligned}\quad (44)$$

bağıntıları ile hesaplanır, [2], [7].

Yine Şekil 3.'e göre yardımcı köşe noktası A'ya göre 1 numaralı köşe noktasından başlayarak 1, 2, 3, 4, 5, A, 1 kapalı çokgeninin alan farkı ΔF dik ayağı ve dik boyu uzunlukları kullanılarak Gauss'un üçgenlerle alan hesabı bağıntısına göre,

$$2 \cdot \Delta F = h_1(s_2 - s_A) + h_2(s_3 - s_1) + h_3(s_4 - s_2) + h_4(s_5 - s_3) + h_5(s_A - s_4) + h_A(s_1 - s_5) \quad (45)$$

hesaplanır.

$2 \cdot \Delta F$ alan farkı miktarı artı işaretli ise Parsel-1'e fazla miktarda alan verilmiş olup ΔF kadar alanın Parsel-2'ye iadesi gerekmektedir. Parsel-2'ye geçecek ΔF alanını oluşturan üçgenin tabanı s_A dik ayağı uzunluğu olup yüksekliği de h_B dik boyudur. Bu durumda yeni sınır köşe noktası 5A doğrusu üzerindeki B noktası olacaktır. Buna göre;

$$2 \Delta F = s_A \cdot h_B \quad \rightarrow \quad h_B = \frac{2 \cdot \Delta F}{s_A} \quad (46)$$

dik boyu uzunluğu hesaplanır. B köşe noktasının dik ayağı uzunluğu ise;

$$\begin{aligned}\Delta s_{5A} &= s_A - s_5 \\ \Delta s_{BA} &= s_A - s_B\end{aligned}\quad (47)$$

olmak üzere üçgen benzerliklerinden yararlanılarak,

$$\frac{\Delta s_{5A}}{h_5} = \frac{\Delta s_{BA}}{h_B} \quad \rightarrow \quad \Delta s_{BA} = \Delta s_{5A} \cdot \frac{h_B}{h_5} \quad \rightarrow \quad s_B = s_A - \Delta s_{BA} \quad (48)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

B noktasının XY dik koordinatlarının hesabında kısaltmalar,

$$\begin{aligned}\Delta s_{5B} &= s_B - s_5 \\ \Delta h_{5B} &= h_B - h_5\end{aligned}\quad (49)$$

şeklinde yapılarak,

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

$$\ell_{5B} = \sqrt{\Delta s_{5B}^2 + \Delta h_{5B}^2} \quad (50)$$

bağıntısı ile B yeni parsel köşe noktasının 5 numaralı köşe noktasından olan uzaklığı hesaplanır ve

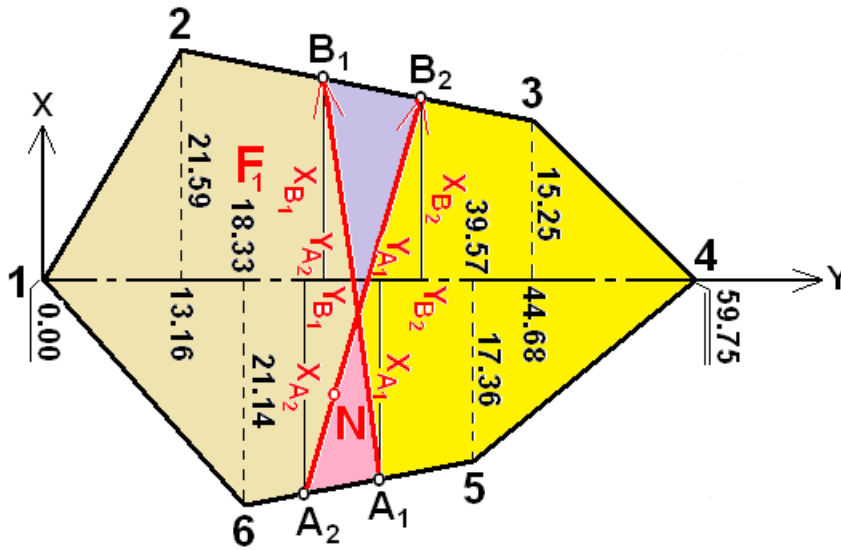
$$\begin{aligned} y_B &= y_5 + \ell_{5B} \cdot \sin(\text{atn } m_{56}) \\ x_B &= x_5 + \ell_{5B} \cdot \cos(\text{atn } m_{56}) \end{aligned} \quad (51)$$

eşitlikleri ile belirlenir, [2].

4. SAYISAL UYGULAMA

4.1. Parsellerin Bölünmesi Uygulaması

Sayısal uygulama için altı köşe noktalı bir parsel ele alınmıştır. İfrazı yapılacak parselin şekli ve hesaplarda kolaylık sağlaması bakımından yerel koordinat değerleri Şekil 4.'de verilmiştir. Öncelikle bu verilerle Gauss'un koordinat değerleri ile üçgen bağıntısı kullanılarak ifrazı yapılacak yani bölünecek parselin alanı hesaplanmıştır, (Tablo 1.).



Şekil 4. İfrazı yapılacak örnek parselin koordinatları ve ifraz çizgileri

Tablo 1. İfrazı yapılacak parselin köşe noktalarının koordinatları ve alan hesabı

Nokta No.	Y _i (m)	X _i (m)	Y _{i+1} - Y _{i-1}	X _i (Y _{i+1} - Y _{i-1})
1	0.00	0.00	-5.17	0.0000
2	13.16	21.59	44.68	964.6412
3	44.68	15.25	46.59	710.4975
4	59.75	0.00	-5.11	0.0000
5	39.57	-17.36	-41.42	719.0512
6	18.33	-21.14	-39.57	836.5098
			Σ= 0.00	2F=3230.6997 m ²
				F=1615.35 m²

Sonra parseli bölecek ifraz çizgisinin A ve B noktalarının bulunduğu 6-5 ve 2-3 parsel sınırlarının eğimleri (1), (2) bağıntılarından, A ve B noktalarının y değerleri için (3), (4) bağıntıları kullanılarak koşul denklemleri yazılmıştır.

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

$$m_A = \frac{39.57 - 18.33}{-17.36 + 21.14} = 5.61905 = \frac{y_A - 18.33}{x_A + 21.14} \rightarrow \alpha_{6-5} = 88.^{\circ}7877 \quad (52)$$

$$m_B = \frac{44.68 - 13.16}{15.25 - 21.59} = -4.97161 = \frac{y_B - 13.16}{x_B - 21.59} \rightarrow \alpha_{2-3} = 112.^{\circ}6365 \quad (53)$$

$$y_A = 18.33 + 5.61905(x_A + 21.14) \quad (54)$$

$$y_B = 13.16 - 4.97161(x_B - 21.59) \quad (55)$$

Parseli iki eşit alana bölecek AB ifraz çizgisinin koordinatlarını belirlemek için gereken üçüncü koşul denklemi A612B köşe noktalı F_1 alanı için (5)'den yazılmıştır.

$$F_1 = \frac{F}{2} \rightarrow 2F_1 = F = 1615.35 \text{ m}^2 \text{ 'dir.}$$

$$x_B(y_A - 13.16) + x_A(18.33 - y_B) - 21.14(0.00 - y_A) + 0.00(13.16 - 18.33) + 21.59(y_B - 0.00) = 1615.35 \text{ m}^2$$

yazılarak yapılan düzenlemeler sonunda,

$$x_B(y_A - 13.16) + x_A(18.33 - y_B) + 21.14y_A + 21.59y_B = 1615.35 \text{ m}^2 \quad (56)$$

denklemini elde edilmiştir.

1. durum: A_1 ve B_1 noktalarından birinin sabit olması.

Bu uygulamada A_1 noktasının sabit olması öngörülmüştür. Bu durumda (4) eşitliğinden

$$y_{B_1} = -4.97161x_{B_1} + 120.497$$

elde edilmiş ve (5) koşulunda yerine konularak yapılan düzenlemeler sonucunda (12)'nin karşılığı

$$x_{B_1} = \frac{-986.18 + 102.167x_{A_1} - 21.14y_{A_1}}{(4.97161x_{A_1} - 107.337) + (y_{A_1} - 13.16)}$$

eşitliği bulunmuştur. Parselin 6 numaralı köşe noktasından $S(6-A_1)=10$ m uzakta olması öngörülen A_1 noktasının dik koordinatları (14) ve (15) eşitliklerinden,

$$x_{A_1} = -21.14 + 10.00 \times \cos 88.^{\circ}7877 = -19.39 \text{ m}$$

$$y_{A_1} = +18.33 + 10.00 \times \sin 88.^{\circ}7877 = +28.18 \text{ m}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değerler (12)'nin karşılığında yerine konulmak suretiyle,

$$x_{B_1} = \frac{-986.18 + 102.167 \times (-19.39) - 21.14 \times 28.18}{(4.97161 \times (-19.39) - 107.337) + (28.18 - 13.16)} = +18.88 \text{ m} \quad (57)$$

bulunmuş ve (4)'de yerine konularak,

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

$$y_{B_1} = 13.16 - 4.97161 \times (18.88 - 21.59) = +26.63 \text{ m} \quad (58)$$

olarak B₁ noktasının dik koordinatları hesaplanmıştır. B₁ noktasının parselin 2-3 sınır hattı üzerinde olup olmadığının kontrolü için 2-3 sınırının eğimi bir kez de bu değerlerle hesaplanmış ve

$$m_B = \frac{26.63 - 13.16}{18.88 - 21.59} = -4.97048$$

değeri elde edilerek noktanın parsel sınırı üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

2. durum: İfraz çizgisinin doğrultusunun verilmesi.

Yine parselin 6 numaralı köşe noktasından S(6-A₂)=5 m uzakta olduğu düşünülen A₂ noktasının dik koordinatları için (14) ve (15) eşitlikleri ile,

$$x_{A_2} = -21.14 + 5.00 \times \cos 88.^s7877 = -20.26 \text{ m}$$

$$y_{A_2} = +18.33 + 5.00 \times \sin 88.^s7877 = +23.25 \text{ m}$$

değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerde (12)'nin karşılığı olan eşitlikte ve oda (4) yerine konularak,

$$x_{B_2} = \frac{-986.18 + 102.167 \times (-20.26) - 21.14 \times 23.25}{(4.97161 \times (-20.26) - 107.337) + (23.25 - 13.16)} = +17.92 \text{ m} \quad (59)$$

$$y_{B_2} = 13.16 - 4.97161 \times (17.92 - 21.59) = +31.41 \text{ m} \quad (60)$$

olarak tespit edilmiştir. Buradan hareketle parseli iki eşit alana bölecek A₂B₂ ifraz çizgisinin T₂ doğrultusu (17) eşitliği ile hesaplanarak,

$$T_2 = \frac{+31.41 - 23.25}{+17.92 - 20.26} = +0.213724 \rightarrow \alpha_{T_2} = 13.^s4045 \quad (61)$$

olarak verildiğini kabul edelim. Şimdi,

$$T_2 = +0.213724 = \frac{y_{B_2} - y_{A_2}}{x_{B_2} - x_{A_2}} \quad (62)$$

olduğu öngörülerek bu eşitlikte (1) ve (2)'den hareket edilerek y_{A_2} , y_{B_2} için (3) ve (4) ile

$$y_{A_2} = +18.33 + 5.61905 \times (x_{A_2} + 21.14) \quad (63)$$

$$y_{B_2} = +13.16 - 4.97161 \times (x_{B_2} - 21.59) \quad (64)$$

hesaplanmış ve bu eşitlikler (17/2)'de yerine konularak,

$$+0.21372 = \frac{+13.16 - 4.97161 \times (x_{B_2} - 21.59) - 18.33 - 5.61905 \times (x_{A_2} + 21.14)}{x_{B_2} - x_{A_2}}$$

elde edilmiş ve yapılan kısaltma düzenlemeleri sonucunda,

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

$$x_{A_2} = -3.07474 - 0.9593 x_{B_2} \quad (65)$$

eşitliğine ulaşılmıştır.

(3/2) ve (4/2)'yi (5)'de yerine koyarsak,

$$x_{B_2} \left[18.33 + 5.61905 \times (x_{A_2} + 21.14) - 13.16 \right] + x_{A_2} \left[18.33 - 13.16 + 4.97161 \times (x_{B_2} - 21.59) \right] + 21.59 \left[13.16 - 4.97161 \times (x_{B_2} - 21.59) \right] + 21.14 \left[18.33 + 5.61905 \times (x_{A_2} + 21.14) \right] = 1615.35 \text{ m}$$

düzenleme ve kısaltmalarla,

$$3884.8288 + 16.62(x_{A_2} + x_{B_2}) + 10.59066 x_{A_2} x_{B_2} = 0 \quad (66)$$

ulaşılır. (23/2)'yi (28/2)'de yerine koyarak,

$$3884.8288 + 16.62 \left[(-3.07474 - 0.9593 x_{B_2}) + x_{B_2} \right] + 10.59066 (-3.07474 - 0.9593 x_{B_2}) x_{B_2} = 0$$

düzenlenerek,

$$-10.15962 x_{B_2}^2 - 31.8871 x_{B_2} + 3833.72662 = 0 \quad (67)$$

ikinci derece denklem eşitliği bulundu. Bu denklem çözüldüğünde iki kökü

$$x_{B_2}^I = -21.06 \text{ m} \quad \text{ve} \quad x_{B_2}^{II} = +17.92 \text{ m}$$

değerleri elde edilmiştir. Negatif işaretli değer problemimiz için anlamlı (dik koordinat sistemine göre) olmadığından pozitif işaretli $x_{B_2} = +17.92 \text{ m}$ değeri aranan sonuç olmaktadır. Bu değer (4/2) yerine konularak,

$$y_{B_2} = +13.16 - 4.97161 \times (17.92 - 21.59) = +31.41 \text{ m}$$

değerleri elde edilir ki, problemin oluşumundaki hesapladığımız (12/2) ve (4/2) ile belirlediğimiz değerler böylece tekrar elde edilmiş oldu.

3. durum: İfraz çizgisinin parselin içindeki bir noktadan geçmesi.

Parsel içindeki N noktasının A₂B₂ ifraz çizgisi üzerinde A₂ noktasından S(A₂-N)=15 m uzaklıkta bir nokta olduğunu varsayalım. Bu noktanın koordinatları,

$$x_N = -20.26 + 15.00 \times \cos 13.^\circ 4045 = -5.59 \text{ m}$$

$$y_N = +23.25 + 15.00 \times \sin 13.^\circ 4045 = +26.39 \text{ m}$$

olacaktır. Parseli iki eşit alana bölecek yeni sınırın bu N noktasından geçmesini isteyelim. Bu durumda,

$$\frac{y_{A_2} - y_{B_2}}{x_{A_2} - x_{B_2}} = \frac{y_N - y_{B_2}}{x_N - x_{B_2}}$$

'de (3/2) ve (4/2)'yi yerine koyarsak,

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

$$\frac{18.33+5.6105(x_{A_2} + 21.14) - 13.16 + 4.97161(x_{B_2} - 21.59)}{x_{A_2} - x_{B_2}} = \frac{26.39 - 13.16 + 4.97161(x_{B_2} - 21.59)}{-5.59 - x_{B_2}}$$

bütün düzenlemeler ve kısaltmalar yapıldıktan sonra,

$$62.6970 x_{A_2} - 138.5153 x_{B_2} - 10.59066 x_{A_2} x_{B_2} - 92.9058 = 0 \quad (68)$$

eşitliği elde edilmiştir. (28/2)'den (34/2) çıkarılarak,

$$3884.8288 + 16.62 x_{A_2} + 16.62 x_{B_2} + 10.59066 x_{A_2} x_{B_2} = 0 \quad (69)$$

$$+ 92.9058 - 62.6970 x_{A_2} - 138.5153 x_{B_2} - 10.59066 x_{A_2} x_{B_2} = 0 \quad -(34/2)'den$$

$$3791.9230 + 79.3170 x_{A_2} - 121.8953 x_{B_2} = 0 \text{ 'dan}$$

$$x_{A_2} = -47.8072 + 1.5368 x_{B_2} \quad (70)$$

'ye ulaşılmıştır. (35/2), (28/2)'de yerine konularak,

$$3884.8288 + 16.62[-47.8072 + 1.5368 x_{B_2}] + x_{B_2} + 10.59066[-47.8072 + 1.5368 x_{B_2}] x_{B_2} = 0$$

'nin düzenlenmesi ile,

$$16.2757 x_{B_2}^2 - 464.1482 x_{B_2} + 3090.2731 = 0 \quad (71)$$

ikinci derece denkleminin kökleri için,

$$x_{B_2}^I = +17.986 \text{ m ve } x_{B_2}^{II} = +10.592 \text{ m}$$

değerlerine ulaşılmıştır. Burada 10.592 m değeri parselin 2-3 sınır çizgisinin üzerinde olamayacağından 17.986 m değeri aranan değer olmaktadır. Bu değer (4/2)'de yerine konularak,

$$y_{B_2} = +13.16 - 4.97161 \times (17.986 - 21.59) = +31.078 \text{ m}$$

olarak B₂ noktasının dik koordinatları bulunmuştur. B₂ noktasının parselin 2-3 sınır hattı üzerinde olup olmadığının tespiti için 2-3 sınırının eğimi bir kez de bu değerlerle hesaplanmış ve

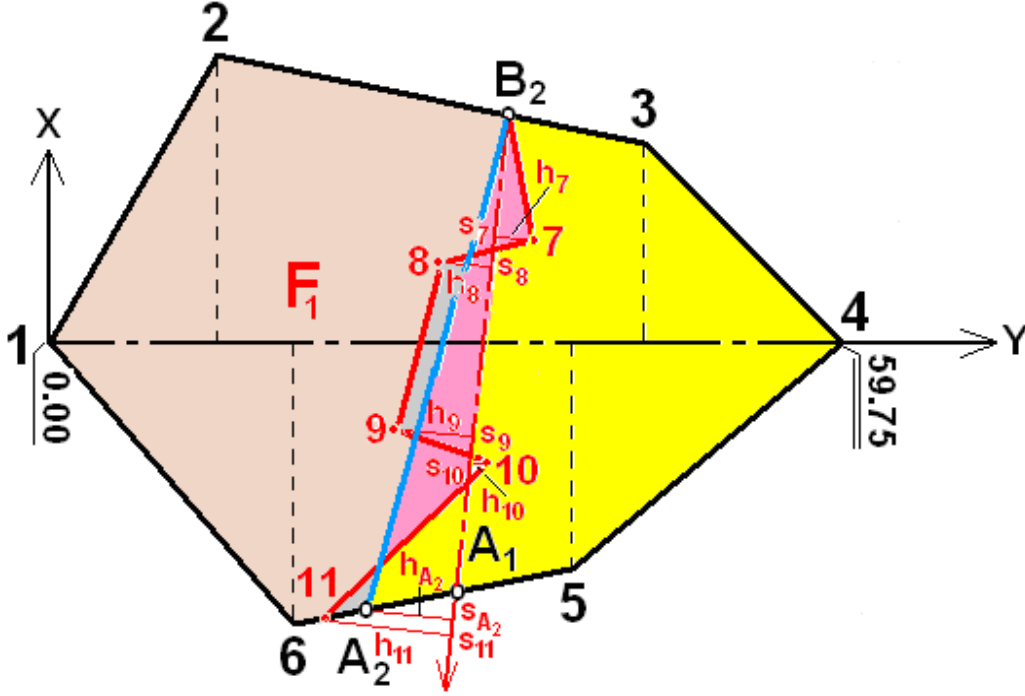
$$m_B = \frac{31.078 - 13.16}{17.986 - 21.59} = -4.97170$$

değeri elde edilerek noktanın parsel sınırı üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Parsel Kırık Sınırının Düzeltilmesi Uygulaması

Şekil 4.'de verilen parselin F₁ ile gösterilen alana sahip kısmının 23 ve 56 kenar çizgileri arasında B₂, 7, 8, 9, 10 ve 11 noktaları ile kırık sınır oluşturacak şekilde iki eşit alana bölündüğü öngörülmüştür. Kırık sınır noktalarının yerel koordinatlarının (s_i, h_i) hesaplanması amacıyla B₂A₁ hattı, A₂B₂ yeni doğru sınır hattının belirlenmesine yönelik olarak geçici ölçü hattı seçilmiştir. (39) eşitlikleri ile a ve b katsayıları, (42) eşitlikleri ile XY dik koordinat farkları, (43) eşitlikleri ile ardışık kırık sınır köşe noktalarının dik ayağı ve dik boyu farkları, (44) eşitlikleri ile de kontrollü olarak dik ayağı ve dik boyu uzunlukları

hesaplanmıştır. Hesap sonuçları Tablo 2.'de verilmiştir. Burada h dik boyu uzunluklarının (-) işaretli olması noktanın hesap yönünün sol tarafında olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Kırık parsel sınırının düzeltilmesi

Tablo 2. Kırık sınır noktalarının XY dik koordinatlarından dik ayağı ve dik boyu uzunluklarının hesabı
[$\alpha(B_2A_1)=205.49764$ gon, $a=-0.086249361$, $b=-0.996273580$]

Nokta No.	Y_i (m)	X_i (m)	$\Delta Y_i=Y_{i+1}-Y_{i-1}$	$\Delta X_i=X_{i+1}-X_{i-1}$	$\Delta s_i=a.\Delta Y_i+b.\Delta X_i$ $s_i=s_{i-1}+\Delta s_i$	$\Delta h_i=b.\Delta Y_i-a.\Delta X_i$ $h_i=h_{i-1}+\Delta h_i$
B ₂	31.41	17.92			0.000	0.000
7	33.07	7.25	1.66	-10.67	-0.143+10.630= +10.487→ +10.487	-1.654-0.920= -2.574→ -2.574
8	26.50	5.52	-6.57	-1.73	+0.567+1.724= +2.291→ +12.778	+6.397→ +3.823
9	23.50	-7.62	-3.00	-13.14	+0.259+13.091= +13.350→ +26.128	+2.989-1.133= +1.856→ +5.679
10	29.33	-10.25	5.83	-2.63	-0.503+2.620= +2.117→ +28.245	-5.808-0.227= -6.035→ -0.356
11	20.28	-20.79	-9.05	-10.54	+0.781+10.501= +11.282→ +39.527	+9.016-0.909= +8.107→ +7.751
A ₁	28.18	-19.39	7.90	1.40	-0.681-1.395= -2.076→ +37.451	-7.871+0.121= -7.750→ +0.001
	$Y_n-Y_1=$ -3.23	$X_n-X_1=$ -37.31	$[\Delta Y]=$ -3.23	$[\Delta X]=$ -37.31		

Hesaplanan yerel dik koordinat değerleri ile B₂A₁ geçici ölçü hattına göre hattın her iki tarafı arasında kalan ΔF alan farkı Gauss'un üçgenlerle alan hesabı bağıntısına göre hesaplanmıştır (Tablo 3.).

Tablo 3.'e göre geçici ölçü hattının sol tarafında kalan kısma ΔF=90.6635 m² fazla alan geçmiştir. Kırık sınırın doğru sınır haline dönüştürülmesi için geçici hattın sağ tarafına A₁A₂B₂ üçgeni kadar alanın geri verilmesi, yani A₁ noktasının A₂ noktasına ötelenmesi gerekmektedir. A₂ noktasının konumunun belirlenmesi için yerel sistemdeki dik ayağı ve dik boyu belirlenmelidir. (46) eşitliği ile dik boyu hesaplanmıştır.

PARSELLERİN BÖLÜNMESİ (İFRAZINDA) VE PARSEL KIRIK SINIRLARININ DÜZELTİLMESİNDE DİK KOORDİNATLARA DAYALI KESİN YÖNTEM

Tablo 3. Kırık sınır çizgisinin geçici ölçü hattı arasında kalan alan farkının hesabı

Nokta No.	s _i (m)	h _i (m)	s _{i+1} - s _{i-1}	h _i (s _{i+1} - s _{i-1})
B ₂	0.000	0.000	-26.964	0.0000
7	10.487	-2.574	12.778	-32.8906
8	12.778	3.823	15.641	59.7955
9	26.128	5.679	15.467	87.8371
10	28.245	-0.356	13.399	-4.7700
11	39.527	7.751	9.206	71.3557
A ₁	37.451	0.000	-39.527	0.0000
			Σ= 0.000	2ΔF=181.3277 m² ΔF=90.66385 m²

$$2 \cdot \Delta F = s_{B_2A_1} \cdot h_{A_2} \rightarrow h_{A_2} = \frac{181.3277}{27.451} = 4.842 \text{ m}$$

Noktanın dik ayağı uzunluğu ise (47) ve (48) eşitlikleri ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\Delta s_{11-A_1}}{h_{11}} = \frac{\Delta s_{A_2-A_1}}{h_{A_2}} \rightarrow \Delta s_{A_2-A_1} = \frac{-2.076 \cdot 4.842}{7.751} = -1.297 \text{ m} \quad (72)$$

Benzer üçgenlerin hipotenüsleri (49) ve (50) eşitlikleri ile hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \ell_{11-A_1} &= \sqrt{\Delta s_{A_1-A_1}^2 + h_{11}^2} = \sqrt{2.076^2 + 7.751^2} = 8.024 \text{ m} \\ \ell_{A_2-A_1} &= \sqrt{\Delta s_{A_2-A_1}^2 + h_{A_2}^2} = \sqrt{1.297^2 + 4.842^2} = 5.013 \text{ m} \\ \Delta \ell_{11-A_2} &= 8.024 - 5.013 = 3.011 \text{ m} \end{aligned} \quad (73)$$

6 ile 11 köşe noktaları arasındaki açıklık açısı (37) eşitliğinden,

$$\alpha_{6-11} = \text{atn} \frac{20.28 - 18.33}{-20.79 + 21.14} = \text{atn} \frac{+1.95}{+0.35} = 88.6939 \text{ gon}$$

$$(m_{6-11} = 5.571428572) \quad (74)$$

olarak hesaplanmış olup bu verilerle A₂ noktasının XY dik koordinat değerleri (51) eşitlikleri ile belirlenmiştir.

$$y_{A_2} = y_{11} + \Delta \ell_{11-A_2} \cdot \sin \alpha_{6-11} = 20.28 + 3.011 \cdot \sin 88.6939 = 23.244 \cong +23.25 \text{ m} \quad (75a)$$

$$x_{A_2} = x_{11} + \Delta \ell_{11-A_2} \cdot \cos \alpha_{6-11} = -20.79 + 3.011 \cdot \cos 88.6939 = -20.258 \cong -20.26 \text{ m} \quad (75b)$$

Görüldüğü gibi parseli iki eşit alana bölen düzeltilmiş sınırın A₂ parsel köşe noktasının koordinat değerleri parsellerin bölünmesi uygulaması kısmındaki 2. durumdaki A₂ köşe noktasının aynı değerleri bulunmuştur.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma ile sunulan yöntem, görüldüğü gibi bir herhangi geometriye sahip parselin bölme işlemi için deneme ve yanılmasız doğrudan sonuç vermektedir. Yöntemin uygulanabilmesi için ifrazı yapılacak parselin köşe noktalarının koordinatlarının bilinmesi gerekmektedir. Kırık parsel sınırlarının düzeltilmesinde de sadece bir fazla adım ile kesin sonuca ulaşılabilmektedir. Problemlerin çözümünde genel koordinat değerleri kullanılabilir. Ayrıca verilen sayısal uygulamalarda olduğu gibi ters koordinat dönüşümü ile parsel bazlı yerel koordinat sistemine (obje koordinat sistemi) geçilerek küçük değerlerle çalışmak da mümkündür. Yöntem, koordinat değerlerine dayandığından uygun bir programlama dili kullanılarak formüle

R. G. Hoşbaş, A. Pirri

edilebilir. Bu sayede yöntemin bilgisayar ortamında çalışan bir uygulamaya dönüştürülmesi mümkün olacaktır. Bu yöntem, bir parselin ikiden fazla parçaya bölümlendirilmesi için de rahatlıkla uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. M. Easa, “General direct method for land subdivision”, *Journal of Surveying Engineering*, vol. 115(4), pp. 402-411, 1989.
- [2] V. Matthews, *Vermessungskunde 1*, B.G. Teubner, Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden, 2003.
- [3] İ. Koç, *Ölçme Bilgisi 1*, Gökhan Matbaacılık, İstanbul 1998.
- [4] M.N. Ergin, *Ölçme Bilgisi-1*, Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayını, Konya, 1994.
- [5] İ. Koç, “Parsellerin bölünmesi ve sınır uygulamaları”, I. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 30-31 Ekim 2003, ss: 435-450
- [6] H. W. Stoughton, “Subdivision of aquadrilateral for a specified area”, *The Canadian Surveyor*, vol. 40(2), pp: 146-172, 1986.
- [7] H. Erkaya, “Ölçme Bilgisi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Basılmamış Ders Notları, sayfa: 89-91, İstanbul 2010.





DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY (2018) VE DBYBHY (2007) 'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

Ömer ÖZER^{1,*} , S. Bahadır YÜKSEL² 

^{1,2} Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Selçuklu/Konya

ÖZET

Betonarme birçok yapıda deprem etkileri, betonarme çerçeveler ve betonarme perdeler tarafından birlikte karşılanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bu tip betonarme yapıların analiz sonuçlarının Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 (DBYBHY, 2007) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY, 2018) göre karşılaştırıp sonuçlarının incelenmesidir. Rijit bodrum + 13 katlı bina modeli, DBYBHY (2007) için 1. Derece deprem bölgesinde, TBDY (2018)'e göre ise hem İstanbul Atatürk Havaalanı bölgesinin yer ivmesine, hem de Kocaeli Gölcük bölgesinin yer ivmesine göre analiz edilmiştir. Yapının, tüm taşıyıcıları ve tüm parametreleri için karşılaştırma yapıldığında, DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) analiz sonuçları arasında ciddi farklılıkların olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: DBYBHY (2007), TBDY (2018), Bağ kirişi, Perdeli sistem, Zemin yapı etkileşimi, Yumuşak zemin.

COMPARING ANALYSIS RESULTS OF TALL BUILDINGS WHICH TAKES EARTHQUAKE EFFECTS BY REINFORCED CONCRETE FRAMES AND SHEAR WALLS TOGETHER ACCORDING TO TBEC 2018 AND TEC 2007

ABSTRACT

In many reinforced concrete structures, the earthquake effects are met together by reinforced concrete frames and shear walls. The purpose of this study is to compare and examine the results of analysis of this type of reinforced concrete structures according to Turkish Earthquake Code 2007 (TEC, 2007) and Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC, 2018). The rigid basement + 13 floor model building is analyzed for seismic zone 1 according to TEC (2007) and same model is analyzed at Istanbul Atatürk Airport and at Kocaeli Gölcük regions ground acceleration according to TBEC (2018). By comparing for all the load carrying members and the parameters of the structure, it has been observed that there are serious differences between the analysis results of TEC (2007) and TBEC (2018).

Keywords: TEC (2007), TBEC (2018), Coupling beam, Shear wall system, Soil structure interaction, Soft soil.

1. GİRİŞ

Ülkemizde, bugüne kadar 1947, 1953, 1961, 1968, 1975, 1998, 2007 ve şu anda yürürlükte olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY, 2018) olmak üzere, toplam 8 farklı deprem yönetmeliği yürürlükte olmuştur. Bir önceki deprem yönetmeliği olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007'de (DBYBHY, 2007) Türkiye coğrafyası dört ana deprem bölgesine ayrılmış ve her bir deprem bölgesi için ayrı bir etkin yer ivmesi belirlenmiştir [1]. Bu kabuldeki en büyük sorun ise aynı deprem bölgesindeki her bir coğrafyada sanki aynı yer ivmesi varmış gibi kabul edilmesidir. TBDY (2018)'de ise her bir koordinatın kendine has yer ivmesi ve deprem parametreleri vardır. Ayrıca literatürde yapılan bir çok çalışma doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermiştir [2]. TBDY (2018)'in de doğrusal olmayan analiz yöntemleri üzerinde de daha fazla durulduğu görülmektedir. Böylelikle yenilenen deprem yönetmeliğiyle daha gerçekçi deprem yüklemeleri ve analiz sonuçlarının yolu açılmıştır.

TBDY (2018)'in 16C.1.2 maddesi incelendiğinde ise, ilgili maddede “güvenli tarafta kalma tercihi nedeni ile bodrumlu binalar dâhil olmak üzere temeli yüzeysel olan binalarda yapı-zemin etkileşimi bu nedenle ihmal edilebilir” hükmü bulunmaktadır. Ancak kolon ve perdeler gelen deprem yükü dağılımı, temel çözüm sistemine göre değişmekte, rijit temel

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: omer@anahtarmuhendislik.com
Geliş / Received: 29.02.2020 Kabul / Accepted: 22.05.2020 doi: 10.28948/ngmuh.694781

Ö. Özer, S. B. Yüksel

kabulünde zorlanmayan perde ve kolon kesitleri zemin yapı etkileşimli (ZYE) çözümlerde zorlanabilmektedir [3]. Ayrıca zemin parametrelerinin binaların deprem performansına ciddi etkilerinin olduğu bilinmektedir [4], [5]. Bu etkileri en doğru şekilde yapıya aktarmanın yolu ise gerçekçi modellemedir. Bu bağlamda rijit temel kabulü de yerini düşey statik yüklemeler altında yapıların temellerinde çökme ve dönme etkileri, yatay dinamik yükler altında ise yapı ve temel arasında farklı hareket etme eğilimini dikkate alan ZYE'li çözüme bırakmıştır [6], [7]. Literatürde yapılan çalışmalarda göstermiştir ki ankastre temel kabulü gerçekçilikten uzak kalmakta ve yapı analizlerinde ZYE'li çözümlerin uygulanması önem arz etmektedir [8-10].

Bu çalışmada, DBYBHY (2007)'e göre Z3, TBDY (2018)'e göre ise ZD zemin sınıfında bulunan, rijit bodrum + 13 katlı bağ kirişli perdelerin ve kolon kiriş sisteminin bir arada kullanıldığı yapı modeli hem rijit temel kabulü ile hem de ZYE'li çözüm kullanılarak analiz edilmiştir. Literatürdeki çoğu çalışmada olduğu gibi sadece yapı periyodu üzerinde durulmamış, perde, kolon ve bağ kirişi kesit tesirleri, temel analiz sistemine ve seçilen deprem yönetmeliğine göre detaylı olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Yapı modellemesi yapılırken perdeleri bağlayan kirişlerin bağ kirişi sayılıp sayılmayacağını belirlemek için TBDY (2018)'deki formüllerden yararlanılmıştır. Bağ kirişli (boşluklu) perdelerin tanımlanmasında esas alınan bağ derecesi katsayısı Ω , Denklem (1)'e göre hesaplanmaktadır [11].

$$\Omega = \frac{cN_V}{M_{DEV}} = \frac{cN_V}{M_1+M_2+cN_V} \quad (1)$$

Denklem (1)'de verilen bağ derecesi katsayısının Denklem (2)'de tanımlanan koşulu sağladığı taşıyıcı sistem elemanları ise bağ kirişli (boşluklu) perde olarak tanımlanır.

$$\Omega \geq 1/3 \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)'de simgelerin anlamları aşağıda verilmiştir:

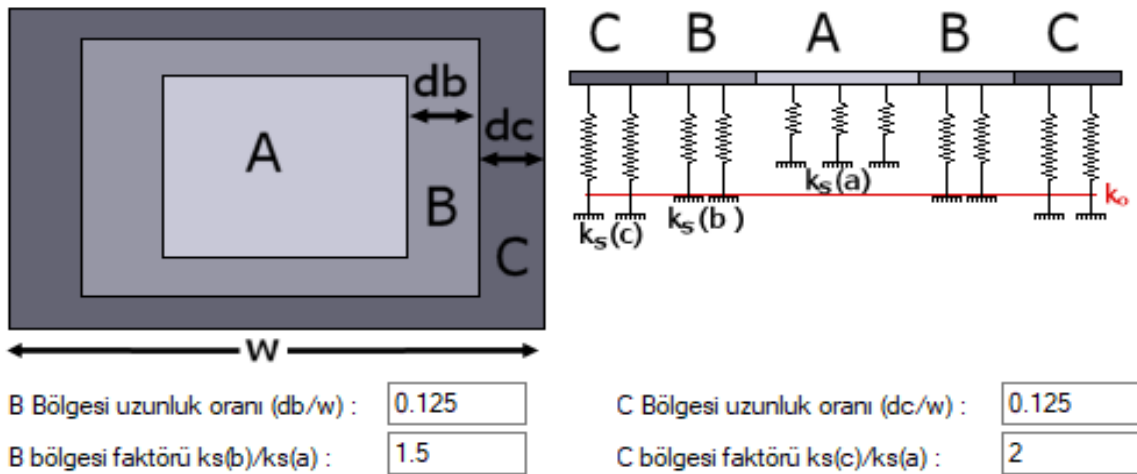
c : Bağ kirişli (boşluklu) perde parçalarının enkesit ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık

N_V : Deprem etkisinde bağ kirişli perdenin bağ kirişlerinde oluşan kesme kuvvetlerinin tüm perde yüksekliği boyunca toplam olarak perde parçalarının tabanında oluşan birbirine eşit çekme ve basınç eksenel kuvvetleri

M_1, M_2 : Bağ kirişli perdeyi oluşturan perde parçalarında deprem etkisinden, tabanda elde edilen eğilme momentleri

M_{DEV} : Betonarme perdenin veya çaprazlı çerçevenin tabanında deprem yüklerinden meydana gelen devrilme momenti

Temel sistemi modellenirken iki farklı temel metodu üzerinde durulmuştur. Bunlardan birincisi rijit temel metodudur. Bu yöntemde, en alt kat kolonları ve perdeleri, temele ankastre mesnetli olarak kabul edilmekte, dolayısıyla zeminin yapıdan, yapının da zeminden etkilenmediği varsayılmaktadır. Diğer temel analiz metodu ise daha gerçekçi temel modelleme yöntemi olan Pseudo-Coupled metodudur [12]. Bu yöntemde, temel 3 parçaya bölünür ve her bir alan için ayrı yatak katsayısı tanımlanır (Şekil 1). Her 3 parçaya ait seçilecek olan yatak katsayısının bulunmasında kullanılacak parametreler de aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Pseudo-Coupled metodunda boyutsuz yatak katsayısının düzenli formasyonlu temel alanı içindeki değişimi [13]

DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

$$ydb=W \times (db/W) \quad (3)$$

$$hdb=H \times (db/W) \quad (4)$$

$$ydc=W \times (dc/W) \quad (5)$$

$$hdc=H \times (dc/W) \quad (6)$$

$$Aa=(W-ydb-ydc) \times (H-hdb-hdc) \quad (7)$$

$$Ba=(W-ydc) \times (H-hdc)-Aa \quad (8)$$

$$Ca=W \times H-Ba-Aa \quad (9)$$

$$Eo=(Aa+Ba+Ca)/(Aa+B \text{ faktör} \times Ba+C \text{ faktör} \times Ca) \quad (10)$$

$$K_s(a)=Eo \times K_0 \quad (11)$$

$$K_s(b)=(B \text{ faktör}) \times K_s(a) \quad (12)$$

$$K_s(c)=(C \text{ faktör}) \times K_s(a) \quad (13)$$

W: Radye taban bölgesinin X-Y ekseninde X yönündeki uzunluğu

H: Radye taban bölgesinin X-Y ekseninde Y yönündeki uzunluğu

db/W: Şekil 1'deki B bölgesi genişliği için alınan oran

dc/W: Şekil 1'deki C bölgesi genişliği için alınan oran

Aa: A bölgesi alan değeri

Ba: B bölgesi alan değeri

Ca: C bölgesi alan değeri

K₀: Zemin etütüne göre elde edilen zemin yatak katsayısı değeri

B faktör: Diyalogdan alınan B bölgesi faktörü

C faktör: Diyalogdan alınan C bölgesi faktörü

Temel analizinde, temel içerisinde yukardaki formüllere göre ayrılan 3 ayrı bölge için K_s(a), K_s(b) ve K_s(c) yatak katsayıları kullanılır.

Analiz modeli TBDY (2018)'e göre deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (A14) grubuna girmektedir. Bu sistemler için davranış katsayısı R=8 alınmaktadır. DBYBHY (2007) modelinde süneklik düzeyi yüksek perdelerin tabanında elde edilen kesme kuvvetleri toplamının, binanın tümü için tabanda meydana gelen toplam kesme kuvvetine oranını belirten α_s 0.88 bulunmuştur. DBYBHY (2007)'e göre süneklik düzeyi yüksek sistemde Denklem (14) formülüne göre R katsayısı 6.48 seçilmiştir.

$$R = 10 - 4 \alpha_s \quad (14)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan analiz modeli rijit bodrum + 13 kattan oluşmaktadır ve kat yükseklikleri 3.5m'dir. Analizi yapılan modelde deprem etkileri, moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılanmaktadır. Modelin kalıp planı Şekil 2'te verilmiştir ve TBDY (2018)'de bahsedilen süneklik düzeyi yüksek sistem seçilmiştir. Seçilen modele ait parametreler, Tablo 1'de verilmiştir.

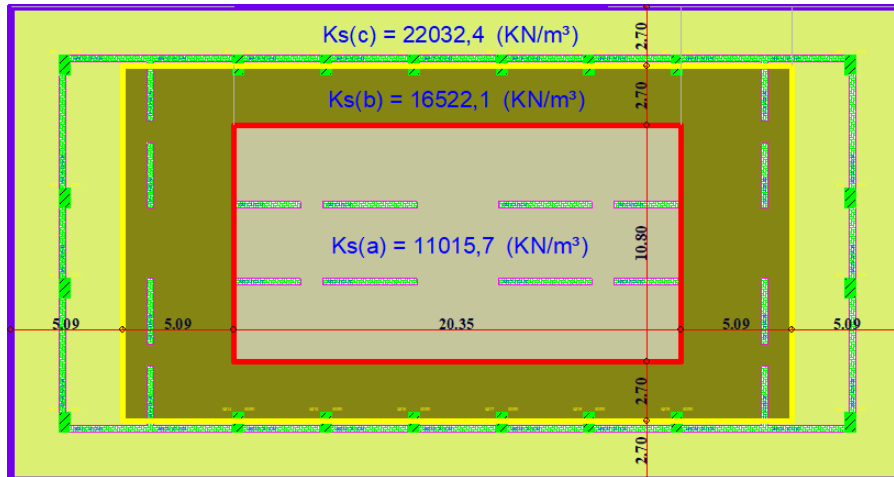
Tablo 1. Yapı genel parametreleri

Yapı Modeli Parametreleri			
Genel Parametreleri		Taşıyıcı Parametreleri	
Kat Sayısı	Rijit bodrum + 13 kat	Temel Yüksekliği	1.4 m
Kat Yüksekliği	3.5 m	Temel Ebatları	40.7m x 21.6m
Yapı Yüksekliği	49 m	Perde Kesiti	0.3 x 3
Bina Yükseklik Sınıfı	BYS 3	Perde Uç Düşey Donatı-Etr.	Φ14 - Φ12/10
Taşıyıcı Sistem	TBDY 2018 – 8	Perde Gövde Donatı-Etr.	Φ14 - Φ12/10
Davranış Katsayısı R	DBYBHY (2007) – 6.48	Kolon Kesiti	0.5 x 0.9
Dayanım Fazlalığı Katsayısı D	2.5	Kolon Donatısı - Etr.	18Φ18 - Φ10/9
Beton Sınıfı	C45	Kiriş Kesiti	0.3 x 0.7
Çelik Sınıfı	B420C	Bağ Kirişi Kesiti	0.3 x 1.4
Deprem Tasarım Sınıfı	DTS 1	Döşeme Kalınlıkları	0.15 m
Bina Kullanım Sınıfı	BKS 3	Döşeme Ölü / Hareketli Yük	0.17 / 0.2 t/m ²
Hesap Yöntemi	Dayanıma Göre Tasarım	Zemin Sınıfı	ZD
Yapı Süneklik Düzeyi	Yüksek	Zemin Taşıma Gücü	ZD – 490,5 KN/m ²
Deprem Hesap Yöntemi	Mod Birleştirme	Yatak Katsayısı	ZD - 14715 KN/m ³
Yapı Toplam Ağırlığı	114836 KN		

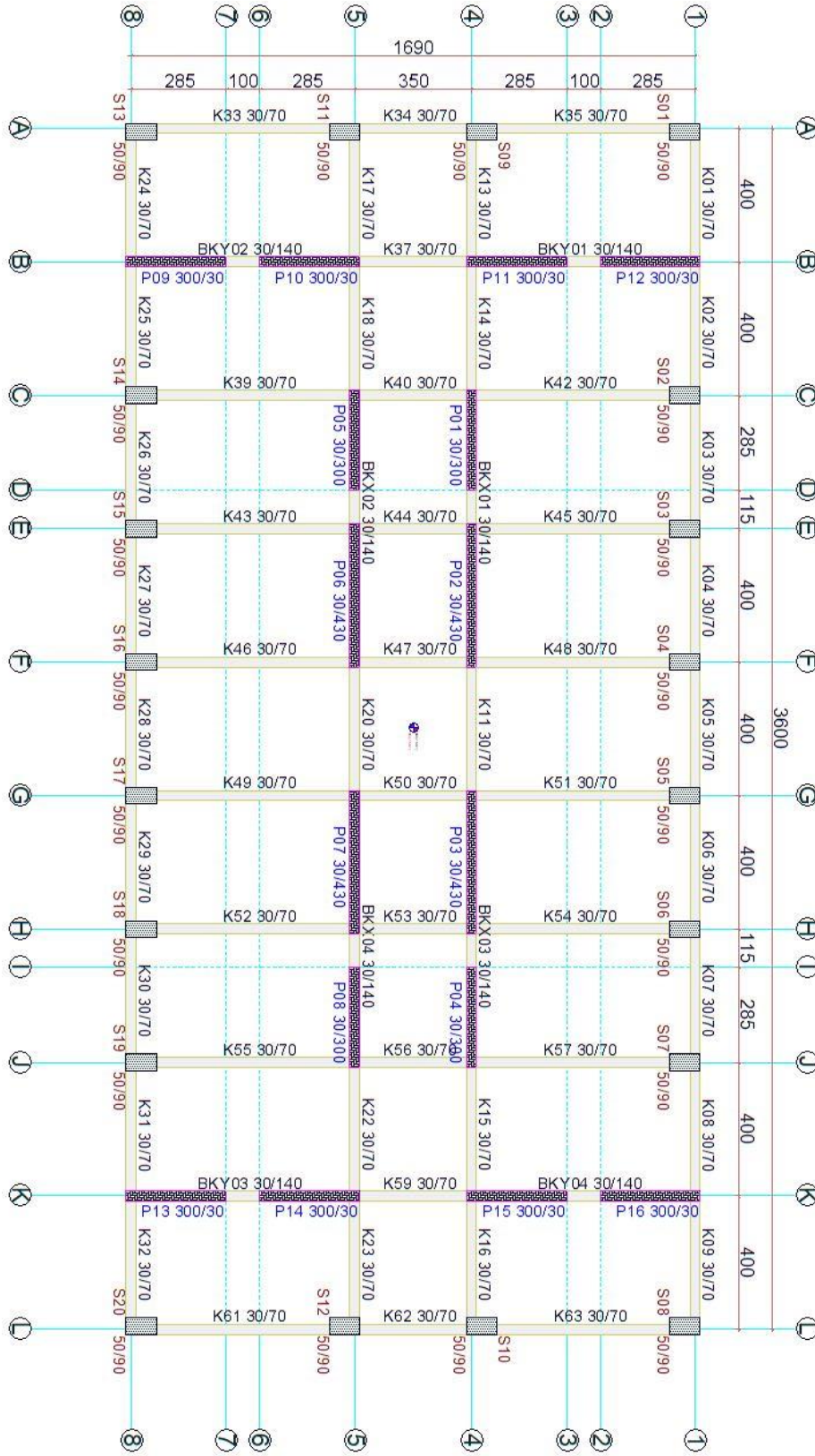
ZYE’li çözüm için Şekil 1’e ve Denklem (11), Denklem (12) ve Denklem (13)’e göre elde edilen yatak katsayılarına ait değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2.ZYE’li çözümde kullanılan yatak katsayısı parametreleri

W (m)	H (m)	db / W	dc / W	ydb (m)	hdb (m)	ydc (m)	hdc (m)	Aa (m ²)
40.7	21.6	0.125	0.125	5.0875	2.7	5.0875	2.7	494.505
Ba (m ²)	Ca (m ²)	K _o (t/m ³)	B Faktör	C Faktör	E _o	K _s (a) (KN/m ³)	K _s (b) (KN/m ³)	K _s (c) (KN/m ³)
178.57125	206.04375	1500	1.5	2	0.748538	11015,7	16522,1	22032,4

**Şekil 2.** ZYE’li analizlerde kullanılan yatak katsayılarının radye temel üzerindeki gösterimi

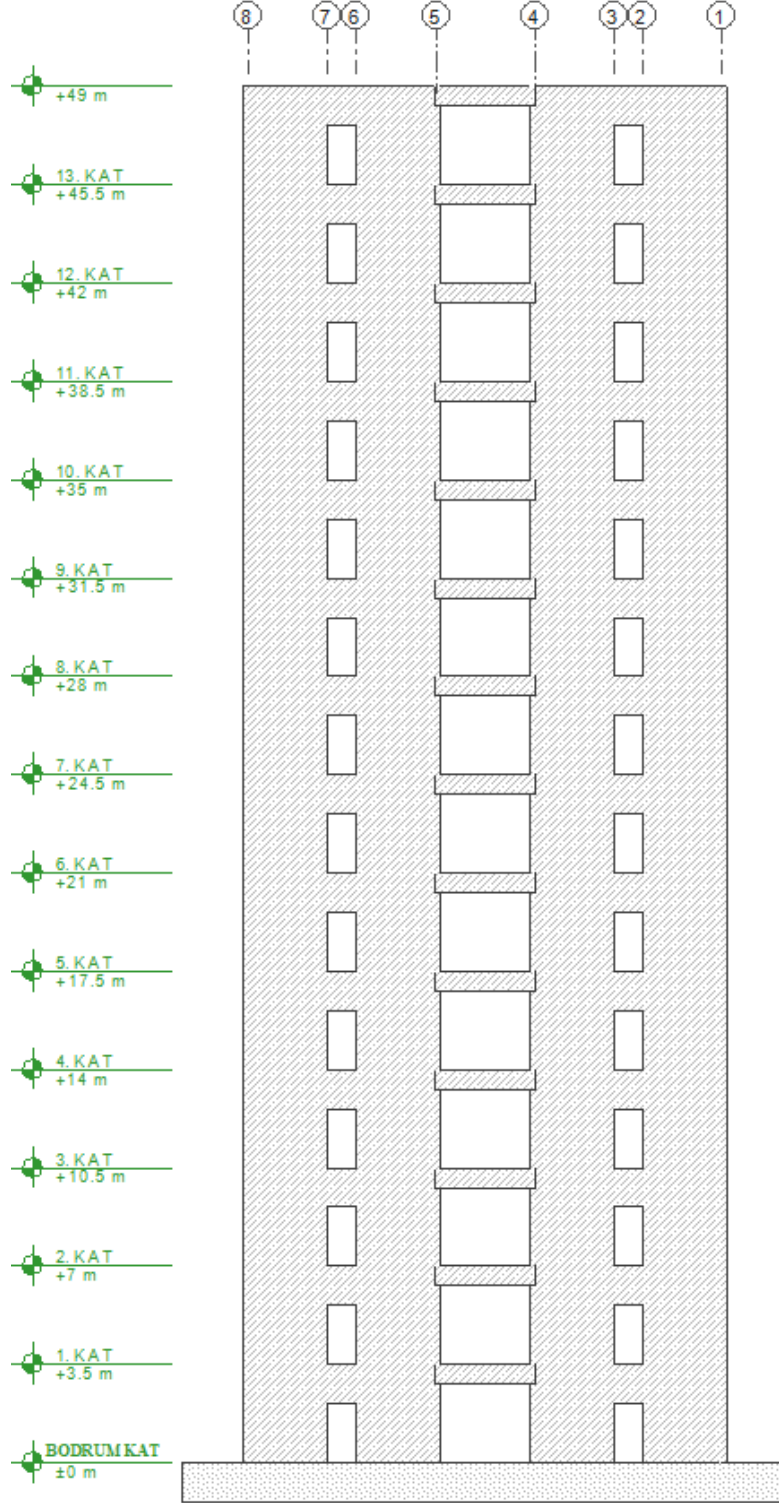
DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 3. Analiz modelinin kalıp planı

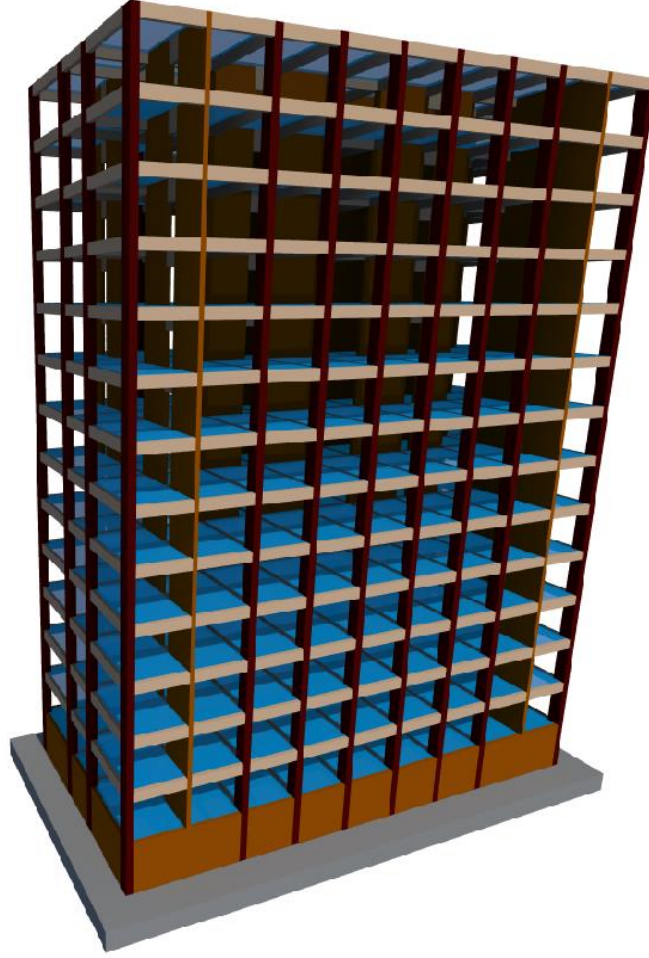
Ö. Özer, S. B. Yüksel

Analizi modeli Şekil 4 ve Şekil 5’de gösterildiği gibi rijit bodrum + 13 katlı ve yapı toplam yüksekliği 49 metredir. Yapının bodrum katında rijit perdeler bulunmaktadır. Deprem analizlerinde, mod birleştirme hesap yöntemi kullanılmıştır. Analiz modelinin oturduğu zemin, Tablo 3’de gösterildiği gibi TBDY (2018)’de bahsi geçen ZD zemin sınıfında olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4. Analiz modelinin B aks kesiti

DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 5. Analiz modelinin 3 boyutlu görünümü

Tablo 3. TBDY (2018)'de bahsi geçen zemin sınıfları [11]

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		(Vs) ₃₀ [m/s]	(N ₆₀) ₃₀ [darbe/30 cm]	Cu 30 [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya PI > 20 ve w > % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (c _u < 25 kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI > 50) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Ö. Özer, S. B. Yüksel

Yapılacak analizlerde İdecad Statik v10'dan yararlanılmıştır [13]. İdecad Statik v10 ile hem rijit temel hem de zemin yapı etkileşimli çözüm yapılabilir. Ayrıca İdecad Statik v10 paket programı ile hem DBYBHY (2007) hem de TBDY (2018)'e göre analiz yapmak mümkündür.

Bu bölümde yapı modelleri, iki farklı zemin yapı analiz yöntemiyle, TBDY (2018)'e göre ZD zemin sınıfı için İstanbul Atatürk Havaalanı ve Kocaeli Gölçük koordinatlarının deprem parametreleri ile DBYBHY (2007)'ye göre ise 1.derece deprem bölgesi ve Z3 zemin sınıfı için analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda bahsi geçen başlıklar altında karşılaştırılarak incelenmiştir.

Yapı genel sonuçları

- Yapı periyodu
- Katlara etkiyen deprem kuvveti
- Kat deplasmanları

Perde sonuçları:

- Perdelere gelen aksel kuvvetler
- Perdelere gelen deprem yüklemelerinden oluşan eğilme momentleri
- Perdelere gelen deprem yüklemelerinden oluşan kesme kuvvetleri
- Perdelere konulması gerekli donatı alanları

Kolon sonuçları:

- Kolonlara gelen aksel kuvvetler
- Kolonlara gelen deprem yüklemelerinden oluşan eğilme momentleri
- Kolonlara gelen deprem yüklemelerinden oluşan kesme kuvvetleri

Bağ girişi sonuçları:

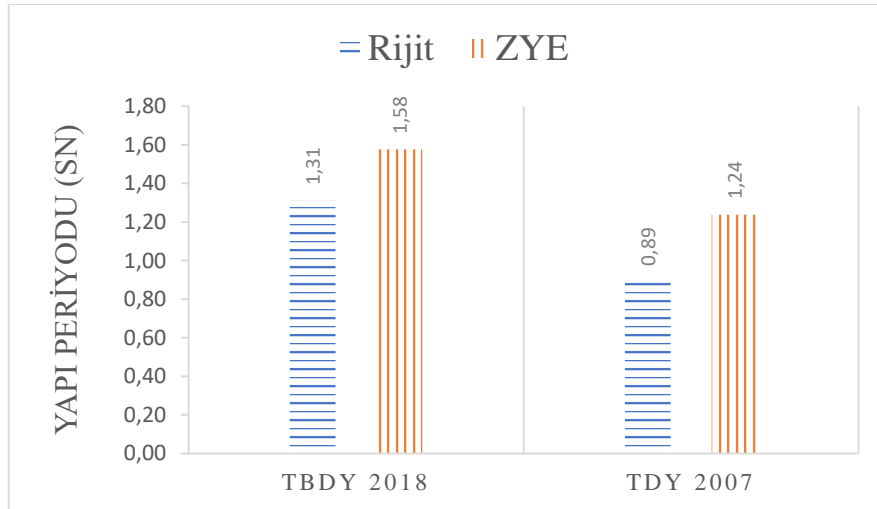
- Bağ girişlerine gelen deprem yüklemelerinden oluşan kesme kuvvetleri

ZYE'li çözümlerde yapı periyodunun arttığı bilinmektedir [14]. Bu çalışmada da TBDY (2018)'e göre analiz edilen ZYE'li çözümün kullanıldığı modellemelerde, yapı periyodunun rijit kabule göre %21 oranında, DBYBHY (2007)'ye göre analiz edilen ZYE'li çözümün yapı periyodunun ise rijit kabule göre %39 oranında arttığı görülmüştür. Ayrıca DBYBHY (2007) ile TBDY (2018)'den elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, TBDY (2018) ile analizi yapılan modelin periyodunun fazla olduğu görülmüştür. Yapı periyodunun analiz koordinatından bağımsız olmasından dolayı Atatürk Havaalanı ve Gölçük modellerinin yapı periyodu aynıdır. Bu yüzden bu iki modele TBDY 2018 olarak ortak paydada isim verilmiştir (Şekil 6).

Yapı periyodu hesaplanırken Denklem (4)'den faydalanılmaktadır. Bu formüldeki geçen kütle (m) tüm modellerde aynıdır. Ancak rijitlik katsayısı (k) ZYE'li çözümlerde yapının temelle beraber çözülmesi ve temel rijitliğinin de yapı hesabına dâhil edilmesinden dolayı farklılık göstermektedir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

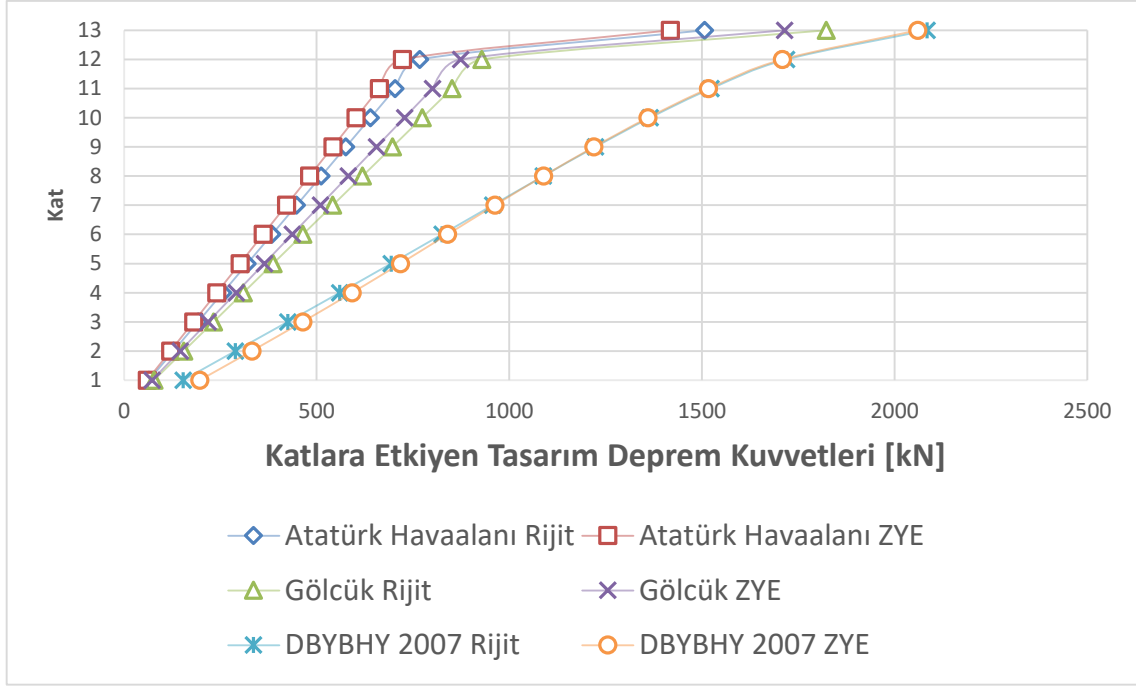
(4)



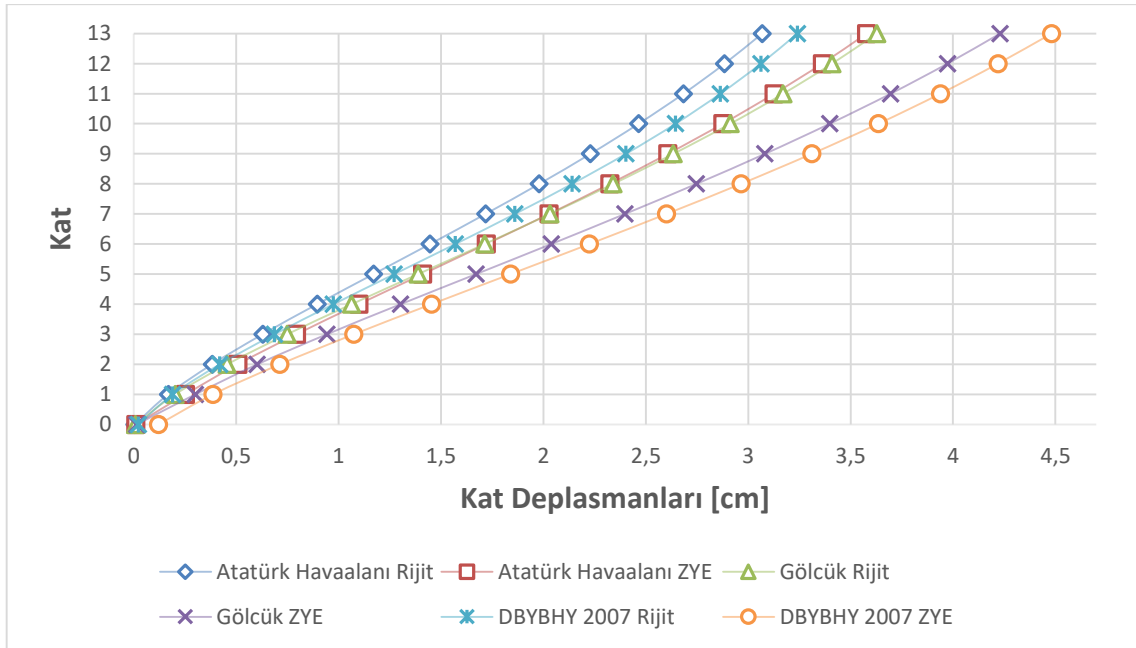
Şekil 6. Temel analiz yöntemleri ve deprem yönetmeliklerine göre yapı periyotlarının karşılaştırılması (sn)

DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

Katlara etkiyen deprem kuvvetleri en düşük ZYE'li Atatürk Havaalanı modeliyken, en yüksek ise DBYBHY (2007) modelinde hesaplanmıştır (Şekil 7). Bodrum katta rijit perdeler bulunduğu için grafiklere 1.kattan başlanmıştır. Kat deplasmanları ise ZYE'li çözümlerde daha yüksek çıkmıştır (Şekil 8). Bunun sebebi ise ZYE'li çözümlerde temel ankastre kabul edilmemesi böylelikle yapının hem düşeyde hem de yatayda deplasman yapabilme kabiliyetinin daha fazla olmasıdır. Deprem yüküne göre ise DBYBHY (2007) modelinin Gölcük modelinden, Gölcük modelinin ise Atatürk Havaalanı modelinden daha yüksek olması ise beklenen bir durumdur.



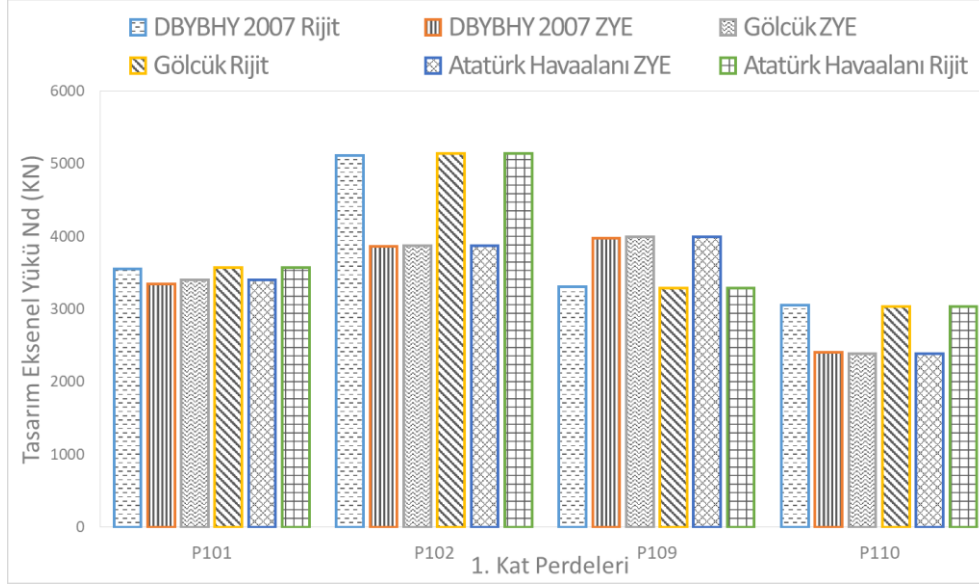
Şekil 7. 6 farklı modelin her bir katına etkiyen deprem kuvvetlerinin karşılaştırılması (kN)



Şekil 8. 6 farklı modelin toplam kat deplasmanlarının karşılaştırılması (cm)

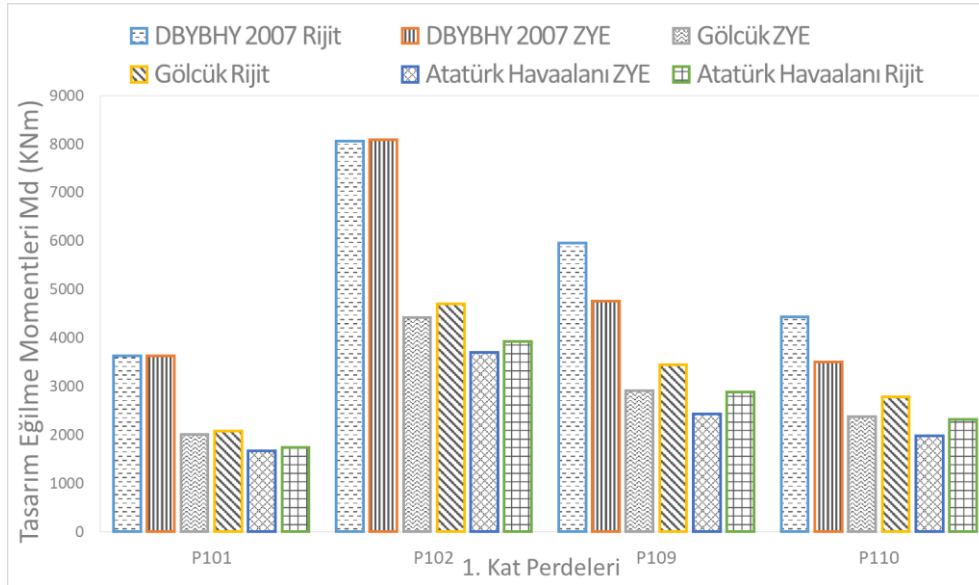
Ö. Özer, S. B. Yüksel

Perde sonuçları kat planında P01-P02-P09 ve P10 şeklinde isimlendirilen hem X hem de Y yönündeki 1. kat perdeleri için incelenmiştir (Şekil 3). Temel analiz yöntemlerinin, perdelerin analiz sonuçlarına etkisinin detaylı incelenebilmesi için perdeler eksenel yük, eğilme momenti, kesme kuvveti ve gerekli donatı alanı olmak üzere 4 farklı parametre için incelenmiştir. G yüklemesi için eksenel yükler incelendiğinde P101 – P102 ve P110 için ZYE’li modeller daha az zorlanırken P109 modellemesi için ise ZYE’li model daha fazla zorlanmıştır (Şekil 9). Bu durum rijit temel kabulünün her zaman güvenli tarafta kalmadığının güzel bir örneğidir.



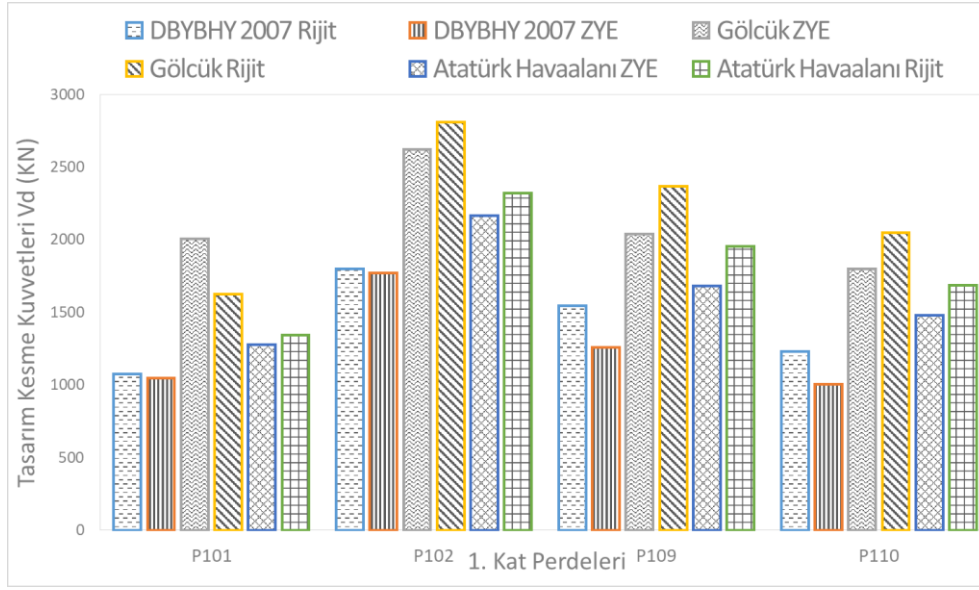
Şekil 9. Birinci katta yer alan seçili 4 adet perdede G yüklemesiyle ortaya çıkan tasarım eksenel yükleri (kN)

Ex (P101 ve P102) ve Ey (P109 ve P110) deprem yüklerinin oluşturduğu momentler incelendiğinde, DBYBHY (2007)’ye göre tasarlanan modelin daha fazla momente maruz kaldığı ayrıca ZYE’li modellere ise daha az moment geldiği görülmüştür (Şekil 10). Aynı yüklemenin oluşturduğu kesme kuvvetleri incelendiğinde ise TBDY (2018)’e göre tasarlanan modelin en fazla deprem kuvvetine maruz kaldığı, P102, P109 ve P110 perdelerinin ZYE’li çözümde daha az deprem yüküne maruz kaldığı ancak TBDY (2018)’e göre Gölcük’te tasarlanan P101 modelinin ZYE’li çözümde daha fazla zorlandığı tespit edilmiştir (Şekil 11).



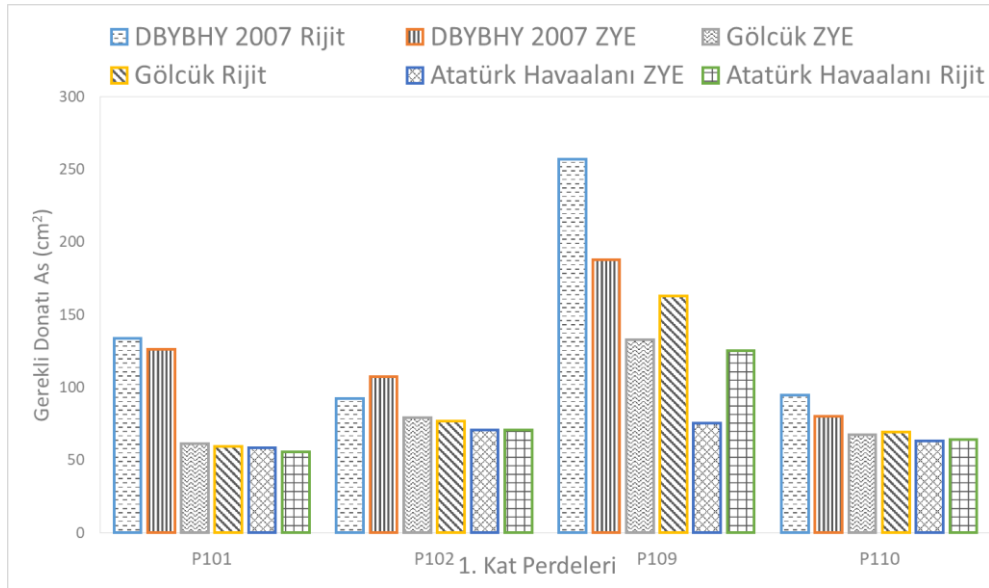
Şekil 10. Birinci katta yer alan 4 adet perdede oluşan Ex ve Ey deprem yüklemesiyle oluşan tasarım eğilme momentleri (kNm)

DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 11. Birinci katta yer alan 4 adet perdede oluşan Ex ve Ey deprem yüklemesiyle oluşan tasarım kesme kuvvetleri (kN)

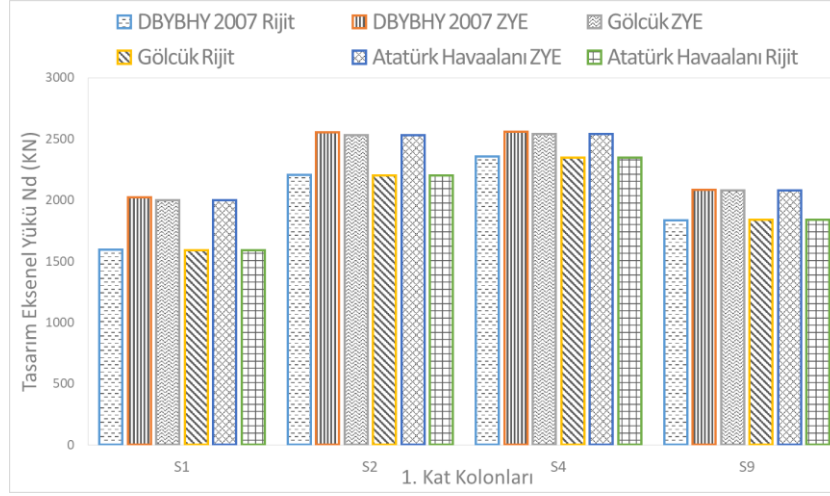
Tasarlanan modeller arasında en olumsuz yükleme kombinasyonuna göre gerekli olan donatı alanları karşılaştırıldığında seçilen 4 perde de farklılık göstermektedir (Şekil 12). P101 için ZYE'li Gölcük modelinin en yüksek donatı ihtiyacı varken, diğer perdelerde en yüksek donatı ihtiyacı rijit temelle modellenmiş Gölcük modelinde ortaya çıkmıştır.



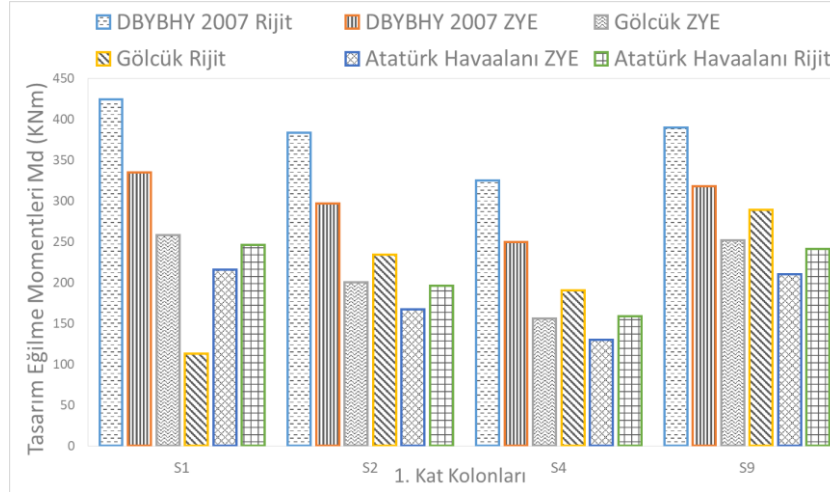
Şekil 12. Birinci katta yer alan seçili 4 adet perdede en olumsuz kombinasyon için hesaplanan donatı alanları (cm²)

Kolon sonuçları incelenirken yapı simetrisi de göz önüne alınarak 1.kat S1-S2-S4 ve S9 kolonları incelenmiştir (Şekil 3). Temel analiz yöntemlerinin, kolon analiz sonuçlarına etkisinin detaylı bir biçimde incelenebilmesi için kolonlar da perdelerle benzer şekilde aksel yük, eğilme momenti ve kesme kuvveti olmak üzere 3 farklı parametre üzerinden incelenmiştir. Aksel yüklerin ZYE'li çözümlerde rijit temel kabulüne göre %33'lere varan oranda arttığı görülmüştür (Şekil 13). Bu durum da rijit temel kabulünün her durumda güvenli tarafta kalmadığının açık bir örneğidir. Eğilme momentleri incelendiğinde ise hem temel analiz yöntemine hem de seçilen deprem yönetmeliğine bağlı olarak analiz sonuçları değişkenlik göstermiştir (Şekil 14). Kolon kesme kuvvetleri incelendiğinde ise Gölcük bölgesinde bulunan modelinin diğer bölgelerde bulunan modellere göre daha yüksek kesme kuvvetine maruz kaldığı görülmüştür (Şekil 15).

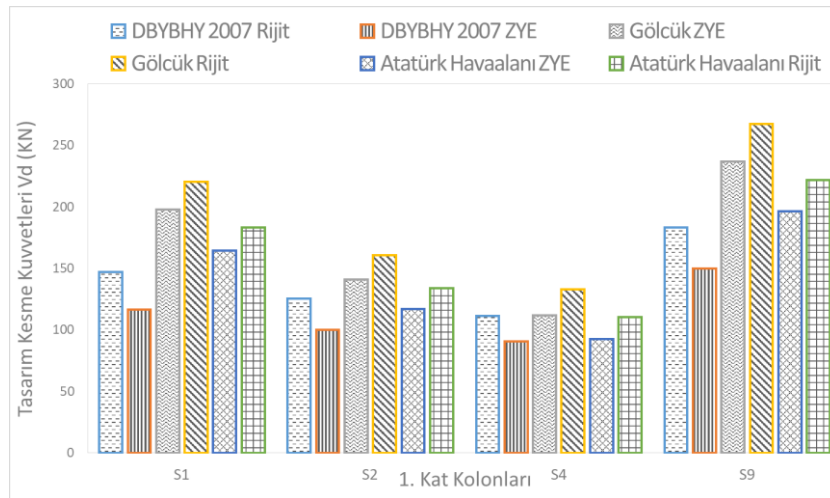
Ö. Özer, S. B. Yüksel



Şekil 13. Birinci katta yer alan 4 adet kolonda G yüklemesiyle oluşan tasarım aksenal kuvvetleri (kN)



Şekil 14. Birinci katta yer alan 4 adet kolonda Ex ve Ey deprem yüklemesiyle oluşan tasarım eğilme momentleri (kNm)



Şekil 15. Birinci katta yer alan 4 adet kolonda oluşan Ex ve Ey deprem yüklemesiyle oluşan tasarım kesme kuvvetleri (kN)

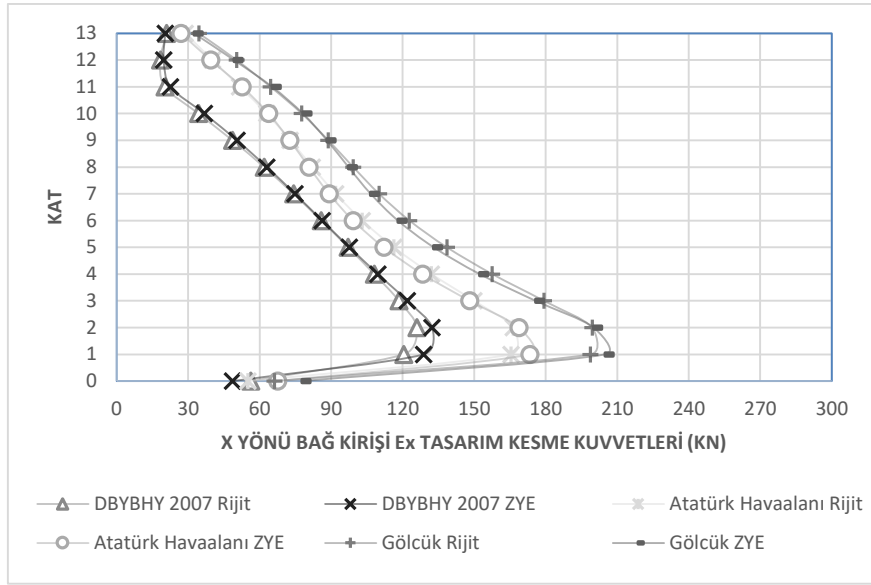
DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

Bağ kirişleri incelenirken Denklem (1) ve Denklem (2)'den faydalanmıştır. Tablo 4'e göre $\Omega > 1/3$ olduğu için bağ kirişleri ile bağlanan perdeler TBDY 2018'e göre boşluklu perde kabul edilmiştir.

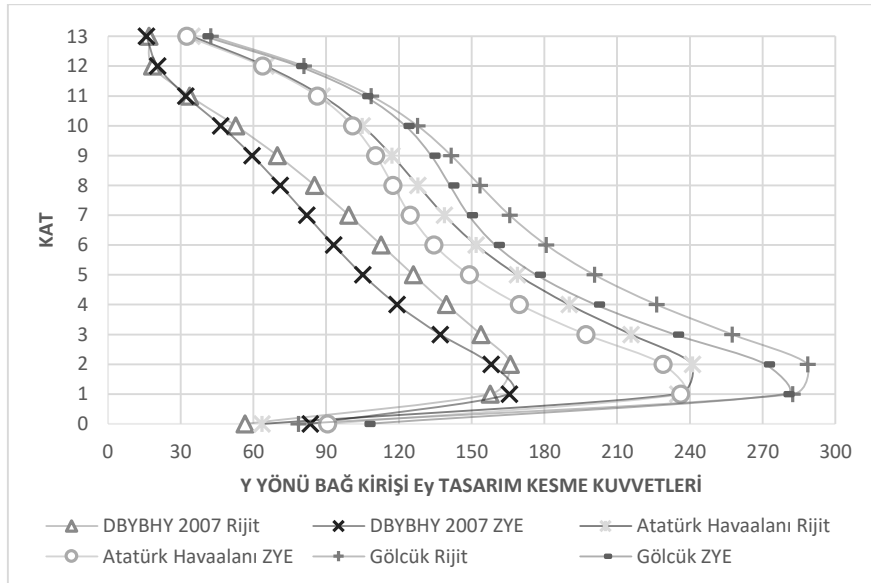
Tablo 4. Bağ kirişleri bağlılık dereceleri

Bağ Kirişi	Bağladığı Perde	c	Nv	M1	M2	Ω
BKX01	P01 P02	4.65	1053.57	497.53	1288.51	0.733
BKY01	P11 P12	4	1285.62	772.03	772.03	0.769

6 farklı modelin hem x hem de y yönündeki bağ kirişi kesme kuvvetleri incelendiğinde Gölcük bölgesinde bulunan modelin 2 farklı temel sistemi için de en fazla kesme kuvvetine maruz kaldığı görülmüştür. DBYBHY (2007)'ye göre analiz edilen modelin ise en az zorlanan model olduğu görülmüştür (Şekil 16-17). Tablo 5 ve Tablo 6'da ise her bir modelin her bir katta Ex ve Ey deprem yüklemesiyle oluşan kesme kuvvetleri ayrıntılı şekilde verilmiştir.



Şekil 16. X yönü bağ kirişlerine gelen Ex tasarım kesme kuvvetleri (kN)



Şekil 17. Y yönü bağ kirişlerine gelen Ey tasarım kesme kuvvetleri (kN)

Tablo 5. X yönü bağ kirişlerine gelen Ex tasarım kesme kuvveti (kN)

Kat No	DBYBHY 2007 Rijit	DBYBHY 2007 ZYE	Atatürk Havaalanı Rijit	Atatürk Havaalanı ZYE	Gölcük Rijit	Gölcük ZYE
Bodrum	56.26	48.62	55.1	67.55	66.25	77.74
1	120.49	128.86	165.42	173.43	198.81	204.94
2	125.98	132.36	166.44	168.78	199.55	200.09
3	118.52	121.9	149.91	148.11	179.23	175.74
4	108.14	109.57	132.08	128.35	157.56	152.3
5	97.14	97.66	116.3	112.11	138.54	133.03
6	85.89	86.2	103	99.26	122.81	118
7	74.24	74.81	91.86	89.16	110.07	106.57
8	61.92	63.05	82.12	80.71	99.22	97.24
9	48.65	50.49	72.81	72.66	88.8	88.26
10	34.37	36.77	62.99	63.8	77.64	78.18
11	20.31	22.64	51.64	52.65	64.56	65.3
12	18.4	19.71	40.2	39.46	50.36	49.26
13	21	20.37	28.7	27.01	34.49	32.5

Tablo 6. Y yönü bağ kirişlerine gelen Ey tasarım kesme kuvveti (kN)

Kat No	DBYBHY 2007 Rijit	DBYBHY 2007 ZYE	Atatürk Havaalanı Rijit	Atatürk Havaalanı ZYE	Gölcük Rijit	Gölcük ZYE
Bodrum	56.54	83.48	63.6	90.6	78.57	106.39
1	157.69	165.54	234.97	236.17	282.39	279.25
2	166.04	158.03	241.08	228.89	288.61	271.22
3	153.79	137.07	215.79	197.12	257.48	233.7
4	139.56	119.25	190.22	169.7	226.32	201.08
5	125.92	105.07	168.83	149.05	200.64	176.67
6	112.71	93.06	151.9	134.43	180.81	159.76
7	99.34	82	138.75	124.67	165.67	148.75
8	85.24	71.03	127.82	117.52	153.38	140.98
9	69.86	59.43	117.14	110.35	141.62	133.25
10	52.68	46.57	104.8	100.94	127.67	122.57
11	33.66	32.11	88.31	86.43	108.5	105.55
12	18.35	20.47	65.09	63.75	80.77	78.39
13	16.95	15.87	34.66	32.5	42.47	39.62

4. SONUÇLAR

TBDY (2018) ile birlikte DBYBHY (2007)'ye nazaran birçok değişikliğe gidilmiştir ve önemli yenilikler getirilmiştir. Bunlardan biri DBYBHY (2007)'deki 4 farklı deprem bölgesi ve etkin yer ivme katsayısının yerini TBDY (2018) ile birlikte her coğrafi koordinata ait kendine has yer ivme katsayısına bırakmasıdır. Bu bağlamda DBYBHY (2007)'ye göre ikisi de birinci derece deprem bölgesinde sayılan İstanbul Atatürk Havaalanı ile Kocaeli Gölcük bölgesinin, TBDY (2018)'e göre kendi koordinatlarından alınan deprem parametreleriyle analizleri yapılmış ve bu analizler DBYBHY (2007)'ye göre birinci derece deprem bölgesindeki modelle de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde Gölcük bölgesinde bulunan modelin Atatürk Havaalanı bölgesinde bulunan modele göre her parametre için daha fazla zorlanmış ve daha fazla donatı ihtiyacı duymuştur. Dolayısıyla her bir koordinatın kendine has yer ivmesi ve deprem parametrelerinin olması yaklaşımı, gerçekçi tasarım için oldukça önemli ve güzel bir yeniliktir.

Bir diğer değişiklik ise DBYBHY (2007)'nin 2.2.1.5 maddesinde zorunlu tutulan zemin yapı etkileşimli çözümün TBDY (2018)'de yüzeysel temeller için ihmal edilebilmesidir. Yapı periyotları incelendiğinde ZYE'li çözümün kullanıldığı modellemelerden elde edilen yapı periyotlarının rijit temel metoduna göre elde edilenlerden daha fazla olduğu görülmektedir. Binada incelenen 4 adet perdeden biri olan P101 perdesinin ZYE'li çözümde daha fazla zorlandığı görülmüştür. Özellikle kolon

DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BOŞLUKLU BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI YÜKSEK BİNALARIN ANALİZ SONUÇLARININ TBDY 2018 VE TDY 2007'YE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

eksenel yüklerinin ZYE'li çözümlerde rijit temel kabulüne göre %33'lere varan oranda daha fazla çıktığı görülmüştür. Ayrıca bazı kolon, perde ve bağ kirişlerine ZYE'li çözümde daha fazla kesme kuvveti geldiği dolayısıyla da TBDY (2018) 16.C.1.2 maddesinde yüzeysel temeller için bahsi geçen rijit temel kabulünün güvenli tarafta her koşulda kalınmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Ankara, 2007.
- [2] B. Ozturk, "Evaluation of Seismic Behavior of the Selected Buildings Located Close To Duzce Recording Station in Duzce, Turkey where two Subsequent Earthquakes Occurred in 1999," presented at the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Ontario, Canada, 2007.
- [3] S. İ. Mısır, G. Özden, and S. Kahraman, "Temel Zemin Yaylarının Alansal Etkileşimi ve Yapı Davranışına Etkisi," *Deprem Sempozyumu Kocaeli*, pp. 1064-1071, 2005.
- [4] B. Ozturk, "Dynamic Analysis and the Resulting Nonlinear Response of Building Structures Located in Seismically Active Regions in Turkey," presented at the ICEE 2006: 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, 2006.
- [5] B. Ozturk, "Evaluation of Drift Demand on the Basis of Nonlinear Response of Building Structures Located at Seismically Active Regions," presented at the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Selanik, Greece, 2007.
- [6] A. A. Farghaly and H. H. Ahmed, "Contribution of soil-structure interaction to seismic response of buildings," *Ksce J Civ Eng*, vol. 17, no. 5, pp. 959-971, Jul 2013.
- [7] B. Fatahi, S. H. R. Tabatabaiefar, and B. Samali, "Soil-structure interaction vs Site effect for seismic design of tall buildings on soft soil," *Geomech Eng*, vol. 6, no. 3, pp. 293-320, Mar 2014. [Online]. Available: <Go to ISI>://WOS:000337307000006.
- [8] S. C. Girgin, S. Mısır, G. Özden, and S. Kahraman, "Yapı - Zemin Etkileşiminin Yapısal Tasarımdaki Rolü," *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 27-37, 2008.
- [9] C. Balkaya, S. B. Yuksel, and O. Derinoz, "Soil-structure interaction effects on the fundamental periods of the shear-wall dominant buildings," *Struct Des Tall Spec*, vol. 21, no. 6, pp. 416-430, Jun 2012.
- [10] M. Choiniere, P. Paultre, and P. Leger, "Influence of soil-structure interaction on seismic demands in shear wall building gravity load frames," *Eng Struct*, vol. 198, Nov 1 2019.
- [11] Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Ankara, 2018.
- [12] *Foundations and Subsoil (manual)*, SCIA, 2012.
- [13] İdecad Statik v10, İdeYapı A.Ş., Şişli, İstanbul, 2020
- [14] B. Siyahi, Ö. Ç. Çetin, and H. T. Bilge, "Geoteknik Deprem Mühendisliği Açısından Zemin-Temel-Yapı Etkileşimine Kritik Bakış," *Çukurova Üniversitesi Geoteknik Sempozyumu*, 2013.





DUVARLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE PLASTİK KOMPOZİT DONATI KULLANIMI

Selçuk KAÇIN^{1,*}, Ezgi GÜNEŞ²

^{1,2} İskenderun Technical University, Civil Engineering Department, 31200, İskenderun, Turkey

ÖZET

Bu çalışmada, ülkemizdeki ve dünyadaki mevcut yapıların olası deprem vb. afetlerde duvarların güçlendirilmesi amacıyla plastik kompozit donatı kullanılmasının etkisi araştırılmıştır. Duvarları güçlendirmek için günümüze kadar birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler çoğunlukla olumlu sonuçlar vermektedir ancak güçlendirme için kullanılan malzemelerde genellikle; pahalı olması, kolay erişilebilir olmaması, işçiliği zor olması, ağır olması gibi sıkıntılarla karşılaşmaktadır. Güçlendirmenin pozitif etkileri ve yaşanan sıkıntılar değerlendirildiğinde; zemin güçlendirilmesi, istinat duvarları gibi yapılarda donatı olarak kullanılan aslında zemin malzemesi olarak bilinen 'plastik kompozit donatı' bu çalışmada duvarların güçlendirilmesinde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda tuğla duvarlar ele alınmıştır. 80*80 cm boyutlarında toplam 5 adet şaşırtmalı tuğla duvar örülmüştür. Güçlendirme amacıyla örülen tuğla duvarlardan 1 adedi yalın, 2 adedi tek yüzü, 2 adedi de çift yüzü güçlendirilerek kıyaslanmıştır. Hazırlanan duvarlara laboratuvar ortamında diyagonal yükleme deneyleri yapılmıştır ve yük-deplasman eğrileri oluşturulmuştur. Deney sonuçlarında plastik kompozit donatı kullanılan duvarların, şahit numuneye göre hem yük hem de deplasman açısından çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Duvarlarda plastik kompozit donatının çift yüze ve tek yüze uygulanmasının da sonuçlara etki eden bir parametre olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Plastik kompozit malzeme, Duvar yükleme, Duvar güçlendirme, Duvar dayanımı, Plastik hasır donatı

PLASTIC COMPOSITE EQUIPMENT USING IN STRENGTHENING WALLS

ABSTRACT

In this study, the effect of using plastic composite reinforcement to strengthen for the walls in the existing structures in our country and in the world was investigated. Many different methods have been used to strengthen the walls until today. The methods used give mostly positive results, but in the materials used for reinforcement; problems such as being expensive, not easily accessible, difficult to work and being heavy. When the positive effects of reinforcement and the problems experienced are evaluated; The 'plastic composite reinforcement', which is known as floor material, which is used as reinforcement in structures such as floor reinforcement and retaining walls, was used in the reinforcement of brick walls in this study. In the experimental studies, brick walls were discussed. A total of 5 staggered brick walls were built in the dimensions of 80 * 80 cm. One of the brick walls built for reinforcement was compared with 1 plain, 2 single sides and 2 double sides reinforced. Diagonal loading tests were carried out on the prepared walls in a laboratory environment and load-displacement curves were created. It was found that the walls using plastic composite reinforcement gave much better results in terms of both load and displacement than the witness sample. It has been observed that the application of plastic composite reinforcement on both sides and on one side is a parameter affecting the results.

Keywords: Plastic composite material, Wall loading, Wall reinforcement, Wall strength, Plastic wicker reinforcement

1. GİRİŞ

Ülkemizin mevcut konumu itibarıyla deprem vb. afetlere yakalanması olasıdır. Her ne kadar deprem konusunda bilincimiz artmış, yönetmelikler güçlendirilmeye çalışılmış, yeni yapılar daha dikkatli oluşturulmaya çalışılsa da; ülkemizin kırsal kesimlerinde hala mühendislik çalışması gerektirmediği düşüncesiyle yığma yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılarda fazlaca bulunan işçilik hatası ve kullanılan alanın işlevinin değişmesi yapılardaki riski arttırmaktadır. Ayrıca daha önceki zamanlardan bizlere miras kalan birçok tarihi eser de yığma yapı olarak yapılmıştır. Bu yapıların; can ve mal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selcuk.kacin@iste.edu.tr
Geliş / Received: 01.04.2020 Kabul / Accepted: 18.06.2020 doi: 10.28948/ngumuh.713082

güvenliğinin korunması amacıyla depreme karşı güçlendirilmesi gerekmektedir. Yığma yapıların taşıyıcısı tuğla duvarlar olduğu için mevcut yapıya zarar vermeden güçlendirme işlemi yapılması gerekmektedir.

Yapıların ve duvarların güçlendirilmesi için günümüze kadar birçok farklı güçlendirme yöntemleri bulunmuş ve kullanılmıştır. Triantafillou [1], yığma duvarlarda güçlendirme yöntemi olarak lifli polimer malzemelerle güçlendirme yöntemini kullanmıştır. Deneyde düzlem içi kayma ve eğilme, düzlem dışı eğilme etkileri gözlemlenmiş ve analitik bağlantılarla belirtilmiştir. Deney sonuçlarında güçlendirilmiş numunelerde lifli polimerler numune yüzeyinden ayrılarak göçme gerçekleşmiş ve ankraj uygulamasının olumlu bir etki sağladığı gözlemlenmiştir. Deney sonucunda lifli polimer malzemelerin güçlendirme çalışmalarında kullanımının olumlu etkisi gösterilmiştir. İlki vd. [2], tarihi yapıların güçlendirilmesi çalışmalarının zorluğundan bahsedilmiştir. Çok çeşitli malzeme kullanımı, yapıların büyük olması, kullanılan malzemelerin örneğinin bulunamaması gibi özellikler tarihi yığma yapılarda güçlendirme çalışmalarının yapılmasını zorlaştırdığı görülmektedir. Çalışmada 135 yıllık Tarihi Akaret Sıralı Evlerinin malzemeleri değerlendirilmiştir. Yapının restorasyon sürecinde olması ve yapıdaki bazı duvarların kaldırılacak olması sebebiyle kaldırılan duvarlar laboratuvarında deney numunesi olarak kullanılmıştır. Bu sayede deneyler için çok fazla farklı numune elde edilmiştir. Bu numunelerin güçlendirilmesinde cam lifli polimerler kullanılmıştır. Vandergrift vd. [3], CRFP malzemesi kullanarak duvarlar üzerinde deneysel güçlendirme çalışmaları yapmıştır. Deneyler için 6 adet yalın tuğla duvar (1219*2438 mm ebatlarında) kullanılmıştır. Tuğla duvarlar güçlendirme öncesi ve sonrası test edilmiştir. Deney sonuçlarında kullanılan CFRP bantların tuğla duvarların düzlem içi kesme ve düzlem dışı eğilme dayanımlarını önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca süneklilikte de artış görülmüştür. Fakat CFRP bantları her ne kadar süneklilik ve enerji yutma kapasitesini arttırmış olsa da; duvarların orta kısımlarında ağır hasar oluşmasını engelleyememiştir. Yüksek deplasmanlarda duvarda bütünlük bozulmuş ve duvar parçalanmıştır. Coza [4], çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak birbirine bitişik dolgu duvarlı çerçeveler üzerinde güçlendirme çalışması yapmıştır. Dolgu duvarlı betonarme yapılarda tek veya çift taraflı sıva/güçlendirme etkisi incelenmiştir. Prota vd. [5], Akdeniz Bölgesinde yaygın olarak kullanılan tuf binalar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Sismik kuvvetlere karşı korunmaları gerektiği ve son zamanlarda bunun için birçok çalışma olduğu belirtilmiştir. Kompozit malzemeler kullanılarak güçlendirilmesi için kapsamlı deneyler yapılmıştır. Deneyler için toplamda 12 adet aynı ebatlarda duvar inşa edilmiştir. Güçlendirme malzemesi olarak CMG sistemi denilen cam kaplı ızgara şeklinde bir çeşit kumaş kullanılmıştır. Bu malzeme işçiliği kolay, sisteme uyumlu, nem sağlayabilen(hava aldrabilen) bir malzemedir. Triantafillou vd [6], dünyanın birçok yerinde köklü ve yaygın olarak yığma duvarların mevcut olduğunu ve bunların olası deprem riskine karşı güçlendirilmesi gerektiğini belirtilmiştir. Bu yüzden bir güçlendirme yöntemi olan tekstil takviyeli harç ile tuğla duvarların güçlendirilmesi üzerine çalışmıştır. Binici vd. [7], içi boş tuğla duvarlar üzerinde yaptıkları güçlendirme çalışmalarında duvarların güçlendirildikten sonra yanal yüke dayanıklı elemanlara dönüştüğünü gözlemlenmiştir. Deneylerde güçlendirme yöntemi olarak FRP ile güçlendirme yöntemi uygulanmıştır. Deneyin amacı FRP uygulaması yaparak katlar arası deformasyonu sınırlamaktır. Öztaş [8], çalışmasında mevcut bir 3 katlı yığma yapı ele alarak analizler yapmıştır. Böylece güçlendirme öncesi veriler elde edilmiştir. Güçlendirme yöntemi olarak 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Birincisi betonarme panellerle güçlendirme yöntemi, ikincisi ise cam lifli polimerle güçlendirme(GFRP) yöntemidir. Deney sonuçlarına bakıldığında; betonarme perdelerle güçlendirme sisteminde, mevcut yapının deprem dayanımı artmıştır. Diğer sistemlere göre daha az yer değiştirme yapması sağlanmıştır. Ayrıca bu güçlendirme binanın iç kısmında yapılarak yapının tarihi dokusu koruma altına alınmıştır. GFRP ile güçlendirme yönteminde ise, eğer uygulanacak yapıda bitişik bir yapı yoksa çift taraflı uygulanması zorunluluğu vardır. Binanın 2 yüzüne de uygulamak binanın tarihi dokusunu kapatmaktadır. Bu güçlendirme yöntemi betonarme güçlendirme yöntemine göre daha fazla yer değiştirme meydana getirmektedir. Elgawady vd. [9], yığma yapıların güçlendirilmesi yöntemi olarak püskürtme beton kullanılan bu çalışmada 3 adet ½ ölçekli tuğla duvar inşa edilmiştir. Bu duvarlardan biri referans olarak seçilmiştir. Bir diğerinin tek yüzü 40 mm kalınlıkla püskürtme beton ile güçlendirilirken son numunenin her iki yüzü 20 mm kalınlıkta püskürtme beton ile güçlendirilmiştir. Sevil vd. [10], ekonomik ve yapım uygulaması açısından pratik bir yöntem elde etmek amacı ile deneysel çalışmalar yapmıştır. İçi boş tuğla duvarlara uygulanan çelik lifli harç ile yığma yapılar neredeyse güçlü ve katı dolgulara dönüştürülmüştür. Cumhur vd. [11], tuğla duvarlar için etkili, ekonomik ve pratik bir güçlendirme yöntemi olarak öngörülen genişletilmiş hafif çelik plakalar ile güçlendirme yöntemini kullanarak hem deneysel hem de sayısal incelemeler yapmıştır. Tuğla duvarların katkısını arttırarak yapının yanal mukavemeti ve sertliğini artırıp yapısal hasarı en aza indirmek amaçlanmıştır. Taghdi vd. [12], farklı yapıda dikdörtgen kesitli 6 adet duvar inşa etmiş ve deneysel çalışma yapmıştır. Duvarlardan 4 adedi tuğla duvar, 2 adedi betonarme duvar olarak inşa edilmiştir. Çelik şeritlerle güçlendirme metodu kullanılan bu çalışmada duvarların her iki yüzüne de diyagonal çelik şeritler yerleştirilmiştir ve duvarların uzun kenarından uzanan çelik şeritler vasıtasıyla güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre; genel olarak güçlendirilmiş tüm duvar örnekleri diğerlerine göre üstün davranış sergilemiştir. Araki vd. [13], yığma yapıları güçlendirme yöntemi olarak epoksi reçine enjeksiyon yöntemi kullanmıştır. Bu yöntemin basınç, kayma ve eğilme özelliklerini değerlendirmek için 3 tip yükleme testi yapılmıştır. Deneyin değişken parametreleri olarak harcın dayanımı ve uygulanan aksenal kuvvet belirlenmiştir. İncelemek için 3 tuğla duvar üzerine yükleme testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarında; istenen özelliklerde artışlar gözlemlenmiştir. Ancak harcın dayanımı, tuğla duvarın kayma ve eğilme dayanımını etkilememiştir. Ve ek olarak epoksi reçine enjeksiyon yöntemi ile güçlendirilmiş duvarların gücünü tahmin edebilmek için denklemler önerilmiştir.

DUVARLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE PLASTİK KOMPOZİT DONATI KULLANIMI

Farklı malzemeler ve deneysel metotlarla güçlendirme yöntemleri denenmiş, üzerinde çalışılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada ise piyasada ilgili firmaların kataloglarında geosentetik ürünlerin çeşitlerinden biri olup geogrid olarak adı geçen, günümüzde ise plastik kompozit donatı adıyla bilinmekte olan malzeme kullanılmıştır. Şimdilerde duvar güçlendirilmelerinde dikkat çekmeye başlayan bu malzeme, piyasada bir zemin malzemesi olarak bilinip; zemin iyileştirme ve güçlendirme yöntemlerinde, istinat duvarlarında, erozyon kontrolü, zemin drenajı gibi inşaat mühendisliği alanlarında kullanılmaktadır. Yüksek çekme ve düşük sönme özelliğine sahip bu malzeme poliester, polipropilen, polietilen vb. hammaddelerden üretilmektedir [14],[15].

Bu çalışmada plastik kompozit donatı uygulanmasının nedenleri; düşük maliyetli olması, hafif olması, kolayca ulaşılabilir olması, kolay uygulanabilmesi, yapısı itibariyle deformasyon yapabilmesi gibi özellikleridir. Bu özellikleriyle üst yapıdaki güçlendirme davranışı konusunda merak uyandırmaktadır.

Bu doğrultuda toplam 5 adet tuğla duvar laboratuvar ortamında örülmüştür. Bu örülen duvarlardan 1 tanesi şahit olarak bırakılmıştır. 2 tanesi plastik kompozit donatı ile tek yüzüne sıva uygulanarak hazırlanmış, diğer 2 tanesi de aynı plastik kompozit donatıyla çift yüzüne sıva uygulanmıştır. Duvarlar laboratuvar ortamında bulunan diyagonal yükleme cihazına yerleştirilip güç ünitesi yardımıyla kırılana kadar yük verilerek yük ve deplasman değerlerine ulaşılmıştır. Bu değer yardımıyla yük-deplasman grafikleri oluşturulup yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında yapılan deneysel çalışma için ilk başta ön hazırlık aşaması olan deney malzemelerinin temini gerçekleştirilmiştir. Temin edilen malzemeler; 8.5'lik yatay delikli tuğlalar, 50kg'lık çimentolar, doğal/tabi ince agrega, su ve plastik kompozit donatıdır. Malzemeler laboratuvarda depolandıktan sonra tuğla duvar numuneleri inşa edilmiştir. Tuğla duvarlar şaşırtma örgü yöntemiyle ortalama 80*80 cm boyutlarında 5 adet örülmüştür. Duvar örümü tamamlandıktan sonra diğer aşama güçlendirme aşamasıdır. Plastik kompozit donatılar herhangi bir yapııştırma malzemesi olmadan sıvayla duvara uygulanmıştır. Sıvalar yapıldıktan sonra sulanmasına özen gösterilmiştir. Hazırlanan numuneler diyagonal yükleme deneylerine tabi tutulmuştur. Her bir duvar numunesi bilgisayar ortamından takip edilerek yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir ve incelenmiştir. Deneylerin detaylı anlatımı ve görselleri bu bölümde sunulmaktadır.

2.1. Numunelerin diyagonal yükleme deneyi için hazırlanması

Bu çalışmada deney düzeneği için uzunluk*genişlik*yükseklik = 19*19*8.5 cm boyutlarında tuğla (Şekil 1) kullanılmıştır.



Şekil 1. 19*19*8.5 cm tuğla numuneleri

Duvar örümü için kullanılacak derz harcı için yönetmeliklerde ki standart karışım oranlarına göre agrega + su + çimento miktarı belirlenmiştir (Tablo 1). Darası alınmış terazide malzemeler ölçülerek mikser yardımıyla karıştırılıp derz harcı uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Sıva işlemi için de aynı karışım oranı kullanılmıştır.

Tablo1. 1 mikser için derz ve sıva harcı karışım oranı

Çimento(kg)	Su(kg)	Agrega(kg)
14,11	7,055	42,33

Yığma yapıların taşıyıcı sistemi olan tuğla duvarlar; şaşırtmalı örgü yöntemiyle ortalama boyutları 80*80 cm olarak toplam 5 adet inşa edilmiştir. Duvar örümü için hazırlanan derz harcından karot numunesi alınmıştır. Karot kalıpları yağlanıp derz bu kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra laboratuvarında bulunan pres makinesi yardımıyla eğilme ve basınç testlerine tabi tutulmuş ve sonuçları kaydedilmiştir (Şekil 2).

**Şekil 2.** Numuneye eğilme ve basınç deneylerinin yapılması

Duvarlara sıva işlemi yapılmadan önce ilgili firmadan belirli özelliklerde temin edilen plastik kompozit donatılar (Şekil 3) duvar boyutlarında kesilmiştir. Makas yardımıyla kolaylıkla kesilebilen plastik kompozit donatıların fazla kısımları sıva kurduktan sonra da rahatlıkla kesilmiştir.

**Şekil 3.** Plastik kompozit donatı

Örülen duvarlara sıva işlemi uygulanmıştır. Sıvaya herhangi bir katkı yapılmamış derz harcı ile aynı oranlarda hazırlanmış ve sıvadan da karot için numune alınmıştır. Duvarların 1 adedi şahit olarak bırakılıp sıva uygulanmamıştır. Plastik kompozit donatı uygulanacak duvarlarda sıvadan önce duvar yüzüne plastik kompozit donatı yerleştirilip herhangi bir yapıştırma malzemesi kullanılmadan elle tutularak üzerine sıva uygulanmıştır (Şekil 4). Sıva ile plastik kompozit donatı bütünleşip duvar yüzüne bu şekilde yapışmış, kurduktan sonra da herhangi bir kopma gözlenmemiştir. 2 adet duvarın tek yüzüne GG 40/40 P

DUVARLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE PLASTİK KOMPOZİT DONATI KULLANIMI

plastik kompozit donatı, 2 adet duvarın çift yüzüne GG 40/40 P plastik donatı uygulanmıştır. Sıva uygulaması yapıldıktan sonra çatlamların oluşmaması için sıvalı duvarlar sulanmıştır.



Şekil 4. Tuğla duvara sıva uygulanması

2.2 Diyagonal Yükleme Deneyleri

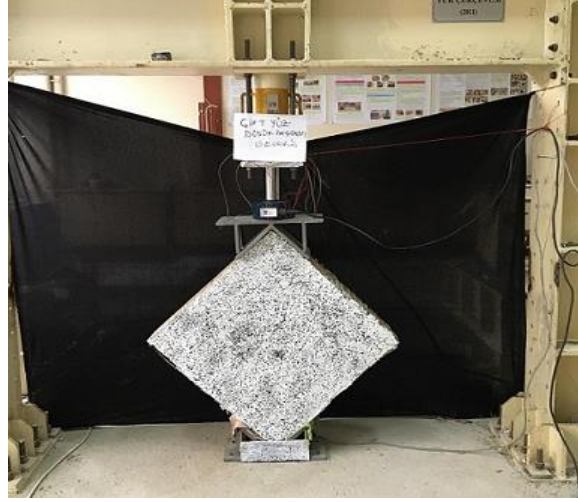
İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında diyagonal basınç düzeneği oluşturmak için; ilk önce yük çerçevesinin alt ve üst kısımlarına yük başlıkları yerleştirilmiştir. Alt başlığın üzerine ve üst başlığın altına duvara zarar vermemesi ve duvarın daha rahat sabitlenmesi için bez parçası yerleştirilmiştir. Üst başlığın üzerinde olan yük cihazının zarar görmemesi için iyi yerleştirildiğinden emin olunmuştur.

Duvarlar düzeneğe yerleştirildikten sonra potansiyometre adı verilen LVDT (deplasmanölçer) ile deplasmanı ölçebilmek için duvarların üzerinde yönetmelik gereğince verilen mesafeler kalemle çizildikten sonra belirtilen noktada matkap yardımıyla delik açılmıştır. Bir demir çubuk delikten geçirildikten sonra çeşitli profillerle her 2 tarafta sabitlenmiştir. Sabitlenen profillerin denge kontrolü için su terazisi kullanılmıştır. Duvar arka yüzüne potansiyometre Şekil 5’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 5. Potansiyometre'nin (LVDT) düzeneğe yerleştirilmesi

Deney düzeneği (Şekil6) hazırlandıktan sonra güç ünitesinden el yardımıyla aynı aralıklara olmasına dikkat ederek artan bir şekilde yük verilmiştir.



Şekil 6. Hazırlanmış deney düzeneği

Bilgisayar ortamında deney düzeneğindeki duvara gelen yükler ve duvarın yaptığı deformasyon takip edilmiş ve kontrollü bir şekilde ilerlenmiştir. Artan yüklemeye birlikte kırılan duvar numunesinin yük ve deplasman değerleri elde edilmiştir.

Bu sistemle tüm tuğla duvarlara diyağonal yüklemeye deneyi kapsamında yük verilerek kırılması sağlanmıştır. Her bir numune için yük ve deplasman değerleri elde edilip, kaydedilmiştir. Kırılan numuneler diyağonal yüklemeye cihazından alınıp hem sıvayla birlikte uygulanan plastik kompozit donatının son durumunu (Şekil 7) hem de tuğla duvar numunelerinin bütün halindeki son durumu (Şekil 8) incelenip, yorumlanmıştır.



Şekil 7. Kırılan plastik kompozit donatılı duvarda plastik kompozit donatının son durumu

DUVARLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE PLASTİK KOMPOZİT DONATI KULLANIMI

Şekil 8. Çift yüze uygulanmış plastik kompozit donatılı duvarın son durumu

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 5 adet olan tuğla duvarların her birinin yük, deplasman değerlerine ulaşılmış olup, kırılmalar sonrası duvarlardaki değişimler gözlemlenmiştir. Plastik kompozit donatı ile güçlendirilen duvarlar tek veya çift yüze uygulanma durumlarına göre birbiriyle ve şahit numuneyle kıyaslanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında yığma yapıları güçlendirmek adına, bir zemin malzemesi olan ‘plastik kompozit donatı’ güçlendirme malzemesi olarak yığma tuğla duvarlara uygulanmıştır. Plastik kompozit donatıyla güçlendirilen yığma tuğla duvarlara diyagonal yükleme cihazı ile diyagonal yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda bilgisayar sistemi üzerinden yük ve deplasman değerleri elde edilmiştir.

T1: Tek yüzü plastik kompozit donatıyla güçlendirilmiş birinci duvar numunesi

T2: Tek yüzü plastik kompozit donatıyla güçlendirilmiş ikinci duvar numunesi

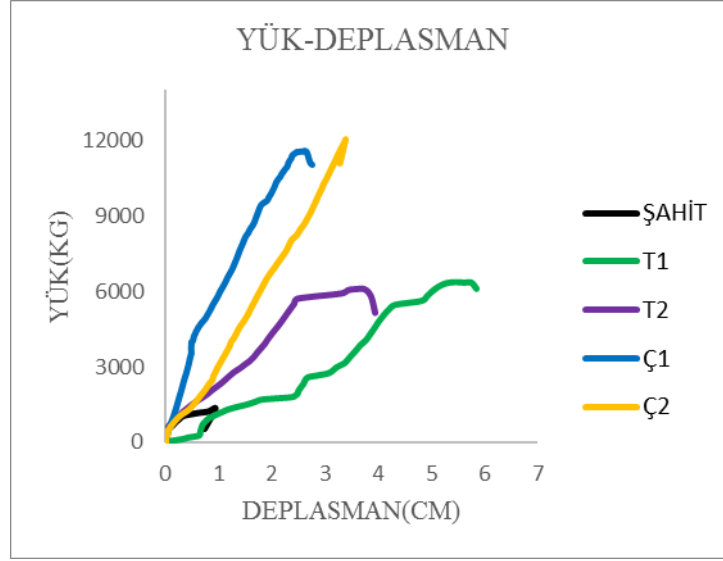
Ç1: Çift yüzü plastik kompozit donatıyla güçlendirilmiş birinci duvar numunesi

Ç2: Çift yüzü plastik kompozit donatıyla güçlendirilmiş ikinci duvar numunesi

Şahit: Sıva uygulanmamış yalın duvar numunesi

Her bir numunenin yük-deplasman grafiği elde edilip, birbirleri arasında kıyaslama yapabilmek adına Şekil 9’da gösterildiği gibi tüm yığma tuğla duvar numunelerinin grafikleri tek grafikte sunulmuştur. Yığma tuğla duvar numuneleri diyagonal yükleme cihazında kırıldıktan sonra bir miktar daha yüklenmeye devam edilmiştir. Yük-deplasman grafiğinde kırılma sonrasındaki değerler de gözlemlenebilmektedir.

Yığma tuğla duvar numunelerinin diyagonal yükleme deneyi ile en büyük yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir (Tablo.2). Hata payı ve aynı sonuçların elde edilip edilemeyeceğinin anlaşılması için aynı güçlendirme yöntemiyle uygulanan; T1, T2 ve Ç1, Ç2 yığma tuğla duvar numunelerinin en büyük yük taşıma kapasitelerinin ortalamaları alınarak Tablo.3’de belirtilmiştir. Deneyden elde edilen en büyük deplasman değerleri Tablo.4’de sunulmuştur. Aynı güçlendirme yöntemleri uygulanan numunelerin en büyük deplasman değerlerinin ortalamaları ise Tablo.5’de verilmiştir.



Şekil.9 Tuğla duvar numunelerinin yük-deplasman grafikleri

Tablo2. Tuğla duvar numunelerinin max. yük taşıma kapasiteleri

Numune	Pmax(kg)
Şahit	1321
T1	6361,9
T2	6070,6
Ç1	11681,9
Ç2	12061,6

Tablo3. Güçlendirme yöntemleri aynı olan numunelerin max. yük taşımalarının ortalama değerleri

Ortalaması Alınan Numuneler	Ortalama(kg)
Tort	6216,25
Çort	11840,25

Tablo4. Tuğla duvar numunelerinin max. deplasmanları

Numune	Max. Deplasman (cm)
Şahit	0,95
T1	5,84
T2	3,95
Ç1	2,76
Ç2	3,38

DUVARLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE PLASTİK KOMPOZİT DONATI KULLANIMI**Tablo5.** Güçlendirme yöntemleri aynı olan numunelerin max. deplasmanlarının ortalama değerleri

Ortalaması Alınan Numuneler	Ortalama(cm)
Tort	4,9
Çort	3,1

4. SONUÇLAR

İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleşen bu deneysel çalışmada; ülkemizde ve dünyada yaygın olarak bulunan yığma yapıları depremden dolayı oluşacak hasarlara karşı güçlendirmek için mevcut yöntemlere bir alternatif sunmak amaçlanmıştır. Zemin malzemesi olarak kullanılan polyester mikroçiplerle örülüp PVC ile kaplı plastik kompozit donatı; dayanıklı, uzun ömürlü, düşük maliyetli, işçiliğinin kolay olması gibi avantajlarından dolayı yığma tuğla duvarların güçlendirmesinde kullanılarak, duvardaki etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda 5 adet tuğla duvar numunesi üretilmiş bunlardan 1 adedi şahit, 2 adedinin tek yüzüne, 2 adedinin de çift yüzüne plastik kompozit donatı uygulanmıştır. İnşa edilen yığma tuğla duvar numunelerinin diyagonal yükleme cihazı yardımıyla yük taşıma kapasiteleri ve deplasmanları bulunup, grafikler oluşturulmuştur. Çalışmayla elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Yükleme sonrasında şahit numuneye göre; tek yüzü plastik kompozit donatılı duvarların dayanımı %370,6 oranında artmıştır. Çift yüzü plastik kompozit donatılı duvarlar ise şahit numuneye göre %796,3 oranında yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Tek yüzü plastik kompozit donatılı duvarlara göre çift yüzü plastik kompozit donatılı duvarlar yük taşıma kapasitesini ortalama olarak %90,5 arttırdığı görülmüştür.

Numunelerin elde edilen max. deplasman değerleri incelendiğinde; tek yüzü plastik kompozit donatılı duvarların şahit numuneye göre max deplasmanı %415.8 arttırdığı hesaplanmıştır. Çift yüzü plastik kompozit donatılı duvarın ise şahit numuneye göre max. deplasmanı %226.3 arttırdığı görülmüştür. 2 farklı parametre şeklinde tek yüzüne ve çift yüzüne plastik kompozit donatı uygulanan duvarlar kıyaslandığında ise çift yüzü plastik kompozit donatılı duvarlara göre tek yüzü plastik kompozit donatılı duvarlar max. deplasmanı %58.1 arttırmıştır.

Plastik kompozit donatı uygulanan duvarların donatılı yüzü, donatı uygulanmayan yüze göre gözle görülür bir şekilde daha az hasar almıştır. Kırılan plastik kompozit donatılı duvarlar incelendiğinde; sıva parçalanmış olsa bile plastik kompozit donatı belirgin bir hasar almadan tek parça durmaktadır.

Şahit numune plastik kompozit donatılı duvaralar göre gevrek ve ani kırılmıştır. Güçlendirme uygulanan numuneler daha sünek davranışlar göstermiştir.

Genel olarak elde ettiğimiz verilere ve gözlemlerimize göre plastik kompozit donatı, tuğla duvarların güçlendirilmesinde başarılı bir performans sergilemiştir. Plastik kompozit donatı ile sadece yığma tuğla yapıların değil tüm duvar güçlendirilmeleri için üzerinde çalışıp farklı parametrelerle de denebileceği ve diğer güçlendirme yöntemlerine bir alternatif olarak sunulabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmalarımız için plastik kompozit donatının firmalardaki ismi ile geogird'in teminini sağlayan İstanbul Teknik firmasına çalışmamıza katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Triantafillou, T. C., "Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy- Bonded FRP Laminates", *Journal of Composites for Construction*,107-115, May 1998.
- [2] İlki, A., Ispir, M., As, F., Demir, C. ve Kumbasar, N., "FRP Retrofit of Walls Constructed with Historical Bricks", *Challenges for Civil Construction Torres Marques et al.(Eds)*, FEUP, 2008.
- [3] Vandergrift, J., Gergely, J. and Young, D.T., "CFRP Rertrofit of Masonary Walls", Proceedings of the Third International Conference on Composites in Infrastructure ICCI 02, San Francisco, CA, USA, 2002.

- [4] Coza, H., “Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin karbon lifli kompozitlerle güçlendirilmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 18, Ocak 2009.
- [5] Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G. and Aldea, C. (2006)., “Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix-Grid Composites”, *Journal of Composites for Construction*, May/June 2006, pp 223-233.
- [6] Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Karlos, K., Papathanasiou, M., “Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading”, *Materials and Structures*, 40(10): 1081-1097 (2007).
- [7] Binici, B., Özcebe, G. ve Özçelik, R., “Analysis and design of FRP composites for seismic retrofit of infill walls in reinforced concrete frames”, *Composites: Part B*, Cilt 38, 575-583, 2007.
- [8] Öztaş, V., “Yığma yapıların güçlendirilmesi ve bir yığma yapı örneğinde güçlendirme analizi”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 74, Ocak 2009.
- [9] Elgawady, M. A., Lestuzzi, P. ve Badoux, M., “Retrofitting of Masonry Walls Using Shotcrete”, Proceedings of 2006 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Napier, New Zealand, 45-53, 2006.
- [10] Sevil, T., Baran M., Bilir T. ve Canbay E., “Tuğla dolgu duvarların b/a çerçevesel yapıların davranışına etkilerinin incelenmesi; deneysel ve kuramsal çalışmalar”, *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.2, No.2, June 2010.
- [11] Cumhuriyet, A., Altundal, A., Kalkan, İ., Aykaç, S., “Genişletilmiş Çelik Levhalarla Güçlendirilmiş Yatay Boşluklu Tuğla Duvarların Davranışı”, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, Eskişehir, 15-17 Ekim, 2015.
- [12] Taghdi, M., Bruneau, M. ve Saatcioglu, M., “Seismic Retrofitting of Low-Rise Masonry and Concrete Walls Using Steel Strips”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126:1017- 1025, 2000.
- [13] Araki, H., Yasojima, A. ve Kagawa, J., “Strength of Masonry Walls Retrofitted with Epoxy Resin Injection”, *Applied Mechanics and Materials*, 82:545-550, 2011.
- [14] Geoart, URL: <http://www.geogrid.com.tr/geogrid> (Erişim zamanı; Temmuz, 21, 2020).
- [15] Maccaferri, URL: <https://www.maccaferri.com.tr/geogrid-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir> (Erişim zamanı: Temmuz, 21, 2020)





TARİHİ YIĞMA KEMERLİ BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Alper ÖZMEN¹ , Erkut SAYIN^{2,*} 

¹ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44000, Malatya, Türkiye

² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

ÖZET

Tarihi yığma kemerli köprüler eski dönemlerden beri geçmiş uygarlıkların kültürel mirasını günümüze aktaran en önemli yapılardan biridir. Tarihi yığma kemerli köprüler geçmişte ulaşım, ticaret ve mimarinin en önemli unsurlarından biridir. Ancak yeni yapı malzemelerinin ve yapım yöntemlerinin gelişmesiyle günümüzde artık yığma kemerli köprüler inşa edilmemektedir. Bu yapılar deprem, sel, yangın ve savaşlar gibi dış etkenlerle zarar görebilmektedir. Ülkemizde de tarihi köprüler gibi geçmişi günümüze bağlayan önemli mühendislik yapılarının mevcut durumlarının tespit edilerek geleceğe güvenle devredilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmanın temel hedefi tarihi yığma kemerli bir köprünün lineer dinamik analizlerini gerçekleştirerek köprünün deprem etkisi altındaki davranışını incelemektir. Bu amaçla tek açıklıklı yığma kemerli bir köprü sayısal örnek olarak ele alınmıştır. Köprünün 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar programı ile makro modelleme yaklaşımı dikkate alınarak oluşturulmuştur. Lineer dinamik analizlerde köprünün bulunduğu konum da göz önünde bulundurularak 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerine ait ivme kayıtları sismik etki olarak kullanılmıştır. Yapılan analizlerden köprüye ait yer değiştirmeler ve maksimum-minimum asal gerilmeler elde edilmiş ve köprünün sismik tepkileri değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yığma kemerli köprüler, Sonlu elemanlar modeli, Makro modelleme, Lineer dinamik analiz

EVALUATION OF EARTHQUAKE BEHAVIOR OF A HISTORICAL MASONRY ARCH BRIDGE

ABSTRACT

Historical masonry arch bridges are one of most important structures which transfer to cultural heritage of ancient civilizations to the present. These bridges have been one of the most important elements of transportation, trade and architecture in the past. However, nowadays, with the development of new construction materials and methods, masonry arch bridges are no longer constructed. These structures can be damaged by external factors such as earthquakes, floods, fires and wars. There are various studies that are carried out in order to determine the earthquake behaviour of the historical masonry arch bridges. The main objective of this study is to investigate the behaviour of the single span masonry arch bridge under earthquake effects by performing linear dynamic analyses. For this purpose, a single-span masonry arch bridge is considered as a numerical example. Three dimensional finite element model of the bridge has been created by using ANSYS finite element software into account with the macro modelling approach. Because of the location of the bridge, the acceleration records of the 2011 Simav and 2002 Sultandağı earthquakes were used as a seismic effect in the linear dynamic analyses. The displacements and maximum-minimum principal stresses of the bridge were obtained from the analyses and the seismic responses of the bridge were evaluated.

Keywords: Masonry arch bridges, Finite element model, Macro modelling approach, Linear dynamic analyses

1. GİRİŞ

Tarihi yapıların en önemlilerinden biri de hiç kuşkusuz köprülerdir. Tarihi köprüler bölgeden bölgeye bazı değişiklikler göstermektedir. Ülkemizde de farklı dönemlere ait geçmişten günümüze kadar ulaşan birçok tarihi yığma köprü bulunmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan tarihi köprüler envanterine göre yurt içinde büyük çoğunluğu Osmanlı dönemine ait toplam 1646 adet tarihi köprü bulunmaktadır [1].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esayin@firat.edu.tr

Geliş / Received: 06.04.2020 Kabul / Accepted: 25.05.2020 doi: 10.28948/ngumuh.715121

Yüzlerce yıllık geçmişe sahip olan bu köprüler doğal afetler veya insanlar tarafından zarar görebilmekte ya da yıkılabilmektedir. Ayrıca köprüde kullanılan malzemelerin zamanla dayanımını yitirmesi, zemin oturmaları ve köprünün inşa edildiği dönemde düşünülmeyen yüklere maruz kalması gibi sebepler de tarihi köprülerin zarar görmesine sebep olabilmektedir. Günümüzde bu köprülerin yerini betonarme ve çelik köprüler almıştır. Ancak tarihi köprüler bazı ülkelerde ve ülkemizde halen karayolu, demiryolu ve yaya trafiğinde etkin olarak kullanılmaktadır.

Tarihi köprülerin önemli bir bölümü yığma yapım tekniğiyle ve taş kullanılarak inşa edilmiştir. Bu köprüler, temel, kemer, tempan duvar ve dolgu malzemesinden meydana gelmekte olup kemerler bu yapı sistemlerinin ana unsurlarını oluşturmaktadır. Geometrisinden dolayı basınç kuvvetlerine maruz kalan kemerler geniş açıklıkların geçilmesi için tarihi köprüler için uygun yapı sistemleridir. Tarihi köprüler hakkında birçok araştırmacı önemli çalışmalar yapmıştır. Fanning ve Boothby [2] üç yığma köprüyü sonlu elemanlar metodu ile üç boyutlu olarak modellemiştir. Köprülerin sonlu eleman modellerinin servis yükleri altında statik analizlerini yapmışlar ve bu modellerden elde edilen sonuçları köprü üzerinde yapılan test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Ural [3] Trabzon'un Maçka ilçesinde bulunan Çoşandere köprüsünün lineer elastik deprem davranışını incelemiştir. Köprünün, dinamik etkilere karşı tepkisini incelemek amacıyla 1940 El Centro deprem kayıtlarını kullanmıştır ve dinamik etkiler sonucunda maksimum gerilmelerin kemer yüksekliğinin orta bölgesinde meydana geldiği sonucuna varmıştır. Bayraktar ve diğ. [4] tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla Trabzon'un Akçabat ilçesindeki tarihi Şinik köprüsünü incelemiştir. Çalışma sonucunda model iyileştirmesi yapılmadan önceki durumda köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin ve asal gerilmelerin, model iyileştirmesi yapıldıktan sonraki durumda meydana gelen maksimum yer değiştirme ve asal gerilmelerden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Pela ve diğ. [5] kemerleri betondan ve tuğladan inşa edilmiş iki farklı köprünün doğrusal olmayan statik analizlerini yapmışlardır. Sayın ve diğ. [6] Malatya ilinin Darende ilçe merkezindeki tarihi Uzunok köprüsünün lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda deprem sırasında köprüde meydana gelecek olası çatlak bölgeleri belirlenmiş ve köprünün stabilitesini tehlikeye sokmayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Sevim ve diğ. [7] Rize ilinde bulunan Mikron köprüsünün operasyonel modal analiz yardımı ile sonlu eleman model iyileştirilmesini yapmış köprünün 1992 Erzincan depremi altında lineer olmayan davranışını inceleyerek, sonlu eleman iyileştirmesinin lineer olmayan analizlere etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda sonlu eleman iyileştirilmesi yapılmayan modellerden elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum asal gerilmelerin, sonlu eleman model iyileştirmesi yapıldıktan sonraki durumdan elde edilen maksimum yer değiştirme ve asal gerilmelerden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Halifeoğlu ve diğ. [8] Anadolu'daki önemli tarihi köprülerden biri olan Samsun ili, Vezirköprü ilçesinde, Kızılırmak nehri üzerindeki Altınkaya baraj gölüne dökülen İstavroz (İstavroz) çayı üzerinde bulunan Tarihi Kurt Köprüsü'nde (Mihraplı Köprü, Vezirköprü) 2007-2009 yılları arasında gerçekleştirilen uygulama çalışmaları ile teknik araştırmalar konusunda bilgiler vererek gerçekleştirilen restorasyon projesini tanıtmışlardır. Gonen ve diğ. [8] tarihi yığma bir köprüyü SAP2000 sonlu elemanlar programı ile modelleyerek köprünün deformasyonları ve gerilmeleri ölü yükler altında elde edilmiş ve köprünün lineer elastik deprem davranışı araştırılmıştır. D'Ambrisi ve diğ. [10] çalışmalarında taş kemer köprüleri çimento katkılı karbon fiber malzeme ile güçlendirmişlerdir. Bu güçlendirmenin köprünün yapısal davranışına etkisini araştırmışlardır. Zampieri ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada kemer kalınlığında zamanla meydana gelen hasarın kemerin sismik davranışına ve yıkılma mekanizmasına olan etkilerini sismik limit analiz yöntemi ile incelemiştir. Özmen ve Sayın [12] Elazığ ili Maden ilçesinde bulunan tarihi Dutpınar köprüsünün zaman tanım alanında lineer dinamik analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda 2003 Bingöl depremi altında köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmeler ve köprüde meydana gelen asal gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler elde edilmiş ve gerilme yığılmaların olduğu bölgelerde daha detaylı analizler yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Öncü ve diğ. [13] Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunu değerlendirmek amacıyla tek açıklığa sahip tarihi köprüyü ANSYS programında üç boyutlu olarak modellemiş ve köprünün statik ve dinamik yükler altında doğrusal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda tarihi köprünün sınırlı hasar performans düzeyini sağladığı kanaatine varmışlardır.

Bu çalışmada, yığma yapıtlı tarihi taş kemer bir köprünün lineer dinamik analizleri yapılarak köprünün deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Lineer dinamik analizler için 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu depremler köprünün bulunduğu bölgede daha önce meydana gelmiş olan depremlerdir. Lineer dinamik analizleri gerçekleştirmek amacıyla ANSYS paket programı kullanılmıştır. Bu amaçla Kütahya ili Gediz ilçesinde bulunan Tarihi Debboy Köprüsü sayısal örnek olarak dikkate alınmıştır. Böylece tarihi köprülerde hasara yol açabilecek en önemli unsurlardan biri olan deprem etkisinin incelenmesi ve ileride bu köprü için planlanacak koruma ve restorasyon çalışmalarına katkı sunulması amaçlanmıştır.

2. DEBBOY KÖPRÜSÜ

Debboy köprüsü Kütahya ili Gediz ilçesi, Eskigediz beldesinde yer almaktadır. Kemer şekli sivri olan köprü kesme taşlardan inşa edilmiş olup tek açıklığa sahiptir. Köprü, 5.5 m genişliğinde ve 23 m uzunluğundadır. Köprü kemeri birden fazla yaydan oluşmaktadır ve ortalama yarıçapı 3.9 m'dir. Köprünün yan taşıyıcı duvarlarının kalınlığı 0.40 m olup korkuluk yüksekliği ise 1.2 m'dir. Tarihi köprü, 39.0244 Kuzey, 29.2454 Doğu koordinatlarında bulunmaktadır.

TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaynaklarda köprünün Bizans zamanında yapıldığı belirtilmektedir. Köprü; yapı, plan ve mimari detayları ile bir Osmanlı eseridir. Köprü, Gediz’de meydana gelen sel ve 1944 ile 1970 yıllarındaki depremler gibi pek çok doğa felaketinden sağlam olarak çıkmayı başarmıştır. Köprünün yakınına yeni bir köprü yapılmış ve tarihi köprü bugün işlevsiz kalmıştır [14]. Gediz Çayı üzerinde bulunmakta olan tarihi köprüye ait iki farklı görünüş Şekil 1’de geometrik özellikleri ise Şekil 2’de verilmiştir.

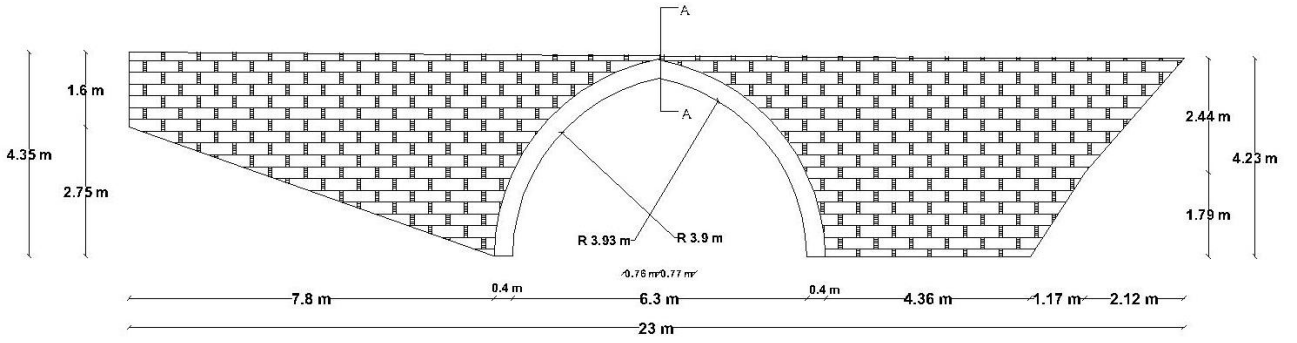


a)

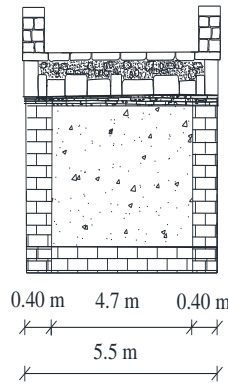


b)

Şekil 1. Debboy köprüsünün genel görünüşü



a) Köprünün genel görünüşü

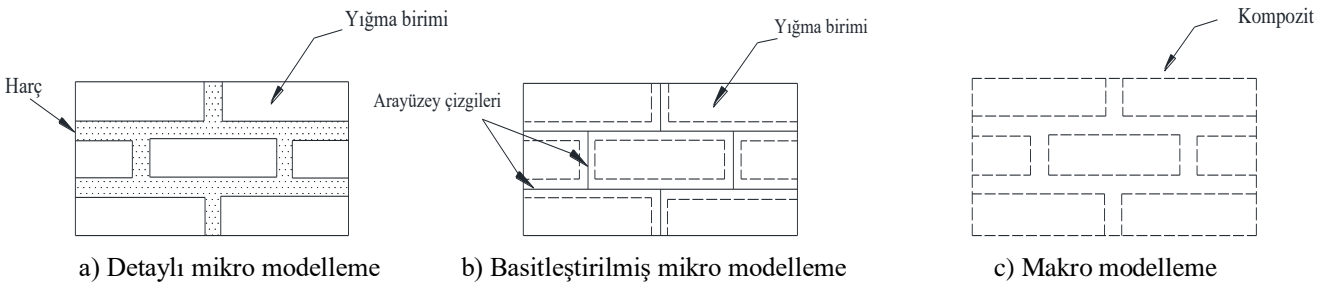


b) A-A kesiti

Şekil 2. Debbay köprüsünün geometrik özellikleri

3. KÖPRÜNÜN SONLU ELEMANLAR MODELİ VE DEPREM ANALİZİ

Yığma yapılar için yapılacak olan sayısal analizlerde, ele alınan yapı sistemin büyüklüğüne bağlı olarak 3 farklı modelleme tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak isimlendirilir [15]. Detaylı mikro modellemede, çözüm süresi oldukça uzundur bu sebeple bu modelleme yöntemi özellikle küçük yapılar ya da dikkate alınacak yapının bir bölümünün çözümü için daha kullanışlıdır. Basitleştirilmiş mikro modellemede, yığma birimlerinin boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Yığma birimleri birbirinden ara yüzey çizgileri ile ayrılırlar. Makro modelleme ise, taş, tuğla vb. bloklar ve harç arasında ayırım yapmaksızın, yapı elemanını kompozit olarak kabul eden ve bu malzemelerin ortak özelliğini yansıtan eşdeğer bir malzeme modelidir. Büyük yapı sistemlerinin incelenmesinde bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azalttığından çoğunlukla makro modelleme yöntemi kullanılır. Bu yöntemde yığma birimi ile harç arasındaki ilişki ihmal edilerek malzeme kompozit olarak dikkate alınmaktadır. Bu modelleme teknikleri Şekil 3’ de verilmiştir. Mikro ve makro modelleme tekniklerinin farklı kullanım alanlarından dolayı, bir modelleme tekniğinin diğerine göre daha uygun olduğunu söylemek doğru değildir. Ancak, literatür incelendiğinde büyük tarihi yapıların çoğunlukla makro modelleme tekniği kullanılarak modellendiği görülmektedir [16, 17].



a) Detaylı mikro modelleme

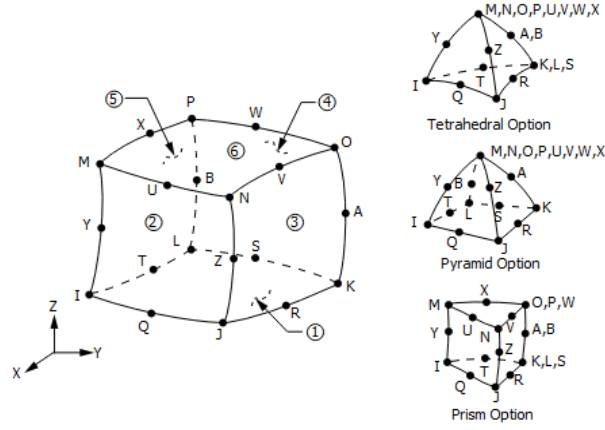
b) Basitleştirilmiş mikro modelleme

c) Makro modelleme

Şekil 3. Yığma yapı modelleme teknikleri [18].

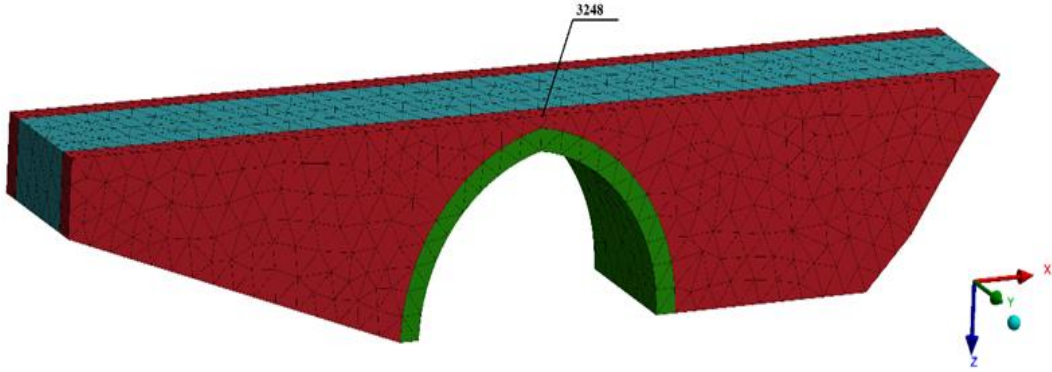
TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Debboy köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS programı kullanılarak makro modelleme yöntemi ile SOLID186 elemanı kullanılarak elde edilmiştir. SOLID186 elemanı toplam 20 düğüm noktasına ve her bir düğüm noktasında üç adet yer değiştirme serbestlik derecesine sahiptir. SOLID186 elemanının genel görünüşü Şekil 4' de verilmiştir.



Şekil 4. SOLID186 elemanının genel görünüşü [19].

Debboy köprüsünün sonlu eleman modelinde sırasıyla 12986 düğüm noktası ve 8022 adet üç-boyutlu katı (solid) eleman bulunmaktadır. Köprü'nün sonlu eleman ağı ve yer değiştirmenin zamanla değişim grafiklerinin çizildiği köprü'nün en üst noktasında yer alan 3248 nolu düğüm noktası Şekil 5' de verilmiştir. Köprü ayakları kaya zemin üzerine oturduğu için modelin sınır koşulları (boundary conditions) ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprüde kemer ve yan duvarlar arasında bir yüzey elemanı tanımlanmamış bu kısımlar bonded contact olarak alınmıştır. Köprüde kullanılan elemanların mesh büyüklüğü ise 0.5 m olarak dikkate alınmıştır.



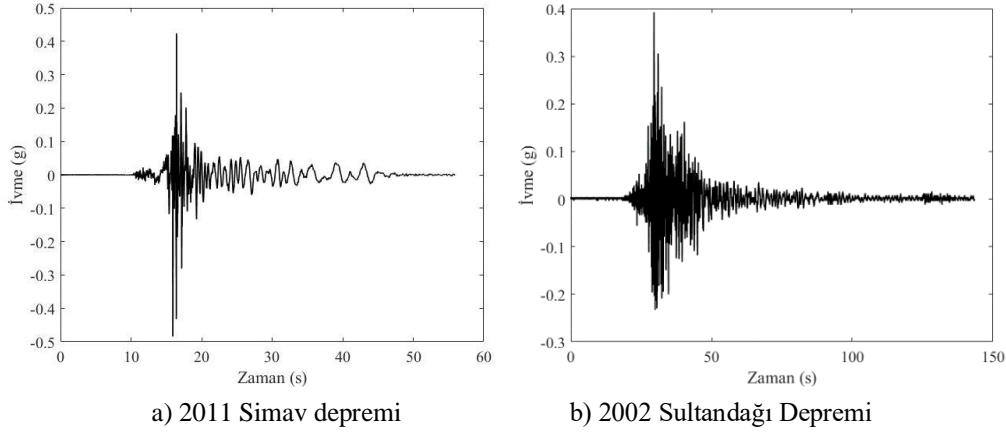
Şekil 5. Debboy köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik parametrelerinin belirlenmesi güçtür. Bu sebeple köprüde kullanılan malzemelerin özellikleri literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir [20, 21]. Bu çalışmada kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Köprüde kullanılan taşın basınç dayanımı 20 MPa, çekme dayanımı ise basınç dayanımının 1/10 ile 1/20 arasında alınabileceği dikkate alınarak 1 MPa olarak dikkate alınmıştır [22].

Tablo 1. Malzeme özellikleri

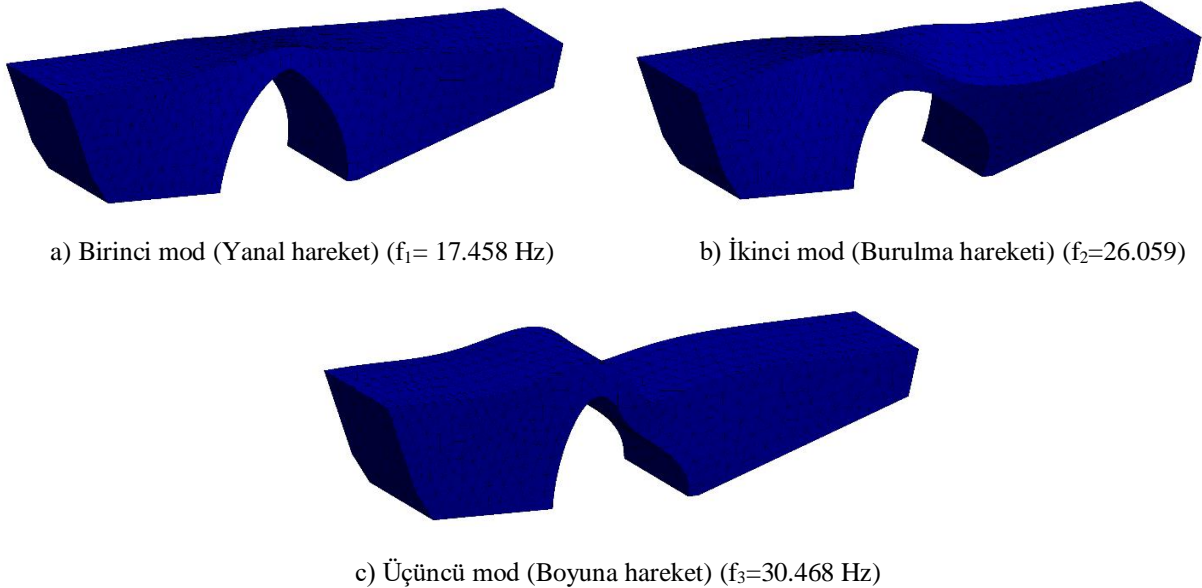
Malzeme	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Yoğunluk (t/m ³)	Poisson Oranı
Kemer	2.5E6	2.3	0.2
Yan Duvar (Tempan Duvar)	2E6	2.2	0.2
Dolgu Malzemesi	1.2E6	1.4	0.2

Lineer analizlerde köprünün bulunduğu bölgenin depremselliği de dikkate alınarak 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Deprem ivmeleri köprünün zayıf eksenini (suyun akış doğrultusu) olan y doğrultusundan etki ettirilmiştir. Her iki deprem kaydının da en etkili olduğu 15 saniyelik zaman dilimi dikkate alınmıştır. 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerinin ölçeklendirilmiş ivme zaman grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Lineer analizlerde kullanılan deprem ivmelerine ait ivme-zaman grafiği

Analizlerde kullanılan deprem ivmeleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY-2018) göre hazırlanan interaktif deprem haritasından köprünün bulunduğu konumun koordinatları girilerek alınan spektrum grafiğine göre maksimum ivme 0.48g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işlemi Seismomatch yazılımı ile yapılmıştır [23]. Lineer analizlerde viskoz sönüm oranı %5 olarak kabul edilmiş ve Newmark yaklaşımı ile analizler yapılmıştır. Köprüye ait ilk üç mod şekli ve doğal frekansları ise Şekil 7'de verilmiştir.

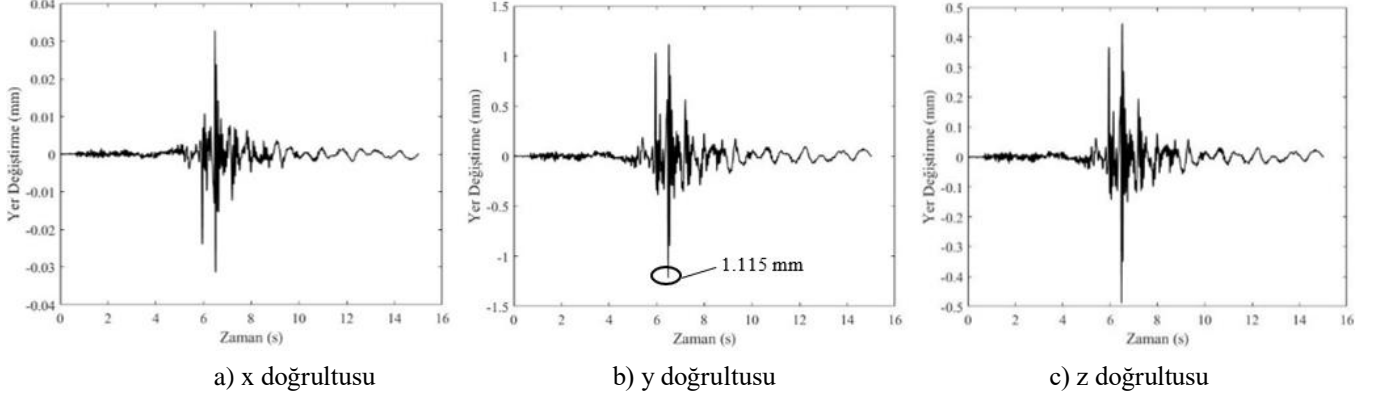


Şekil 7. Debboy köprüsüne ait mod şekilleri ve doğal frekanslar

Tarihi Debboy köprüsünün rölöve ve restorasyon çizimlerine göre oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli dikkate alınarak köprünün kendi ağırlığı ve deprem yükü altında lineer dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar programı ile oluşturulmuştur. Analizlerde doğrusal elastik malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. En büyük yer değiştirme değerleri köprünün en üst noktasında yer alan 3248 nolu düğüm noktasında meydana gelmiştir. Lineer dinamik analizler neticesinde 3248 nolu düğüm noktasının x, y ve z doğrultusunda 2011 Simav depremi için elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla Şekil 8'de verilmiştir.

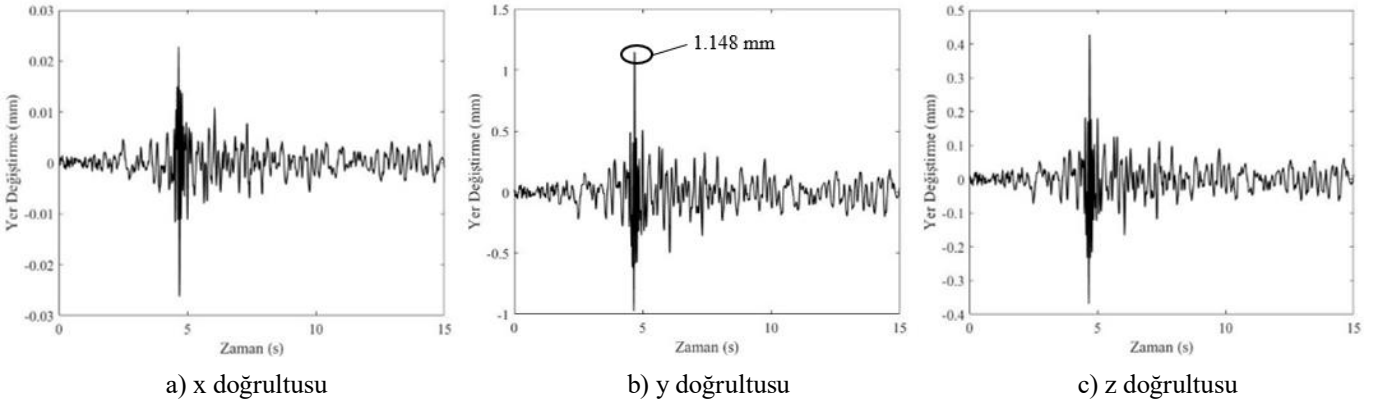
TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Simav depreminden elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde maksimum yer değiştirme değerinin 1.115 mm olarak köprünün kemer açıklığının ortasında y doğrultusunda bulunmuştur.



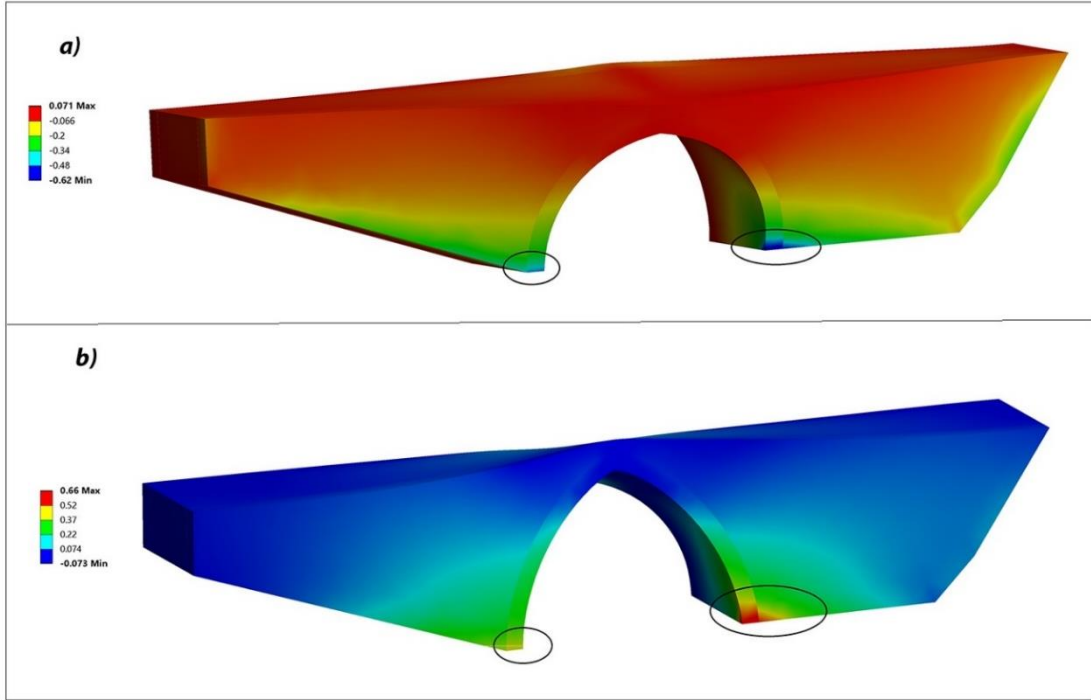
Şekil 8. 2011 Simav depremi için 3248 nolu düğüm noktasının yer değiştirme zaman grafikleri

2002 Sultandağı depremi için 3248 nolu düğüm noktasında x, y ve z doğrultusunda elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri ise sırasıyla Şekil 9’da verilmiştir. Sultandağı depreminden elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde maksimum yer değiştirme değeri 1.148 mm olarak köprünün kemer açıklığının ortasında y doğrultusunda elde edilmiştir. Her iki deprem kaydı için elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri birbirine yakın olup y doğrultusunda bulunmuştur.



Şekil 9. 2002 Sultandağı depremi için 3248 nolu düğüm noktasının yer değiştirme zaman grafikleri

2011 Simav depremi için lineer dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum çekme gerilmesi 0.66 MPa, maksimum basınç gerilmesi ise 0.62 MPa olarak tespit edilmiştir. Köprü üzerinde maksimum ve minimum basınç bölgelerinin meydana geldiği bölgeler Şekil 10’da işaretlenmiştir. Şekil incelendiğinde basınç ve çekme gerilmelerinin köprünün memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaştığı söylenebilir.

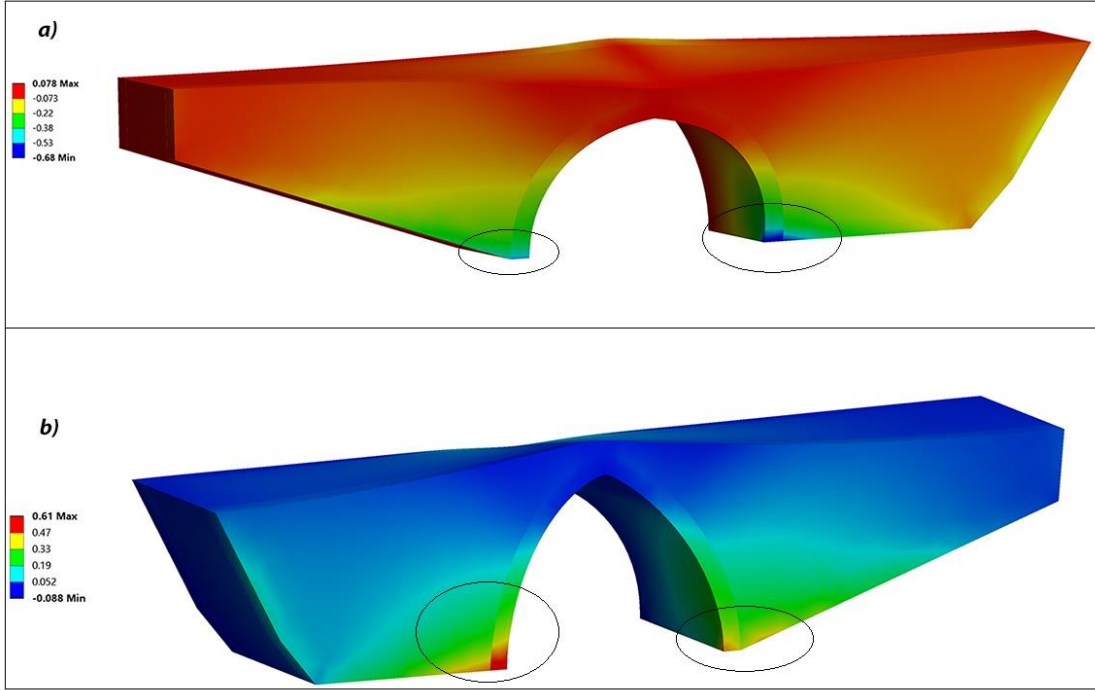


Şekil 10. 2011 Simav depreminden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme diyagramları

2002 Sultandağı depremi için yapılan analizlerde ise maksimum çekme gerilmesi 0.61 MPa, maksimum basınç gerilmesi ise 0.68 MPa olarak elde edilmiştir. Köprü üzerinde çekme ve basınç gerilmelerinin meydana geldiği bölgeler Şekil 11’ de verilmiştir. 2002 Sultandağı deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan lineer dinamik analizler sonucunda basınç gerilmeleri memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaşırken çekme gerilmeleri ise maksimum değerine mansap cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada ulaşmıştır.

Her iki deprem kaydı için yapılan analizlerde basınç gerilmeleri köprü için dikkate alınan taşın basınç dayanımının (20 MPa) oldukça altında olduğundan basınçtan dolayı köprüde bir hasar oluşması beklenmemektedir. Elde edilen çekme gerilmeleri de taşın çekme dayanımından düşük olmakla beraber taşın çekme dayanımına oldukça yakındır. Çekme gerilmelerinden elde edilen değerler köprüde kullanılan malzemenin dayanımını aşarsa potansiyel hasar bölgelerinin ilk olarak analizde tespit edilen bu bölgelerde meydana gelmesi beklenmelidir. Bu sebeple lineer analiz ile tespit edilen bu bölgelerin nonlineer analiz ile daha ayrıntılı olarak modellenerek hasar ve çatlak mekanizmalarının irdelenmesi faydalı olacaktır.

TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 11. 2002 Sultandağı depreminden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme diyagramları

4. SONUÇLAR

Tarihi yapılar çeşitli etkenler sonucunda zarar görmekte veya yıkılmaktadır. Bu yapıların güvenle gelecek nesillere aktarılabilmesi için korunması ve restorasyonu oldukça önemli bir husustur. Bu çalışma kapsamında Kütahya ili Eskigediz beldesi Gediz çayı üzerinde bulunan Tarihi Debboy köprüsü makro modelleme yaklaşımı ile üç boyutlu olarak modellenerek lineer dinamik analizleri yapılmıştır. Sismik etki olarak iki farklı ivme kaydı dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda maksimum deplasman değeri 2011 Simav depremi ve 2002 Sultandağı depremi için y doğrultusunda (suyun akış doğrultusu) sırasıyla 1.115 mm ve 1.148 mm olarak elde edilmiştir.

Dinamik analizler sonucunda 2011 Simav depremi için basınç ve çekme gerilmeleri köprü'nün memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaşırken, 2002 Sultandağı deprem için basınç gerilmeleri köprü'nün memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaşmış çekme gerilmesinin maksimum değeri ise köprü'nün mansap cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre basınç ve çekme gerilmelerinin maksimum olduğu bu bölgelerde elde edilen değer köprü'nün malzeme dayanımını aşarsa ilk olarak bu bölgelerde potansiyel hasar bölgelerinin meydana gelmesi beklenebilir. Ülkemiz gibi aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan bölgelerde; tarihi yapıların bu çalışmada kullanılan yaklaşımlara benzer yöntemler kullanılarak değerlendirilmelerinin yapılması, güçlendirme gereksinimlerine bu şekildeki değerlendirme sonuçlarına göre karar verilmesi uygun bir çözüm olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), Tarihi Köprüler Şubesi Müdürlüğü Envanteri, Ankara, 2012.
- [2] P. J. Fanning, and T. E. Boothby, "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges," *Computers and Structures*, vol. 79, pp. 2645-2662, 2001.
- [3] A. Ural, "Tarihi kemer köprülerin sonlu eleman metoduyla analizi," Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- [4] A. Bayraktar, A. C. Altunışık, T. Türker, ve B. Sevim, "Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi," Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim 2007.

- [5] L. Pela, A. Aprile, and A. Benedetti, "Seismic assessment of masonry arch bridges," *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 1777-1788, 2009.
- [6] E. Sayın, M. Karaton, B. Yön, ve Y. Calayır, "Tarihi Uzunok köprüsünün yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak doğrusal olmayan dinamik analizi," 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.
- [7] B. Sevim, A. Bayraktar, A. C. Altunışık, S. Atamtürktür, and F. Birinci, "Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations," *Nonlinear Dynamics*, vol. 63, no. 4, pp. 755-770, 2011.
- [8] F. M. Halifeoğlu, H. Sert, ve S. Yılmaz, "Tarihi Kurt köprüsü (Mihraplı köprü, Vezirköprü) restorasyonu proje ve uygulama çalışmaları," *METU JFA*, vol. 30, no. 2, pp. 81-104, 2013.
- [9] H. Gonen, M. Dogan, M. Karacasu, H. Ozbasaran, and H. Gokdemir, "Structural failures in retrofit historical Murat masonry arch bridge," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 35, pp. 334-342, 2013.
- [10] A. D'Ambrisi, F. Focacci, R. Luciano, V. Alecci, and M. De Stefano, "Carbon- from materials for structural upgrade of masonry arch road bridges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 75, pp. 355-366, 2015.
- [11] P. Zampieri, M. A. Zanini, and F. Faleschini, "Influence of damage on the seismic failure analysis of masonry arches," *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 343-355, 2016.
- [12] A. Özmen, and E. Sayın, "Seismic assessment of a historical masonry arch bridge," *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, vol. 1, no.2, pp. 95-104, 2018.
- [13] M.E. Öncü, A. Karaşin, R. İzgi, İ.B. Karaşin, "Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi", 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- [14] T. Acar, "Eskigediz'de (Kütahya) su mimarisi: köprüler, çamaşırhaneler, su kemerleri ve su deposu," *Uluslararası Folklor Akademisi Dergisi*, vol. 2, no. 1, pp. 1-32, 2019.
- [15] P.B. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures," Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands, 1996.
- [16] L. Pela, A. Aprile, and A. Benedetti, "Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 381-394, 2013.
- [17] P. Zampieri, M. A. Zanini, and C. Modena, "Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 13, no. 9, pp. 2629-2646, 2015.
- [18] E. Sayın, "Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Elazığ, 2009.
- [19] ANSYS, 2015, Finite Element Software, Swanson Analysis System, Inc., Houston, TX, USA.
- [20] A.C Altunışık, A. Bayraktar, B. Sevim, and F. Birinci, "Vibration-based operational modal analysis of the Mikron historic arch bridge after restoration," *Civ. Eng. Envir. Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 247-259, 2011.
- [21] A. Brencich, and D. Sabia, "Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The Tanaro Bridge," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 2087-2099, 2008.
- [22] H. Güllü, Tarihi yığma yapı Cendere köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi," *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 7, sayı 1, 245-259, 2018.
- [23] Seismomatch, 2018, Seismosoft Ltd., Pavia, Italy.





DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ

Hatice Öznur ÖZ^{1,*}, Hasan Erhan YÜCEL², Muhammet GÜNEŞ³, Beytullah MALKOÇ⁴

^{1,2,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

⁴ Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Aksaray İl Müdürlüğü, 68000, Aksaray, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma kapsamında Finlandiya'dan temin edilen doğal wollastonitin, yüksek performanslı harcın (YPH) dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. YPH üretim aşamasında su/bağlayıcı oranı sabit tutularak, wollastonit minerali %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında karışıma eklenmiştir. Ayrıca yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi (SA) vasıtasıyla karışımın işlenebilirliği sağlanmıştır. Basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı testleri 3., 7., 28. ve 90. günlerde yapılırken, kılcal su geçirimsizliği ve gaz geçirimsizliği deneyleri 28. ve 90. günde uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre, %3 wollastonit içeren karışımda tüm deneyler için performansta iyileşme gözlenmiştir. %6 wollastonit içeriğine sahip karışımda ise kontrol harcına oranla daha iyi sonuçlar elde edilirken, %3 wollastonit içeren karışıma göre performansta azalmalar gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Basınç, Durabilite, Eğilme, Gaz geçirimsizliği, UTH, Wollastonit, Yüksek performanslı harç

THE EFFECTS ON HIGH PERFORMANCE MORTARS OF NATURAL WOLLASTONITE

ABSTRACT

In this study, the effects of natural wollastonite obtained from Finland on strength and durability properties of HPM of wollastonite were investigated. In the production of HPM, wollastonite mineral was added to the mixture at 3%, 6%, 9%, 12% and 15% by keeping the water/binder ratio constant. In addition, the workability of the mixture was achieved by means of a high range water reducing admixture (SP). Compressive, flexural and ultrasonic pulse velocity tests were conducted at 3, 7, 28 and 90 days while sorptivity and gas permeability tests were applied at 28 and 90 days. According to the obtained results of these tests, it was observed that the mixtures containing 3% wollastonite had the recuperation in performance for all experiments. Compared to the control mortar, the mixture containing 6% wollastonite indicated the better results whereas the reduction in performance was observed in the comparison the mixture containing 3% wollastonite.

Keywords: Compressive, Durability, Flexural, Gas permeability; UPV; Wollastonite; High performance mortar

1. GİRİŞ

Yüksek performanslı beton (YPB), yüksek dayanım ve durabilite özelliklerinin istendiği yapılarda yaygın bir şekilde kullanılan yapı malzemesidir. YPB, düşük su/bağlayıcı oranının yanı sıra çimento pastasının mikroyapıdaki porozitesini azaltmak için silis dumani, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemelerle de tasarlanabilir [1], [2]. Sadece puzolanik karakteristikli malzemeler değil aynı zamanda inert malzemeler de çimento esaslı kompozitlerin dayanım özelliklerini ve servis ömrünü geliştirebilmektedir [3].

Çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirebilen en önemli inert malzemelerden biri de wollastonittir [3]. Özel bir mikroskobik görünüme sahip olan wollastonit minerali 3:1 ile 20:1 boy:çap aralığında değişen iğnemi parçacık yapısıyla dikkat çekmektedir [4]. Bu iğnemselliği sayesinde seramik, plastik, metalurji ve diğer sanayilerde önemli bir kullanım alanı bulan wollastonit minerali, çimento esaslı kompozitlerin tasarımında özellikle çimento yerine kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [4], [5]. Örneğin; Mathur vd. [6], wollastonit minerali içeren beton üretiminde mukavemet özelliklerinin artırılmasının yanı sıra kuruma büzülmesinin, su emiliminin, aşınma direncinin, donma çözülme ve sülfata karşı dayanıklılığın iyileştiğini rapor etmişlerdir. Kalla vd. [7], betonun basınç ve eğilme dayanımlarının, wollastonitin iğnemi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oznuroz@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 22.04.2020 Kabul / Accepted: 18.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.725269

H.Ö. Öz, H. Yücel, M. Güneş, B. Malkoç

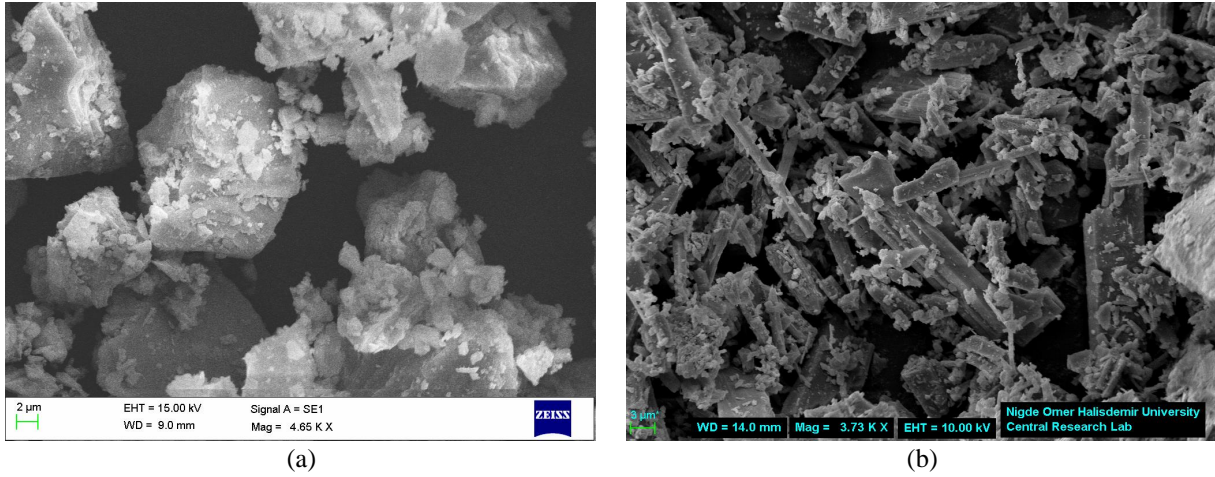
morfolojisi (lifli doğası) ve 200 GPa'a kadar yüksek elastisite modülü sayesinde 90. günde %15 oranında vollastonit kullanımıyla, yaklaşık %12 arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, vollastonitin yüksek boy:çap oranına sahip olması ile mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğinin artırarak ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımını daha yüksek seviyelere çıkardığı ve kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir [8]. Bu nedenle, çimento esaslı kompozitlerde kullanılan vollastonitin iğnemsî yapısının boy:çap oranının betonun/harcın dayanım ve durabilite karakteristikleri üzerinde belirleyici bir etken olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada kullanılan doğal vollastonit Finlandiya'dan temin edilmiş olup, yüksek performanslı harç (YPH) içerisinde değişen oranlarda kullanılmış ve YPH üzerindeki etkileri hem mekanik hem de durabilite performansı açısından değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzemeler

YPH karışımlarının üretiminde, CEM I 42,5 R tipi normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun yerine belirli oranlarda kullanılan doğal vollastonit ise Finlandiya'dan temin edilmiştir. Çimento ve vollastonitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de, bu malzemelerin SEM görüntüleri ve tane boyutu dağılımları ise sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulmuştur. Ayrıca vollastonitin boy:çap oranını gösteren SEM görüntüsü ve vollastonit olduğunu kanıtlayan XRD analizi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Vollastonitin boy:çap oranı yaklaşık olarak 11:1 (Pa 1/Pa 2 (69.28µm/6.398µm)) olarak belirlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiği zaman, 20:1 boy:çap oranı yüksek iğnemsellik olarak kabul edilmektedir [3]. Bu bilgiye göre 11:1 boy:çap oranına sahip Finlandiya vollastonitin iğnemselliği orta olarak değerlendirilmiştir. Özgül ağırlığı 1,07 olan polikarboksilik eter tipi yüksek oranda su azaltıcı bir süper akışkanlaştırıcı (SA) işlenebilirliği sağlamak amacıyla tüm karışımlarda kullanılmıştır. Karışımlarda 0-0,4 mm, 0,6-1,2 mm ve 1,2-2,5 mm olmak üzere 3 farklı tane boyutuna sahip olan ve sırasıyla, ince orta ve iri olarak isimlendirilen kuvars kumları kullanılmıştır. Bu agregaların özgül ağırlıkları aynı olup, 2,65'tir.

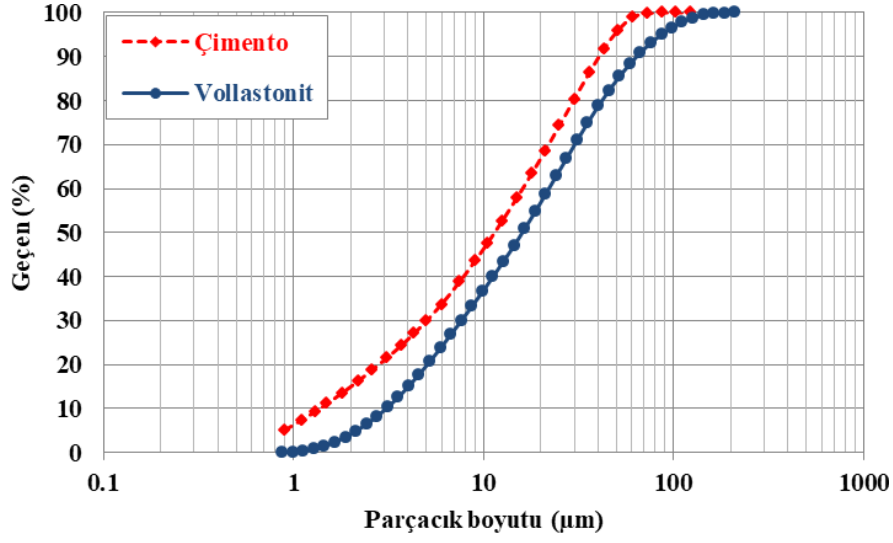


Şekil 1. (a) Çimentonun SEM görünümü, (b) Finlandiya Vullastonitinin SEM görünümü

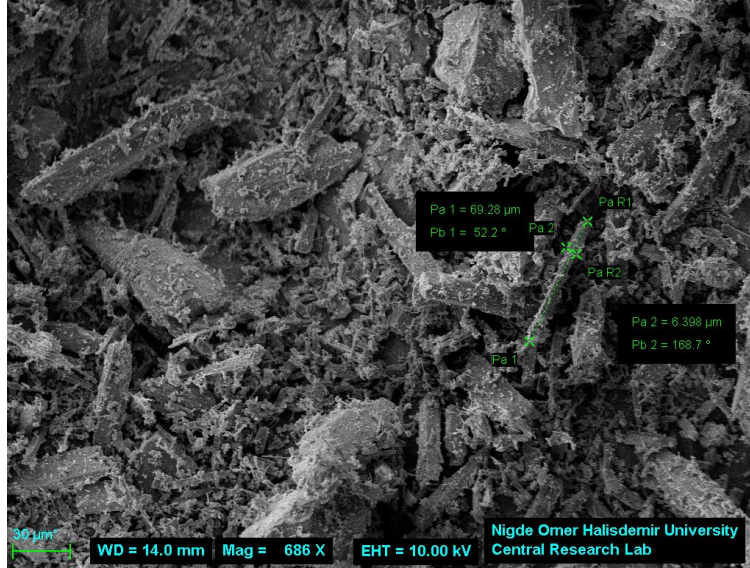
2.3. YPH Karışım Oranları

Bu çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak sabit tutulan 6 farklı YPH karışımı üretilmiştir. Bu YPH'lere ait karışım oranları Tablo 2'de gösterilmiştir. Karışımlardaki toplam bağlayıcı içeriği (çimento+vullastonit) 550 kg/m³ olarak belirlenmiştir. SA, tüm karışımlarda aynı oranda kullanılmıştır. YPH'ler, ASTM C305 [9] standardına uygun olarak üretilmiştir. İlk olarak kontrol karışımı (V0), hiç vollastonit eklenmeksizin üretilmiştir. Diğer karışımlarda, vollastonit, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Buna bağlı olarak V3, V6, V9, V12 ve V15 olarak isimlendirilen YPH karışımları elde edilmiştir.

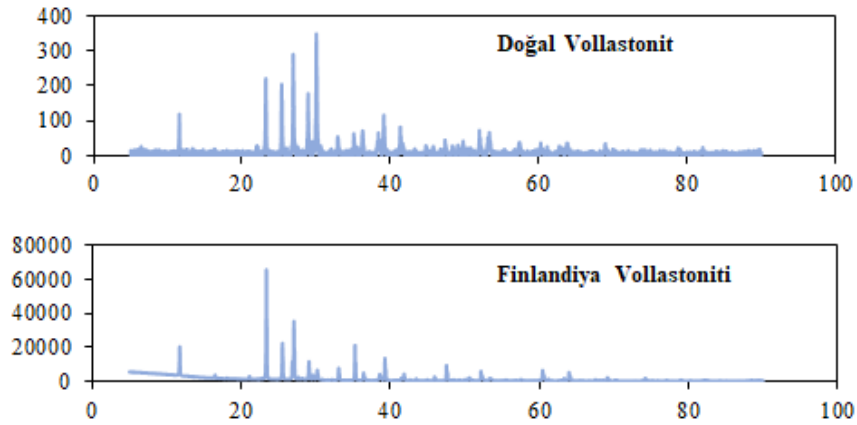
DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ



Şekil 2. Çimento ve doğal vollastonitin tane boyut dağılımları



Şekil 3. Finlandiya Vollastonitinin boy:çap oranının ölçülmesi



Şekil 4. Finlandiya Vollastoniti ve doğal vollastonitin XRD analizleri

Tablo 1. Çimento ve vollastonitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşenler (%)	Çimento	Vollastonit
CaO	62,58	45,69
SiO ₂	20,25	52,61
Al ₂ O ₃	5,31	0,43
Fe ₂ O ₃	4,04	0,18
MgO	2,82	0,27
SO ₃	2,73	-
K ₂ O	0,92	0,09
Na ₂ O	0,22	0,14
Mn ₃ O ₄	-	0,01
TiO ₂	-	0,13
Fiziksel Özellikler	Çimento	Vollastonit
Kızdırma Kaybı	2,96	0,50
Özgül Ağırlığı	3,15	2,82
İncelik Modülü (m ² /kg)	326	-

Tablo 2. YPH karışım oranları (1 kg/m³)

Kod	S/B	Su	Çimento	Vollastonit	İnce (0-0,4)	Orta (0,6-1,2)	İri (1,2-2,5)	SA
V0	0,35	192,5	550,0	-	748,5	582,2	332,7	12,5
V3	0,35	192,5	533,5	16,5	747,8	581,6	332,4	12,5
V6	0,35	192,5	517,0	33,0	747,1	581,1	332,0	12,5
V9	0,35	192,5	500,5	49,5	746,4	580,5	331,7	12,5
V12	0,35	192,5	484,0	66,0	745,7	580,0	331,4	12,5
V15	0,35	192,5	467,5	82,5	744,9	579,4	331,1	12,5

2.4. Deneysel Çalışmalar

2.4.1. Taze ve mekanik testler

YPH'lerin taze özellikleri slump deneyi ile ASTM C1437'ye [10] göre belirlenmiştir. Deney esnasında, akış kalıbının yaklaşık yarısı dolacak şekilde harç tabakası kesik koniye konmuş ve 20 defa şişlenmiştir. Daha sonra koninin geri kalan kısmı da harçla doldurularak birinci tabakaya uygulanan işlemin aynısı ikinci tabakaya da uygulanmıştır. Harcın fazlası mala yardımıyla alınarak koni harç kalıbından çıkarıldığı anda kronometre çalıştırılmış, yayılma tablasının kolu yardımıyla yayılma tablası, 15 saniyede 25 defa düşürülmüştür. Son olarak, kumpas yardımıyla harcın yayılma çapı tespit edilmiştir.

YPH'lerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyleri sırasıyla, ASTM C349 [11], ASTM C348 [12] ve ASTM C597'ye [13] göre belirlenmiştir. Eğilme deneyi her test yaşı için 3 adet 40x40x160 mm³ boyutlarında prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Basınç deneyi ise eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 40x40x160 mm³ boyutlarındaki prizmatik numunelerden elde edilen parçalar kullanılarak her test yaşı için 6 numune üzerinde yapılmıştır. Tahribatsız bir test metodu olan UTH testi ise eğilme deneyinden hemen önce eğilme testinde kullanılacak olan 40x40x160 mm³ boyutlarındaki numunelerin 160 mm uzunluğundaki kısmına uygulanmıştır. Bu 3 test de YPH numunelerine 3., 7., 28. ve 90. günlerde uygulanmış olup, deney sonuçları ölçülen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

2.4.2. Durabilite testleri

Kılcal su geçirimsizliği deneyi, 50 mm kalınlığında ve yarıçapında 3 adet numune kullanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait görseller Şekil 5'te verilmiştir. 24 saat süresince, 100±5 °C'lik bir etüvde kurutulan numunelerin su emmeye bırakılacak yüzeylerinin çevresi su geçirimsizliğini engellemek için silikon ile kaplanmıştır. İlk ağırlıkları tartılan numuneler, su seviyesi ayarlanan havuz içerisine konulmuş ve deney başlamıştır. Su içerisine bırakılan numunelerin ağırlıkları sırasıyla, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numunelerin ıslak yüzeyi kuru bir bezle kurulandıktan sonra ölçülmüştür. Dolayısıyla kılcal su

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ

geçirimsizliği, birim kesit alanı başına YPH'lerin zamanla emdiği su miktarıyla Denklem (1) yardımıyla değerlendirilmiştir. Deney tüm karışımlara 28. ve 90. günde uygulanmış ve sonuçlar ortalama alınarak belirlenmiştir.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (1)$$

Burada; k: kapilarite katsayısı (mm/dak^{0.5}), A: su ile temas eden alan (mm²), t: geçen zaman (dak), Q: Emilen su miktarı (mm³). Kapilarite katsayısı, en küçük kareler metodu kullanılarak Q/A arasındaki lineer ilişkinin eğiminden elde edilmiştir.

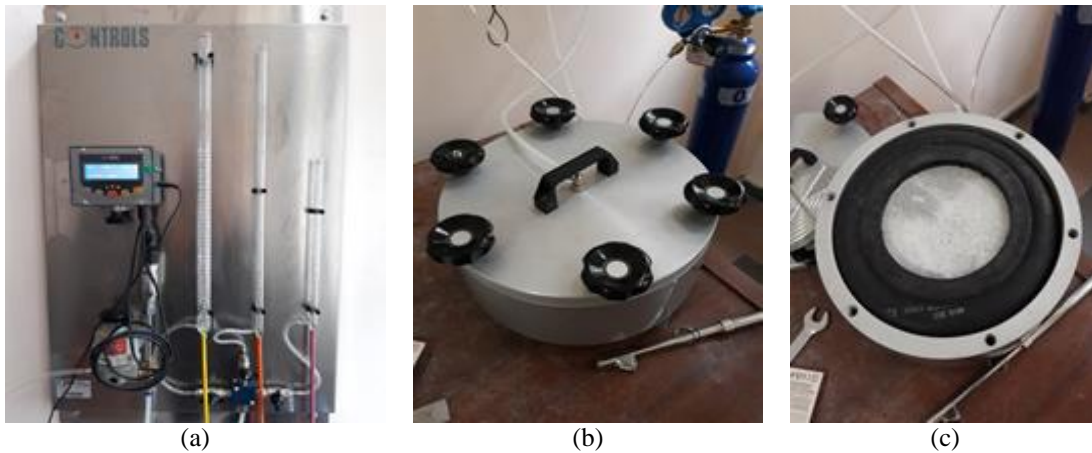


Şekil 5. Kılcal su geçirimsizliği testi

YPH'lerin gaz geçirimsizliği, RILEM tarafından önerilen CEMBUREAU'ya [14] göre, 150 mm çapında ve 50 mm kalınlığındaki disk numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Gaz geçirimsizliği deneyine ait görseller Şekil 6'da gösterilmiştir. Test yaşı geldiğinde 24 saat boyunca 50±5 °C sıcaklıkta kurutulan YPH numuneleri daha sonra üzeri örtülü bir kap içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Giriş gaz basınçları 150, 250 ve 300 kPa olarak uygulanmıştır. Gaz geçirimsizliği katsayıları kararlı hal koşullarında küçük kılcal boşluklarla gözenekli bir ortam yoluyla sıkıştırılabilir bir akışkanın laminer akışı için Hagen-Poiseuille ilişkisi kullanılarak her seviye için hesaplanmıştır. Gaz geçirimsizliği katsayısı RILEM tarafından önerilen bu katsayıların ortalaması alınarak tespit edilmiştir [14]. Gaz geçirimsizliği katsayısı "Ka", Darcy'nin denklemi (Denklem (2)) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K_a = \frac{2P_2QL\mu}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (2)$$

Ka; gaz geçirimsizliği katsayısı (m²), P₁; giriş gaz basıncı (N/m²), P₂; çıkış gaz basıncı (N/m²), A; numunenin kesit alanı (m²), L; numunenin yüksekliği (m), μ; oksijenin viskozitesi (2,02x10⁻⁵ Ns/m²) ve Q; hacim akış oranıdır.

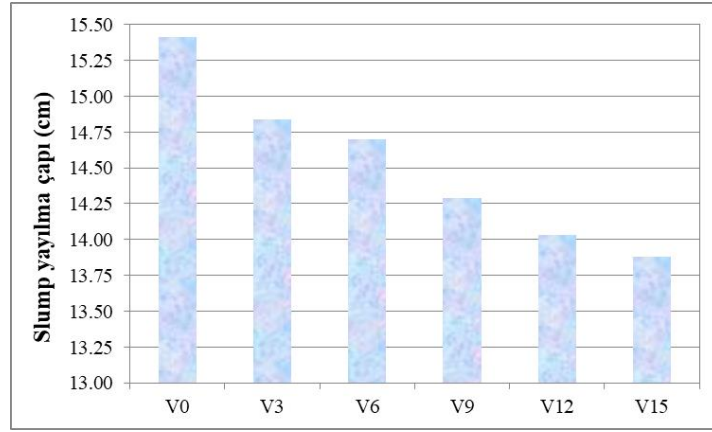


Şekil 6. (a) Dijital basınç ölçer, (b) geçirgenlik hücresi, (c) numunenin hücreye yerleştirilmesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yayılma Çapı

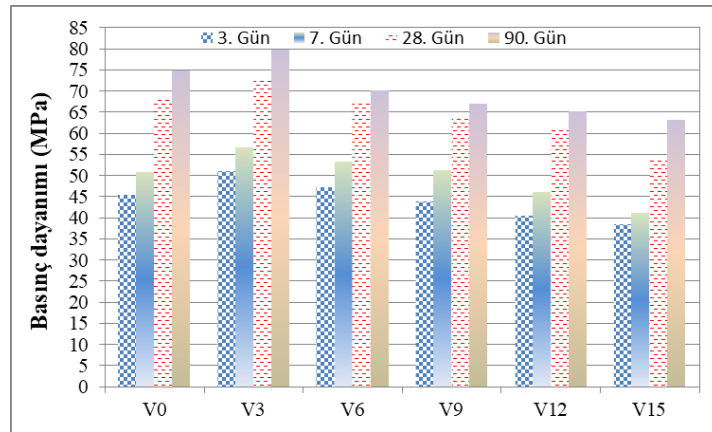
YPH karışımlarının slump yayılma çapı Şekil 7’de grafiksel olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere vollastonit kullanım oranı arttıkça, YPH’lerin işlenebilirliği azalmıştır. V3, V6, V9, V12 ve V15 karışımlarının yayılma çapları kontrol harcına göre sırasıyla, %3,7, %4,6, %7,3, %9,0 ve %9,9 oranlarında azalmıştır. Benzer şekilde Zareci vd. [15] %20 vollastonit içeren betonun slump değeri aynı SA içeriği için kontrol betonuna göre %15’e kadar azaldığını göstermiştir. Vollastonitin işlenebilirliğe olan olumsuz etkisi, iğnemsiz parçacık yapısının (Şekil 1, Şekil 3) sebep olduğu kenetlenme ile açıklanabilir [16].



Şekil 7. YPH karışımlarının slump yayılma çapları

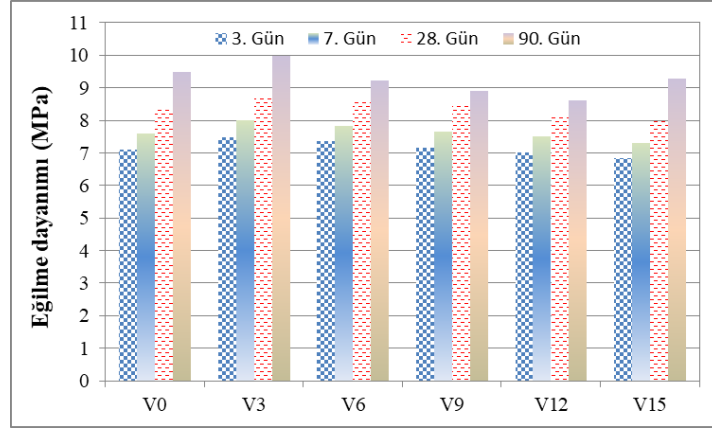
3.2. Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Ultrasonik Titreşim Hızı

YPH’lerin 3., 7., 28. ve 90. gündeki basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UTH değerleri sırasıyla, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere her 3 test yaşı için de %3 vollastonit kullanımı YPH’lerin mekanik performansını artırmıştır. V3 karışımının 3., 7., 28. ve 90. gündeki basınç dayanımları V0 karışımına göre sırasıyla, %12.0, %11.5, %7.6 ve %6.6 oranlarında artmıştır. Aynı kıyaslama eğilme dayanımı ve UTH için yapıldığında sırasıyla, %5.4, %5.5, %4.9, %5.3 ve %7.2, %4.3, %2.9, %0.3 olarak hesaplanmıştır. %3 vollastonit içeriğinde oluşan bu gelişim, vollastonit mineralinin iğnemsiz parçacık yapısı (Şekil 1-Şekil 3) ve yüksek elastisite modülü (300-530 GPa) ile açıklanabilir [4], [6]. %6 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise YPH karışımlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı dört test yaşı içinde artan oranda azalmıştır. Bu durum vollastonitin %6 ve daha fazla oranda kullanılmasının mikroyapıyı bozması şeklinde düşünülmektedir [5]. Ayrıca, Finlandiya Vollastonitinin boy:çap oranı ile tanımlanan iğnemselliğinin (11:1) çok yüksek olmaması ve Şekil 1-3’ten görüldüğü üzere iğnemsiz yapının tüm kütleyle hakim olmamasının da bu sonucu etkileyen temel etkenlerden olduğu değerlendirilmektedir [17].

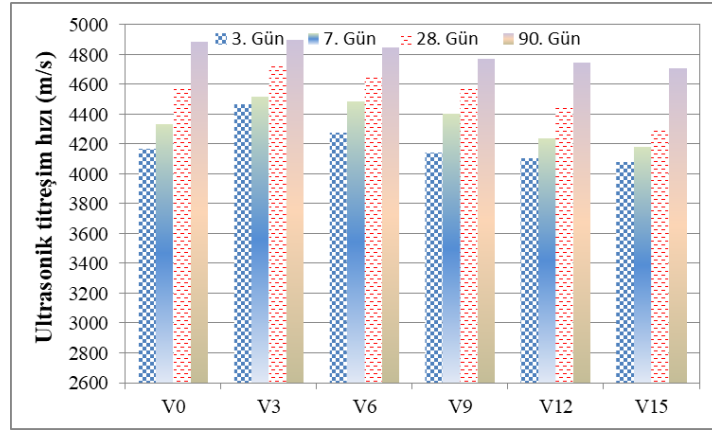


Şekil 8. YPH karışımlarının basınç dayanımları

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ



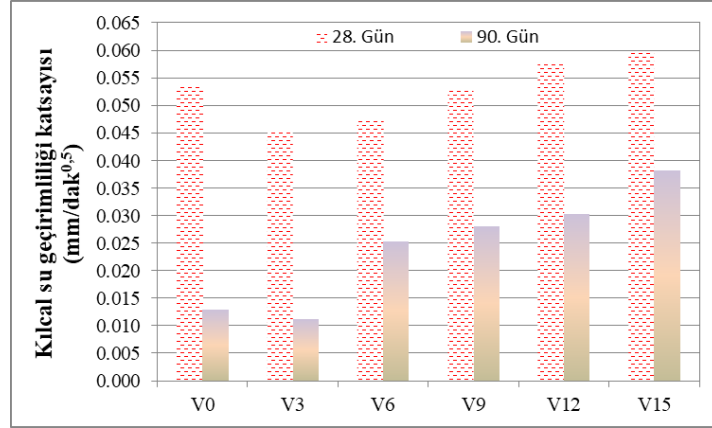
Şekil 9. YPH karışımlarının eğilme dayanımları



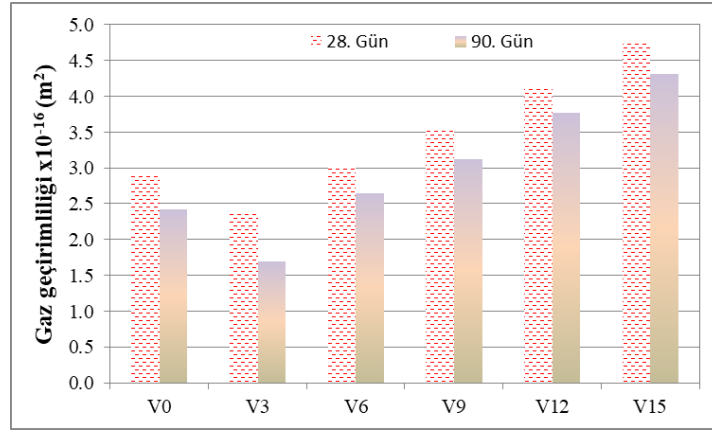
Şekil 10. YPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızları

3.3. Kılcal Su Geçirirliği ve Gaz Geçirirliği

YPH karışımlarının kılcal su geçirirliği katsayıları ve gaz geçirirliği değerlerini gösteren grafikler sırasıyla, Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulmuştur. Grafiklerden açıkça görüleceği üzere V3 karışımının durabilite performansı, V0 karışımından daha üstün çıkmıştır. Bununla birlikte, %6 ve daha fazla vollastonit içeren YPH karışımlarının durabilite özellikleri kontrol karışımından daha düşük performans sergilemiştir. Bilindiği gibi, durabilite performanslarının belirlendiği yüzeyin çimento pastası bileşenlerinin mikro yapı özellikleri büyük ölçüde yüzey bölgesinin gözenek yapısı tarafından belirlenmektedir [6]. V3 karışımı düşünüldüğünde, gözenek yapısının vollastonit tarafından düzenlendiği ve basınç dayanımına ters orantılı olacak şekilde kılcal su geçirirliği katsayısının ve gaz geçirirliğinin azaldığı söylenebilir. Bu nedenle, çimento sisteminde gözenek süreksizliğini sağladığı düşünülen bu özel mineralin, ince tanecik yapısı sayesinde kazandığı doldurucu etkisi ile sistemdeki gözenekleri azalttığı ve YPH'nin mikro yapısının yoğunlaşmasını sağladığı tahmin edilebilir [4], [6], [18]. %6 ve daha fazla vollastonit içeriğinde meydana gelen performans kaybı ise iğnemselliği çok da yüksek olmayan mineralin iğnemsisi yapısının tüm kütleyle hakim olmamasına (Şekil 1-3), bu nedenle, mikroyapıyı da bozmasına bağlanabilir [5], [17].



Şekil 11. YPH karışımlarının kılcal su geçirimsizliği katsayıları



Şekil 12. YPH karışımlarının açık gaz geçirimsizliği değerleri

4. SONUÇLAR

Finlandiya Vollaistonitinin YPH karışımlarının taze, mekanik ve durabilite performansları üzerine etkisini tespit etmek amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Vollaistonit minerali, iğnemsiz parçacık yapısının neden olduğu kenetlenme ve ince tanecik yapısının neden olduğu fazla su ihtiyacından dolayı YPH'lerin işlenebilirliğini azaltmıştır.

Mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlendiği deney sonuçlarına göre, bu vollaistonitin %3 oranında YPH içerisinde kullanılabileceği, %6 ve daha fazla oranlarda kullanımının ise performans kaybına yol açacağı belirlenmiştir. İğnemsiz parçacık yapısı SEM analizi ile ispatlanan Finlandiya Vollaistonitinin iğnemsiz parçacıklarının tüm vollaistonit kütlelerine hakim olmadığı ve boy:çap oranının literatürde yüksek olarak nitelendirilen 20:1'den daha düşük olduğu, bu nedenle, % 3'ten daha fazla kullanımında hem mekanik hem de durabilite performansı açısından başarısız sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Bu bilgilere göre, çimento esaslı kompozitlerin tasarımında kullanılması planlanan vollaistonit mineralinin boy:çap oranının en az 20:1 olması ve iğnemsiz yapının kütlelerin çoğunda gözlemlenebilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] D. Harbec, A. Zidol, A. Tagnit-Hamou, and F. Gitzhofer, "Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 142-156, 2017.
- [2] M. Mazloom, A. A. Ramezani-pour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 347-357, 2004.

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ

- [3] H. E. Yücel, and S. Özcan, “Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique,” *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 165-176, 2019.
- [4] P. Kalla, A. Rana, Y. B. Chad, A. Misra, and L. Csetenyi, “Durability studies on concrete containing wollastonite,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, pp. 726-734, 2015.
- [5] M. A. Wahab, I. A. Latif, M. Kohail, and A. Almasry, “The use of wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes,” *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 304-309, 2017.
- [6] R. Mathur, A. K. Misra, and P. Goel, “Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete,” *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 66, pp. 1029-1034, 2007.
- [7] P. Kalla, A. Misra, R. C. Gupta, L. Csetenyi, V. Gahlot, and A. Arora, “Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite-fly ash combination,” *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1142-1150, 2013.
- [8] V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, and B. Mobasher, “Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites,” *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 351-359, 2015.
- [9] ASTM C305, “Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [10] ASTM C1437, “Standard test method for flow of hydraulic cement mortar,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [11] ASTM C349, “Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure),” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [12] ASTM C348, “Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [13] ASTM C597, “Standard test method for pulse velocity through concrete,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2016.
- [14] RILEM TC 116-PCD, “Permeability of concrete as a criterion of its durability,” *Materials and Structures*, vol. 32, pp. 174-179, 1999.
- [15] S. A. Zareei, F. Ameri, P. Shoaeei, and N. Bahrami, “Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study,” *Construction and Building Materials*, vol. 11–32, pp. 201, 2019.
- [16] P. C. Tatnall, “Fiber-reinforced concrete. In: J. F. Lamond, and J. H. Pielert, editors, “Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials (STP 169D),” *ASTM International*, West Conshohocken, vol. 49, pp. 578-594, 2006.
- [17] H. Ö. Öz, H. E. Yücel, M. Güneş and Ç. Duymaz, “The effects of natural wollastonite on mechanical and durability properties of standard mortars,” in 6th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation (MSNG2019), 2019, pp. 265-269
- [18] G. D. Ransinchung, B. Kumar, and V. Kumar, “Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1168-1177, 2009.





AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI

Mustafa KORKANÇ^{1,2,*} 

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde Türkiye

ÖZET

Ak Medrese (Niğde) 1409-1410 yılında Karamanoğlu hükümdarı Alâeddin Ali Bey'in oğlu Ali Bey tarafından yaptırılmıştır. Bazı onarımlar görenek günümüze kadar gelen medrese, orijinal durumunun muhafaza etmekte olup, dönem medrese yapıları arasında en önemlilerinden birisidir. Yapı, Cumhuriyet döneminden itibaren farklı amaçlar için kullanılmaktadır (okul, müze deposu, kütüphane vb.). Bu tür yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması için bakımlarının düzenli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada yapıda kullanılan taşların jeomekanik özellikleri ve sorunlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada yapıda kullanılan taşların jeomekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapıda temel seviyesine yakın kesimlerdeki yapı taşlarında zemin suyuna bağlı olarak önemli oranda bozunmalar gözlemlenmiştir. Anıtta restorasyon aşamasında gerçekleştirilen drenaj uygulamasından sonra da anıtın bazı kesimlerde zemin suyu ile ilişkili olarak renklenme, çiçeklenme ve taşın dayanımının azalması sonucunda yüzeysel ve bazı kesimlerde oldukça önemli miktarda taş kayıpları gözlemlenmiştir. Restorasyon uygulamalarında yörenin orijinal taşının kullanılmadığı belirlenmiştir olup, yerine kullanılan restorasyon taşların özellikle kapiler bölgede bozunma sürecini hızlandırdığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ak Medrese, Bozunma, Jeomekanik özellikler, Kapiler seviye, Niğde

ENGINEERING PROPERTIES AND PROBLEMS OF STONES USED IN THE CONSTRUCTION OF AK MADRASA (NIGDE)

ABSTRACT

Ak Madrasa was built in 1409-1410 by Ali Bey who is the son of the sovereign of the Karamanoğlu, Aliâddin Ali Bey. The madrasah, which has survived to the present day with some repairs, maintains its original state and is one of the most important of the madrasah structures of the period. The building has been used for different purposes since the Republican era (school, museum warehouse, library, etc.). In order to protect such structures and transfer them to future generations, they should be maintained regularly. In this study, it was aimed to determine the geomechanical properties and problems of the stones used in the building, and the characteristic features of the stones were determined on three samples. Significant degradation was observed in the building stone close to the basement level due to ground water. After the drainage application performed at the restoration stage of the monument, as a result of coloration, efflorescence formation and decreased resistance of the stone in some parts of the monument, a significant amount of stone losses were observed in some areas. It was determined that the original stone of the region was not used in restoration applications, and it was determined that the restoration stones used instead accelerated the decay process especially in the capillary region.

Keywords: Ak Medrese, Decay, Geomechanical properties, Capillary level, Niğde

1. GİRİŞ

Tarihi eserler bir ulusların uygarlık yolunda kat ettiği mesafenin temel göstergelerinden biridir. Tarihi yapılar geçmişten günümüze milletin kültürünü taşıdığı gibi, gelecek nesiller için de ışık tutan, yol gösteren ve kıvanç veren kültür varlıklarıdır. Aynı zamanda bu yapılar milletin kabiliyetlerinin, bilgilerinin, hünerlerinin, his ve heyecanlarının yanı sıra uğradıkları felaketlerin de aynası durumundadır. Bütün bu değerler göz önüne alındığında, milli kültürün devamlılığı açısından, bu eserlerin titizlikle korunup gelecek nesillere aktarılması kaçınılmaz bir görevdir [1].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mkorkanc@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 24.06.2020 Kabul / Accepted: 24.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.757299

M. Korkanç

Tarihi yapılarda kullanılan yapı elemanları arasında taş malzeme, en dayanıklısı olmasına rağmen yine de zaman içerisinde farklı nedenlerle ayrışıp parçalanmakta ve koruma çalışmaları gündeme gelmektedir. Tarihi yapılarda kullanılan taşların iyi ya da kötü durumda olması, eserin koruma ve kullanımını etkilediği gibi olumsuz şartlarda, eserin yok olmasına varabilecek pek çok sorunu da beraberinde getirebilmektedir. Günümüzde bozunmanın nitelikleri konservasyon, biyoloji, kimya, jeoloji vb. disiplinlerden uzmanlar tarafından incelenerek bazen esere dokunmadan, çevre koşulları iyileştirilerek sorunlar giderilmektedir. Bu nedenle tarihi yapılar üzerinde meydana gelen bozunmaların doğru tanımlanması oldukça önemlidir. Bu sorunların kökenlerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir [2,3].

Tarihsel dönemlerde, yalnızca yüksek statülü taş bloklar daha uzun mesafelere taşınırken, yerel yapı taşları daha büyük yapılar için kullanılmıştır [4,5]. Yerel taşlar düşük ulaşım maliyetleri nedeniyle uygun olmaları durumunda fazlaca kullanılabilirler [6]. Burada en önemli özellik, taş ocağından çıkarılan bloklarda eklem, çatlak veya diğer zayıflık düzlemleri yakın aralıklarda olmaması istenir [7]. Helenistik dönem mimarisinde mermer, gnays, kireçtaşı, kumtaşı, granit, andezit, tüf, breş, serpantin, porfir ve trakit gibi taşlar yaygın olarak kullanılmıştır [8]. Diğer taşlar arasında tüflerin çıkartılması, taşınması ve işlenmesi daha kolay olup, nispeten ucuz ve hava koşullarından korunması şartıyla yapının herhangi bir kesiminde kullanılabilir [9]. Ülkemizde de düşük birim ağırlığı, yüksek-çok yüksek gözenekliliği ve durabilitesi orta-iyi olan tüfler, antik yapılarda olduğu gibi Selçuklu-Osmanlı devrinin birçok tarihi eserlerinde de dayanıklı olmaları sonucu geçmişten günümüze kadar başarıyla kullanılmıştır [10-15, 3, 16, 8, 17-20].

Tarihi yapılar üzerinde meydana gelen bozunmalarla ilgili gerek uluslararası gerekse de ülkemizde son yıllarda yapılan çalışmalar artmakla birlikte yeterli değildir. Türk Tarih Kurumu'na 2001 yılında Prof. Dr. Mehmet ÖZKARCI tarafından hazırlanan "Niğde'de Türk Mimarisi" adlı envanter çalışmasında, Niğde Merkezde bulunan yapıların daha çok mimari özellikleriyle ilgili bilgiler bulunmaktadır [21]. Niğde yöresindeki kültürel yapılarda kullanılan taşların özellikleri ve bu taşlarda meydana gelen bozunmalarla ilgili çalışmalar genellikle tarafımızca yapılmış olup, daha sonra birkaç çalışma daha eklenmiştir. [3, 16, 19, 22-24]. Ülkemiz ve dünyada bu tür yapılar için taş değişimi veya yeniden inşası durumunda, orijinal taş ihtiyacına yönelik kapsamlı çalışmalar da kısıtlı sayıdadır. Bu konularda son dönemlerde araştırmalar artmakla birlikte istenilen düzeyde değildir.

İncelenen yapıda da günümüze kadar yapılan restorasyon uygulamalarında yapının orijinal taşı kullanılmamış olup, Nevşehir ve Kayseri yöresinde ticari olarak işletilen alanlardan getirilen ve orijinal taşta hem fiziksel ve mekanik özellikleri hem de renk ve dokusal olarak uymayan taşlar kullanılmıştır. Bölgedeki tarihi yapılarda kullanılan taşlar ile yerleri yaklaşık da olsa eski ocak alanları ile potansiyel bölgelerden alınan benzer dokusal özelliklere sahip örneklerin de mühendislik özellikleri yine tarafımızca yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [25, 26]. Yeni taş ihtiyacına yönelik olarak bu alanlar ayrıntılı olarak tanımlanmış olup, yörede devam eden restorasyon uygulamalarında hala aynı orijinal taş yerine uygun olmayan taşların kullanımı devam etmektedir. Bilindiği gibi restorasyon çalışmalarında kullanılacak yeni taşların mühendislik özelliklerinin, yapıda kullanılmış örnekler ile aynı ya da benzer davranışı gösterecek mühendislik özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Ak Medrese'de kullanılan yapı taşlarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve taşların sorunlarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaçla restorasyon sırasında izinler ölçüsünde yapıdan düşmüş ve bir daha kullanılması mümkün olmayan örnekler üzerinde yapıda kullanılmış olan taşların mineralojik, petrografik, jeomekanik özellikleri ve taşlarda gözlenen sorunları ayrıntılı bir biçimde ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Ak Medresenin Tarihi ve Mimari Özellikleri

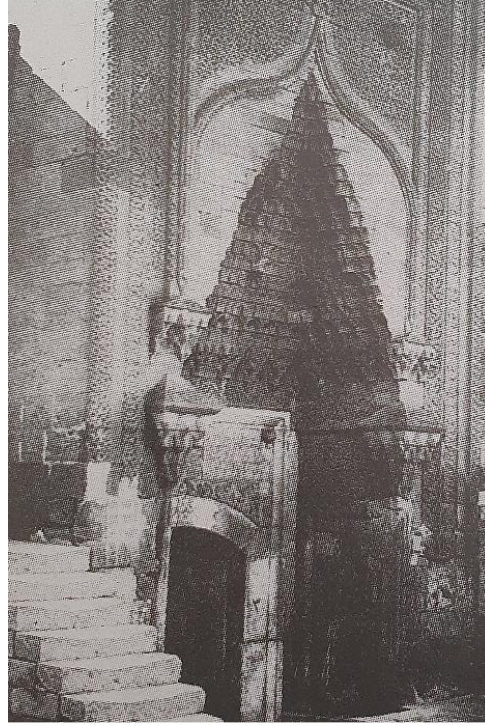
Ak Medrese, Niğde ilinin merkezinde Saruhan mahallesinde bulunmaktadır. Taçkapının üstündeki inşa kitabesine göre, 812 H./ 1409-1410 M. yılında Karamanoğlu hükümdarı Alâeddin Ali Bey'in oğlu Ali Bey tarafından yaptırılmıştır. Medresenin taçkapısı tamamen beyaz mermerden yapıldığı için yapıya "Ak Medrese" adı verilmiştir [21].

Bazı onarımlar görenek günümüze kadar gelen medrese, orijinal durumunun muhafaza etmektedir. Yapı, I. Dünya Savaşı'nda nalbathane olarak kullanılmış, 1922 yılında 60 öğrencisiyle medrese olarak fonksiyonunu sürdürmüştür. Cumhuriyet döneminde de çeşitli okul hizmetlerinde kullanılmıştır. 1936 yılından itibaren çevrede bulunan tarihi eserler medresede toplanmaya başlanmış, 1939-1950 yılları arası ise II. Dünya Savaşı tehlikesine karşı İstanbul Arkeoloji Müzesi'nin deposu olarak hizmet vermiştir. 1950-1957 tarihleri arasında Niğde Müzesi deposu, 1957-1977 yılları arasında ise Niğde Müzesi Müdürlüğü, 1977'den itibaren de yine Niğde Müzesi'nin deposu olarak bazı taş eserler burada muhafaza edilmiştir. Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün mülkiyetinde olan yapı, 19.03.1993 tarihinden itibaren 10 yıl süreyle Niğde Üniversitesi'ne kütüphane amacıyla kullanılmak üzere devredilmiştir. Günümüzde ise Niğde Belediyesi tarafından sosyal amaçlı (sergi, söyleşi, tanıtım vb.) olarak kullanılmaktadır. Medrese 1963, 1976, 1983, 1986-1987, 2008-2009 yıllarında Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından çeşitli onarımlar yaptırılmıştır. Albert Gabriel tarafından 1928'de çekilen resimde [27] üst katın revak cephelerindeki bezemelerin kısmen tahrip olduğu, üst kattaki eyvanların oda şekline dönüştürüldüğü, üst katın kuzey cephesi sofaların oda şeklinde düzenlendiği ve sofalara çıkmak için kuzey cephede taçkapının iki yanına merdivenlerin yapıldığı görülmektedir (Şekil 1). Bu

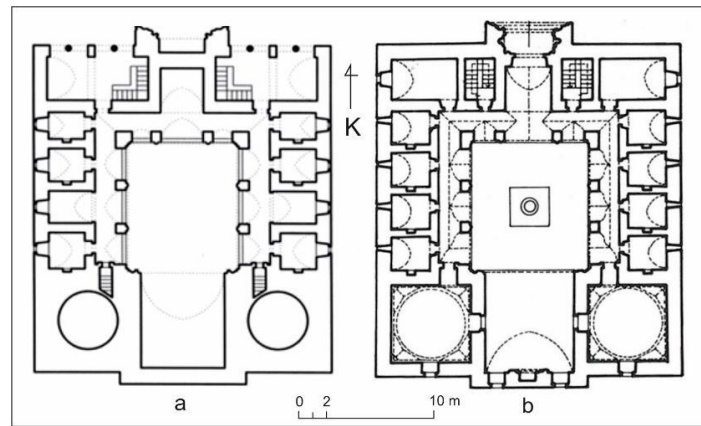
AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI

onarımlarda bütün mekanlar restore edilmiş kuzey cephedeki merdivenler kaldırılmış, aşınan taşlar yenilenmiş, çatıdaki toprak tabakası kaldırılmış, odaların içleri sıvanarak badana edilmiştir [21].

Yapı, açık avlulu ve iki katlı medreseler grubuna girer. Alt iki kat eyvanlı bir şemaya sahipken, üst katta ise iki kat yüksekliğinde tutulan ana eyvan ile beraber dört eyvanlı bir düzenleme görülür. Medresenin plan şeması son derece simetrik olup, plan düzenlemesi bakımından Türk medrese mimarisinde tek örnektir (Şekil 2). Kuzey-güney doğrultusunda yerleştirilen kapı, dıştan 21.80 x 24.50 m. boyutlarındadır [28]. Medrese zamanla yol seviyesinin altına indiği için, taçkapağı oniki basamaklı merdivenle inilmekte ve yapı biraz çukurda kalmaktadır [21].



Şekil 1. Albert Gabriel [27] tarafından 1928'de çekilen Ak Medrese'nin giriş kapısının görünümü ([21]'den alınmıştır)



Şekil 2. Ak Medresenin a) alt ve üst kat b) zemin kat planları (Kuran, [28]'den düzenlenmiştir)

Medresenin doğu batı ve güney cephelerinde iki katlı pencereler açılarak duvarların masifliği giderilmeye çalışılmıştır. Bu cephelerin alt taraflarında dışa açılan toplam onbeş pencerenin sekizi mazgal, diğerleri dikdörtgen kesitlidir. Mazgal pencereler odaların duvarlarının üst kısmında bulunmaktadır. Ayrıca doğu cephenin güney tarafındaki ile kuzey cephenin doğu kısmında yer alan alt pencerelerin sonradan onarımlar sırasında açıldığı sanılmaktadır. Pencereler dıştan demir parmaklıklıdır. Üst katın doğu ve batı tarafların da yer alan hacimlerin dışa açılan birer penceresi vardır. Ayrıca ana eyvanın iki yanında bulunan kubbeli odaların da üst kısmında dışa açılan birer mazgal penceresi mevcuttur. Kuzey cephe yapının en muhteşem kısmını

M. Korkanç

oluşturmaktadır. Bu cephenin alt katı sağır yapılmış, fakat ortada medresenin yüksekliğini bir kat daha aşan anıtsal taçkapı bulunmaktadır. Taçkapının doğusuna ve batısına simetrik olarak yerleştirilen ve ikiz kaş kemerlerle belirtilen çift gözlü sofalar yapılarak, kuzey cephenin önemi kuvvetle vurgulanmıştır. Cephe duvarları dışa hafif taşıntı yapan kesme taş kornişle nihayetlenmektedir. Çatının güneydoğu köşesinde taş çörten mevcuttur, orijinalinde çatının muhtelif yerlerinde çörtlenlerin olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca çatının doğu ve batı taraflarında dörderden sekiz tane, dikdörtgen kesiti ve konik külahlı baca bulunmaktadır [21].

Yapıda sadece taş bezeme görülür. Süslemenin en yoğun olduğu eleman şüphesiz ki taçkapıdır. Taçkapıda bütün yüzeyler boş bırakılmadan süslemeye çalışılmıştır. Bezemeler alçak ve yüksek kabartma olarak oyulmuştur. Ayrıca iç kısımda mihrap, bazı kapılar ve revakların ön yüzleri çeşitli şekillerde dekore edilmiştir [21].

2.2. Yapıdan Alınan Örneklerle Ait Veriler

Niğde sarısı olarak bilinen ve yöredeki eserlerde yaygın olarak kullanılan tüfler Melendiz Tüfü olarak bilinen birimler olup, burada da en fazla kullanılan taş çeşididir. Bundan başka yörede yaygın olarak bulunan Kızılkaya İgnimbiritlerinden alınan kayaçlar da özellikle önemli tadilatların ve eklemelerin olduğu kesimlerde kullanılmıştır. Yapının özellikle alt kesimlerinde Bor yöresindeki bazalt litolojilerine çok benzer olan bazalt blokları ile yine aynı kesimde ve giriş portalı Niğde Masifine ait mermerler kullanılarak yapılmıştır. Yapının taş işçiliği oldukça muntazam ve kalitelidir. Avlu, revaklar ve diğer mekânların zeminleri de kesme taşla kaplanmıştır. Örnek alımına ilişkin olarak 2008-2009 yıllarındaki tadilatlar sırasında alınan izinler ölçüsünde yapıdan düşmüş bir daha kullanılması mümkün olmayan sarı tüf ve ignimbiritlerden 3 blok örnekleme yapılmıştır (Tablo 1). Daha sonra örneklerin mineralojik, petrografik ve jeomekanik özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvarında; ince kesitler ile toz numune, karot numunesi ve parça numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan toz numuneler üzerinde kimyasal analizler ve XRD analizleri yapılarak örneklerin mineral bileşimleri tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda ISRM [29]'de belirtilen esaslar göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 1. Ak Medreseden alınan örneklerin tanıtımı ve kayaç özellikleri

Örnek kodu	Formasyon	Örnekleme Yeri	Kaya Adı	Açıklamalar
AK1	Melendiz tüfü	Yapıda kullanılmış örnek	Sarı Tüf	Açık sarı renkli, İri taneli, yer yer boşluklu, ayrışma etkileri gözlenmiyor.
AK2	Melendiz tüfü	Yapıda kullanılmış örnek	Sarı Tüf	Kısmen AK1 örneğine göre ince taneli, makro boşlukları daha azdır.
AK3	Kızılkaya ignimbiriti	Yapıda kullanılmış örnek	İgnimbirit	Gri renkli, yer yer iri taneli pomza çakıllı, kaynaşmış ignimbirit özellikli olup, ayrışma etkisi gözlenmemektedir, makro boşluk oranı düşüktür.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. İncelenen Örneklerin Kimyasal ve Petrografik Özellikleri

Yapıda kullanılan sarı tüf ve ignimbiritler üzerinde numune hazırlama aşamalarından sonra kimyasal analizler, petrografik incelemeler ve jeomekanik deneyler yapılmıştır. İncelenen örneklerin ana element içerikleri ICP-AES yöntemi (Kanada –Acme Lab.) ile gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. İncelenen örneklerin kimyasal bileşimi

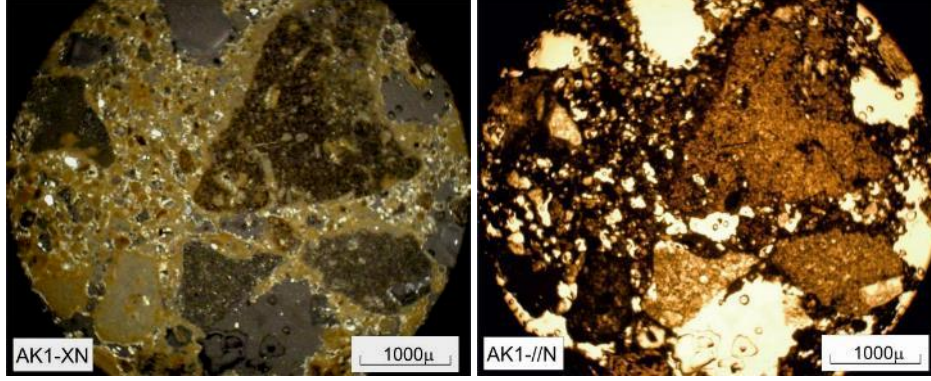
Element oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	LOI	Toplam
AK1	58,08	2,81	13,39	0,15	1,63	0,81	3,26	0,69	0,82	0,01	0,005	18,1	99,91
AK2	56,82	4,79	13,61	0,17	0,76	0,50	3,69	0,71	0,88	0,02	0,009	17,7	99,89
AK3	75,68	12,86	1,20	0,14	1,02	2,98	4,48	0,20	0,05	0,05	<0,002	1,2	99,95

Sarı tüflerin kimyasal bileşimleri birbirlerine oldukça benzer olup, demir içerikleri ile ateşte kayıp oranları ignimbirite göre oldukça yüksektir. İgnimbiritlerin ise SiO₂ ve Al₂O₃ değerleri sarı tüflere oranla belirgin olarak daha yüksek değerlerdedir.

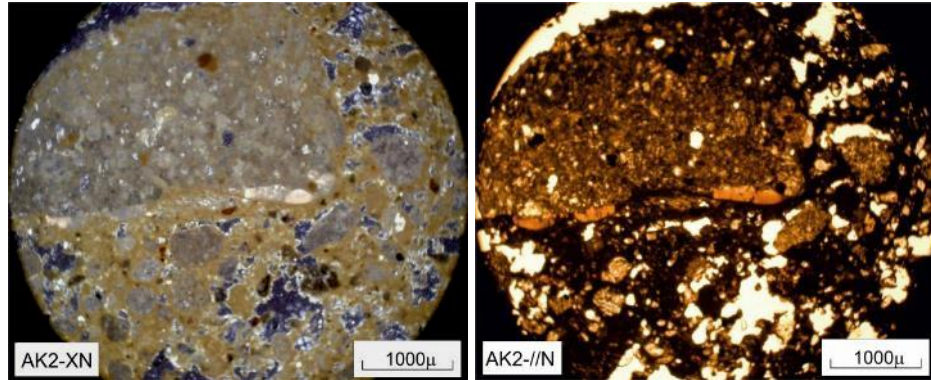
AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI

Melendiz sarı tüfleri ile Kızılkaya ignimbiritlerinden olduğu düşünülen ve yapıda kullanılmış örneklerden hazırlanan ince kesitler üzerinde petrografik incelemeler de yapılmıştır. Bu incelemelerle örneklerin; başlıca mineralojik bileşimi, dokusu, ayrışma, boşluk ve kristal boyutları, fenokristal-matriks oranları belirlenmeye çalışılmıştır.

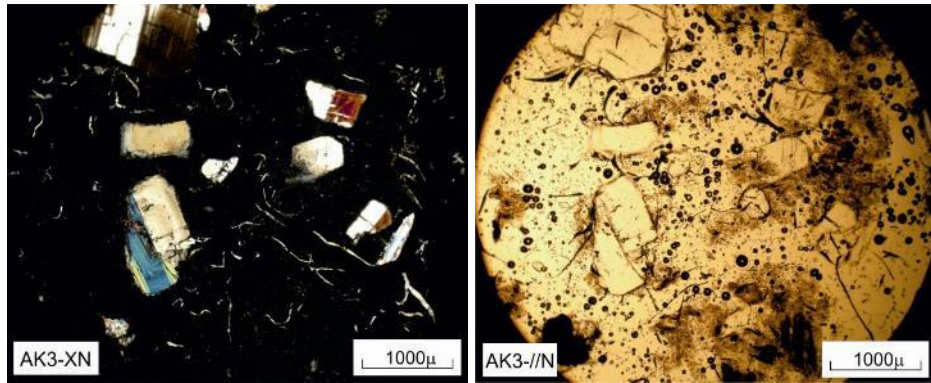
AK1 örneği, AK2 örneğine nazaran nispeten daha küçük kaya parçası bulundurmaktadır. Litolojik olarak oldukça benzer mineral içeriğine ve dokusal özelliklere sahiptir. AK1 örneği AK2 örneğine nazaran daha boşluklu ve ayrışma etkileri nispeten daha belirgindir. Kayaçta tane oranı, hamur oranından fazladır (Şekil 3, Şekil 4). AK3 örneği iyi kaynaklanmış ignimbirit özellikleri sunmaktadır. Kayaçta fenokristaller ince tanelidir. Matriks oranı, tane oranından fazladır. Yer yer opak mineraller de gözlenen kayaç, hipokristalin porfirik dokuludur (Şekil 5).



Şekil 3. AK1 örneğinin mikroskop görüntüsü a) çift nikol, b) tek nikol (büyütme 4X)



Şekil 4. AK2 örneğinin mikroskop görüntüsü a) çift nikol, b) tek nikol (büyütme 4X)

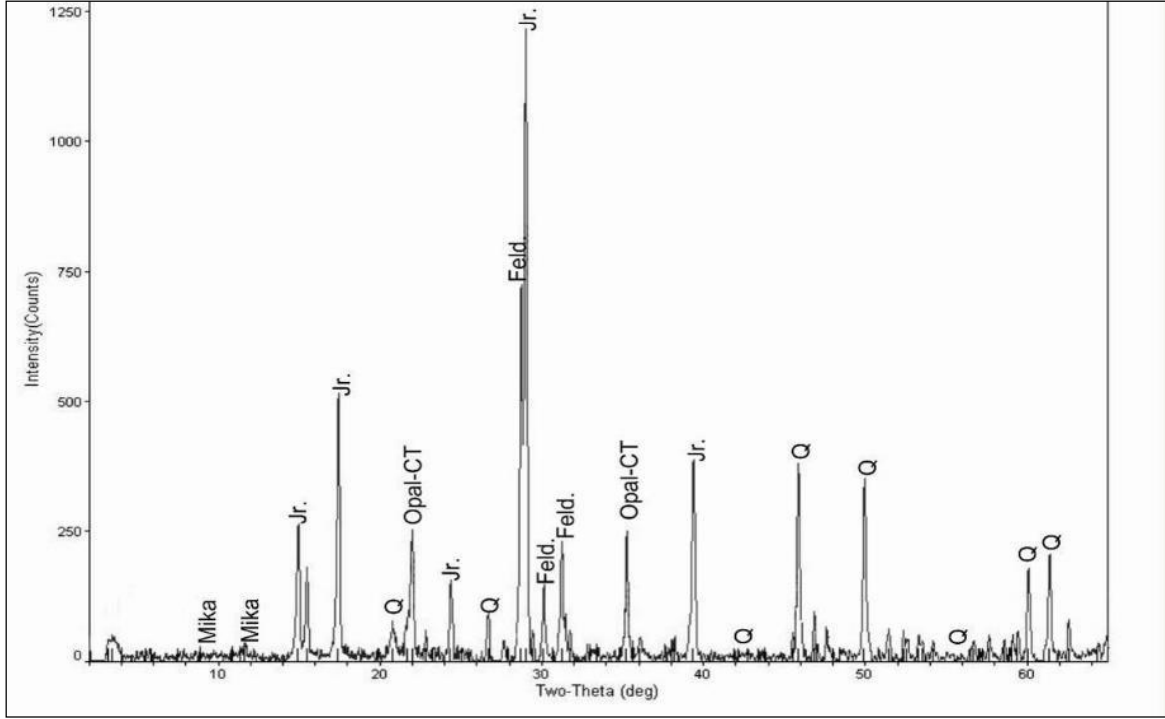


Şekil 5. AK3 örneğinin mikroskop görüntüsü a) çift nikol, b) tek nikol (büyütme 4X)

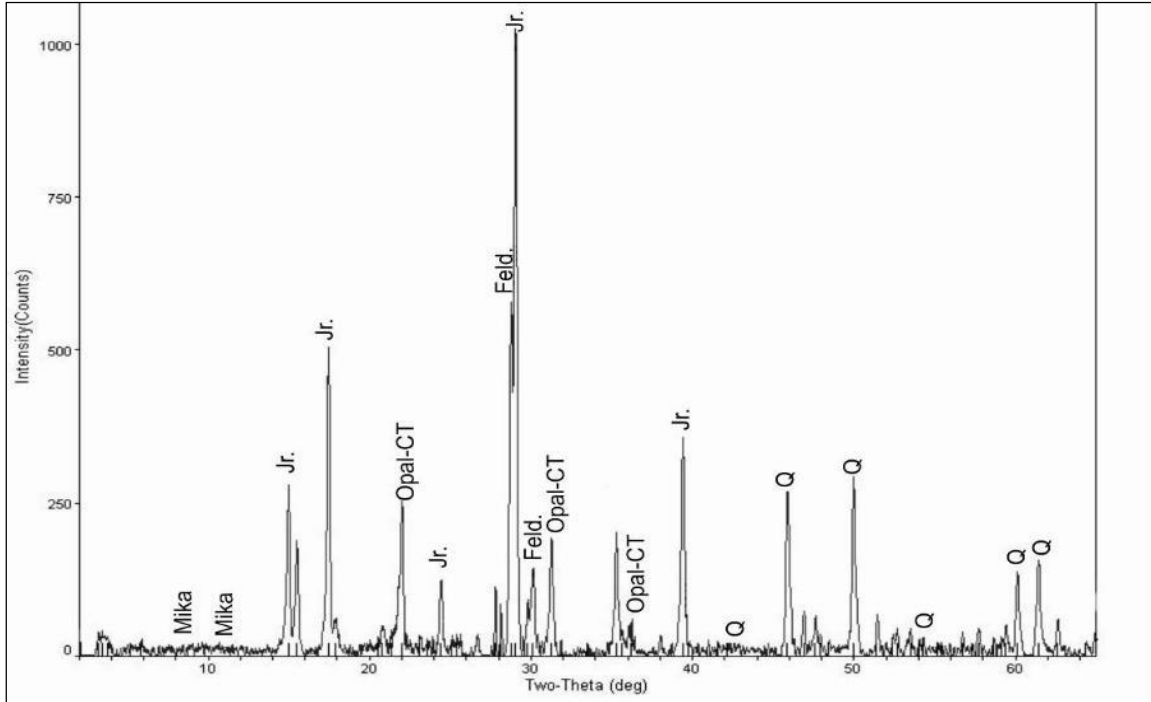
Aynı örnekler üzerinde hazırlanan toz numunelerin XRD yöntemi ile yapılan incelemelerinde AK1 ve AK2 örnekleri sarı tüflere ait örnekler olup, bu örneklerden elde edilen XRD sonuçlarına göre benzer mineral birlikeliklerine sahiptir (Şekil 6, Şekil

M. Korkanç

7). Bu örneklerde gözlenen mineraller ise sırasıyla Jarosit (Jr.), Feldispat (Feld.), Opal-CT, Kuvars (Q) ve Mika mineralleridir. İğnimbirit özelliği gösteren AK3 örneğinde ise Opal-CT, Plajiyoklas (Plj.) ve Feldispat (Feld.) mineralleri en fazla gözlenen mineraller olmuştur (Şekil 8).

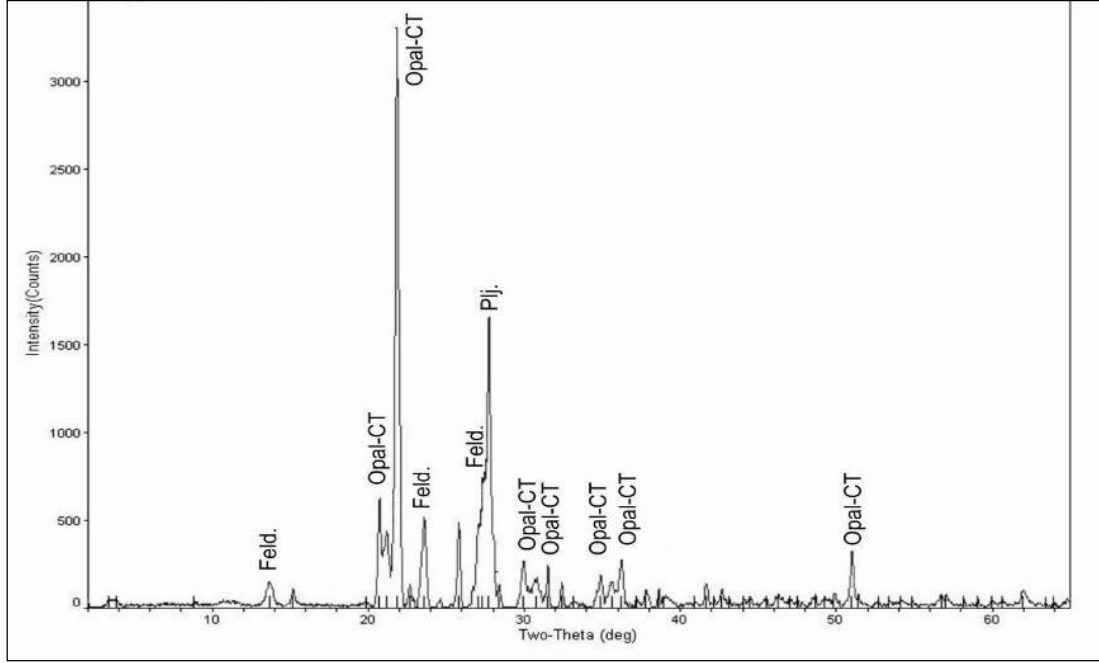


Şekil 6. AK1 örneğinin difraktometre analiz sonuçları



Şekil 7. AK2 örneğinin difraktometre analiz sonuçları

AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI



Şekil 8. AK3 örneğinin difraktometre analiz sonuçları

3.2. İncelenen Örneklerin Jeomekanik Özellikleri

Yapıda kullanılan sarı tuf ve ignimbiritler üzerinde ISRM [29] tarafından önerilen yöntemler esas alınarak; kuru (γ_d) ve doymun birim ağırlık (γ_s), ağırlıkça su emme (a_w), görünür porozite (n), kapiler su emme (C), suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (Id_2), P-dalga hızı (V_p), Böhme yüzeysel aşınma (BAV) ve tek eksenli basınç dayanımı (TBD) deneyleri yapılmıştır. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyi parça numuneler üzerinde 2 tekrarlı olarak yapılmış olup, diğer deneyler karot boyu/karot çapı oranı 2,5-3 olan karot örnekleri üzerinde en az 5 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen jeomekanik özelliklere ait ortalama veriler aşağıda sunulmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. İncelenen örneklerin bazı ortalama jeomekanik özellikleri

Örnek No	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	a_w (%)	n (%)	C (Kg/m ² /h)	Id_2 (%)	V_p (km/s)	BAV (%)	TBD (MPa)
AK1	14,85	17,13	15,37	23,26	6,39	94,08	2,74	23,00	18,88
AK2	16,29	18,35	12,64	20,99	5,81	96,87	3,23	30,75	32,24
AK3	13,68	17,00	24,21	33,78	23,77	89,33	1,82	48,68	6,43

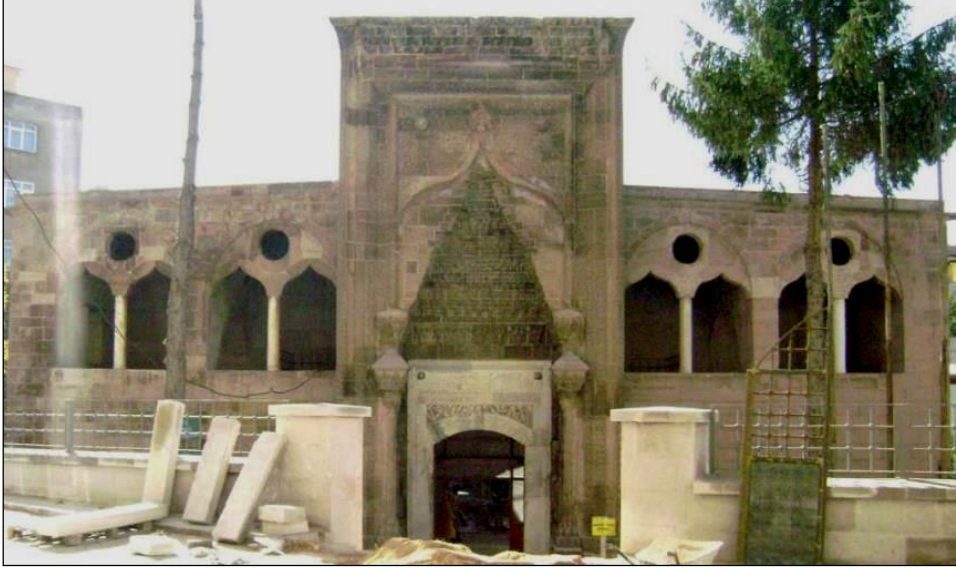
İncelenen örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlığı, doymun birim hacim ağırlık, su emme, porozitesi, kapiler su emme, P-dalga hızı, suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi, Böhme yüzeysel aşınma ve tek eksenli basınç değerlerine bakıldığında, sarı tuf örneklerinden nispeten daha yüksek jeomekanik özellikler elde edilmiştir. İgnimbiritlerin daha yüksek porozite değerlerine sahip oldukları belirlenmiş olup, kapiler su emme, suda dağılmaya karşı duraylılık indeks değerleri ile P-dalga hızları ve tek eksenli basınç dayanımları, tuf örneklerine göre bariz olarak düşüktür (Tablo 3). İncelenen örneklerin kuru birim ağırlıkları NGB [30]'e göre değerlendirildiğinde, “çok düşük” birim ağırlıklı kayaç sınıfında yer almaktadır. Örneklerin porozite değerleri NGB [30]'e göre değerlendirildiğinde “çok yüksek” poroziteye sahip kayaç sınıfında yer almaktadır. İncelenen örneklerin kapiler su emme değerleri 5,81–23,77 K/m²/h arasında olup, Sneath [31]'a göre sınıflandığında “yüksek emici” kayaç olarak sınıflandırmıştır. Örneklerin P-dalga hızları NGB [30]'e göre değerlendirildiğinde ise ignimbiritler “çok düşük” sismik hız

M. Korkanç

gurubunda yer alırken, tüfler “düşük” sismik hız sınıfında yer almaktadır. İncelenen örnekler tek eksenli basınç direnci açısından Deere ve Miller [32]’e göre değerlendirildiğinde ise “çok düşük-düşük” dirençli kayaç sınıfında yer almaktadır.

3.3. Yapıya Kullanılan Taşların Mühendislik Jeolojisi Sorunları

Ak Medrese’nin yapımında Niğde sarısı olarak bilinen tüfler en fazla kullanılan yapı taşlarıdır. İgnimbiritler de nispeten yapının daha çok üst taşıyıcı duvarlarında ve tadilat yapılan kesimlerinde kullanılmıştır. Bunun dışında daha çok alt benden duvarlarında bazı kesimlerde bazalt ve mermer blokları da devşirme taş olarak kullanılmıştır. Yapının giriş portalinde beyaz mermerler kullanılmış olup, yapının isminin de buradan geldiği belirtilmektedir [21] (Şekil 9, Şekil 10).



Şekil 9. Ak Medrese'nin ana giriş kapısının görünümü



Şekil 10. Medrese taç kapısındaki mermerlerin yakından görünümü

AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI

Yapının kuzeybatıya bakan beden duvarlarında daha belirgin olmak üzere nemin etkisi ile kapiler zonda ignimbiritlerde düşükten ileri derecede ayrışmaya kadar geçiş gösteren kesimler gözlenmektedir. Bu taşlarda özellikle kapiler zonda yüzeysel dökülmeler, kopmalar ve çiçeklenmeler gözlenmektedir (Şekil 11, Şekil 12). Kapiler yükselme bölgesindeki tüflerde ise nispeten dökülme ve parçalanma etkisi daha azdır. Bunda tüflerdeki mineralojik bileşim ve büyük boşlukların fazlalığı ile geçirimli derzlerin etkisinin büyük olduğu düşünülmektedir. Yerinde yapılan gözlemlerle yapıda belirlenen bozunma etkileri görsellerle birlikte aşağıda verilmiştir (Şekil 13 - Şekil 18).



Şekil 11. Ak Medresenin iç kısmında ignimbiritlerde nemlenme nedeni ile meydana gelen çiçeklenmeler



Şekil 12. Ak Medresede taş yüzeyinde yer yer 5 cm'yi aşan kopmalar ve yerine eklenen taş

M. Korkanç

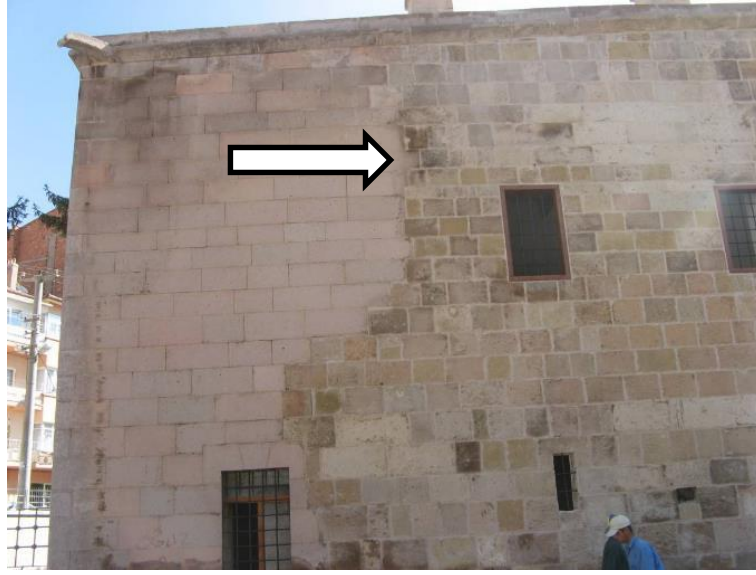


Şekil 13. Yapıda zemin suyuna bağlı kapiler yükselme bölgesindeki nemlenme etkilerine karşı alınan drenaj önlemleri



Şekil 14. Farklı litolojik özelliklerdeki taşların birlikte kullanımı ve farklı yüksekliklerdeki nemlenme sonucu bozunmalar

AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI



Şekil 15. Sonradan yapılan tadilatlarda orijinal taşla benzemeyen taşların kullanımı



Şekil 16. Taç kapı üst kesiminde yağmur ve kar sularının drenaj sisteminin çalışmaması nedeniyle süslemelerde meydana gelen ileri derecedeki bozunmalar

M. Korkanç



Şekil 17. Giriş portalini sol üst kesimindeki süslemelerdeki önemli kayıplar ve orijinal olmayan taşla yapılan değiştirme işlemi



Şekil 18. Yapının iç kesimlerinde iğnimbiritlerde kirlenme etkilerinin fazlaca görüldüğü alanlar

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapıda gözlenen bozulmalar genellikle üç ana başlık altında değerlendirilmektedir (atmosferik, biyolojik ve antropojenik). Atmosferik etkiler, donma-çözünme [33-37], termal etkiler [38-41], ıslanma-kuruma [42,43] ve tuz kristalizasyonu [44-46] olarak sıralanabilir. Biyolojik etkiler ise bitkilerin, likenlerin, mantarların, bakterilerin ve alglerin kayaların fiziksel ve kimyasal parçalanmasına doğrudan ve dolaylı katkısı olarak tanımlanmaktadır [47-50]. Antropojenik etkiler, yapı taşlarına mekanik müdahalelerin ve doğrudan insan temasının neden olduğu aşınmalar ile kötü kullanımın neden olduğu tahribatlar olarak

AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI

tanımlanmaktadır [40, 51-53]. Bu çalışmada yapılardaki bozunma sorunları tanımlanırken Vergès-Belmin [54] ve Fitzner ve Heinrichs [55]'deki çalışmalar göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Yapıdaki en yaygın bozulma türü, zemin ve yağış suyuna bağlı nemlenme etkileri sonucu oluşan bozunmalardır. Ayrıca sonradan yapılan restorasyon uygulamalarında yapının orijinal taşı yerine orijinal taşlara benzemeyen taşlar kullanılmıştır. Bu yeni taşlar, nemlenme etkilerinden ve bozunma süreçlerinden daha fazla etkilendiği gözlenmiştir.

600 yıldan beri bazı onarımlar gören yapı hala orijinal durumunu korumaktadır. 1900'lü yılların başından itibaren farklı fonksiyonlar üstlenen yapı, birçok kez önemli restorasyonlar geçirmiştir. En son 2008 yılı sonu ile 2009 yılı restorasyonu esnasında alınan izinler ölçüsünde yapıdan düşmüş ve bir daha kullanılması mümkün olmayan sarı tüf ve ignimbirit bloklarından temsilci örnekler alınmıştır. Alınan bu örnekler üzerinde yapıda kullanılan taşların karakteristik özellikleri ayrıntılı biçimde ortaya konulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre yapıda yoğun olarak kullanılan sarı tüflerden alınan nispeten farklı dokuya sahip iki örneğin kimyasal ve petrografik özellikleri birbirine oldukça yakındır. Sarı tüflerden elde edilen dayanım değerleri ignimbiritlere göre daha yüksek değerler sunmaktadır. İgnimbiritlerin porozite ve su emme değerleri tüflere göre daha yüksek olup, bu etkinin arazi gözlemleriyle de örtüşmektedir. Yapıda kullanılmış ignimbiritlerde daha ciddi bozunmalar gözlenmiştir.

Yapıda kullanılan taşlardan temel seviyesine yakın olan özellikle ignimbiritlerde zemin suyuna bağlı olarak kayaçta bazı kesimlerde önemli oranda yüzeysel taş kayıpları gözlenmiştir. 2008-2009 dönemi restorasyonu sırasında zemin suyunun etkilerinde kurtulmak amacıyla drenaj önlemlerinin alındığı gözlenmiş olup, yine de bazı kesimlerde özellikle kapiler yükselme bölgelerinde renklenmeler, çiçeklenme ile taşa direnç azalması ve sonuçta yüzeysel ve bazı kesimlerde 5 cm'yi aşan taş kayıpları gözlenmiştir. Bu etki sarı tüflerde nispeten daha azdır. Yapım sırasında temel seviyesinde sarı tüfler, ignimbiritlere oranla daha fazla tercih edilmiş olup, bu durum yapının günümüze kadar kapiler seviyedeki taşların daha az yıpranması açısından önemli bir tecrübe olarak değerlendirilmiştir. Yapının bakımsız kaldığı dönemlerde özellikle taşıyıcı duvarlarının olduğu kesimde duvara yakın toprak birikintileri nedeniyle zemin suyu etkileri daha olumsuz olarak yapıyı etkilemiştir. Yapıda günümüzde herhangi bir yapısal sorun gözlenmemekte olup, yapının gerek zemin gerekse de çatı suyu drenajının ve drenaj elemanlarının bakımlarının aksatılmadan düzenli olarak yapılmasının, yapının gelecek nesillere aktarılmasında önemli bir görev olduğu unutulmamalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma finansal olarak; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından (Proje No: 106Y220) desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Savran, "Niğde İlinde tarihi eserler üzerinde yetişen bitkilerin yapılara verdiği zarar," *Kayseri Vakıflar Bölge Müdürlüğü Düünden Bugüne Vakıflar Niğde, Vakıflar Bülteni* 2, 2004.
- [2] G. Küçükaya, *Taşların bozulma nedenleri koruma yöntemleri*, Birsen Yayınevi, 2004.
- [3] M. Korkanç, "Deterioration of different stones used in historical buildings within Niğde province," *Cappadocia, Construction and Building Materials* vol. 48, pp. 789–803, 2013.
- [4] M. Gomez-Heras and R. Fort Gonzalez, "Location of quarries of non-traditional stony materials in the architecture of Madrid: the Crypt of the Cathedral Santa Mari'a de la Almudena," *Materiales de la Construcción*, vol. 14, pp. 33–49, 2004.
- [5] Török, A. and Prikryl, R., "Current methods and future trends in testing, durability analyses and provenance studies of natural stones used in historical monuments," *Engineering Geology*, vol. 115, pp. 139–142, 2010.
- [6] F. G. Bell, "Engineering geology and building Stones of historical monuments: construction materials, geological origin, quarries," In Proc.: Marinos, K. (ed.) *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*. Rotterdam, A. A. Balkema, 1990, 1867–1880.
- [7] G. R. Rapp, *Archaeomineralogy*. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [8] D. Ergenç, E.N.C. Satık, and T. Topal, "Antique stone quarries in Turkey: a case study on tuffs in the Temple of Apollon Smintheus," *The Geological Society of London*, vol. 416, pp. 133-144, 2016.
- [9] P. L. Tucci, "Materials and techniques of architecture," in: *Marconi, C. (ed.) The Oxford Handbook of Greek and Roman Art and Architecture*, Oxford University Press, New York, 2015, pp. 241–268.
- [10] T. Topal and V. Doyuran, "Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff," *Engineering Geology*, 47, pp. 175–187, 1997.
- [11] T. Topal and V. Doyuran, "Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey." *Environmental Geology*, vol. 34, pp. 5-20, 1998.

- [12] T. Topal, “Quantification of weathering depths in slightly weathered tuffs.” *Environmental Geology*, vol. 42, pp. 632–641, 2002.
- [13] T. Topal and B. Sözmen, “Deterioration mechanisms of tuffs in the Midas monument.” *Engineering Geology*, vol. 68, pp. 201–223, 2003.
- [14] A. B. Yavuz, “Durability assessment of the Alaçatı tuff (Izmir) in western Turkey,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 67, pp. 1909–1925, 2012.
- [15] M. Y. Çelik, H. Akbulut and A. Ergül, “Water absorption process effect on strength of Ayazini tuff, such as the uniaxial compressive strength (UCS), flexural strength and freeze and thaw effect,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 71, pp. 4247–4259, 2014.
- [16] M. Korkanç, A. Tuğrul, A. Savran and F.Z. Özgür, “Structural–geological problems in Gümüşler archeological site and monastery.” *Environmental Earth Sciences*, vol. 73 (8), pp. 4525-4540, 2015.
- [17] T. Topal, B.E. Deniz and N. Şahin Güçhan, “Deterioration of Limestone Statues at Mount Nemrut (Adiyaman, Turkey),” *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analyses, and Restoration*, vol. 9 (3), pp. 244-264, 2015.
- [18] İ. İnce, A. Bozdağ, M.B. Tosunlar, M.E. Hatır and M. Korkanç, “Determination of deterioration of the main facade of the Ferit Paşa Cistern by non-destructive techniques (Konya, Turkey),” *Environmental Earth Sciences*, vol. 77 pp. 420, 2018.
- [19] M.E. Hatır, M. Korkanç and M. E. Başar, M.E., “Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, pp. 3465–3478, 2019.
- [20] M. Korkanç, M.Y. Hüseyinca, M.E. Hatır, M.B. Tosunlar, A. Bozdağ, L. Özen and İ İnce, “Interpreting sulfated crusts on natural building stones using sulfur contour maps and infrared thermography.” *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, pp. 378, 2019
- [21] M. Özkarcı, *Niğde’de Türk Mimarisini*, Türk Tarih Kurumu Basım Evi, Ankara, 2001.
- [22] M. Korkanç and A. Savran, “Impact of the surface roughness of stones used in historical buildings on biodeterioration,” *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 279-294, 2015.
- [23] M. Korkanç and B. Solak, “Estimation of engineering properties of selected tuffs by using grain/matrix ratio,” *African Earth Sciences*, vol. 120, pp. 160-172, 2016.
- [24] M. Korkanç, “Characterization of building stones from the ancient Tyana aqueducts, Central Anatolia, Turkey: implications on the factors of deterioration processes,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 77, pp. 237-252, 2018.
- [25] M. Korkanç ve A. Savran, “Niğde Yöresindeki Tarihi Yapılarda Kullanılan Taşlar ve Sorunları,” Tübitak Projesi Proje No: 106Y220, 375 sayfa, 2010.
- [26] M. Korkanç ve A. Turgut, “Niğde yöresi tarihi yapılarında kullanılan taşların kaynak alan araştırmaları,” Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 3-5 Ekim, s. 167-176, 2019.
- [27] A. Gabriel, *Monuments Turcs D’Anatolie I, Kayseri- Niğde*, Du Ministère Turc de L’Instruction Publique, Paris, 1931.
- [28] A. Kuran, “Karamanlı Medreseleri,” *Vakıflar Dergisi*, sayı: 8, ss. 209- 223, 1969.
- [29] ISRM (International Society for Rock Mechanics), The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay and Hudson (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey., 2007 p.628.
- [30] NBG (Norwegian Group for Rock Mechanics), 1985. Engineering Geology and Rock Engineering. Handbook No 2, 249 pp.
- [31] R. Snethlage, *Leitfaden zur Steinkonservierung*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart., 2005.
- [32] D.U. Deere and R.P. Miller, “Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock,” Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapon Laboratory, New Mexico, 1966.
- [33] M. Fener and İ. İnce, “Effects of the freeze–thaw (F–T) cycle on the andesitic rocks (Sille-Konya/Turkey) used in construction building,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 109, pp. 96-106, 2015.
- [34] M.V. Gökçe, İ. İnce, M. Fener, T. Taşkıran and K. Kayabalı, “The effects of freeze–thaw (F–T) cycles on the Gödene travertine used in historical structures in Konya (Turkey),” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 127, pp. 65-75, 2016.
- [35] J. Ondrasina, D. Kirchner and S. Siegesmund, “Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: a long-term experiment,” *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 205(1), pp. 9-18, 2002.
- [36] S. Siegesmund, T. Weiss and A. Vollbrecht, “Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction,” *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 205(1), pp. 1-8, 2002.
- [37] D.M. Freire-Lista, R. Fort and M.J. Varas-Muriel, “Freeze–thaw fracturing in building granites,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 113, pp. 40-51, 2015.

AK MEDRESENİN (NİĞDE) YAPIMINDA KULLANILAN TAŞLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE SORUNLARI

- [38] P. Wang, J. Xu, S. Liu, H. Wang and S. Liu, "Static and dynamic mechanical properties of sedimentary rock after freeze-thaw or thermal shock weathering," *Engineering Geology*, vol. 210, pp. 148-157, 2016.
- [39] A. Bonazza, C. Sabbioni, P. Messina, C. Guaraldi and P. De Nuntiis, "Climate change impact: mapping thermal stress on Carrara marble in Europe," *Science of the Total Environment*, vol. 407(15), pp. 4506-4512, 2009.
- [40] T.R. Paradise, "Sandstone architectural deterioration in Petra, Jordan," in Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice June 19–24, pp. 145-154. 2000.
- [41] M. Gómez-Heras, B.J. Smith and R. Fort, "Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue," *Geomorphology*, vol. 78(3-4), pp. 236-249, 2006.
- [42] K. Hall and A. Hall, "Weathering by wetting and drying: some experimental results," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 21(4), pp. 365-376, 1996.
- [43] A.S. Goudie, "Quantification of rock control in geomorphology," *Earth-Science Reviews*, vol. 159: pp. 374-387, 2016.
- [44] M. Ulusoy, "Different igneous masonry blocks and salt crystal weathering rates in the architecture of historical city of Konya," *Building and Environment*, vol. 42(8), pp. 3014-3024, 2007.
- [45] D. Camuffo, "Physical weathering of Stones," *Science of The Total Environment*, vol. 167(1), pp. 1-14, 1995.
- [46] H. Özşen, A. Bozdağ and İ. İnce, "Effect of salt crystallization on weathering of pyroclastic rocks from Cappadocia, Turkey," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 10(12), pp. 258, 2017.
- [47] N. Cutler and H. Viles, "Eukaryotic microorganisms and stone biodeterioration," *Geomicrobiology Journal*, vol. 27(6-7), pp. 630-646, 2010.
- [48] T. Warscheid and J. Braams, "Biodeterioration of stone: a review," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 46(4), pp. 343-368, 2000.
- [49] T. Warscheid, "Integrated concepts for the protection of cultural artifacts against biodeterioration," in: *Of Microbes and Art*, Springer, Boston, MA, 2000, pp. 185-201.
- [50] E. Doehne and C.A. Price, *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Getty Publications, 2010.
- [51] Pope, G.A., T.C. Meierding, and T.R. Paradise, "Geomorphology's role in the study of weathering of cultural stone," *Geomorphology*, vol. 47(2-4), pp. 211-225, 2002.
- [52] L. Zakar and K.K. Eyüpgiller, *Mimari Restorasyon Koruma Teknik ve Yöntemleri*, ed. R. Güngör. İstanbul: Ömür Matbaacılık A.Ş. 2015.
- [53] J. Ashurst and F.G. Dimes, "Conservation of Building and Decorative Stone," Butterworth–Heinemann Series in *Conservation and Museology*, Oxford and Woburn: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [54] V. Vergès-Belmin, *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*, ICOMOS, 2008.
- [55] B. Fitzner and K. Heinrichs, "Damage diagnosis on stone monuments-weathering forms, damage categories and damage indices, in Understanding and managing stone decay," V.H. In: Pirkryl R, Editor, The Karolinum Press: Prague. 2002, p. 11-56.





THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE ADDITIVE PRODUCED FROM DIFFERENT CALCIUM SOURCES TO STRENGTH OF BONE CEMENT

Nida GELİBOLU¹, Özge Can ÖZTÜRK², Nevin KARAMAHMUT MERMER³, Fatma Tuğçe ŞENBERBER⁴, Nurcan TUĞRUL^{5,*}, Mehmet Burçin PİŞKİN⁶

^{1,2,3,5} Yıldız Technical University, Department of Chemical Engineering, 34142, Istanbul, Turkey

⁴ Nisantasi University, Department of Civil Engineering, 34398, Istanbul, Türkiye

⁶ Yıldız Technical University, Department of Bioengineering, 34142, Istanbul, Turkey

ABSTRACT

Acrylic bone cement at high strength is produced by adding hydroxyapatite additive which was produced using two different calcium sources ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3) was aimed. Seashell was used as a CaCO_3 source. Characterizations were performed using XRD, and FT-IR. Thermal behaviours and surface morphologies were determined using DTA/TG and SEM techniques. The addition of hydroxyapatite synthesized from $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3 increased the compressive strength (from 74 MPa to 106 MPa and 103 MPa) of the resultant cements respectively. These new bone cements have mechanical strengths comparable with commercially available cements and are believed to be more biocompatible since hydroxyapatite is a natural mineral present in the bone structure.

Keywords: Acrylic bone cement, Hydroxyapatite, Seashell, Characterization, Compression strength

FARKLI KALSİYUM KAYNAKLARINDAN ÜRETİLMİŞ HİDROKSİAPATİTİN KEMİK ÇİMETOSU DAYANIMINA ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, iki farklı kalsiyum kaynağı ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3) kullanılarak üretilen hidroksiapatit katkısı eklenerek yüksek mukavemetli akrilik kemik yapıştırıcısı üretilmiştir. CaCO_3 kaynağı olarak deniz kabuğu kullanılmıştır. Üretilen örnekler, XRD ve FT-IR kullanılarak karakterize edilmiştir. Termal davranış ve yüzey morfolojileri DTA/TG ve SEM teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve CaCO_3 kullanılarak üretilen hidroksiapatit ilavesi, ortaya çıkan yapıştırıcıların basınç dayanımını (74 MPa'dan 106 MPa ve 103 MPa'ya) arttırmıştır. Bu yeni kemik yapıştırıcıları, ticari olarak temin edilebilen örneklerle karşılaştırılabilir mekanik dayanımlara sahiptir ve hidroksiapatitin kemik yapısında mevcut doğal bir mineral olduğu için daha biyolojik olarak uyumlu olduğuna inanılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Akrilik kemik yapıştırıcısı, Hidroksiapatit, Deniz kabuğu, Karakterizasyon, Basınç mukavemeti

1. INTRODUCTION

In orthopedics recovery and regeneration of the human bones are common challenge. Titanium, titanium alloy and 316L stainless steel materials have been utilized in bone tissue substitution. Bone cement is used to fix to prosthesis into bone [1].

Polymethylmethacrylate (PMMA) and related polymers have been used more than 40 years as bone cement in orthopedic surgery and dentistry, is the most effective synthetic biomaterial to fix prosthesis into bone. Bone cement is generally used as grouting agent between bone and the prosthesis and it provides transfer of the load from the prosthesis to bone [2-4].

Acrylic bone cements include two phases, a powder and a liquid. Generally, the ratio of powder/liquid is 2:1. The powder consists of PMMA as a polymer, benzoyl peroxide (BPO) as a polymerization initiator, barium sulphate (BaSO_4) as a radiopacifier. The liquid phase consists of methylmethacrylate (MMA) as a monomer, N,Ndimethylparatoluidine (DMPT) as an activator [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ntugrul@yildiz.edu.tr, ntugrul@hotmail.com

Geliş / Recieved: 18.06.2019 Kabul / Accepted: 15.02.2020 doi: 10.28948/ngumuh.579474

Hydroxyapatite (HAp - $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) has similar properties with the mineral composition of bones and teeth that used in orthopedic, dental and maxillofacial applications. Hydroxyapatite is a material that is proved its biocompatibility, osteoconductive properties and commonly used in orthopedics. HAp can be obtained from biogenic materials such as eggshell [6-8], seashell [9], coral [10], and by some synthetic chemical methods. Production of HAp can be succeeded by using hydrothermal reactions [11], sol-gel methods [12], solid state reactions [13, 14] and mechano-chemical methods by using of different starting materials [18]. Due to the structure properties of HAp, many studies are carried out about its effect on bone cement.

In recent years, many studies are carried out to improve mechanical, rheological, biological and radiopacity properties of bone cement. For this purpose, some additives such as hydroxyapatite, chitosan, antibiotics, titanium dioxide, carbon nanotubes etc. are added into bone cement.

Serbetci et al. (2002), improved bone cement including hydroxyapatite and was aimed to investigate the biocompatibility properties of this cement. The bone cement with 7% wt HAp additive was prepared and was compared with tissue reaction of produced bone cement and tissue reaction of commercial bone cement. For in vivo experiments, white rabbits were used. The pathology pattern taken in 1st, 3rd, 7th days showed that the bone cement with 7% wt hydroxyapatite was more biocompatible than commercial bone cement [15]. In another study performed by Korkusuz et al. (2000), production of new bone cements with high mechanical strengths, low setting temperature and composition comparable with commercially available cements were aimed. After addition of 8% wt HAp, polymerization temperature decreased from 111°C to 87°C and compressive strength increased from 110 MPa to 122 MPa [16]. Zebarjad et al. (2011), performed wear, compression and three-point bending tests to measure performance of bone cement with hydroxyapatite. The wear rate decreased by increasing in hydroxyapatite content and the compression strength increased with 2.5% wt hydroxyapatite additive. The results of three-point bending tests showed that the bone cement with 2.5 wt % hydroxyapatite had maximum bending strength value and modulus. Increasing amount of hydroxyapatite additive from 2.5 wt % to 10 wt % did not affect the bending properties significantly [17]. Phakatkar et al. (2020), examined the effects of magnesium phosphate and nanofibers of hydroxyapatite addition to nanocomposites of PMMA bone cement on the materials' mechanical and biological properties [18]. Che et al. (2019), prepared the modified bone cement with the addition of hydroxyapatite and PMMA at different morphologies [19]. Ayatollahi et al. (2018), modified the bone cement with nano particles of hydroxyapatite and examined tension-shear behaviour [20].

The aim of this study was to produce bone cements with high mechanical strength. For this purpose, hydroxyapatite additives produced from different raw materials were used and various compositions with different hydroxyapatite ratios were prepared. The effect of hydroxyapatite additive on the compressive strength of the bone cement was examined. Prepared samples were characterized and compared with each other using the techniques of XRD, FT-IR, SEM and thermal analyses.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Materials

Calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), phosphoric acid (H_3PO_4) (purity \geq 85%) and ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (purity \geq 96%) were obtained from Merck Chemicals. Polymethylmethacrylate ($(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_n$) and dimethyl para toluidine ($\text{C}_9\text{H}_{13}\text{N}$) having a minimum purity of 99% were supplied from Alfa Aesar. Barium sulphate (BaSO_4) was obtained from Carlo Erba. Benzoyl peroxide ($[\text{C}_6\text{H}_5\text{C}(\text{O})]_2\text{O}_2$) and methyl methacrylate ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) (purity \geq 98,5%) received from Sigma Aldrich. Sea shells were retrieved from Tekinler Sea Word. All of the sea shells were crushed and ground using a Retch Agate mortar and sieved using 150 μm sieve. Sea shells were calcined at 900°C for 3 hours. As a reference for the comparison of bone cements characteristic features, a commercial bone cement (ORCEM Standard viscosity bone cement produced by ORTHOPRO Company) was used.

2.2. Preparation of hydroxyapatite

Hydroxyapatite powder was synthesized using two different kinds of calcium sources. The solutions of Ca^{2+} agent and H_3PO_4 were mixed in hydrothermal conditions using magnetic stirrer. Experimental conditions in the synthesis of hydroxyapatite were selected as Ca/P ratio of 1.67, reaction temperature of 75°C, reaction time of 4 hours. Calcium agent was determined as calcium hydroxide [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] for the first synthesis process, and sea shell for the second synthesis process. After agitation process, the solutions were aged for 4, 24, 48 and 72 hours at room temperature in a dark place, washed with ethyl alcohol and dried in an oven at 105°C for 24 hours. Dried samples were calcined at 1100°C for 2 hours.

THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE ADDITIVE PRODUCED FROM DIFFERENT RAW MATERIALS TO STRENGTH OF BONE CEMENT

Each product was coded by initial letters of the raw materials (C: Calcium hydroxide and S: Sea shell), and agitation time. For instance, “C-24” indicated the product synthesized hydroxyapatite at agitation time of 24 hours using the calcium source of $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

2.3. Preparation of bone cement reinforced hydroxyapatite

Acrylic bone cements were produced by hand mixing of the powder and liquid phases. The powder phase consisted of 87.5% *wt* PMMA, 2.5% *wt* benzoyl peroxide (BPO), 10% *wt* barium sulphate (BaSO_4). The liquid phase consisted of 99.17% methylmethacrylate (MMA), 0.83% N,Ndimethylparatoluidine (DMPT).

Hydroxyapatite samples synthesized using the different calcium sources ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ and sea shell) were selected at the proper crystallinity features to add the powder mixture of 40 g. The ratio of powder/liquid was prepared as 2:1. Molds, in accordance with ASTM F 451 standard, were filled with the mixture after hand mixing process. Specimens were removed from molds after one hour and compression tests were performed at room temperature after 24 hours.

Each product was coded by initial letters of the raw materials (C: Calcium hydroxide and S: Sea shell), agitation time of hydroxyapatite and addition amount of hydroxyapatite to the bone cement composition. For instance, “C-48-0.5” indicated the product bone cement composition using the calcium source of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at agitation time of 48 hours and addition amount was 0.5 g.

2.4. Characterizations of the synthesized products

The synthesized samples were identified with a Philips PANalytical Xpert Pro diffractometer (XRD) analyses by using a Cu-Ka tube at 45 kV and 40 mA in the 2θ range of $20 - 80^\circ$. For the characterization of synthesized hydroxyapatites and bone cements, a Perkin Elmer Spectrum One FT-IR with the universal diamond/Zn attenuated total reflectance (ATR) sampling accessory was used in a wavenumber range of $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$. Thermal decomposition of bone cements synthesized from the calcium sources of sea shell and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ were studied by thermal analyses (TG-DTA) techniques. For thermal analysis, a Perkin Elmer Diamond DTA/TG was used. Thermal behaviors of samples were in the temperature range of $50 - 550^\circ\text{C}$ and heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ in platinum crucibles under a nitrogen atmosphere. The surface morphologies of samples were examined under a scanning electron microscope (SEM, CamScan Apollo 300 Field-Emission) at 20 kV and at the magnification scales between 250 and 20.000. The compressive strength of bone cements with hydroxyapatite additive were determined according to ASTM F 451 standard. Bone cement specimens were molded in steel molds ($\text{Ø}=6.0\pm 0.1 \text{ mm}$, $L=12.0\pm 0.1 \text{ mm}$) for one hour and end of specimen grounded with P240 silicon carbide abrasive in accordance with the standard. After 24 hours, compressive strength test was performed by constantly increasing load with simultaneous recording of load versus deformation using Hounsfield tensile test machine. A constant speed of 20 mm/min was applied. The average compressive strength was calculated from results of 5 specimens.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 XRD Results

The calcium sources used in experiments were calcium hydroxide and sea shell. According to XRD results, calcium hydroxide was identified with the powder diffraction file (pdf no.) of “01-078-0315, ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)” and XRD score of 91. Sea shell was identified with the pdf no. of “01-076-0606, (CaCO_3)” and XRD score of 77 —when all the peak intensities (%) and peak locations are matched perfectly with the reference card, the XRD score of the analysed mineral is equal to 100—.

After the synthesis of hydroxyapatite, products were determined as “ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ” with pdf no. of 00-024-0033. XRD scores of synthesized hydroxyapatite samples are given in Table 1. In Table 1, XRD scores increased with the increasing aging time until 48 hours, and the highest XRD scores are obtained at the agitation time of 48 hours for both of calcium sources. The XRD results indicated that both sources of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3 can be used in hydroxyapatite preparation. The XRD patterns of synthesized hydroxyapatite samples at the agitation time of 48 h for both of calcium sources are presented in Figure 1.

Table 1. XRD results of the synthesized hydroxyapatite

Raw material source	Aging time (h)	Product Code	Chemical Formula	XRD Scores
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	4	00-024-0033	$\text{C}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	82
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	24	00-024-0033	$\text{C}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	83
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	48	00-024-0033	$\text{C}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	84
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	72	00-024-0033	$\text{C}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	81

N. Gelibolu, Ö.C. Öztürk, N.K. Mermer, F.T. Şenberber, N. Tuğrul, M.B. Pişkin

Sea shell (CaCO ₃)	4	00-024-0033	C ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	80
Sea shell (CaCO ₃)	24	00-024-0033	C ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	80
Sea shell (CaCO ₃)	48	00-024-0033	C ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	88
Sea shell (CaCO ₃)	72	00-024-0033	C ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	83

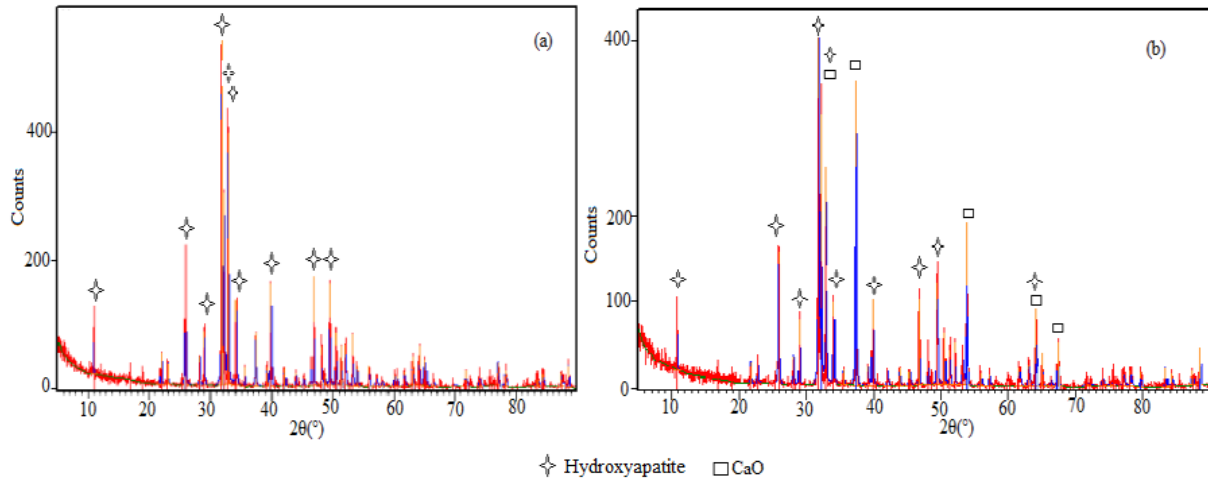


Figure 1. XRD patterns of synthesized hydroxyapatite with 48 h aging
a. with Ca(OH)₂, **b.** with Sea shell (CaCO₃)

The hydroxyapatite samples, which has the highest XRD scores for both C and S sets, added to bone cement. The XRD patterns of bone cement with hydroxyapatite additive (0.5, 1, 1.5 and 2 g amounts) are shown in Figure 2 and Figure 3. All peaks related to bone cement with 0.5, 1, 1.5 and 2 g hydroxyapatite additive (from both C and S) were in accordance with each other and peaks of reference bone cement. According to the XRD results, hydroxyapatite addition didn't have any adverse effect to bone cement composition.

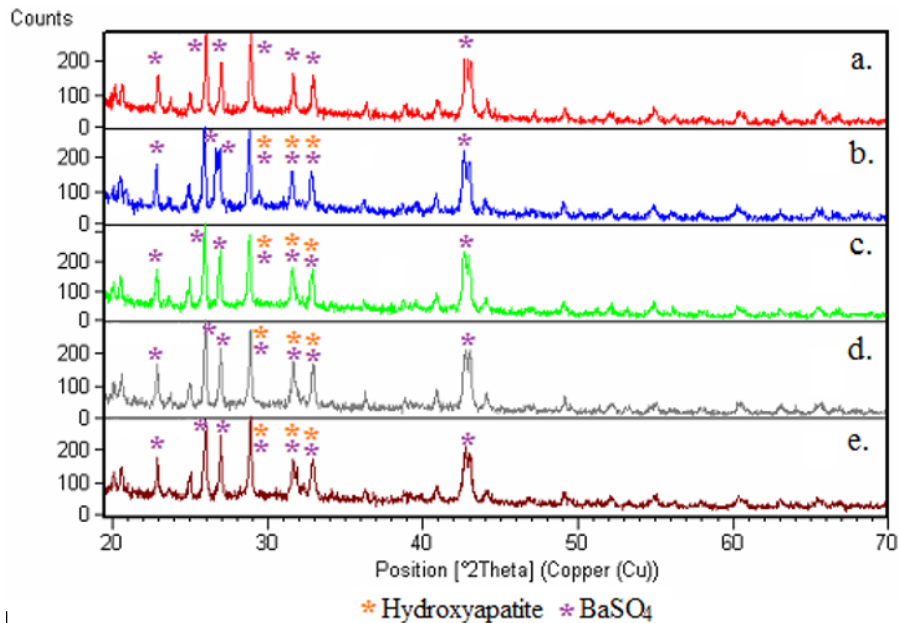


Figure 2. XRD patterns of the bone cements, a. Reference, b. C-48-0.5, c. C-48-1, d. C-48-1.5, e. C-48-2

THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE ADDITIVE PRODUCED FROM DIFFERENT RAW MATERIALS TO STRENGTH OF BONE CEMENT

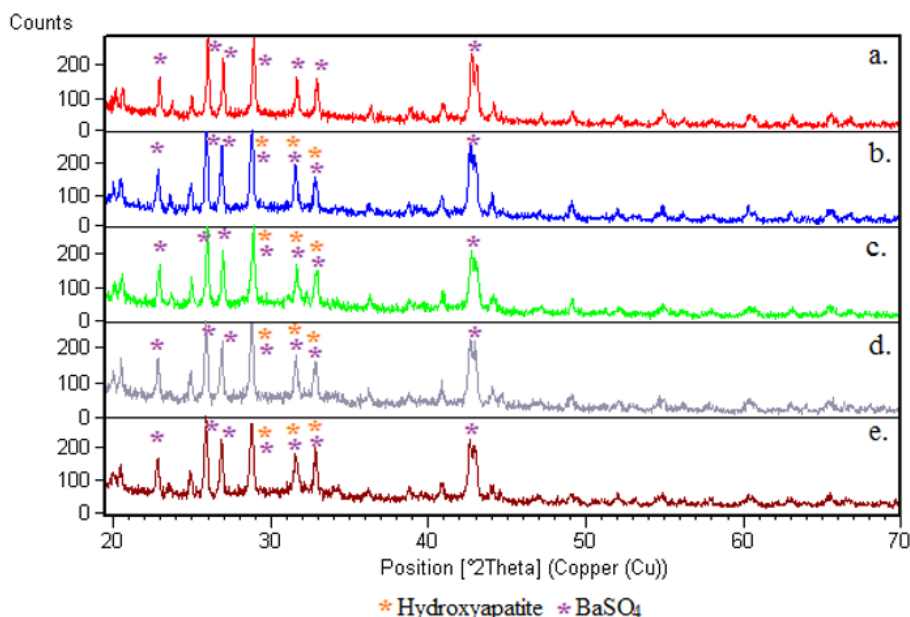


Figure 3. XRD patterns of the bone cements, a. Reference, b. S-48-0.5, c. S-48-1, d. S-48-1.5, e. S-48-2

3.2. FT-IR results

FT-IR spectra of synthesized hydroxyapatite from Ca(OH)_2 and sea shell are shown in Figure 4. For the synthesized hydroxyapatite from Ca(OH)_2 , bands due to the OH stretching were at 3572 cm^{-1} and 2982 cm^{-1} . Bands observed at 1085 and 1028 cm^{-1} are assigned to asymmetric stretching vibration mode of PO_4^{2-} groups. Symmetric stretching vibration mode bands of PO_4^{2-} occurred at 961 cm^{-1} and also the bands observed at around 672 cm^{-1} are assigned to the bending vibration mode of OPO. For the synthesized hydroxyapatite from sea shell, bands due to the OH stretching were at 3572 cm^{-1} and 2976 cm^{-1} . Bands observed at 1087 and 1022 cm^{-1} are assigned to asymmetric stretching vibration mode of PO_4^{2-} groups. Symmetric stretching vibration mode bands of PO_4^{2-} occurred at 961 cm^{-1} and also the bands observed at around 673 cm^{-1} are assigned to the bending vibration mode of OPO. The obtained characteristic band values for the C and S sets are good agreement with the literature. [6].

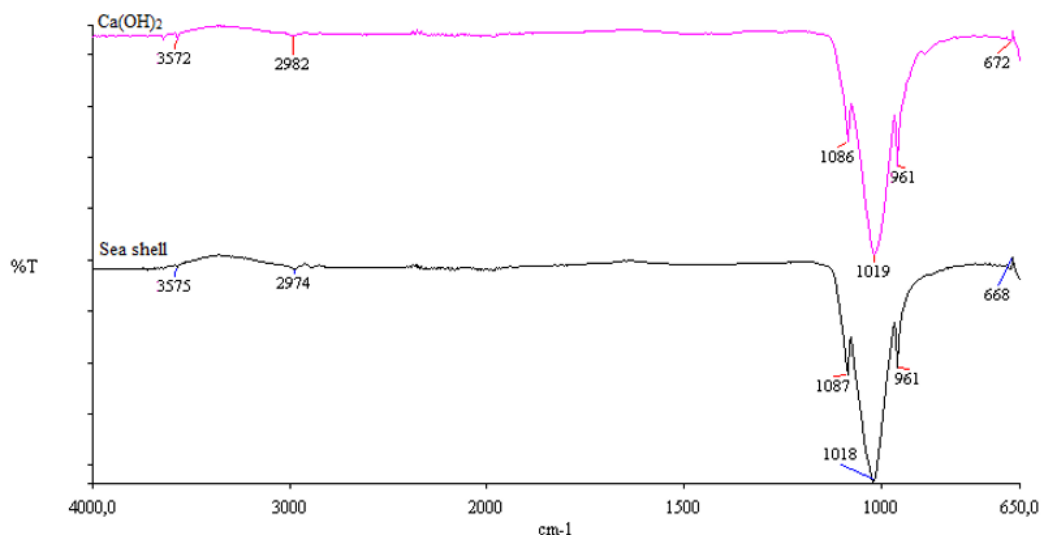


Figure 4. FT-IR spectra of synthesized hydroxyapatite using Ca(OH)_2 with 48 h aging and sea shell with 48 h aging

The FT-IR spectra comparison of bone cement with hydroxyapatite additive (0.5, 1, 1.5 and 2 g amounts) are shown in Figure 5 and Figure 6.

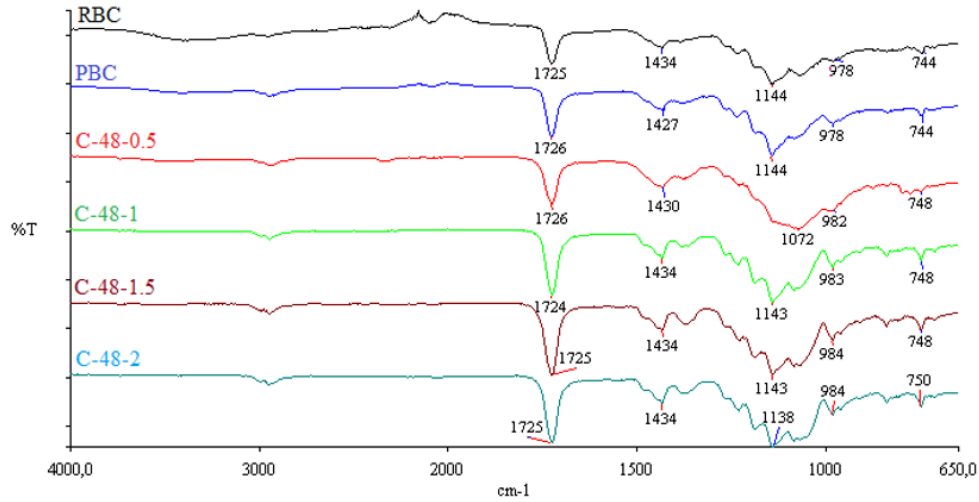


Figure 5. FT-IR spectra of the **a.** Reference bone cement (RBC), **b.** Produced cement without hydroxyapatite (PBC), **c.** C-48-0.5 **d.** C-48-1 **e.** C-48-1.5 **f.** C-48-2

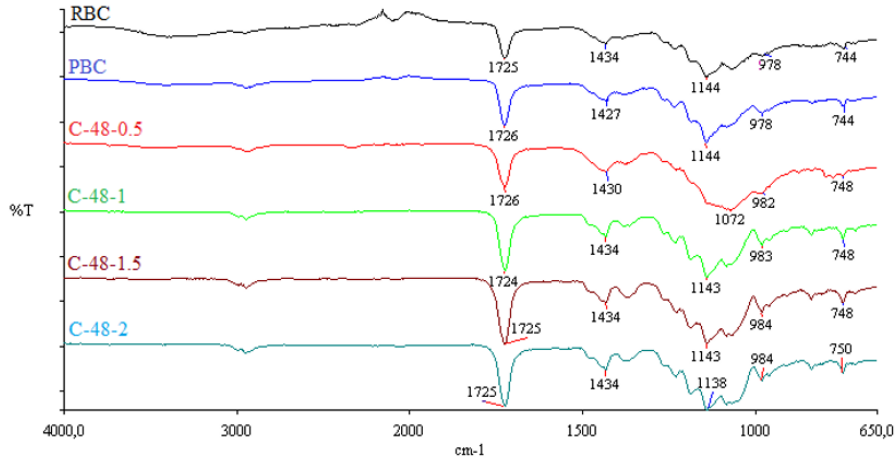


Figure 6. FT-IR spectra of the **a.** Reference bone cement (RBC), **b.** Produced cement without hydroxyapatite (PBC), **c.** S-48-0.5 **d.** S-48-1 **e.** S-48-1.5 **f.** S-48-2

All peaks related to bone cement with 0.5, 1, 1.5 and 2 g hydroxyapatite additive were in accordance with each other's and peaks of reference bone cement. The FT-IR results of hydroxyapatite added bone cements indicate that characteristic bands of bond cements are constant and hydroxyapatite successfully bonded to polymeric cement.

3.3. Surface Morphologies of Samples

The SEM morphologies of hydroxyapatite produced using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with different aging times are given Figure 7. As it is seen from Figure 7, the agglomerated angled particle were obtained in use of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as calcium source. The particle sizes of hydroxyapatite produced with 4 h aging were between 246-818 nm. The average particle size was determined as 475 nm. The particle sizes of hydroxyapatite produced with 24 h aging were found to be between 136-318 nm. The average particle size was determined as 246 nm. The particle sizes of hydroxyapatite produced with 48 h and 72 h aging were between 255-655 and 230-473 nm and the average particle size was determined as 350 nm and 340 nm, respectively.

THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE ADDITIVE PRODUCED FROM DIFFERENT RAW MATERIALS TO STRENGTH OF BONE CEMENT

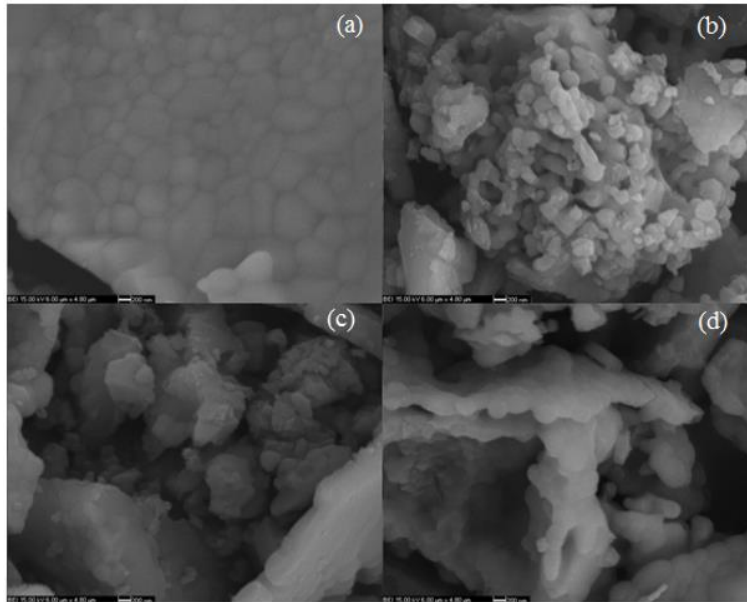


Figure 7. SEM images of hydroxyapatite produced from produced from Ca(OH)_2 ;
a. Produced with 4 h aging **b.** Produced with 24 h aging **c.** Produced with 48 h aging **d.** Produced with 72 h aging

The SEM morphologies of hydroxyapatite produced using sea shell with different aging times are given Figure 8. As it is seen from Figure 8, generally agglomerated and rounding particles were synthesized. The particle sizes were decreased and agglomeration was increased with the increasing aging time. The particle sizes of hydroxyapatite produced with 4 h aging were between 236-490 nm. The average particle size was determined as 388 nm. The particle sizes of hydroxyapatite produced with 24 h aging were found to be between 335-975 nm. The average particle size was determined as 540 nm. The particle sizes of hydroxyapatite produced with 48 h and 72 h aging were between 270-1150 and 316-686 nm and the average particle size was determined as 650 nm and 450 nm, respectively.

In the comparison of Figure 7 and 8, agglomeration of particle increased in the use of CaCO_3 . This result will be essential in the potential applications of modification of hydroxy apatite added bone cement.

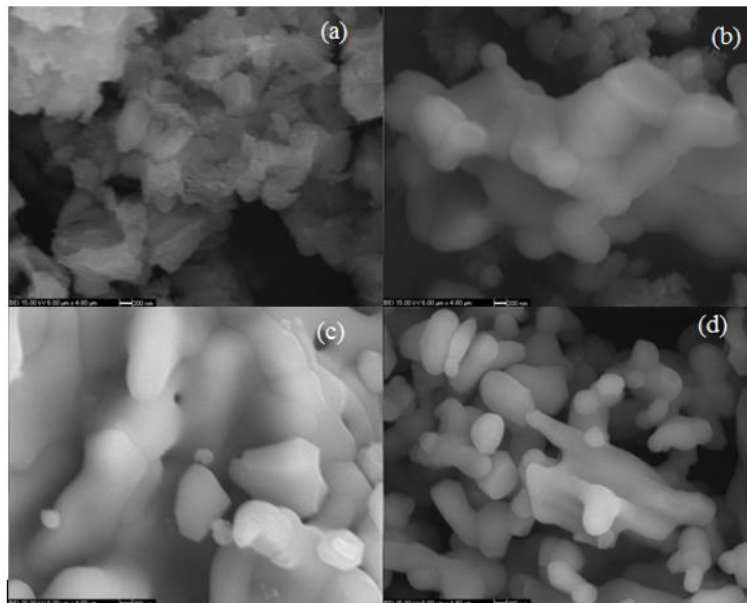


Figure 8. SEM images of hydroxyapatite produced from produced from sea shell (CaCO_3);
a. Produced with 4 h aging **b.** Produced with 24 h aging **c.** Produced with 48 h aging **d.** Produced with 72 h aging

The SEM morphologies of bone cements are given Figure 9. The particle sizes of reference bone cement were between 21-75 μm . The average particle size was determined as 42 μm . The particle sizes of produced bone cement without hydroxyapatite were found to be between 14-76 μm . The average particle size was determined as 31 μm . The particle sizes of bone cements consisting of 0.5 g synthesized hydroxyapatite from $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with 48 h aging and consisting of 0.5 g synthesized hydroxyapatite from sea shell with 48 h aging were between 50-88 μm and 25-88 μm and also the average particle size was determined as 74 μm and 48 μm , respectively.

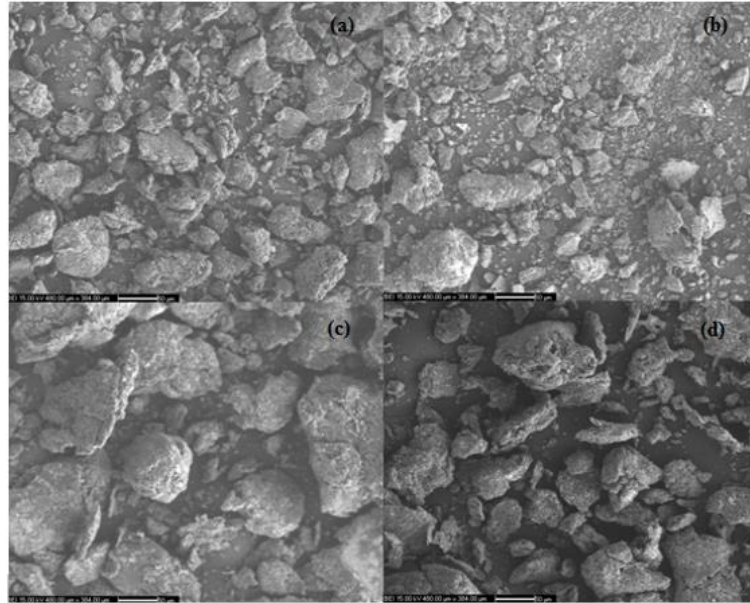


Figure 9. SEM images of bone cement **a.** Reference **b.** Produced without hydroxyapatite **c.** C-48-0.5 **d.** S-48-0.5

3.4. Compressive strength results

The compression test was performed according to ASTM F 451 standard. The comparison of compressive strength results for reference commercial bone cement, bone cement without addition and hydroxyapatite added bone cement samples are given in Table 2.

Table 2. Compression strength results of bone cement with hydroxyapatite additive

Sample Name	Average Max. Strength (MPa)
Reference	74.38
Bone cement without additive	86.79
C-48-0.5	105.93
C-48-1	103.35
C-48-1.5	84.18
C-48-2	92.35
S-48-0.5	103.38
S-48-1	86.97
S-48-1.5	78.55
S-48-2	79.37

According to compression strength test results, the addition of hydroxyapatite caused the reinforcing effects to compressive strength of bone cement. The obtained results are in good agreement with the hydroxyapatite added bone cements [18 – 20]. The results indicate that both of the calcium sources ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3) can be preferred for the increase mechanical strength of polymeric bone cements. The compressive strengths of hydroxyapatite added bone cements were measured as 105.93 MPa for C-48-0.5 and 103.38 MPa for S-48.0.5, respectively.

THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE ADDITIVE PRODUCED FROM DIFFERENT RAW MATERIALS TO STRENGTH OF BONE CEMENT

3.5. Thermal Decomposition Behaviour of Samples

Thermal curves of reference commercial bone cement, bone cement without addition and hydroxyapatite added bone cement samples are presented in Figure 10. Obtained mass losses and temperatures range were in compatible with reference bone cement. Thermal analyses results are given Table 3.

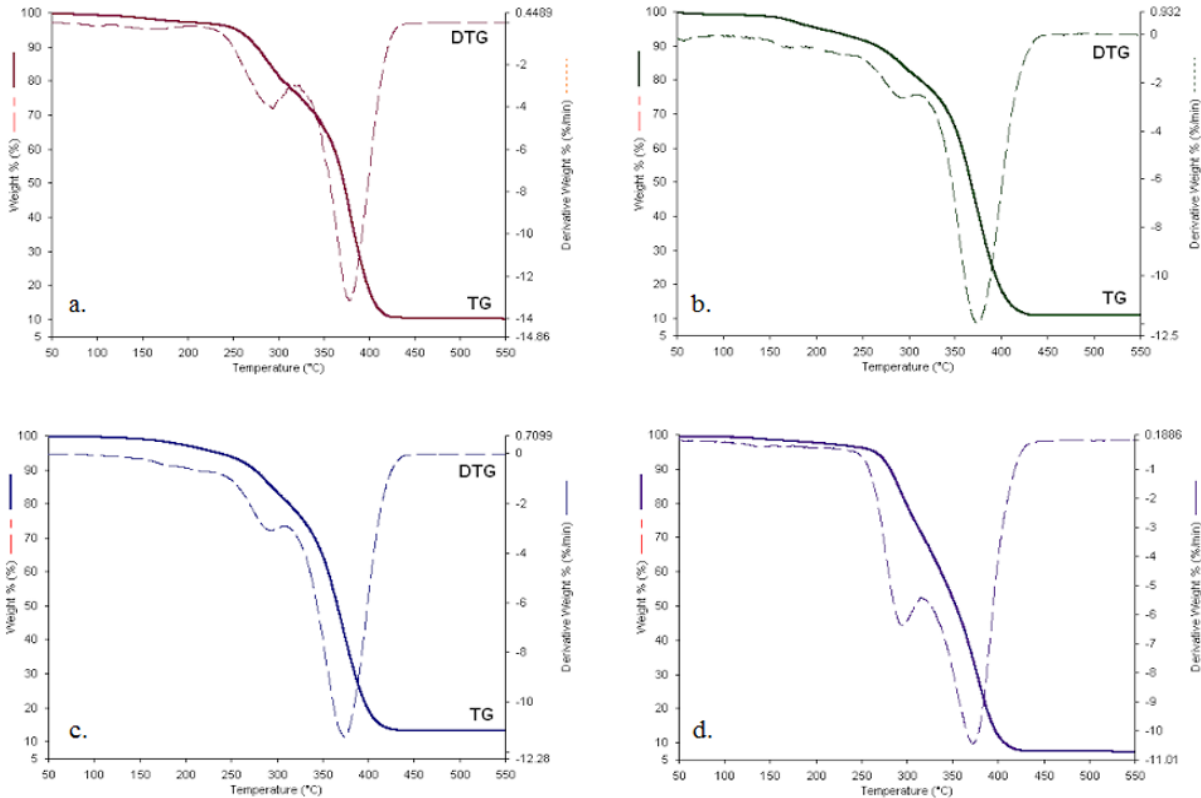


Figure 10. TG-DTG curves of bone cement **a.** Reference **b.** Produced without hydroxyapatite **c.** C-48-0.5 **d.** S-48-0.5

According to thermal analyses results, thermal decomposition of all samples occurred via a two-step process between the temperatures of 50 – 550°C. First step was approximately seen in the range of 200 – 317°C and mass losses were between 15.53 – 25.58%. The highest initial temperatures were seen at S-48-0.5. The second step of decomposition was occurred in the temperature range of 316.90 – 441.01°C. Approximately 63.09 – 70.05% of bone cement have left from the composition that can be explained with the removal PMMA from composition. Total mass losses were between 84.50 – 88.67%. Obtained thermal results of reinforced samples were consistent with the reference material.

Table 3. Thermal analyses result of bone cement samples

Step	Temperature	Reference	Bone cement without additive	C-48-0.5	S-48-0.5
1 st step	Ti (°C)	202.37	211.27	222.40	247.09
	Tf (°C)	316.90	307.98	308.80	317.17
	Mass Loss (%)	20.14	15.53	16.68	25.58
2 nd step	Ti (°C)	316.90	307.98	308.80	317.17
	Tf (°C)	435.4	441.01	440.92	432.82
	Mass Loss (%)	66.50	70.05	67.82	63.09
Total Mass Loss (%)		86.64	85.58	84.50	88.67

The thermal results of samples can be interpreted that the decomposition begin at higher temperature at the hydroxyapatite bone cements. To obtain a higher resist to decomposition of material, Sea shell (CaCO₃) can be preferred.

4. CONCLUSION

The addition of hydroxyapatite increased remarkably the compressive strength of bone cement. The hydroxyapatite used in these experiments, produced with two different calcium sources ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3). There are minor changes were observed in the comparison of characteristic band values of hydroxyapatites synthesized by using the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3 .

Morphologies of reinforced samples were analyzed by SEM. The agglomeration increased with the increasing aging time. The angular particles were obtained in the use of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, whereas the round particle were synthesized in the of CaCO_3 as calcium source.

In addition of hydroxyapatite to bone cement retarded the decomposition of materials that may make the material useful in specific applications. Especially, the use of sea shell (CaCO_3) retard the initial temperature of first step of decomposition 36°C than the bone cement without bone cement.

Increasing of rate of hydroxyapatite into bone cement caused decreasing of viscosity of bone cement therefore caused decreasing of compressive strength of bone cement. Considering literature studies and reference bone cement, it was proved that the compressive strength of all bone cements with hydroxyapatite additive had higher strength. All of the synthesized samples have higher strength comparing to the reference sample. C-48-05's strength resistance is 1.4 times greater than the reference.

The results showed that hydroxyapatite addition had not any adverse effects on characteristic features of bone cements.

KAYNAKLAR

- [1] J. Zhang, C.S. Dai, J. Wei, J.W. Wen, "Study on the bonding strength between calcium phosphate/chitosan composite coatings and a Mg alloy substrate", *Applied Surface Science*, vol. 261, pp. 276-286, 2012.
- [2] Z. Khaled, Development of A New Generation of Bone Cements using Nanotechnology, Graduate Program in Engineering Science, School of Graduate and Postdoctoral Studies The University of Western Ontario, London, UK, 2009. [Online] Available: <https://www.eng.uwo.ca/people/pcharpentier/docs/Khaled%20Thesis.pdf> [Accessed May 13, 2020].
- [3] K. Serbetci, F. Korkusuz, N. Hasircı, "Mechanical and Thermal Properties of Hydroxyapatite-Impregnated Bone Cement", *Turkish Journal of Medical Sciences*, vol. 30, pp. 543-549, 2000.
- [4] Y.H. Nien, C.L. Huang, "The mechanical study of acrylic bone cement reinforced with carbon nanotube", *Materials Science and Engineering*, vol. 169, pp. 134-137, 2010.
- [5] S. Marangoz, "Bone Cement", *Totbid Jurnal*, vol. 10, pp. 103-108, 2011.
- [6] E.M. Rivera, M. Araiza, W. Brostow, V.M. Castano, J.R.D. Estrada, R. Hernandez, J.R. Rodriguez, "Synthesis of hydroxyapatite from eggshells", *Material Letters*, vol. 41, pp. 128-134, 1999.
- [7] S.J. Lee, S.H. Oh, "Fabrication of calcium phosphate bioceramics by using eggshell and phosphoric acid", *Material Letters*, vol. 57, pp. 4570-4574, 2003.
- [8] C. Balázsı, F. Wéber, F. Kövér, Z. E. Horváth, A. Németh, "Preparation of calcium -phosphate bioceramics from natural resources", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, pp. 1601-1606, 2007.
- [9] S.V. Kenneth, X. Zhang, J.B. Massie, M. Wang, C. Kim, "Conversion of bulk seashells to biocompatible hydroxyapatite for bone implants", *Acta Biomaterialia*, vol. 3, pp. 910-918, 2007.
- [10] U. Ripamonti, J. Crooks, L. Khoali, L. Roden, "The induction of bone formation by coral-derived calcium carbonate/hydroxyapatite constructs", *Biomaterials*, vol. 30, pp. 1428-1439, 2009.
- [11] S. Jinawath, D. Polchai, M. Yoshimura, "Low-temperature, hydrothermal transformation of aragonite to hydroxyapatite", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 22, pp. 35-39, 2002.

THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE ADDITIVE PRODUCED FROM DIFFERENT RAW MATERIALS TO STRENGTH OF BONE CEMENT

- [12] C.S. Chai, K.A. Gross, B.B. Nissan, “Critical ageing of hydroxyapatite sol–gel solutions”, *Biomaterials*, vol. 19, pp. 2291-2296, 1998.
- [13] X. Yang, Z. Wang, “Synthesis of biphasic ceramics of hydroxyapatite and b-tricalcium phosphate with controlled phase content and porosity”, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 8, pp. 2233-2237, 1998.
- [14] G. Gergely, F. Weber, I. Lukacs, L. Illés, A.L. Tóth, Z.E. Horváth, J. Mihály, C. Balázs, “Nano-hydroxyapatite preparation from biogenic raw materials”, *Central European Journal of Chemistry*, vol. 8, pp. 375-381, 2010.
- [15] K. Serbetci, S. Orhun, F. Korkusuz, N. Hasirci, “In Vivo Biocompatibility Of Hydroxyapatite Containing Bone Cement”, *Journal of Arthroplasty & Arthroscopic Surgery*, vol. 13, pp. 259-263, 2002.
- [16] S.M. Zebarjad, S.A. Sajjadi, T.E. Sdrabadi, A. Yaghmaei, B. Naderi, “A Study on Mechanical Properties of PMMA/Hydroxyapatite Nanocomposite”, *Scientific Research*, vol. 3, pp. 795-801, 2011.
- [17] D., Verma, “Design of polymer-biopolymer-hydroxyapatite biomaterials for bone tissue engineering: through molecular control of interfaces”, Ph.D. Thesis, North Dakota State University, North Dakota, USA, 2008. [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/238026007_Design_of_polymer-biopolymer-hydroxyapatite_biomaterials_for_bone_tissue_engineering_Through_molecular_control_of_interfaces [Accessed May 13, 2020].
- [18] A.H. Phakatkar, M.R. Shirdar, M.M. Taheri, S. Narayanan, T. Foroozan, T. Shokuhfar, “Novel PMMA bone cement nanocomposites containing magnesium phosphate nanosheets and hydroxyapatite nanofibers”, *Materials Science and Engineering C*, vol. 109, no. 11049, pp. 1-10, 2020.
- [19] Y. Che, S. Min, M. Wang, M. Rao, C. Quan, “Biological activity of hydroxyapatite/poly(methylmethacrylate) bone cement with different surface morphologies and modifications for induced osteogenesis”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 48188, pp. 1-8, 2019.
- [20] M.A. Ayatollahi, S.A. Mirmohammadi, H.A. Shirazi, “The tension-shear fracture behaviour of polymeric bone cement modified with hydroxiapatite nano-particles”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol.18, pp. 50-59, 2018.





KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMİYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Gözde GÖZKE^{1,*} , Korkut AÇIKALIN² 

¹ Yalova Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

² Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, kiraz çekirdeklerinin ısıl bozulma davranışını ve kinetiğini incelemektir. Bu nedenle, iki farklı partikül boyutundaki (75-150 ve 150-250 µm) kiraz çekirdekleri beş farklı ısıtma hızında (5, 10, 20, 30 ve 40 °C/dk) azot gazı varlığında oda sıcaklığından 800 °C'ye kadar izotermal olmayan termogravimetrik analize tabi tutulmuştur. Çalışmalar, piroliz bölgesinde temel olarak nem ve düşük molekül ağırlığında uçucuların uzaklaştırılmasına (1. basamak), hemiselülozun (2. basamak), selülozun (3. basamak) ve ligninin (4. basamak) ısıl bozunmalarına karşılık gelen dört farklı basamağın varlığını ortaya koymuştur. Aktif piroliz basamaklarının (2. ve 3. basamakların) kinetik parametreleri Coats-Redfern ve Kissinger-Akahira-Sunose yöntemleri ile hesaplanmıştır. Coats-Redfern yöntemi daha yüksek değerler vermesine rağmen, her iki yöntemle hesaplanan tüm aktivasyon enerjisi değerlerinin birbirleriyle uyumlu oldukları gözlenmiştir. Ayrıca, artan partikül boyutu ile aktivasyon enerjisi değerlerinde artış gerçekleştiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Piroliz, Kinetik, Kiraz çekirdeği, Coats-Redfern yöntemi, Kissinger-Akahira-Sunose yöntemi

INVESTIGATION OF PYROLYSIS KINETICS OF CHERRY STONE BY USING MODEL-FREE AND MODEL-FITTING INTEGRAL KINETIC METHODS ON THE BASIS OF NON-ISOTHERMAL THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS DATA

ABSTRACT

The objective of present study was to investigate the thermal degradation behavior and kinetics of cherry stone. Thus, cherry stones having two different particle sizes (75-150 and 150-250 µm) were subjected to non-isothermal thermogravimetric analysis from room temperature to 800 °C at five different heating rates (5, 10, 20, 30 and 40 °C/min) under nitrogen flow. The studies revealed the existence of four distinct stages in pyrolysis zone mainly corresponding to removal of moisture and low molecular weight volatiles (stage 1), decomposition of hemicellulose (stage 2), cellulose (stage 3) and lignin (stage 4), respectively. The kinetic parameters of active pyrolysis stages (stage 2 and stage 3) were calculated by Coats-Redfern and Kissinger-Akahira-Sunose methods. It was observed that all activation energy values calculated by both methods were conformable with each other although Coats-Redfern yielded relatively higher values. Moreover, it was determined that there was an increase in activation energy values by the increase of particle size.

Keywords: Pyrolysis, Kinetics, Cherry Stone, Coats-Redfern method, Kissinger-Akahira-Sunose method

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanımları neticesinde ortaya çıkan çevresel sorunlar, rezervlerinin azalması ve değişken politik tutumlar; biyokütle maddelerin kullanımını son derece önemli ve kaçınılmaz kılmıştır. Dünyanın hemen hemen her yerinde doğal olarak bolca bulunması ve fosil yakıtlara kıyasla belirgin bir biçimde daha az çevresel probleme yol açması nedeniyle biyokütle maddeler, yenilenebilir enerji kaynakları olarak sıklıkla tercih edilmektedirler.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: e-posta / e-mail: Gözde Gözke: gozde.gozke@yalova.edu.tr
Geliş / Recieved: 22.02.2020 Kabul / Accepted: 17.07.2020 doi: 10.28948/ngumuh.692840

Dünya’da bolca bulunan, düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynakları olan lignoselülozik biyokütlelerden enerji eldesi en genel anlamda iki şekilde sağlanabilir: (i) ısı üretimi için doğrudan yakarak ve (ii) termokimyasal ya da biyokimyasal yöntemler kullanarak biyoyakıtlara ve/veya değerli hidrokarbonlara dönüştürerek. Birinci seçenek tercih edildiğinde üretilen ısı acilen ısıtma ve/veya güç üretmek için kullanılmalıdır. Ayrıca, düşük verimliliğin yanı sıra yanma reaksiyonu sonucunda yan ürün olarak fazlaca CO₂ çıkmakta ve istenmeyen kül birikimi de gerçekleşmektedir [1]. Bu dezavantajlar nedeniyle, biyokütle maddelerin ikinci seçenek olan termokimyasal ya da biyokimyasal yöntemler vasıtasıyla biyoyakıt ve/veya değerli hidrokarbonlara dönüştürülmesi ön plana çıkmaktadır.

Biyokütle maddelerin oksijensiz ortamda ısıl bozunması olarak tanımlanan piroliz prosesi, termokimyasal bir prosestir ve biyokütle maddelerin dönüştürülmesinde makul maliyet ve basit işleyiş nedeniyle potansiyel bir yöntem olarak kabul edilmektedir [2]. Biyokütle maddeler, katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülebilir tek yenilenebilir karbon kaynağı konumundadır [3], ve piroliz bu ürünlerin elde edilmesini sağlayan bir prosestir. Piroliz prosesi bu özelliğinin yanı sıra yanma ve gazlaştırma proseslerinin de bir basamağı olduğundan [4], termokimyasal proseslerin anlaşılması, tasarlanması ve uygulanması açısından önemli bir role sahiptir. Biyokütle maddelerin ısıl bozunması, (i) nem ve uçucuların salınması, (ii) hemiselülozun bozunması, (iii) selülozun bozunması ve (iv) ligninin bozunmasını içeren dört basamaklı karmaşık bir prosestir. Bu proseslerin gerçekleştiği sıcaklıklar, reaksiyon kinetiği, bozunmaya uğrayan biyokütle madde oranı ve arta kalan kısmın bileşimsel analizi yakıt ürünün ısı değeri ve etkinliğini belirler [5].

Biyokütle maddelerin ısıl bozunma kinetiği, bu maddelerden enerji ve ürünlerin eldesi için kullanılan termokimyasal proseslerin etkin tasarımında anahtar rol oynamaktadır [6]. Kinetik çalışmaları, ürünlerin dağılımı, kütle kaybı davranışı, katı bozunmasının kimyası hakkında kestirimde bulunarak piroliz ekipmanlarının tasarımı ve optimizasyonu için gerekli değerli bilgilerin belirlenmesine imkan tanımaktadır [7].

Termogravimetrik analiz (TGA), kabaca, bir numunenin kütesinin sabit sıcaklıkta zamanın fonksiyonu ya da sabit ısıtma hızında sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldüğü ısıl analiz yöntemidir. Bunlardan birincisi izotermal (ya da statik) TGA, ikincisi ise izotermal olmayan (ya da dinamik) TGA yöntemi olarak adlandırılır. TGA yöntemi biyokütle maddelerin bozunma karakteristiklerinin ve kimyasal kinetiklerinin incelenmesinde kullanılan ısıl tekniklerden birisidir [8]. Piroliz proseslerinde, biyokütlenin dönüşümü ısıtma periyodu esnasında başladığından ve piroliz proseslerinin hemen hemen tamamı izotermal olmayan koşullarda gerçekleştiğinden izotermal olmayan yöntemin kullanılması uygun olmaktadır [9]. Ayrıca, izotermal olmayan TGA yönteminin piroliz kinetiğinin çalışılmasında ve anlaşılmasında kullanılacak en iyi yöntemlerden birisi olduğu kanıtlanmıştır ve bu yöntem 900 °C’ye kadar olan sıcaklıklarda ve düşük ısıtma hızlarında yaygınca kullanılmaktadır [6].

İzotermal olmayan TGA verilerinden kinetik hesaplama yapmakta kullanılan yöntemler model bazlı (model-fitting) ve model içermeyen (model-free, iso-conversional) olmak üzere iki grupta toplanabilir. Model bazlı yöntemlerde, elde edilen TGA verileri seçilen farklı model eşitliklerine oturtulmaya çalışılır ve istatistiksel olarak en iyi uyum sağlayan model eşitliğinden kinetik parametreler hesaplanır. Model bazlı yöntemler, katı hal reaksiyonlarının kinetik parametrelerinin tek bir TGA denemesinden hesaplanabilmesini mümkün kıldığı için yaygınca kullanılmaktadır. Ancak, yöntemde kullanılan model eşitlikleri istatistiksel olarak eş değer olmasına rağmen, hesaplanan kinetik parametrelerin değerleri mertebe cinsinden farklılıklar gösterebilmekte ve bu da reaksiyona uygun kinetik model seçimini zorlaştırmaktadır. Model içermeyen kinetik yöntemde ise farklı ısıtma hızlarındaki TGA verilerine ihtiyaç duyulur ve aktivasyon enerjisinin hesaplanabilmesi için birçok kinetik eğrinin çizilmesi gerekmektedir. Kinetik model içermeyen kinetik model seçiminden kaynaklanan hataları barındırmaz. Model içermeyen yöntem belirli bir dönüşüm değerindeki aktivasyon enerjisinin hesaplanmasına olanak tanır. Bu işlem, farklı dönüşüm değerleri için tekrarlanır ve sonuçta aktivasyon enerjisi dönüşümün fonksiyonu olarak elde edilir [8]. Model içermeyen kinetik yöntem kendi içinde türevsel ve integral olmak üzere iki ayrı sınıfa ayrılır. Model içermeyen türevsel kinetik yöntemde anlık değerler kullanıldığından deneysel gürültüye hassasiyet söz konusudur ve buna bağlı olarak kararsız sayısal değerler elde edilebilmektedir. Diğer taraftan model içermeyen integral kinetik yöntemde bu durum gözlenmemektedir [9].

Kiraz (*Prunus avium*), *Prunus* familyasından etli, çekirdekli bir meyve olup en çok kabul gören meyveler arasında yer almaktadır. Genellikle, taze meyve olarak tüketilmekteyse de kurutulmuş, salamuralanmış, reçel, marmelat ya da meyve suyu olarak işlenmiş haliyle de tüketimi mevcuttur [10]. FAO [11], 2015, 2016 ve 2017 verilerine bakıldığında Dünya çapında üretiminin sırasıyla, 2230879, 2359451 ve 2443407 ton olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, kiraz üretim miktarının artan bir eğilim içinde olduğu söylenebilir. FAO 2017 verilerine göre Dünya’daki en büyük kiraz üreticisi konumundaki ülke 627132 ton ile Türkiye’dir.

Kiraz tüketildikten ya da işleme tabi tutulduktan sonra ortaya çıkan başlıca atıklardan birisi kiraz çekirdeğidir. Kiraz çekirdeği ağırlığının meyvenin toplam ağırlığına olan oranının %8-%15 arasında değiştiği bilindiğinden [12], 2017 yılı üretim verilerine göre Dünya’da ve Türkiye’de ortaya çıkan ortalama kiraz çekirdeği miktarı sırasıyla, 281000 ve 72000 ton civarındadır, ve bu değerlerin kiraz üretimindeki artış göz önüne alınarak artacağını öngörmek doğru olacaktır. Dolayısıyla, Türkiye gibi enerji ihtiyacının yaklaşık olarak %75 gibi büyük bir kısmını ithal eden [13] konumda olan bir ülkenin, zaten sahip olduğu biyokütle atık madde olan lignoselülozik yapıdaki kiraz çekirdeklerinin piroliz prosesi ile değerli yakıtlara dönüştürülmesine altyapı oluşturacak piroliz kinetiği çalışmalarının önemi büyüktür.

Literatür taraması, kiraz çekirdeğinin termokimyasal yöntemlerle dönüştürülmesini içeren pek çok araştırmanın varlığını ortaya koymuştur. Araştırmaların büyük çoğunluğunu aktif karbon, adsorbent ya da odun kömürü (charcoal) ile ilgili çalışmalar

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMİYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

[14–25] oluşturmaktadır. Kiraz çekirdeğinin piroliz prosesi ile ilgili kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birisinde Molenda ve ark. [26] kiraz çekirdeklerini içeren çeşitli biyokütle atık maddeleri 500 ve 700 °C’de pirolize tabi tutarak biyokömür üretimini çalışmışlardır. Duman ve çalışma ark. [27] ise kiraz çekirdeklerinin sabit ve akışkan yataktaki piroliz proseslerini çalışmışlar, reaktör tipi ve sıcaklığın ürün verimleri ve ürün bileşimleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Literatürde kiraz çekirdeklerinin piroliz kinetiği ile ilgili olarak kısıtlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Örneğin, Yangali ve çalışma ark. [28] kömür ve kiraz çekirdeği karışımının 100 K/dk ısıtma hızında, azot atmosferinde termogravimetrik analizini çalışarak kütle kaybı hızını ve global aktivasyon enerjisi değerlerini karışım bileşiminin fonksiyonu olarak tespit etmeye çalışmışlardır. González vd. [29] kiraz çekirdeğinin ısıl bozunma kinetiğini izotermal ve izotermal olmayan termogravimetrik analiz yöntemlerini kullanarak 300-600 °C sıcaklık aralığında ve 5-25 K/dk ısıtma hızlarında çalışmışlardır. İzotermal olmayan koşullarda sadece model bazlı kinetik yöntem olan Arrhenius yöntemini seçerek ve reaksiyonları birinci dereceden kabul ederek pre-eksponansiyel faktör ve aktivasyon enerjisini hesaplamışlardır. Özsin ve Pütün [30], çalışmalarının bir bölümünde kiraz çekirdeklerini de içeren gıda işleme atıklarının piroliz kinetiğini 25-1000 °C sıcaklık aralığında, 5-40 °C/dk ısıtma hızlarında azot gazı atmosferindeki termogravimetrik analiz yöntemini kullanarak çalışmışlardır. Model içermeyen kinetik yöntemleri kullandıkları çalışmalarında kinetik parametre olarak sadece aktivasyon enerjisi değerlerini hesaplamışlardır.

Mevcut çalışmada lignoselülozik bir biyokütle atık madde olan ve Türkiye’de yıllık oluşum miktarları hatırı sayılır miktarlarda olan kiraz çekirdeklerinin izotermal olmayan TGA yöntemi kullanılarak ısıl bozunma karakteristiklerinin belirlenmesi ve piroliz kinetiğinin çalışılması amaçlanmıştır. Piroliz kinetiği çalışmaları kapsamında, kiraz çekirdeği için yapılan literatür araştırmasında benzerine rastlanmamış şekilde hem model bazlı hem de model içermeyen integral formunda kinetik yöntemler kullanılmıştır. Böylece, sadece model içermeyen kinetik yöntemleri kullanmış çalışmaların aksine, hem aktivasyon enerjilerinin hem de reaksiyon derecesi ve pre-eksponansiyel faktörün hesaplanması mümkün kılınmıştır. Ayrıca, mevcut çalışmayla, model bazlı ve model içermeyen kinetik yöntemlerden belirlenen aktivasyon enerjilerinin karşılaştırmalarının yapılabilmesini mümkün kılmamız yanı sıra, sadece model bazlı kinetik yöntem kullanarak ve reaksiyonları birinci dereceden kabul ederek yapılan çalışmaların aksine, reaksiyon derecesinin istatistiksel kontrol yöntemiyle belirlenmesi de sağlanmıştır. Mevcut çalışmanın sonuçları kullanılarak endüstriyel boyutta piroliz prosesinin gerçekleştirileceği koşulların belirlenmesi, reaktörün seçilmesi ve tasarım optimizasyonun yapılabilmesi mümkün olabileceğinden, kiraz çekirdeklerinin piroliz prosesiyle sanayi ölçeğinde değerlendirilerek, alternatif, çevre dostu ve sürdürülebilir yakıt maddelerin üretiminin tasarlanabilmesine katkıda bulunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Kiraz, Yalova (Türkiye) şehrinin merkezinde bulunan yerel bir pazardan temin edilmiştir. Deneylerde kullanılacak lignoselülozik biyokütle atık madde olan kiraz çekirdekleri temin edilen kirazın etli meyve kısmından ayrıldıktan sonra yıkama işlemi uygulanmaksızın açık hava ortamında 2 hafta süreyle ön kurutmaya tabi tutulmuştur. Ön kurutmayı takiben analitik öğütücü (IKA A11, Staufen im Breisgau, Almanya) kullanılarak öğütülmüştür. Öğütülen kiraz çekirdekleri elekler vasıtasıyla 75-150 µm ve 150-250 µm partikül boyutlarında gruplandırılmıştır. Gruplandırılan biyokütle atık maddeler 105 °C’deki etüvde 12 saat kurutulduktan sonra desikatörde soğutulmuş ve daha sonra kullanılmak üzere koyu renkteki cam numune şişelerine koyularak, ışık almayan, nemsiz bir ortamda saklanarak depolanmıştır.

2.2. Materyal Karakterizasyonu

Deneylerde kullanılan kiraz çekirdeklerini karakterize edebilmek amacıyla kısa analiz, elementel analiz ve ısıl değer analizleri gerçekleştirilmiştir.

Kiraz çekirdeklerinin kısa analizi kapsamında nem, uçucu madde ve kül miktarları ilgili ASTM (American Society for Testing and Materials) standart yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Kısa analiz kapsamındaki sabit karbon yüzdesi ise nem, uçucu madde ve kül yüzdelerinin toplamının 100’den farkı alınarak hesaplanmıştır.

Kiraz çekirdeklerinin elementel analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi (Ankara, Türkiye) Merkez Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki LECO CHNS-932 (ABD) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz kapsamında C, H, N ve S elementlerinin yüzdesi doğrudan ölçülmüş, oksijen (O) yüzdesi ise farktan hesaplanmıştır.

Kiraz çekirdeklerinin ısıl değer analizleri Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı’ndaki IKA C5000 (Almanya) bomba kalorimetresi ile ölçülmüştür.

Kiraz çekirdeklerine ait kısa analiz, elementel analiz ve ısıl değer analiz sonuçları Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Kiraz çekirdeği kısa, elementel ve ısı değer analiz sonuçları

<i>Kısa Analiz (% ağı.)</i>	
Nem	3,50
Kül	1,75
Uçucu madde	71,58
Sabit karbon	23,17
<i>Elementel analiz (% ağı.)</i>	
C	50,00
H	6,78
O	41,34
N	1,88
S	-
<i>Üst Isıl Değer (J/g)</i>	
	19535

2.3. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Kiraz çekirdeklerinin ısı bozunma karakteristiklerinin ve piroliz kinetiğinin incelenmesinde kullanılacak verilerin sağlanması amacıyla izotermal olmayan TGA ölçümleri Yalova Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'ndaki EXSTAR SII TG/DTA 6300 (Seiko Instruments, Japonya) TGA cihazı ile yapılmıştır. Analizler, kiraz çekirdeklerinin 75-150 µm ve 150-250 µm partikül boyutlarındaki örnekleri için 5, 10, 20, 30 ve 40 °C/dk ısıtma hızlarında ve süpürme gazı olarak 200 ml/dk debideki azot gazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan numune miktarı 3,56±0,1 mg'dır. Deneyler oda sıcaklığından 800 °C'ye kadar sürdürülmüştür.

2.4. Kinetik Modelleme

Biyokütle maddelerin pirolizi, biyokütle maddenin oksijensiz ortamda ısı olarak bozunarak gazı alınmış katı (çar) ve uçucuları oluşturduğu katı hal bozunma reaksiyonudur ve aşağıdaki şekilde gösterilebilir:



Katı halde bulunan biyokütle maddeden uçucu ve çarın oluşmasını sağlayan piroliz reaksiyonunun hızı (da/dt), reaksiyon hız sabiti (k) ve reaksiyon modeli ($f(\alpha)$) cinsinden aşağıda verildiği şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (2)$$

Eşitlik 2'den görüldüğü gibi piroliz hızı (da/dt), reaksiyon hız sabiti (k) ve reaksiyon modelinin ($f(\alpha)$) lineer bir fonksiyondur. Reaksiyon hız sabitinin büyüklüğü sıcaklığa bağlıdır. Reaksiyon modeli ise dönüşüm oranının (α) fonksiyonudur, ve reaksiyon mekanizmasını yansıtır. Dönüşüm oranı, ya da diğer bir deyişle pirolize uğramış biyokütle madde fraksiyonu, tepkime başlangıcındaki biyokütle madde kütlesi (m_i), t anındaki biyokütle madde kütlesi (m_t) ve tepkime sonundaki biyokütle madde kütlesi (m_f) cinsinden aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_f} \quad (3)$$

Reaksiyon hız sabitinin sıcaklığa bağlılığı Arrhenius eşitliği (Eşitlik 4) ile tanımlanır:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (4)$$

Burada, A pre-eksponansiyel faktör (ya da frekans çarpanı/faktörü), E_a reaksiyonun (görünen) aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Eşitlik 2'de reaksiyon hız sabitinin yerine Arrhenius eşitliği (Eşitlik 4) konursa Eşitlik 5 elde edilir:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}f(\alpha) \quad (5)$$

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMİYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Piroliz prosesinin sabit sıcaklıkta gerçekleşmeyip, izotermal olmayan koşullarda belirli bir ısıtma hızında gerçekleştiği durumları yansıtmak için ısıtma hızının ($\beta = dT/dt$) tanımından yola çıkarak, $dt = dT/\beta$ ifadesi Eşitlik 5'te kullanılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{d\alpha}{dT} \beta = A e^{-\frac{E_a}{RT}} f(\alpha) \quad (6)$$

Eşitlik 6'da ilgili terimler aynı tarafta olacak şekilde düzenleme yapılırsa:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E_a}{RT}} dT \quad (7)$$

Eşitlik 7 izotermal olmayan TGA verilerinden kinetik parametrelerin hesaplanmasında kullanılan temel eşitliktir. Eşitlik 7'nin T_0 sıcaklığındaki α_0 'dan T sıcaklığındaki α 'ya integral alınmış hali aşağıdaki şekilde verilebilir [31]:

$$g(\alpha) = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-\frac{E_a}{RT}} dT \quad (8)$$

Burada, $g(\alpha)$, $f(\alpha)$ 'nın, yani reaksiyon modelinin integral formudur. İzotermal olmayan TGA verilerinden integral formundaki bu eşitlik kullanılarak da kinetik parametreler hesaplanabilir. Bu eşitlikteki (Eşitlik 8) sıcaklık integralinin kesin analitik çözümü olmadığından farklı yaklaşımlar/kestirimler önerilmiş, bu da farklı integral kinetik çözümlene yöntemlerinin doğmasına neden olmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kiraz Çekirdeğinin Karakterizasyonu

Deneylerde kullanılan kiraz çekirdeklerini karakterize edebilmek amacıyla gerçekleştirilen kısa, elementel ve ısıl değer analiz sonuçları Tablo 1'de (Bknz. Bölüm 2.2) verilmiştir. Sonuçlar hakkındaki yorumlar ise aşağıda listelenmiştir:

- Bilindiği üzere, yüksek oranda nem içeren piroliz prosesi hammaddeleri, proses esnasında nemin uzaklaştırılması için fazladan enerji harcanmasına neden olmaktadır. Kiraz çekirdeklerinin hazırlık işlemlerinden sonraki nem içeriği ağ. %3,50 olarak ölçülmüş olup, bu değer piroliz prosesinde kullanılacak hammaddelerin olması istenen nem içeriği sınırları dahilindedir.
- Yapılan ölçümler kiraz çekirdeği kül içeriğinin ağ. %1,75 olduğunu göstermiştir. Kül içeriğinin piroliz prosesi sonucunda elde edilecek sıvı ürün verimini azaltıcı yönde etkisi olduğu bilindiğinden, düşük değerlerde olması sıvı ürün verimini maksimize etmeyi hedefleyen piroliz proseslerinde istenen bir özelliktir. Kiraz çekirdeğinin kül içeriğinin zeytin çekirdeği, erik çekirdeği, kayısı çekirdeği ve şeftali çekirdeğinin kül içerikleriyle (sırasıyla, %0,49, [32], %1,05 [33], %1,2 [34] ve %1,1 [35]) kıyaslandığında daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Yangali vd. [28] tarafından kiraz çekirdeği için raporlanan kül içeriği (%2,70) ile kıyaslandığında ise mevcut çalışmada tespit edilen kül içeriğinin daha düşük olduğu görülmektedir.
- Kiraz çekirdeğinin uçucu madde miktarı ağ. %71,58 olarak bulunmuştur. Uçucu madde miktarının yüksek olması piroliz prosesi esnasında dekompozisyonu kolaylaştırdığından, piroliz prosesinin daha hızlı gerçekleşmesine olanak sağlar. Bu yüzden, yüksek uçucu madde miktarı istenen bir özellik olarak düşünülebilir. Kiraz çekirdeği uçucu madde içeriğinin şeftali çekirdeği uçucu madde içeriği (%71,7 [35]) ile hemen hemen aynı olduğu; zeytin çekirdeği, erik çekirdeği ve kayısı çekirdeği uçucu madde miktarlarından (sırasıyla, %87,06 [32], %80,23 [33] ve %78 [34]) ise düşük olduğu göze çarpmaktadır. Benzer şekilde literatürde [28] kiraz çekirdeği için raporlanmış uçucu madde değeri (%81,00) ile kıyaslandığında da mevcut çalışmadaki uçucu madde içeriğinin daha düşük olduğu göze çarpmaktadır.
- Elementel analiz sonuçları kiraz çekirdeğinin yapısında ağırlıkça %50 C ve %6,78 H bulunduğunu göstermiştir. Piroliz prosesinde değerli enerji kaynaklarına dönüştürülecek temel kısım karbon ve hidrojen olduğundan, bu elementlerce zengin içeriğe sahip hammaddelerin, piroliz prosesi için daha uygun hammaddeler olduğu söylenebilir. Kiraz çekirdeği oksijen içeriğinin ise ağırlıkça %41,34 olduğu belirlenmiştir. Oksijen yakıt değeri olmayan kesir olduğundan, olması istenmez. Ancak, kiraz çekirdekleri de diğer tüm biyokütle maddeler gibi yapısında oldukça fazla oranda oksijen barındırmaktadır. Azot içeriği ise ağ. %1,88 olarak ölçülmüştür. Biyokütle madde azot içeriğinin yüksek olması, piroliz prosesi sonucunda biyokütleden elde edilecek yakıtlarda da azot içeriğinin yüksek olmasına neden olacağından, bu yakıtların yakılması sonucu ozon tabakasının delinmesine ve nitrik asit içerikli asit yağmurlarına daha yüksek katkı sağlaması anlamına geldiğinden azot içeriğinin düşük olması istenmektedir. Kiraz

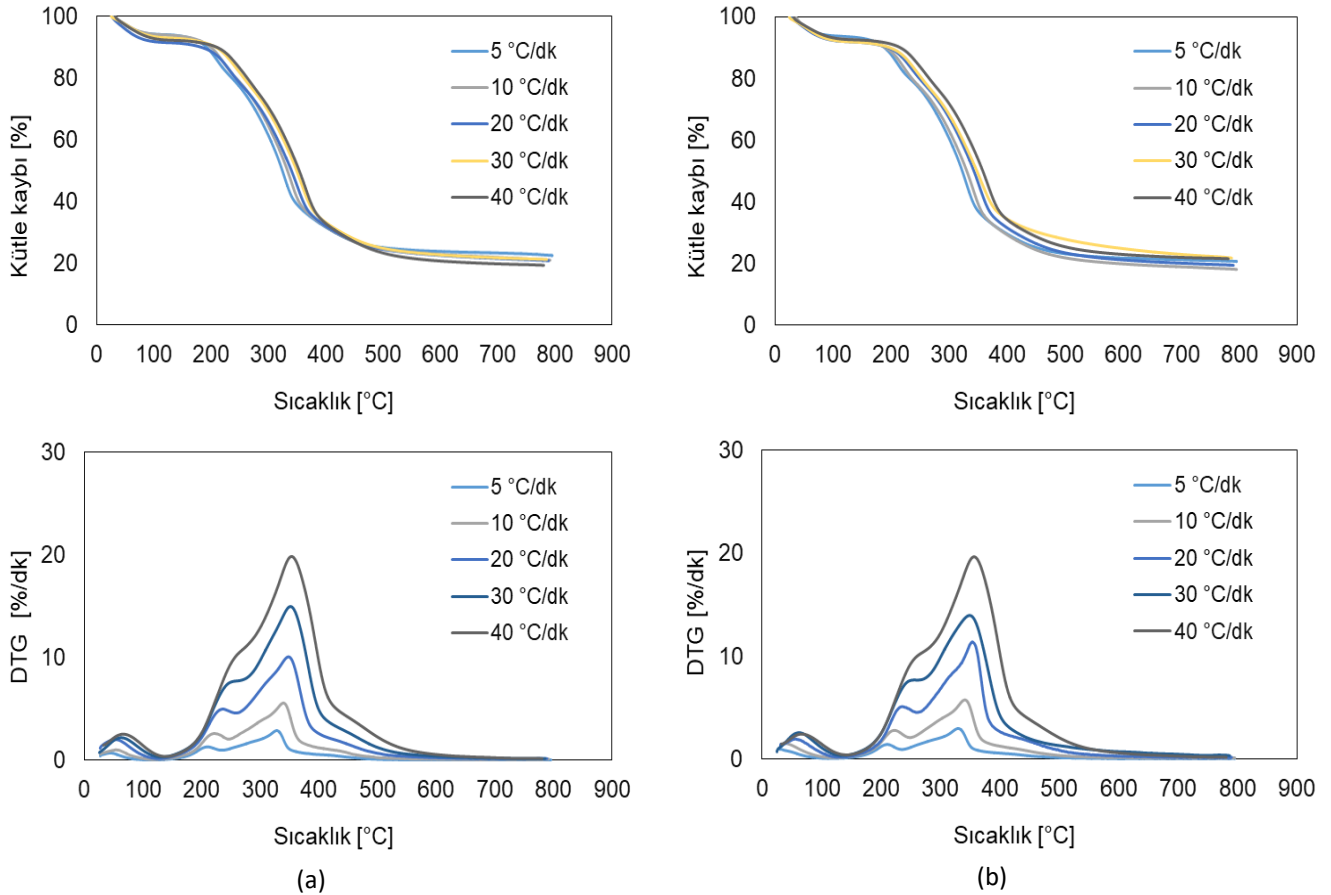
G. Gözke, K. Açıklan

çekirdeğinin elementel analizi S içeriğinin olmadığını (ya da ölçümlenemeyecek kadar düşük oranda olduğunu) göstermiştir, ve bu da kiraz çekirdeklerinden elde edilen yakıtların yakılmasının sülfürik asit içerikli asit yağmurlarına neden olmayacağına (ya da çok az katkıda bulunacağına) işaret etmektedir.

- Isıl değer analizinde kiraz çekirdeğinin üst ısıl değeri 19535 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değer fosil yakıtlarla kıyaslandığında, tüm biyokütle maddelerde olduğu gibi, oldukça düşük bir değerdir. Bunun temel nedeni, elementel analizde de belirlendiği üzere kiraz çekirdeğinin oldukça yüksek oranda yakıt değeri olmayan oksijen içeriğidir. Kiraz çekirdeğinin ısıl değerinin zeytin çekirdeği, erik çekirdeği, kayısı çekirdeği ve şeftali çekirdeğinin ısıl değerlerinden sırasıyla, (19210 [32], 19090 [33], 19090 [34] ve 19330 [35]) J/g az da olsa daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

3.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

TGA'den elde edilen TG (termogravimetri) ve DTG (türevsel termogravimetri) eğrileri piroliz proseslerinin ısıl karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan temel araçlardır. TG eğrisi sıcaklığın ya da zamanın fonksiyonu olarak numunenin kütle kaybını belirten eğridir. DTG eğrisi ise TG eğrisinin birinci dereceden türevidir ve maksimum kütle kaybı hızları ile bunların gerçekleştiği sıcaklıkların belirlenmesinde kullanılır. Mevcut çalışma kapsamında, lignoselülozik biyokütle atık maddeler olan kiraz çekirdeklerinin, beş farklı ısıtma hızında (5, 10, 20, 30 ve 40 °C/dk) ve iki farklı partikül boyutundaki (75-150 ve 150-250 µm) TGA ölçümleri yapılmış olup, elde edilen TG ve DTG eğrileri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Farklı ısıtma hızı ve partikül boyutlarında elde edilen kiraz çekirdeği TG/DTG eğrileri a)75-150 µm b)150-250 µm

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMİYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

3.2.1. Isıl bozunma (piroliz) karakteristikleri

Bölüm 3.2’de verilen kiraz çekirdeği termogravimetrik analiz sonuçları (TG ve DTG eğrileri, Şekil 1) ayrıntılı bir biçimde incelenmiş ve kiraz çekirdeklerinin ısıl bozunma sürecinde sergiledikleri karakteristik özellikler ile bunlara dair yorumlar aşağıda listelenmiştir:

- TG eğrisindeki eğim değişimleri ve DTG eğrisindeki ilgili pikler göz önüne alınarak, kiraz çekirdeği piroliz prosesinin 5, 10 ve 20 °C/dakika ısıtma hızlarında belirgin bir biçimde; 30 ve 40 °C/dakika ısıtma hızlarında ise daha az belirgin bir biçimde dört basamaktan oluştuğu söylenebilir.
- Kiraz çekirdeğinin DTG eğrilerinde yaklaşık olarak 180-420 °C sıcaklık aralığında en yüksek iki pikle temsil edilen bölgeler, piroliz prosesindeki en yüksek kütle kaybı hızlarının gözlemlendiği bölgeler olduğundan, bu bölgelerde gerçekleşen piroliz basamakları “aktif piroliz basamakları” olarak tanımlanmıştır. Şekil 1’deki DTG eğrilerinden görüldüğü gibi, kiraz çekirdeği aktif piroliz basamakları 5, 10 ve 20 °C/dakika ısıtma hızlarında ayrık (split) iki pikle temsil edilmekteyken, 30 ve 40 °C/dakika ısıtma hızlarında ise ayrık pikten ziyade omuz (shoulder) tipi iki pikle temsil edilmektedir.
- Şekil 1-a 10 °C/dk ısıtma hızındaki TG/DTG eğrileri incelendiğinde, kiraz çekirdeği piroliz prosesi birinci basamağın 27-193 °C sıcaklık aralığında %9,1 kütle kaybıyla gerçekleştiği görülmüştür. Bu basamaktaki kütle kaybının temel nedeni biyokütle atık madde yüzeyindeki ve içindeki nem olup, düşük molekül ağırlığına sahip uçucu maddelerin uzaklaştırılması da kütle kaybına katkıda bulunabilmektedir.
- Kiraz çekirdeği piroliz prosesinin ikinci basamağı (Şekil 1-a, 10 °C/dk ısıtma hızı) 193-281 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. Bu basamaktaki kütle kaybı %19,71 olarak ölçülmüştür. İkinci basamağın DTG eğrisindeki ilgili piki 221 °C sıcaklıkta gözlenen piktir ve bu sıcaklıkta gerçekleşen maksimum kütle kaybı hızı 2,62 %/dk’dır. Kaydedilen bu yüksek kütle kaybı hızı nedeniyle 2. basamak aktif piroliz basamağı olarak tanımlanmıştır. Biyokütle maddelerin temel bileşenlerinden birisi olan hemiselülozun 180-320 °C arasında ısıl olarak bozunduğu bilindiğinden [36], 2. basamağın temel olarak hemiselülozun ısıl bozunması ile ilgili olduğu söylenebilir.
- Şekil 1-a 10 °C/dk ısıtma hızındaki sonuçlar incelendiğinde, kiraz çekirdeği piroliz prosesinin üçüncü basamağının 291-392 °C sıcaklık aralığında %34,74 kütle kaybıyla gerçekleştiği görülmüştür. Bu basamağın DTG eğrisindeki ilgili piki 339 °C’de gözlenen pik olup, bu sıcaklıkta gerçekleşen maksimum kütle kaybı hızı 5,59 %/dk olarak ölçülmüştür. Kaydedilen bu yüksek kütle kaybı hızı nedeniyle 3. basamak da 2. basamak gibi aktif piroliz basamağı olarak tanımlanmıştır. Biyokütle maddelerin temel bileşenlerinden birisi olan selülozun 270-370 °C sıcaklık aralığında ısıl olarak bozunduğu bilindiğinden [36], bu basamağın temel olarak selülozun ısıl bozunmasından kaynaklandığı söylenebilir.
- Şekil 1-a 10 °C/dk ısıtma hızındaki TG/DTG eğrilerinden, 392-800 °C sıcaklık aralığında %11,78 kütle kaybıyla kiraz çekirdeği piroliz prosesinin dördüncü ve son basamağı gözlenmiştir. Kiraz çekirdeğinin piroliz prosesi sonucunda kalan kütle miktarı %21,1 olarak ölçülmüştür. Bu basamakta gerçekleşen kütle kaybı hızlarının 2. ve 3. basamaklarda gerçekleşen kütle kaybı hızlarına kıyasla son derece düşük değerlerde olduğu DTG eğrilerinden gözlemlendiğinden, 4. basamak pasif piroliz basamağı olarak tanımlanmıştır. Biyokütle maddelerin temel bileşenlerinden birisi olan lignin ısıl bozunmasını 160-900 °C sıcaklık aralığında tamamladığından [37], 4. basamağın ligninin ısıl bozunma basamağı olduğu söylenebilir.
- González vd. [29] kiraz çekirdeğinin izotermal olmayan koşullardaki aktif ısıl bozunma davranışını yansıtan basamak sayısını mevcut çalışmadan farklı olarak iki basamak değil de üç basamak olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında 10 K/dk ısıtma hızında sundukları termogramlar incelendiğinde aktif piroliz basamaklarının yaklaşık olarak sırasıyla 235-285 °C, 290-335 °C ve 345-390 °C civarında gerçekleştiği görülmüştür. Bu sıcaklık aralıkları göz önüne alındığında tüm aktif piroliz bölgesinin yaklaşık olarak 235-390 °C aralığında gerçekleştiği gözükmemektedir ki bu da mevcut çalışmada belirlenen sıcaklık aralığı (193-392 °C) ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Özsın ve Pütün’ün [30] çalışmalarında ise, kiraz çekirdeğinin izotermal olmayan 10 °C/dk ısıtma hızındaki aktif ısıl bozunma davranışının mevcut çalışmadaki gibi iki basamakta değil tek basamakta gerçekleştiği görülmüştür. Bahsedilen bu tek basamaklı tüm aktif piroliz basamağı için sıcaklık aralığını 10 °C/dk ısıtma hızı için 175-509,6 °C olarak belirtmişlerdir. Bu sıcaklık aralığının mevcut çalışmadaki sıcaklık aralığına kıyasla daha geniş olduğu göze çarpmaktadır. Aktif piroliz basamak sayısı ve sıcaklık aralığında gözlenen bu farklılıklar, çalışılan biyokütle madde aynı tip olsa dahi yetiştigi bölgeye göre farklı bileşim ve yapısal özelliklere sahip olması ile açıklanabilir.

3.2.2. Isıtma hızı ve partikül boyutunun ısıl bozunma (piroliz) karakteristikleri üzerindeki etkisi

Kinetik parametrelerin hesabı aktif piroliz basamaklarında (2. ve 3. basamaklar) gerçekleştirileceğinden, bu bölgelerin karakteristik özellikleri olan başlangıç sıcaklığı (T_i), bitiş sıcaklığı (T_f), maksimum kütle kaybı hızı (W_{max}) ve maksimum kütle kaybı hızının gerçekleştiği sıcaklık (T_{max}) değerleri çalışılan tüm ısıtma hızlarında (5, 10, 20, 30 ve 40 °C/dk) ve partikül boyutlarında (75-150 ve 150-250 μm) belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kiraz çekirdeklerine ait aktif piroliz basamaklarının karakteristik özellikleri

Özellik	Isıtma hızı (°C/dk)																			
	5		10				20				30				40					
	2. basamak		3. basamak		2. basamak		3. basamak		2. basamak		3. basamak		2. basamak		3. basamak		2. basamak		3. basamak	
	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm	75-150 μm	150-250 μm
T_i (°C)	181	186	285	286	193	196	291	295	194	206	311	311	213	214	314	315	222	224	317	317
T_f (°C)	271	276	384	388	281	284	392	394	298	300	404	405	305	307	407	412	314	316	413	414
T_{max} (°C)	210	211	328	330	221	223	339	341	237	237	348	351	258	259	351	352	259	260	354	357
W_{max} (%/dk)	1,32	1,41	2,90	2,96	2,62	2,78	5,59	5,74	4,99	5,10	10,08	11,23	7,72	7,67	14,97	13,96	10,18	9,96	19,84	19,66

Çalışılan değerlerde ısıtma hızının aktif piroliz basamaklarının karakteristik özellikleri üzerinde belirgin bir biçimde etkili olduğu görülmektedir. Tablo 2 incelendiğinde aktif piroliz basamaklarının karakteristik sıcaklıkları olan T_i , T_f ve T_{max} değerlerinin çalışılan her iki partikül boyu için de artan ısıtma hızı değerleriyle birlikte daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Benzer durumun gözlemlendiği çalışmalar [38, 39] literatürde mevcuttur. Bu durum, düşük ısıtma hızlarında kiraz çekirdeği partiküllerinin peyderpey ısınıp, partikül boyunca ve iç kısımlara daha etkin ısı transferi gerçekleştiğini göstermektedir. Bir başka deyişle, yüksek ısıtma hızlarında partikül boyunca ve iç kısımlara ısı aktarımı daha düşük etkinlikle gerçekleştiğinden karakteristik sıcaklıklar daha yüksek sıcaklıklara kaymıştır. Karakteristik sıcaklıklara benzer şekilde maksimum kütle kaybı hızı da her iki partikül boyutundaki çalışmalarda artan ısıtma hızı ile birlikte artış göstermiştir. Isıtma hızının artmasını sağlamak için sisteme birim zamanda yüklenen enerji miktarı da arttığından, birim zamanda kütle kaybındaki artış beklenen bir gelişme olarak yorumlanmıştır.

Tablo 2 incelendiğinde çalışılan değerlerde partikül boyutunun da aktif piroliz basamaklarının karakteristik özellikleri üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Ancak, bu etkinin, değişim nicelikleri karşılaştırıldığında, ısıtma hızının sebep olduğu etkiden daha düşük seviyelerde olduğu gözükmektedir. Tablo 2’den, artan partikül boyutu neticesinde çalışılan tüm ısıtma hızlarında karakteristik sıcaklıkların (T_i , T_f ve T_{max}) da arttığı görülmektedir. Bu durum, partikül boyutunun artırılması sonucunda biyokütle madde partiküllerinin iç kısımlarının ve iç kısımlardaki biyokütle partiküllerinin daha geç ısınması, ve bunun da piroliz prosesinin daha yüksek sıcaklıklarda tamamlanmasına yol açmasıyla açıklanabilir. Partikül boyutunun artırılması ile aktif piroliz basamaklarının maksimum kütle kaybı hızında gözlenen değişimler çalışılan ısıtma hızına bağlı olarak farklı eğilimler izlemiştir. 30 ve 40 °C/dk ısıtma hızlarında artan partikül boyutu neticesinde maksimum kütle kaybı hızında düşüşler gözlenmiştir. Artan partikül boyutu ile maksimum kütle kaybı hızında yaşanan düşüşler, artan partikül boyutunun iç kısımların daha düşük sıcaklıklarda kalmasını sağlaması nedeniyle daha düşük miktarda uçucu madde oluşması ve/veya artan partikül boyutunun partikülü terk etmeye çalışan uçuculara fazladan bir engel oluşturmasıyla açıklanabilir. Düşük ısıtma hızlarında (5, 10 ve 20 °C/dk) ise bu durumun oluşmadığı ve artan partikül boyutu neticesinde maksimum kütle kaybı hızının da arttığı gözlenmiştir.

3.3. Kinetik Parametrelerin Hesaplanması

Mevcut çalışmanın kinetik parametrelerin hesaplanması kısmında (i) sadece model içermeyen kinetik yöntemleri kullanmış çalışmaların aksine, hem aktivasyon enerjisi hem de reaksiyon derecesi ve pre-ekspansiyonel faktörü hesaplayabilmek, (ii) model bazlı ve model içermeyen kinetik yöntemlerden belirlenen aktivasyon enerjisi değerlerini karşılaştırabilmek, ve (iii) sadece model bazlı kinetik yöntem kullanarak ve reaksiyonları birinci dereceden kabul ederek yapılan çalışmaların aksine, reaksiyonların derecesini istatistiksel kontrol yöntemiyle belirleyebilmek amacıyla hem model bazlı hem de model içermeyen kinetik yöntemler kullanılmıştır.

3.3.1. Model içermeyen kinetik yöntem ile yapılan hesaplamalar

Kiraz çekirdeklerinin aktif piroliz basamaklarının (2. ve 3. basamaklar) aktivasyon enerjilerinin hesaplanması amacıyla model içermeyen yöntem olarak Kissinger-Akahir-Sunose (KAS) yöntemi kullanılmıştır. KAS yöntemi model içermeyen

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMEYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

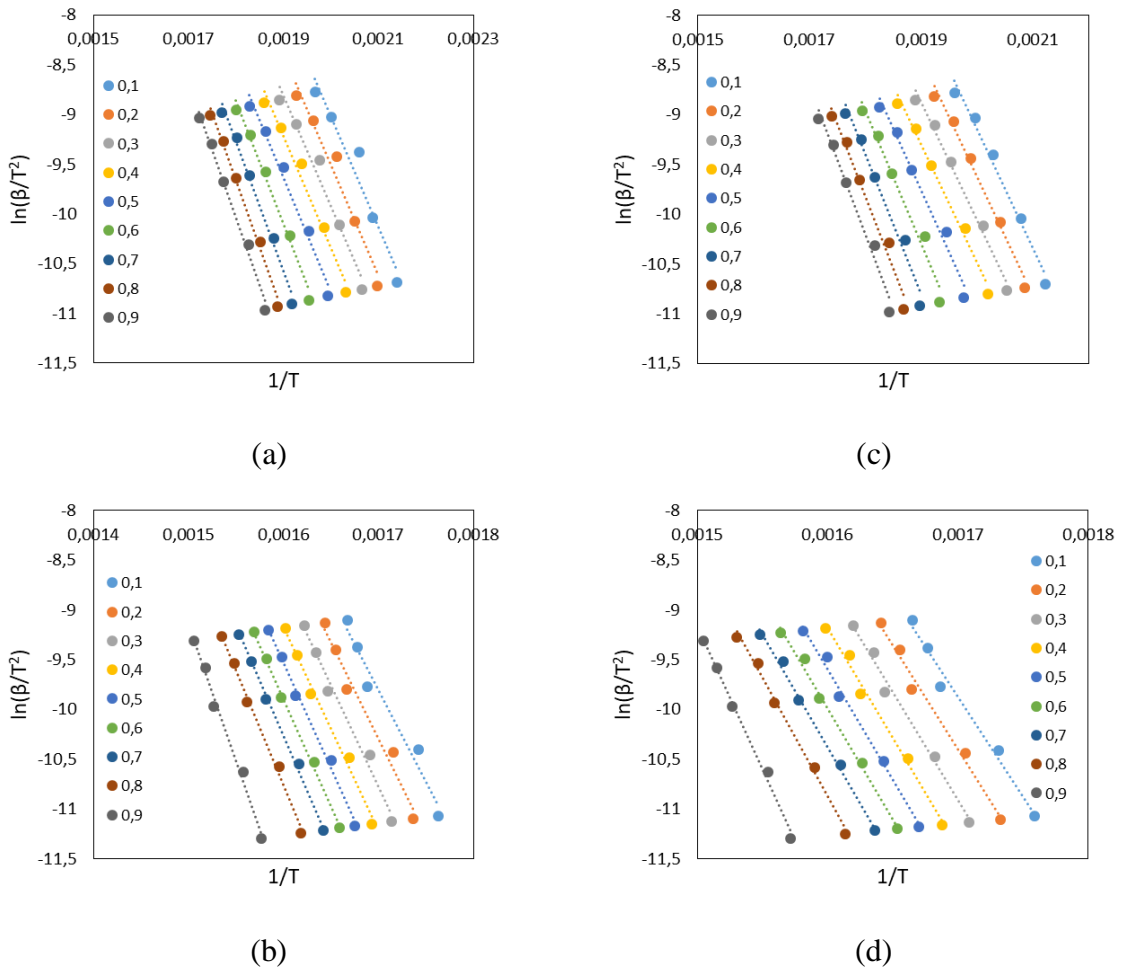
integral kinetik yöntemidir ve Bölüm 2.4’te verilen integral formundaki Eşitlik 8’de Coats-Redfern yaklaşımı kullanarak elde edilir [40]. KAS yönteminde kullanılan eşitlik [40] aşağıda verilmiştir:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E_a g(\alpha)}\right) - \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

Eşitlik 9’dan da görüldüğü üzere kiraz çekirdeğinin aktif piroliz basamaklarının aktivasyon enerjileri $\ln(\beta/T^2) - 1/T$ grafiklerinin eğimlerinden hesaplanmıştır. Bu amaçla çizilen $\ln(\beta/T^2) - 1/T$ grafikleri Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2’de oluşturulan $\ln(\beta/T^2) - 1/T$ grafiklerindeki her bir dönüşüm değeri için elde edilen noktalara oturtulan doğrusal denklemler, bu denklemlerin R^2 değerleri ve doğrusal denklemlerin eğimlerinden hesaplanan aktivasyon enerjileri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde, 75-150 μm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 2. piroliz basamağı için aktivasyon enerjisinin 0,4 dönüşüm oranına kadar 92-93 kJ/mol civarında neredeyse sabit değerde seyrettiğini, daha sonra ise dönüşüm arttıkça sürekli artış göstererek 0,9 dönüşüm oranında 114 kJ/mol değerine ulaştığı görülmektedir. Benzer davranış 150-250 μm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 2. piroliz basamağı için de gözlenmiştir. Aktivasyon enerjisi 0,4 dönüşüm oranına kadar 98-100 kJ/mol civarında neredeyse sabit değerde seyretmiş, daha sonra ise dönüşüm arttıkça sürekli artış göstererek 0,9 dönüşüm oranında 124 kJ/mol değerine ulaşmıştır. 75-150 μm ve 150-250 μm partikül boyutlarındaki kiraz çekirdeği 2. piroliz basamağı için ortalama aktivasyon enerjileri sırasıyla, 100 ve 108 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Kiraz çekirdeğinin 0,1-0,9 dönüşüm değerleri için KAS yönteminden elde edilen $\ln(\beta/T^2) - 1/T$ grafikleri a) 2. basamak, 75-150 μm b) 3. basamak, 75-150 μm c) 2. basamak, 150-250 μm d) 3. basamak, 150-250 μm

G. Gözke, K. Açıklan

75-150 µm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 3. piroliz basamağı için incelendiğinde (Tablo 3), aktivasyon enerjisinin artan dönüşüm oranı ile sürekli artış göstererek, 0,1 dönüşüm oranında 154 kJ/mol'den 0,9 dönüşüm oranında 227 kJ/mol'e ulaştığı görülmektedir. Hemen hemen aynı durum 150-250 µm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 3. piroliz basamağında da gözlenmiştir. Aktivasyon enerjisi, 0,5-0,6 dönüşüm oranlarında sabit değerlerde seyretmiş, bunun dışında ise 0,1 dönüşüm oranında 166 kJ/mol'den 0,9 dönüşüm oranında 240 kJ/mol'e sürekli artış göstermiştir. 75-150 µm ve 150-250 µm partikül boyutlarındaki kiraz çekirdeği 3. piroliz basamağı için ortalama aktivasyon enerjileri sırasıyla, 179 ve 189 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3'e göre kiraz çekirdeğinin hem 2. hem de 3. piroliz basamakları için partikül boyutunun 75-150 µm'den 150-250 µm'ye çıkarılmasıyla aktivasyon enerjilerinin gerek dönüşüm bazında gerekse ortalama bazda arttığı görülmektedir. Bir başka deyişle, yapılan çalışmalar partikül boyutundaki artışın (75-150 µm → 150-250 µm) aktivasyon enerjisinde de artışa neden olduğunu göstermiştir. Benzer durum, Niu ve Liu'nun çalışmasında [41] çam ağacı dalları ve çam ağacı kabukları için partikül boyutunun 75-150 µm'den 150-300 µm'ye çıkarılmasında da gözlenmiştir. Suriapparao ve Vinu da [42], ağaç talaş tozunun sekiz farklı partikül boyutunun (26,5-925 µm) yavaş piroliz kinetiğini inceledikleri çalışmalarında, düşük ısıtma hızlarında (5, 10 ve 20 °C/dk) partikül boyutundaki artış ile aktivasyon enerjisinde artış gözlediklerini raporlamışlardır.

Yapılan çalışmalar, her iki partikül boyutu için geçerli olmak üzere 3. bölge aktivasyon enerjisinin gerek dönüşüm gerekse ortalama değer bazında 2. bölge aktivasyon enerjisinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bölüm 3.2.1'de belirtildiği gibi, 2. ve 3. bölgeler sırasıyla hemiselüloz ve selülozun ısıl bozunmasını yansıttığından, ve selülozun hemiselüloza kıyasla daha yüksek ısıl kararlılığa sahip olduğu bilindiğinden, elde edilen sonuçlar beklenen durumu yansıtmıştır.

Tablo 3. Kiraz çekirdeği aktif piroliz basamakları için KAS yöntemiyle 0,1-0,9 dönüşüm değerleri için oturtulan doğrusal denklemler, doğrusal denklemlerin R^2 değerleri ve doğrusal denklemlerin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjileri

	Dönüşüm	R^2	2. basamak için doğrusal denklem	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	R^2	3. basamak için doğrusal denklem	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
75-150 µm partikül boyutu	0,1	0,9494	$y = -11104x + 13,193$	92	0,9641	$y = -18502x + 21,649$	154
	0,2	0,9658	$y = -11209x + 12,913$	93	0,9748	$y = -19481x + 22,825$	162
	0,3	0,9713	$y = -11099x + 12,273$	92	0,9833	$y = -20182x + 23,535$	168
	0,4	0,9775	$y = -11153x + 11,971$	93	0,9899	$y = -20686x + 23,937$	172
	0,5	0,9818	$y = -11539x + 12,290$	96	0,9940	$y = -21124x + 24,261$	176
	0,6	0,9881	$y = -12376x + 13,411$	103	0,9967	$y = -21439x + 24,405$	178
	0,7	0,9895	$y = -13035x + 14,187$	108	0,9973	$y = -21840x + 24,677$	182
	0,8	0,9905	$y = -13464x + 14,567$	112	0,9951	$y = -23181x + 26,319$	193
	0,9	0,9900	$y = -13702x + 14,625$	114	0,9898	$y = -27272x + 31,756$	227
	Ort.	0,9782	-	100	0,9872	-	179
150-250 µm partikül boyutu	0,1	0,9860	$y = -12007x + 14,873$	100	0,9834	$y = -19937x + 24,016$	166
	0,2	0,9885	$y = -11933x + 14,235$	99	0,9873	$y = -20867x + 25,073$	173
	0,3	0,9890	$y = -11733x + 13,410$	98	0,9893	$y = -21687x + 25,954$	180
	0,4	0,9877	$y = -11765x + 13,050$	98	0,9897	$y = -21996x + 26,002$	183
	0,5	0,9808	$y = -12337x + 13,673$	103	0,9918	$y = -22296x + 26,078$	185
	0,6	0,9767	$y = -13323x + 15,021$	111	0,9934	$y = -22210x + 25,548$	185
	0,7	0,9773	$y = -14032x + 15,850$	117	0,9949	$y = -22529x + 25,670$	187
	0,8	0,9800	$y = -14597x + 16,454$	121	0,9946	$y = -23772x + 27,160$	197
	0,9	0,9800	$y = -14869x + 16,558$	124	0,9933	$y = -28838x + 34,086$	240
	Ort.	0,9829	-	108	0,9909	-	189

3.3.2. Model bazlı kinetik yöntem ile yapılan hesaplamalar

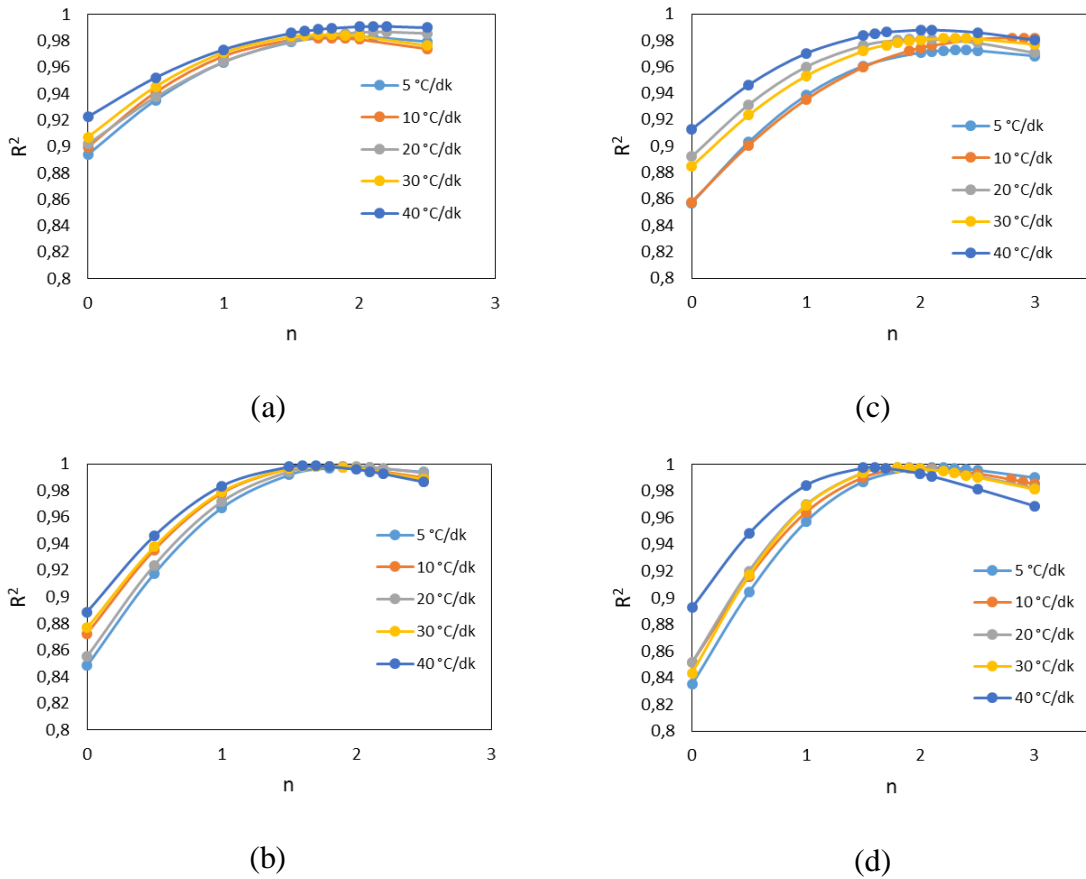
Coats-Redfern yöntemi mevcut çalışmada kiraz çekirdeklerinin aktif piroliz basamaklarının (2. ve 3. basamaklar) aktivasyon enerjisi, reaksiyon derecesi ve pre-eksponansiyel faktör değerlerinin hesaplanması amacıyla kullanılan model bazlı integral

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMEYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

kinetik yöntemidir. Bölüm 2.4'te verilen Eşitlik 7'de reaksiyon modeli olarak n . dereceden kimyasal reaksiyon modeli $(1-\alpha)^n$ kullanılır, integralinin alınmasında analitik çözümü olmayan sıcaklık integrali Taylor serisi açılımı ile kestirilir ve $2RT/E \ll 1$ sadeleştirilmesi yapılırsa Coats-Redfern eşitliği elde edilir [43]:

$$\ln g(\alpha) = -\frac{E}{RT} + \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) \quad (10)$$

Burada, $n = 1$ ise $g(\alpha) = -(\ln(1 - \alpha))/T^2$ ve $n \neq 1$ ise $g(\alpha) = (1 - (1 - \alpha)^{1-n})/((1 - n)T^2)$ 'dir. Eşitlik 10'a göre oluşturulan $\ln g(\alpha) - 1/T$ grafiklerinin reaksiyon derecesi, n uygun seçilmiş ise, bir doğru şeklinde olması gerekir. Bu doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi, kayımından ise pre-eksponansiyel faktör hesaplanabilir. Bu amaçla, Coats-Redfern yöntemi ile kiraz çekirdeği aktif piroliz basamaklarının kinetik parametrelerini hesaplayabilmek için tüm ısıtma hızlarında çeşitli reaksiyon mertebeleri (n) değerleri alınarak elde edilen doğruların korelasyon katsayıları (R^2) hesaplanmış, $R^2 - n$ grafikleri çizilmiş ve çizilen bu grafiklerden en yüksek R^2 değerine sahip n değeri, yani en uygun reaksiyon mertebesi, belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen en uygun reaksiyon mertebesi değerleri kullanılarak $\ln g(\alpha) - 1/T$ grafikleri çizilmiş, ve bu grafiklerdeki doğruların eğim ve kayımından sırasıyla, aktivasyon enerjisi ve pre-eksponansiyel faktör değerleri hesaplanmıştır. İki aktif piroliz basamağı için çalışılan tüm ısıtma hızlarında ve partikül boyutlarında oluşturulan $R^2 - n$ grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'ten belirlenen en uygun n değerleri kullanılarak oluşturulan $\ln g(\alpha) - 1/T$ grafikleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Coats-Redfern yöntemi kullanılarak hesaplanan kinetik parametreler (aktivasyon enerjisi, pre-eksponansiyel faktör ve reaksiyon derecesi), kinetik parametrelerin hesaplanmasında kullanılan doğrusal denklemler ve bu denklemlere ait korelasyon katsayısı değerleri Tablo 4'te toplu olarak sunulmuştur.



Şekil 3. Coats-Redfern yöntemi için oluşturulan $R^2 - n$ grafikleri a) 2. basamak, 75-150 μm b) 3. basamak, 75-150 μm c) 2. basamak, 150-250 μm d) 3. basamak, 150-250 μm

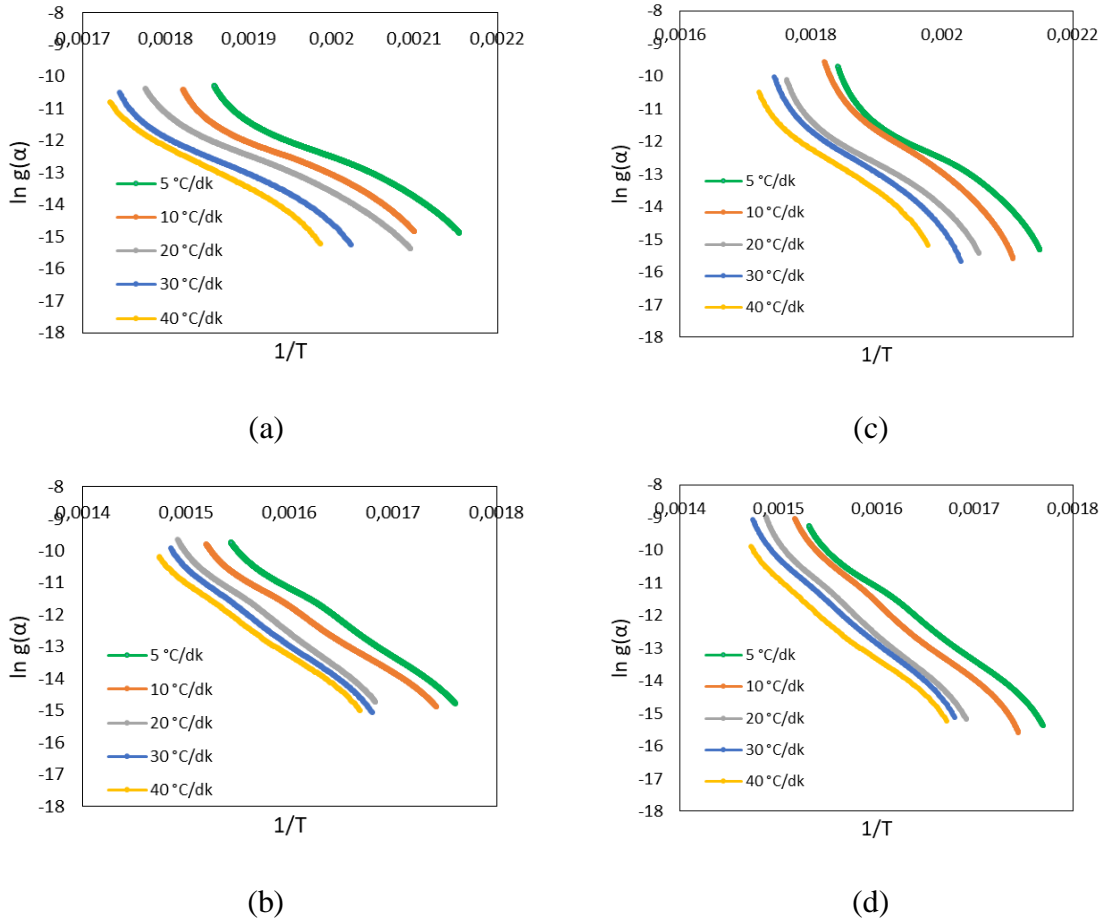
Tablo 4 incelendiğinde 75-150 μm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 2. piroliz basamağı için ortalama aktivasyon enerjisinin Coats-Redfern yöntemi ile 112 kJ/mol olarak hesaplandığı görülebilir. Bu değer, KAS yöntemi ile 100 kJ/mol olarak hesaplanmıştır, ve her iki yöntemle hesaplanan ortalama aktivasyon enerjisi değerleri birbirine uyumludur. Benzer durum 150-250 μm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 2. piroliz basamağı için de gözlenmiştir. KAS ve Coats-Redfern yöntemleriyle hesaplanan ortalama aktivasyon enerjisi değerleri sırasıyla 108 ve 126 kJ/mol olup, birbirleriyle tutarlıdır.

G. Gözke, K. Açıklan

75-150 μm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 3. piroliz basamağı için Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanan ortalama aktivasyon enerjisi değeri 190 kJ/mol'dür (Tablo 4). KAS yöntemiyle hesaplanan ortalama aktivasyon enerjisi ise 179 kJ/mol olup, iki yöntemden elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Benzer durum 150-250 μm partikül boyutundaki kiraz çekirdeği 3. piroliz basamağında da gözlenmiştir. Bu bölge için KAS ve Coats-Redfern yöntemleriyle elde edilen ortalama aktivasyon enerjileri sırasıyla 189 ve 210 kJ/mol olup, birbirleriyle tutarlıdır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki aktif piroliz basamağı için çalışılan tüm partikül boyutlarında KAS ve Coats-Redfern yöntemlerinden elde edilen ortalama aktivasyon enerjisi değerlerinin birbiriyle tutarlı olduğu söylenebilir. Tüm durumlarda Coats-Redfern yöntemi ile elde edilen sonuçlar KAS yöntemine göre daha büyük çıkmıştır. Sayısal olarak ifade edilecek olursa, Coats-Redfern yöntemi ile KAS yöntemine kıyasla ortalama olarak %11,5 daha yüksek ortalama aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4'e göre kiraz çekirdeğinin 2. piroliz basamağı için partikül boyutunun 75-150 μm 'den 150-250 μm 'ye çıkarılmasıyla Coats-Redfern yöntemiyle hesaplanan ortalama aktivasyon enerjisinin 112 kJ/mol'den 126 kJ/mol'e yükseldiği görülmüştür. Benzer şekilde kiraz çekirdeğinin 3. piroliz basamağı için de partikül boyutunun 75-150 μm 'den 150-250 μm 'ye çıkarılmasıyla Coats-Redfern yöntemiyle hesaplanan ortalama aktivasyon enerjisinin 190 kJ/mol'den 210 kJ/mol'e arttığı gözlenmiştir. Partikül boyutunun artırılmasıyla aktivasyon enerjisi değerlerinin de artış göstermesi KAS yöntemiyle hesaplanan değerlerde de gözlenmiş olup, aynı eğilimin raporlandığı çalışmalar Bölüm 3.3.1'de belirtilmiştir. Aktivasyon enerjisi bir reaksiyonun gerçekleşmesi için minimum enerji gereksinimini ifade ettiğinden, artan partikül boyutunda söz konusu piroliz reaksiyonlarının gerçekleşmesi için daha yüksek enerjiye ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun, artan partikül boyutu neticesinde ortaya çıkan ısı ve/veya kütle aktarım kısıtlamalarından kaynaklandığı düşünülebilir.



Şekil 4. Coats-Redfern yöntemi için oluşturulan $\ln g(\alpha) - 1/T$ grafikleri a) 2. basamak, 75-150 μm b) 3. basamak, 75-150 μm c) 2. basamak, 150-250 μm d) 3. basamak, 150-250 μm

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMEYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Coats-Redfern yöntemiyle yapılan hesaplamalar, her iki partikül boyutu için geçerli olmak üzere, 3. basamak ortalama aktivasyon enerjisi değerlerinin 2. basamak ortalama aktivasyon enerjisi değerlerinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Aynı durum KAS yöntemiyle yapılan hesaplamalarda da gözlenmiş olup, 3. basamakta bozulan temel bileşen olan selülozun, 2. basamakta bozulan bileşen olan hemiselüloza kıyasla daha yüksek ısı kararlılığına sahip olmasıyla açıklanmıştır.

Tablo 4 incelendiğinde kiraz çekirdeği 2. aktif piroliz basamağında 75-150 ve 150-250 µm partikül boyutları için Coats-Redfern yöntemiyle hesaplanan reaksiyon mertebelerinin sırasıyla 1,97 ve 2,32 olduğu görülebilir. Benzer şekilde, kiraz çekirdeği 3. aktif piroliz basamağında 75-150 ve 150-250 µm partikül boyutları için Coats-Redfern yöntemiyle hesaplanan reaksiyon mertebeleri sırasıyla 1,88 ve 2,06 olarak bulunmuştur.

Kiraz çekirdeği 2. aktif piroliz basamağında 75-150 ve 150-250 µm partikül boyutları için Coats-Redfern yöntemiyle hesaplanan pre-eksponansiyel faktör değerleri sırasıyla $3,54 \times 10^{11}$ ve $2,23 \times 10^{13} \text{ dk}^{-1}$ 'dir (Tablo 4). Kiraz çekirdeği 3. aktif piroliz basamağı için ise bu değerler sırasıyla $5,07 \times 10^{16}$ ve $4,06 \times 10^{18} \text{ dk}^{-1}$ olarak bulunmuştur.

González ve ark. [29] kiraz çekirdeğinin izotermal olmayan pirolizini 5-25 K/dk ısıtma hızlarında 600 °C'ye kadar çalışmışlar ve Eşitlik 5'te reaksiyon modelini birinci dereceden seçerek aktivasyon enerjisi değerlerini 2. ve 3. bölge için sırasıyla 100,5-115,9 ve 89-114,2 kJ/mol değerleri arasında hesaplamışlardır. 2. bölge için raporlanan sonuçlar mevcut çalışma ile oldukça yakındır ve uyum içindedir. 3. bölge için raporlanan sonuçların ise mevcut çalışmada hesaplanan değerlere göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bir diğer çalışmada [30], kiraz çekirdeğinin izotermal olmayan pirolizi 5-40 °C/dk ısıtma hızlarında 1000 °C'ye kadar çalışılmış, tek aktif piroliz bölgesi tespit edilerek bu bölge için ortalama aktivasyon enerjisi, reaksiyon modeli gerektirmeyen Friedman, Flynn-Wall-Ozawa, Kissinger-Akahira-Sunose ve Starink yöntemleri ile sırasıyla 274,6, 272,2, 268,5 ve 272,2 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışmada 3. bölge için hesaplanan değerler göz önüne alınsa dahi raporlanan bu sonuçlara göre belirgin bir biçimde daha düşük oldukları görülmektedir.

Tablo 4. Kiraz çekirdeği aktif piroliz basamakları için farklı partikül boyutu ve ısıtma hızlarında Coats-Redfern yöntemiyle oturtulan doğrusal denklemler, doğrusal denklemlerin R^2 değerleri, doğrusal denklemlerden hesaplanan aktivasyon enerjileri (E_a), pre-eksponansiyel faktörler (A) ve reaksiyon mertebeleri (n)

Basamak	Partikül boyutu	Isıtma hızı (°C/dk)	R^2	Doğrusal denklem	E_a (kJ/mol)	A (dk ⁻¹)	n	
2. basamak	75-150 µm	5	0,9830	$y = -12663x + 12,775$	105	2,24E+10	1,97	
		10	0,9820	$y = -12831x + 12,468$	107	3,33E+10	1,82	
		20	0,9867	$y = -13033x + 12,324$	108	5,87E+10	2,12	
		30	0,9845	$y = -13769x + 13,037$	115	1,90E+11	1,82	
		40	0,9909	$y = -14890x + 14,716$	124	1,47E+12	2,10	
		Ortalama	0,9854	-	112	3,54E+11	1,97	
	150-250 µm	5	0,9725	$y = -13989x + 15,345$	116	3,23E+11	2,34	
		10	0,9816	$y = -16670x + 20,199$	139	9,87E+13	2,66	
		20	0,9808	$y = -14330x + 14,539$	119	5,91E+11	2,13	
		30	0,9816	$y = -15753x + 16,869$	131	1,00E+13	2,32	
		40	0,9878	$y = -15082x + 15,029$	125	2,03E+12	2,15	
		Ortalama	0,9809	-	126	2,23E+13	2,32	
	3. basamak	75-150 µm	5	0,9982	$y = -21606x + 23,418$	180	1,60E+15	1,98
			10	0,9981	$y = -20991x + 21,821$	175	6,29E+14	1,86
20			0,9982	$y = -24374x + 26,429$	203	1,47E+17	1,93	
30			0,9980	$y = -24067x + 25,561$	200	9,11E+16	1,84	
40			0,9982	$y = -22933x + 23,411$	191	1,35E+16	1,77	
Ortalama			0,9981	-	190	5,07E+16	1,88	
150-250 µm		5	0,9974	$y = -22916x + 25,533$	191	1,41E+16	2,08	
		10	0,9964	$y = -25507x + 29,255$	212	1,29E+18	2,18	
		20	0,9965	$y = -27167x + 30,944$	226	1,49E+19	2,10	
		30	0,9962	$y = -26285x + 29,235$	219	3,92E+18	2,08	
		40	0,9954	$y = -24381x + 25,685$	203	1,39E+17	1,87	
		Ortalama	0,9964	-	210	4,06E+18	2,06	

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, lignoselülozik bir biyokütle atık madde olan kiraz çekirdeğinin farklı partikül boyutlarındaki numuneleri, farklı ısıtma hızlarında izotermal olmayan piroliz şartlarında termogravimetrik analize tabi tutulmuştur. Bu çalışmalar neticesinde kiraz

G. Gözke, K. Açıklan

çekirdeğinin piroliz prosesi esnasındaki ısıl bozunma davranışları ayrıntılı olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar, kiraz çekirdeği piroliz prosesinin nem ve düşük molekül ağırlıklı uçucuların uzaklaştırıldığı 1. basamak; temel olarak hemiselüloz, selüloz ve ligninin ısıl bozunmaya uğradığı 2., 3. ve 4. basamaklar olmak üzere toplam dört basamaktan oluştuğunu göstermiştir. 2. ve 3. basamaklar aktif piroliz basamakları olarak tanımlanmış olup, bu basamaklarda toplam kütlenin yaklaşık %55'inin 400 °C'ye ulaşmadan ısıl bozunmaya uğradığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ısıtma hızı ve partikül boyutu parametrelerinin aktif piroliz basamakları karakteristik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Aktif piroliz basamaklarında, kiraz çekirdeklerinin çalışılan tüm partikül boyutları için, model gerektirmeyen KAS integral yöntemi ve model bazlı Coats-Redfern integral yöntemi kullanılarak kinetik parametreler hesaplanmıştır. Aktif piroliz basamaklarında çalışılan tüm partikül boyutları için KAS ve Coats-Redfern yöntemleri kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değerlerinin birbirleriyle uyumlu oldukları gözlenmiştir. Coats-Redfern yöntemi ile elde edilen sonuçların KAS yönteminde elde edilen sonuçlara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Her iki aktif piroliz basamağında da çalışılan aralıklarda partikül boyutunun artması ile aktivasyon enerjisinde artış gözlenmiştir. Coats-Redfern yöntemi dahilinde aktif piroliz basamaklarının çalışılan partikül boyutları için reaksiyon mertebeleri ve pre-eksponansiyel faktör değerleri hesaplanmıştır. Böylece, kiraz çekirdeği pirolizinin kinetik parametrelerinin hesaplanması tamamlanmış ve ısıl bozunma davranışı ayrıntılı bir biçimde belirlenmiş olduğundan, ilgili piroliz proseslerinin tasarlanması, optimizasyonu ve endüstriyel ölçüğe büyütülmesi için önem arz eden aşamalar tamamlanmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda farklı kinetik hesaplama yöntemleri kullanılarak çalışmanın karşılaştırma kapsamı genişletilebilir. Partikül boyutu ilave olarak daha büyük boyutlarda çalışılarak, belirlenen partikül boyutu etkilerinin daha da artan partikül boyutlarında geçerli olup olmadığı kontrol edilebilir. Kiraz çekirdeklerinin mevcut çalışmada belirlenen piroliz davranışları göz önüne alınarak büyük ölçekli reaktörlerde pirolizi çalışılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, finansal destek için Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinasyon Birimi'ne (Proje No. 2018 / AP / 0017) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] V. Dhyani and T. Bhaskar, "A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass", *Renewable Energy*, 129, 695-716, 2018.
- [2] R. E. Guedes, A. S. Luna, and A. R. Torres, "Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129, 134-149, 2018.
- [3] A. A. Lappas, E. F. Iliopoulou, K. Kalogiannis and S. Stefanidis, "Conversion of biomass to fuels and chemicals via thermochemical processes" in *Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels*, M. Aresta, A. Dibenedetto and F. Dumeignil, Eds. Germany: De Gruyter, 2012, pp 333-361.
- [4] S. Wang, G. Dai, H. Yang and Z. Luo, "Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review", *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33-86, 2017.
- [5] A. Sriram and G. Swaminathan, "Pyrolysis of *Musa balbisiana* flower petal using thermogravimetric studies", *Bioresource Technology*, 265, 236-246, 2018.
- [6] Th. Damartzis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis and A. Zabaniotou, "Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA)", *Bioresource Technology*, 102, 6230-6238, 2011.
- [7] G. Özsin and A. E. Pütün, "TGA/MS/FT-IR study for kinetic evaluation and evolved gas analysis of a biomass/PVC co-pyrolysis process", *Energy Conversion and Management*, 182, 143-153, 2019.
- [8] M. A. Sokoto, R. Singh, B. B. Krishna, J. Kumar and T. Bhaskar, "Non-isothermal kinetic study of de-oiled seed cake of African star apple (*Chrosophyllum albidum*) using thermogravimetry", *Heliyon*, 2, e00172, 2016.
- [9] E. Amini, M. S. Safdari, D. R. Weise and T. H. Fletcher, "Pyrolysis kinetics of live and dead wildland vegetation from the Southern United States", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 142, 104613, 2019.
- [10] A. A. Wani, P. Singh, K. Gul, M. H. Wani and H. C. Langowski, "Sweet cherry (*Prunus avium*): critical factors affecting the composition and Shelf life", *Food Packaging and Shelf life*, 1, 86-99, 2014.
- [11] FAO, *Food and Agriculture Organization of United Nations*, FAOSTAT, Crops, Cherries. [Online] Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> [Accessed: Jan. 12, 2020]
- [12] M. Dolżyńska, S. Obidziński, M. Kowczyk-Sadowy and M. Krasowska, "Densification and combustion of cherry Stones", *Energies*, 12, 3042, 2019.

KIRAZ ÇEKİRDEĞİ PİROLİZ KİNETİĞİNİN MODEL İÇERMİYEN VE MODEL BAZLI İNTEGRAL KİNETİK YÖNTEMLER KULLANILARAK İZOTERMAL OLMAYAN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ VERİLERİ ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

- [13] A. E. Gürel, Ü. Ağbulut, A. Ergün and İ. Ceylan, “Environmental and economic assessment of a low energy consumption household refrigerator”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2), 365-372, 2020.
- [14] R. Pietrzak, P. Nowicki, J. Kaźmierczak, I. Kuszyńska, J. Goscińska and J. Przepiórski, “Comparison of the effects of different chemical activation methods on properties of carbonaceous adsorbents obtained from cherry stones”, *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 1187-1191, 2014.
- [15] M. Olivares-Marín, C. Fernández-González, A. Macías-García and V. Gómez-Serrano, “Preparation of activated carbon from cherry stones by chemical activation with ZnCl₂”, *Applied Surface Science*, 252, 5967-5971, 2006.
- [16] F. Oğuz Erdoğan, “Düşük maliyetli adsorbentler üzerine dispers sarı 211 tekstil boyasının adsorpsiyonu”, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 17, 889-898, 2017.
- [17] Ö. Gerçel and G. Seydioğlu, “Kiraz çekirdeğinden granül aktif karbon üretimi”, *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 16(2), 189-193, 2015.
- [18] M. Olivares-Marín, C. Fernández-González, A. Macías-García and V. Gómez-Serrano, “Porous structure of activated carbon prepared from cherry stones by chemical activation with phosphoric acid”, *Energy & Fuels*, 21(5), 2942-2949, 2007.
- [19] P. Nowicki, J. Kazmierczak and R. Pietrzak, “Comparison of physicochemical and sorption properties of activated carbons prepared by physical and chemical activation of cherry stones”, *Powder Technology*, 269, 312-319, 2015.
- [20] M. Olivares-Marín, C. Fernández-González, A. Macías-García and V. Gómez-Serrano, “Preparation of activated carbon from cherry stones by physical activation in air. Influence of the chemical carbonisation with H₂SO₄”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 131-137, 2012.
- [21] H. Tutar Kahraman and E. Pehlivan, “Cr⁶⁺ removal using oleaster (*Elaeagnus*) seed and cherry (*Prunus avium*) stone biochar”, *Powder Technology*, 306, 61-67, 2017.
- [22] N. Álvarez-Gutiérrez, M. V. Gil, F. Rubiera and C. Pevida, “Kinetics of CO₂ adsorption on cherry stone-based carbons in CO₂/CH₄ separations”, *Chemical Engineering Journal*, 307, 249-257, 2017.
- [23] C. J. Durán-Valle, M. Gómez-Corzo, J. Pastor-Villegas and V. Gómez-Serrano, “Study of cherry stones as raw material in preparation of carbonaceous adsorbents”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 73, 59-67, 2005.
- [24] A. Venegas-Gómez, M. Gómez-Corzo, A. Macías-García and J. P. Carrasco-Amador, “Charcoal obtained from cherry stones in different carbonization atmospheres”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103561, 2020.
- [25] C. J. Durán-Valle, M. Gómez-Corzo, V. Gómez-Serrano, J. Pastor-Villegas and M. L. Rojas-Cervantes, “Preparation of charcoal from cherry stones”, *Applied Surface Science*, 252, 5957-5960, 2006.
- [26] J. Molenda, M. Swat and E. Osuch-Slomka, “Effect of thermal conditions of pyrolysis process on the quality of biochar obtained from vegetable waste”, *Engineering and Protection of Environment*, 21(3), 289-302, 2018.
- [27] G. Duman, C. Okutucu, S. Ucar, R. Stahl and J. Yanik, “The slow and fast pyrolysis of cherry seed”, *Bioresource Technology*, 102, 1869-1878, 2011.
- [28] P. Yangali, A. M. Celaya and J. L. Goldfarb, “Co-pyrolysis reaction rates and activation energies of West Virginia coal and cherry pit blends”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108, 203-211, 2014.
- [29] J. F. González, J. M. Encinar, J. L. Canito, E. Sabio and M. Chacón, “Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 67, 165-190, 2003.
- [30] G. Özsin and A. E. Pütün, “Kinetics and evolved gas analysis for pyrolysis of food processing wastes using TGA/MS/FT-IR”, *Waste Management*, 64, 315-326, 2017.
- [31] L. M. Alvarenga, T. P. Xavier, M. A. S. Barrozo, M. S. Babelos and T. S. Lira, “Analysis of reaction kinetics of carton packaging pyrolysis”, *Procedia Engineering*, 42, 113-122, 2012.
- [32] P. Bartocci, M. D. Amico, N. Moriconi, G. Bidini and F. Fantozzi, “Pyrolysis of olive stone for energy purposes”, *Energy Procedia*, 82, 374-380, 2015.
- [33] N. Voća, N. Bilandžija, V. Jurišić, A. Matin, T. Krička and I. Sedak, “Proximate, ultimate and energy value analysis of plum biomass by-products case study: *Crotia*’s potential”, *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(6), 1655-1666, 2016.
- [34] H. F. Gerçel, G. Çayır and Ö. Gerçel, “Energy applications of biomass: pyrolysis of apricot stone”, *Energy Sources Part A*, 28, 611-618, 2006.
- [35] T. Uysal, G. Duman, Y. Onal, I. Yasa and J. Yanik, “Production of activated carbon and fungicidal oil from peach stone by two-stage process”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108, 47-55, 2014.
- [36] J. M. Faleeva, V. A. Sinelschikov, G. A. Sytchev and V. M. Zaichenko, “Exothermic effect during torrefaction”, *Journal of Physics Conference Series*, 946(1), 012033, 2018.
- [37] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis”, *Fuel*, 86, 1781-1788, 2007.
- [38] X. Zhang, M. Xu, R. Sun and L. Sun, “Study on biomass pyrolysis kinetics”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 128, 493-496, 2006.



G. Gözke, K. Açıkalm

- [39] J. Zhang, B. Huang, L. Chen, J. Du, W. Li and Z. Luo, “Pyrolysis kinetics of hullless barley straw using the distributed activation energy model (DAEM) by the TG/DTA technique and SEM/XRD characterizations for hullless barley straw derived biochar”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35(3), 1039-1050, 2018.
- [40] M. R. Baray Guerrero, M. Marques da Silva Paula, M. Meléndez Zaragoza, J. Salinas Gutiérrez, V. Guzmán Velderrain, A. López Ortiz and V. Collins-Martínez, “Thermogravimetric study on the pyrolysis kinetics of apple pomace as waste biomass”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 16619-16627, 2014.
- [41] H. Niu and N. Liu, “Effect of particle size on pyrolysis kinetics of forest fuels in nitrogen”, *Fire Safety Science- Proceedings of the Eleventh International Symposium*, 2014, pp 1393-1405.
- [42] D. V. Suriapparao and R. Vinu, “Effect of biomass particle size on slow pyrolysis kinetics and fast pyrolysis product distribution”, *Waste and Biomass Valorization*, 9, 465-477, 2018.
- [43] K. Açıkalm, “Pyrolytic characteristics and kinetics of pistachio shell by thermogravimetric analysis”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109, 227-235, 2012.





ILGIN LİNYİT İŞLETMESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI VE RİSK ANALİZİ

Mahmut Suat DELİBALTA^{1,*} , Mustafa GÜNDOĞAR² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 51240 Niğde

² Yeni Çetlek Kömür ve Madencilik AŞ, Ilgın Linyit İşletmesi Şubesi, Ilgın 42605 Konya

ÖZET

Kömür yerkürede kısmen düzenli rezerv dağılımından dolayı tüm ülkeler için stratejik bir enerji kaynağıdır. Ancak; çevresel kaygılar nedeniyle gelecekte kömürün yerini alternatif enerji kaynaklarının alacağı fikri yaygın olsa da, dünya enerji politikaları 2040 yılına kadar kömür kullanım payının (%27,1) önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, kömürün kendiliğinden yanması geçmişte ve günümüzde olduğu gibi gelecekte de önemli bir problem olmaya devam edecektir. Kömürün kendiliğinden yanması ve açık ocak yangınları, Ilgın linyit işletmesinde de sorun olarak karşımıza çıkmakta, bazen stoka çekilen kömürlerin yanması sonucu büyük rezerv ve ekonomik kayıplar yaşanmaktadır. Ilgın linyit işletmesindeki 5 farklı üretim noktasından alınan kömür numunesi ile yapılan kendiliğinden yanma deney sonuçlarına göre; kesişim noktası değerleri çok fazla bir sapma göstermemiş, genelde tutuşma sıcaklığı 195-234 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Laboratuvar testlerine göre; yangına yakınlık indeksleri 2,73-3,73 arasında, risk düzeyi ise “düşük-orta” seviyede tespit edilmiştir. Ayrıca; yapılan termo-gravimetri (TG) / diferansiyel termal analizler (DTA) ile kömürün ortam sıcaklığına bağlı olarak oksidasyona uğradığı ve kendiliğinden yanma meydana getirebileceği gözlenmiştir. Bu maksatla yapılan incelemede; kömürün kendiliğinden yanma mekanizması, yanmayı etkileyen faktörler ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilen bulgular sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ilgın, Kömür, Kendiliğinden yanma, İş sağlığı ve güvenliği

SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL AND RISK ANALYSIS IN ILGIN OPENCAST MINING

ABSTRACT

Coal is a strategic energy source for all countries, partly due to the regular distribution of reserves in the earth. But; although it is widely believed that alternative energy sources will replace coal due to environmental concerns, world energy policies reveal the importance of coal use share (27.1%) by 2040. For this reason, the spontaneous combustion of coal will continue to be an important problem in the future as it was in the past and today. Spontaneous combustion and open pit fires also appear as an important problem in Ilgın lignite plant, and sometimes there are large reserves and economic losses as a result of the combustion of coals withdrawn to stock. Based on spontaneous combustion in 5 different samples taken from the production point in Ilgın lignite mines; intersection tests did not show too much variability and ignition temperature (crossing-point temperature-CPT) is typically varied between 195-234 °C. Laboratory experiments have been identified that fire coal susceptibility index ranged between 2.73 to 3.73, and the risk index of is "low and medium". Also; thermos-gravimetric (TG) / differential thermal analysis (DTA) of the received coal samples are based on the results of experiments it has been determined the activity to the spontaneous combustion of Ilgın lignite's. In this study, spontaneous combustion mechanism of coal, factors affecting combustion and findings obtained by laboratory studies are presented.

Keywords: Ilgın, Coal, Spontaneous combustion, Occupational health and safety

1. GİRİŞ

Dünya Enerji Konseyi (World Energy Council) verilerine göre, dünyada kanıtlanmış işletilebilir kömür rezervi toplam 892 milyar ton büyüklüğündedir. Söz konusu rezervin; 403 milyar tonu antrasit ve bitümlü kömür, 287 milyar tonu alt bitümlü kömür ve 201 milyar tonu ise linyit kategorisindedir. 2015 yılı dünya toplam kömür üretimi dikkate alındığında, küresel kömür rezervlerinin yaklaşık 134 yıllık ömrü olduğu hesaplanmaktadır. Ülkemiz rezerv ve üretim miktarları açısından linyitte dünya ölçeğinde orta düzeyde, taşkömüründe ise alt düzeyde değerlendirilmektedir. Toplam dünya linyit/alt bitümlü kömür rezervinin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: msdelibalta@ohu.edu.tr

Geliş / Recieved: 22.08.2019 Kabul / Accepted: 03.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.609072

M. S. Delibalta, M. Gündoğar

yaklaşık %3,2'si ülkemizde bulunmaktadır [1]. Bununla birlikte, linyitlerimizin büyük kısmının ısı değeri düşük olduğundan termik santrallerde kullanımı ön plana çıkmaktadır.

Kömür, dünyada yaklaşık 80 ülkede kısmen düzenli rezerv dağılımından dolayı tüm ülkeler için stratejik bir enerji kaynağıdır. Ancak; çevresel kaygılar nedeniyle gelecekte kömürün yerini alternatif enerji kaynaklarının alacağı fikri yaygın olsa da, dünya enerji politikaları 2040 yılına kadar kömür kullanım payının (%27,1) önemini ortaya koymaktadır [2]. Bu nedenle, kömürün kendiliğinden yanması geçmişte ve günümüzde olduğu gibi gelecekte de önemli bir problem olmaya devam edecektir. Kömürün kendiliğinden yanması; kömür stoklarında, yeraltında, açık ocaklarda, kömür nakliyesi sırasında gemilerde, terk edilmiş madenlerde, maden atık toplama alanlarında, termik santrallerinin stok sahalarında, bunkerlerde ve kömür zenginleştirme tesisleri atıklarında gerçekleşebilen, önemli rezerv, makine ve ekipman kayıplarının yaşanmasına, zararlı gaz salınımı ile iklim değişikliğine, ciddi yaralanma ve ölümlere neden olabilen riskler içermektedir [3]-[6]. Özellikle açık ocak yangınlarında büyük rezervlerin terk edilmesinin yanı sıra en büyük tehlike, yangınlar sonucu oluşan zehirli ve boğucu gazların çok sayıda personel ölümüne neden olmasıdır. Burada önemli olan, yangının önceden sezilmesi ve önlenmesidir. Kısaca, kömür açık ocak yangınlarının hem insan yaşamı üzerine hem de iş sağlığı ve güvenliği üzerine olumsuz etkileri olduğu söylenebilir.

Kömürün kendiliğinden yanması, tüm kömür üreticisi ülkelerin karşılaştığı en önemli sorunlardan biridir. Bu sorunun nedenini saptama çalışmaları daha 17.yüzyılda başlamıştır. Problemin kaynağı hakkında çeşitli kuramlar ileri sürülmüş olup, bunlardan birkaçı; pirit kuramı, bakteri kuramı, oksidasyon kuramı ve nem kuramıdır [7]-[10]. Kömürün kendiliğinden yanması oldukça karmaşık ve hala tam olarak açıklanamamış bir mekanizmaya sahipse de, günümüzde en yaygın kabul gören yaklaşım kömür oksijen birleşimi kuramıdır.

Kömürün kendiliğinden yanması ve buna bağlı olarak ortaya çıkan açık ocak yangınları, Ilgın linyit işletmesinde de önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmakta, bazen stoka çekilen kömürlerin yanması sonucu büyük rezerv ve ekonomik kayıplar yaşanmaktadır. Bu maksatla yapılan araştırmada; söz konusu risklerin önüne geçebilmek için, kömürün kendiliğinden yanma mekanizması, yanmayı etkileyen faktörler ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilen bulgular sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

Konya-Afyon karayolu (D-300) üzerinde bulunan Ilgın linyit işletmesi, Konya'nın kuzeybatısında ve 87 km mesafededir. Linyit sahası ise Ilgın'ın 22 km kuzeyinde bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Ilgın linyit işletmesi coğrafi haritası [11]

Linyit sahasında, Paleozoik yaşlı şist ve kuarsitler ile Mezozoik yaşlı (muhtemelen Kretase-Jura) kireçtaşları kömür oluşumu baseninin temelini oluşturan kayalardır. Rezerv alanı içinde işletilebilir kömür damar kalınlığı 0,60-21,55 m arasında değişmektedir. Kömür üretimi kademeli basamak shovel-kamyon açık işletme yöntemi ile yapılmaktadır (Şekil 2). Üretilen kömür 7-10 gün arasında stok alanında bekletilerek özelliği gereği %5 ila %10 arasında nem kaybı sağlanmaktadır. Nem kaybı sağlanan kömür piyasa talebi doğrultusunda 20-50 mm, 10-18 mm, 0-150 mm boyutlarına getirilmek üzere kriblaj tesislerine beslenmektedir.

ILGIN LİNYİT İŞLETMESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI VE RİSK ANALİZİ



Şekil 2. Ilgın linyit işletmesi genel görünüşü [12]

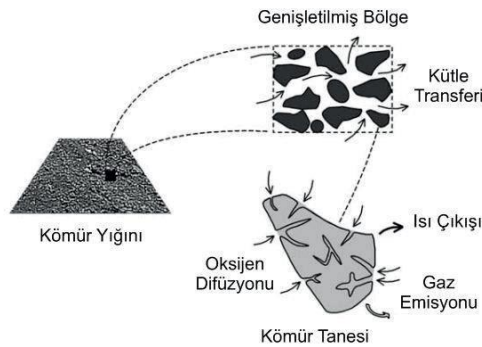
Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Kurumu Garp Linyitleri Müessesesi Ilgın linyit işletmesindeki 5 farklı üretim noktasından alınan kömür numuneleri üzerinde tutuşma sıcaklığı deneyleri yapılarak, kesişim noktası grafiklerine göre kendiliğinden yanmaya yatkınlık düzeyleri belirlenmiştir. Ayrıca; termo-gravimetri (TG) / diferansiyel termal analizler (DTA) ile aynı kömür numunelerinin ortam sıcaklığına bağlı olarak oksidasyona uğrayarak kendiliğinden yanma meydana getirip getirmeyecekleri araştırılmıştır. Böylece; her iki deney sonuçları arasında gözlenecek korelasyon ile kömürün kendiliğinden yanma düzeyini belirlemede daha objektif değerlendirme yapmamıza yardımcı olacağı öngörülmüştür.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ilgın linyit işletmesinde 2016 yılı Mart ayı planlanan üretim faaliyetleri sırasında orta damar ve taban tabakasından yukarıdan aşağı doğru ekskavatör yardımıyla alınmış kömür numuneleri, konileme dörtleme yöntemi ile azaltılmıştır. Çavuşçugöl sahası orta damar, taban tabakası ve stok sahası silodan olmak üzere alınan toplam 5 adet kömür numunesinin kendiliğinden yanma yatkınlıkları araştırması, Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümüne ait Kendiliğinden Yanma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tespit edilen bulgular aşağıda verilmektedir.

3.1 Kömürün Kendiliğinden Yanma Mekanizması ve Etki Eden Faktörler

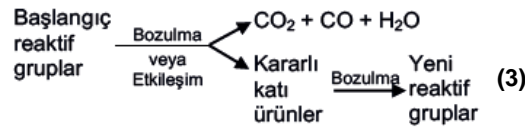
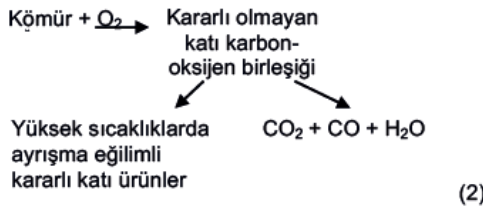
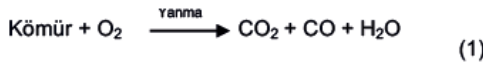
17. yüzyıldan beri kömürün kendiliğinden yanması ile ilgili pirit kuramı, bakteri etkisi, fenil kuramı, serbest radikaller reaksiyonu, hidrojen reaksiyonu, nem kuramı aktivasyon grubu reaksiyonu ve kömür oksijen etkileşim kuramı gibi birçok yaklaşım ortaya konulmuştur. Her kömür ocağında yangın oluşmasa bile, mutlaka oksidasyon vardır. Dolayısıyla belirli bir karbonmonoksit (CO) oluşumu ve oksijen tüketimi söz konusudur (bkz. kimyasal reaksiyon 1, 2, 3). Bu her kömür ocağı için, normal sayılabilecek bir Graham indeksinin varlığını ortaya koyar. Bu nedenle, eğer Graham indeksi ile çalışılacaksa, ocağın normal endeksi tespit edilmeli ve bundan sonra endeksteeki değişiklikler gözlenmelidir. Günümüzde kömür-oksijen etkileşimi kuramı bilim adamları tarafından en çok kabul gören yaklaşımdır. Bu kurama göre etkileşim, oksijenin kömür içerisine nüfuz etmesi ile gerçekleşmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Kömür oksidasyon aşamaları [10]

M. S. Delibalta, M. Gündoğar

Kömürün kendiliğinden yanması, ortam sıcaklığında kömürün oksijen ile teması sonucu kızışmasını (ısınması) sağlayan oksidasyon temelli bir süreçtir. Bu süreçte oksijen -80°C 'da fiziksel adsorpsiyon, -5°C 'da kimyasal adsorpsiyon ve 40°C 'da başlayan kimyasal reaksiyonlar tarafından tüketilir. Yaklaşık 40°C 'a kadar süreçte ortaya çıkan ısı, kömür etrafında birikmeye yol açmadığı sürece bir problem oluşturmaz. Ancak, ortamda yeterli oksijen (hava) var ise ve sıcaklık uzaklaştırılmazsa, kömür ısınmaya devam eder, sıcaklığı artar, süreç daha sonraki aşamalara ulaşabilir ve nihayetinde kendiliğinden yanma meydana gelebilir.



Kömür türüne göre farklılık göstermekle birlikte kendiliğinden yanma süreci; $70-100^{\circ}\text{C}$ 'a kadar (özellikle $40-50^{\circ}\text{C}$ civarında etkisini arttırmaya başlar) kimyasal adsorpsiyonun etkin olduğu yavaş ya da başka bir ifade ile erken oksidasyon aşaması, sıcaklığın $140-150^{\circ}\text{C}$ 'a kadar çıktığı aralık hızlanan oksidasyon ve $140-150^{\circ}\text{C}$ sonrasında ise daha ziyade serbest radikallerin etkisi altında hızlı oksidasyon aşaması gerçekleşir [7]-[10]. Bu aşamalar sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, aşağıda kısaca verilmiştir.

Bazı kömürlerin kendiliğinden yanmaya çok yatkın olduğu ve bazılarının ise olmadığı, hatta bazı damaların tavanının yandığı fakat tabanının yanmadığı olaylar bilinmektedir. Bunun nedeni, kömürde oksidasyonu başlatan temel parametrenin henüz tam olarak tespit edilememesidir [13], [14]. Kömürde oksidasyon ve kendiliğinden yanmaya etki eden faktörleri iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

- 1- İç Faktörler (kömürün yapısıyla ilgili özellikler),
- 2- Dış Faktörler (jeolojik koşullar, atmosferik ve işletme koşulları vs.).

Kömür ocaklarında kendiliğinden yanmayı etkileyen; fakat burada belirtilmeyen karbon içeriği, ısı iletkenliği, alkali içeriği, porozite, işletme derinliği, yan kayaç ısı iletkenliği, jeotermal gradyan, yeraltı ocaklarında kullanılan tahkimat yöntemi, dolgu işlemi vs. gibi daha pek çok faktör vardır [15], [16]. Bu parametrelerden en önemlileri Tablo 1'de kısaca verilmiştir.

Tablo 1. Kendiliğinden yanmaya etki eden faktörler [17]

İç Faktörler (Endojen)	Dış Faktörler (Ekzojen)
Pirit	Sıcaklık
Nem	Nem
Tane boyutu ve yüzey alanı	Barometrik basınç
Kömür rankı ve petrografik bileşenler	Oksijen konsantrasyonu
Kimyasal bileşenler	Bakteri
Mineral madde	Kömür damarı ve yan taşlar
	Madencilik yöntemi
	Havalandırma sistemi

*ILGIN LİNYİT İŞLETMESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI VE RİSK ANALİZİ***3.2 Tutuşma Sıcaklığı Deneyi**

Deney için hazırlanan 35 g, -200 mesh boyutundaki kömür numuneleri sırasına göre reaktöre konularak, mini kompresörden alınan 100 cc/dakika'lık hava ile deney başlatılmıştır. Deney sırasında her 5 dakika'da bir etüv sıcaklığı, bir ucu numune içinde, diğer ucu da kaydedici içinde olan sıcaklık ölçer aracılığı ile değişimler izlenmiş ve kaydedilmiştir (Şekil 4).



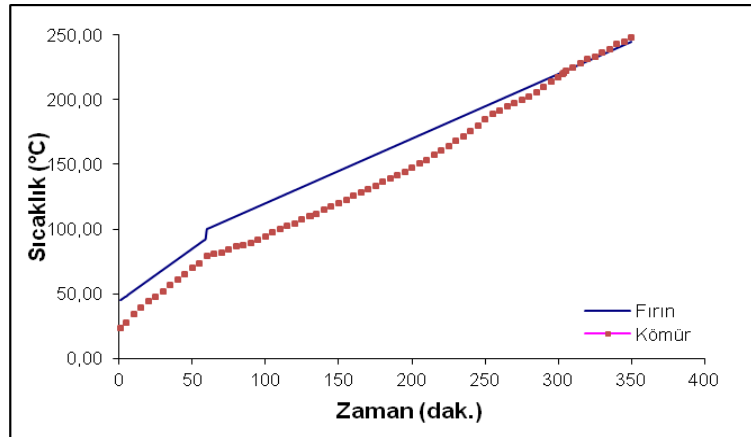
Şekil 4. Tutuşma sıcaklığı deney seti görünümü [17]

Yapılan yanma deneylerinde; reaktif tutuşma sıcaklıkları, ortalama sıcaklık artışları (OSA), tutuşma sıcaklığı (TS) ve yatkinlik indeksi (Liability Index-LI) ölçülmüştür. Bu değerler, tutuşabilirlik kesişim noktası grafikleri ile gösterilmiştir. Kömürün kendiliğinden yanma yatkinliğini göstermek için, genel olarak Tablo 2'de verilen sınıflama kullanılmaktadır.

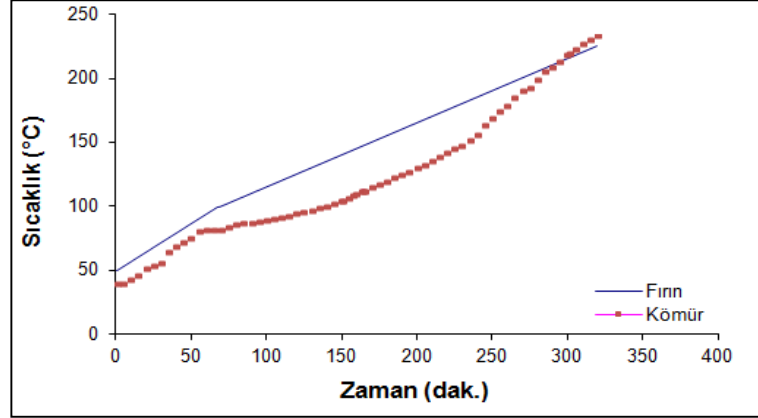
Tablo 2. Kendiliğinden yanmaya yatkinlik indeksi [18]

Yatkinlik indeksi (LI)	Risk düzeyi
0 - 3	Düşük
3 - 5	Orta
> 5	Yüksek

İşletme sahasındaki birinci formasyondan alınan taban ve orta tabaka kömür numunelerinin tutuşabilirlik deney sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Birinci formasyon orta tabaka kömürü tutuşabilirlik eğrisi



Şekil 6. Birinci formasyon taban kömürü tutuşabilirlik eğrisi

Yapılan laboratuvar test sonuçlarına göre; alınan kömür numunelerinin kesişim noktası deneyleri çok fazla bir sapma göstermemiş, genelde tutuşma sıcaklığı 195-234°C arasında değişmektedir. Ortalama sıcaklık artışlarının da düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca; yanmaya yatkınlık indeksleri 2,73-3,73 arasında değiştiği görülmüştür (Tablo 3).

Tablo 3. Ilgın linyitleri tutuşma sıcaklığı deney sonuçları [17]

Numune Adı	OSA (°C/dk)	Yatkınlık indeksi	Risk düzeyi
1.Formasyon orta tabaka	0,6395	2,7330	Düşük
1.Formasyon taban kömürü	0,7638	3,6203	Orta
2.Formasyon orta tabaka	0,7236	3,7303	Orta
2.Formasyon taban kömürü	0,6215	2,8639	Düşük
Silo kömürü	0,6395	3,0251	Düşük

Deney sonuçlarına göre; Ilgın linyitlerinin kendiliğinden yanma yatkınlığı “düşük-orta” risk grubunda olduğu tespit edilmiştir. Ancak; Ilgın linyitlerinin %40’ın üzerinde nem içermesi, kesişim noktasında yapay bir yükselme meydana getirmektedir. Özellikle; işletmede belli bir süre bekletilmekte olan kömürlerin üzerinden çıkan beyaz renkli dumanlar, stoka çekilen kömürlerin neminin artmasının bir göstergesidir. Ilgın linyitleri düşük-orta risk grubunda olmasına rağmen; kendiliğinden yanma meydana gelmemesi için, çevre koşulları olan sıcaklık, rüzgâr ve yağmur gibi dış etkenlere maruz kalmadan stoktan erken sevki gerekmektedir. Aksi halde, yüksek ısınma hızı ve düşük tutuşma sıcaklığına sahip kömürlerin, kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının çok daha çabuk olacağı açıktır.

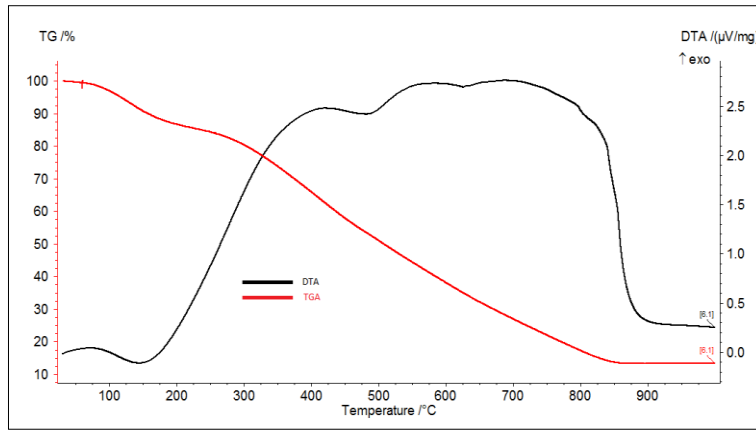
3.3 TG/DTA Analizleri

Bu analizler, bir malzemenin sıcaklık artışı ile bünyesinde meydana gelen termal ve gravimetrik değişimleri belirlemede kullanılmaktadır. Malzeme bünyesinde meydana gelen ağırlık değişimleri (su kaybı, organik madde uzaklaşması gibi) termogravimetri (TG), ekzotermik ya da endotermik reaksiyonlar sonucu meydana gelen sıcaklık değişimleri diferansiyel termal analiz (DTA) cihazı ile tespit edilmektedir (Şekil 7). DTA; incelenen numunenin erime, kaynama, parçalanma noktalarını yüksek bir doğrulukla tayin etmektedir. Ayrıca, kristalleşme ve faz değişimleri hakkında da bilgi vermektedir.

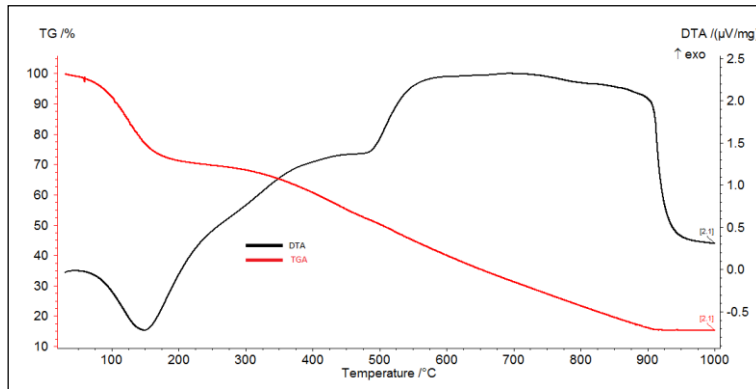
ILGIN LİNYİT İŞLETMESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI VE RİSK ANALİZİ

Şekil 7. TG/DTA analiz cihazı [17]

İlgın linyit işletmesindeki 5 farklı noktadan alınan kömür numunelerinin TG/DTA analizleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM)'da yapılmıştır. Alınan numuneler gerekli boyut küçültme işleminden sonra, 10 g ağırlığındaki numune cihaza konularak, normal şartlarda deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları bilgisayarda otomatik olarak kayıt altına alınarak, birinci formasyona ait grafikler Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Birinci formasyon orta tabaka kömürü TG/DTA analiz eğrisi



Şekil 9. Birinci formasyon taban kömürü TG/DTA analiz eğrisi

M. S. Delibalta, M. Gündoğar

Deney sonuçları ve DTA analiz grafikleri incelendiğinde, kömür numuneleri başta endotermik bir reaksiyon göstermektedir. Bu durumda kömürün 0-200 °C arasında nemini attığı, daha sonra hızlı bir reaksiyona girerek 200-300 °C arasında ani bir değişim göstererek ekzotermik reaksiyon ile kömürün ortam sıcaklığına bağlı olarak oksidasyona uğradığı, böylece kendiliğinden yanma meydana gelebileceği söylenebilir. Burada; numunenin ekzotermik reaksiyon vermeye başladığı andan itibaren, grafiğin ani yükselişinin eğimidir ki, bu da kömürün kısmen kendiliğinden yanmaya yatkınlığını göstermektedir. TG analiz grafiğine bakıldığında ise; sıcaklığa bağlı olarak numune ağırlığında sürekli bir azalma izlenmekte, özellikle 0-200 °C’de genellikle hızlı bir düşüş meydana geldiği gözlenmekte, bu da kömür numunelerinden nemin uzaklaştığını doğrulamaktadır (bkz. Şekil 8, 9). Daha sonraki sıcaklık periyotlarında ise, kömür numunesi kısmen yanma reaksiyonuna uğrayarak ağırlık kaybını sürdürmektedir.

4. SONUÇLAR

Kömür, dünyada yaklaşık 80 ülkede kısmen düzenli rezerv dağılımından dolayı tüm ülkeler için stratejik bir enerji kaynağıdır. Ancak; çevresel kaygılar nedeniyle gelecekte kömürün yerini alternatif enerji kaynaklarının alacağı fikri yaygın olsa da, dünya enerji politikaları 2040 yılına kadar kömür kullanım payının (%27,1) önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle kömürün kendiliğinden yanması, tüm kömür üreticisi ülkelerin karşılaştığı en önemli sorunlardan biridir. Bu sorunun nedenini saptama çalışmaları daha 17.yüzyılda başlamıştır. Problemin kaynağı hakkında çeşitli kuramlar ileri sürülmüştür. Kömürün kendiliğinden yanması oldukça karmaşık ve hala tam olarak açıklanamamış bir mekanizmaya sahipse de, günümüzde en yaygın kabul gören yaklaşım kömür oksijen birleşimi kuramıdır.

Kömür madencilik faaliyetleri sırasında gerek dış kaynaklı (ekzojen) gerekse iç kaynaklı (endojen) etkilerle meydana gelen açık ocak yangınları; maden işletmelerinde özellikle üretim faaliyetlerinin aksamasına, rezerv kaybına, iş sağlığı ve güvenliği gibi unsurların yok olmasına neden olmaktadır. Burada önemli olan, kömürün kendiliğinden yanmasını önceden sezinlemek ve önlemektir. Bu maksatla, Ilgın linyit işletmesi kömürleri ile ilgili laboratuvar çalışmaları yapılmıştır.

Ilgın linyit işletmesindeki 5 farklı üretim noktasından alınan temsili kömür numunesi üzerinde yapılan kendiliğinden yanma deney sonuçlarına göre; kesişim noktası değerleri çok fazla bir sapma göstermemiş olup, genelde tutuşma sıcaklığı 195-234 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Laboratuvar test sonuçlarına göre; yangına yatkınlık indeksleri 2,73-3,73 arasında, risk düzeyi ise “düşük-orta” seviyede tespit edilmiştir. Ayrıca; yapılan TG/DTA analizlerine göre, işletme kömürleri başlangıçta 0-200 °C arasında nemini atarak endotermik reaksiyon göstermiş, daha sonra 200-300 °C arasında hızlı bir artış göstererek ekzotermik reaksiyon göstererek, kömürün ortam sıcaklığına bağlı olarak oksidasyona uğradığı ve kendiliğinden yanma meydana getirebileceği gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, aynı kömür sahasında daha önce yapılan bilimsel araştırma sonuçları ile de uyumluluk göstermektedir.

Ilgın linyit işletmesi kömürlerinin kendiliğinden yanmasına karşı alınabilecek tedbirler; kömürün olabildiğince atmosferik hava ile teması kesilmeli veya kısa tutulmalıdır. Ayrıca, piyasa talebine göre kömür stok miktarı belirlenmelidir. Gereğinden fazla kömürün stoklanması, hem ekonomik hem de çevre yönden pek çok zarara sebep olabilmektedir. Özellikle kömür açık ocak yangınlarında önemli olan, kendiliğinden yanma oluşmadan gerekli tüm önlemleri önceden almaktır. Unutulmamalıdır ki, kazaları önlemek her zaman hasarı ödemekten daha sağlıklı, güvenilir ve ucuz bir yöntemdir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar; kömür yanma ve TG/DTA analizlerinin yapılmasında katkıda bulunan Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama-Araştırma Merkezi (TUAM) yönetici ve personellerine teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- [1] ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi - Kömür, [Online] <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Komur>, [Erişim tarihi: 25.06.2020].
- [2] M. S. Delibalta ve Ö. Y. Toraman, “Kömür karşıtı lobi faaliyetleri ve teknolojik gerçeklik”, Türkiye 26.Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-IMCET2019, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, ISBN: 978-605-01-1273-3, 16-19 Nisan, Antalya/ Türkiye, 2019, ss.113-123.
- [3] V. Didari, “Yeraltı ocaklarında kömürün kendiliğinden yanması ve risk indeksleri”, *Madencilik*, cilt 25, ss.31-32, 1986.
- [4] S. Saraç ve T. Soytürk, “Tunçbilek kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıklarının araştırılması”, Türkiye 8. Kömür Kongresi, Zonguldak, 1992, ss.141-152.

ILGIN LİNYİT İŞLETMESİNDE KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASI VE RİSK ANALİZİ

- [5] B. Ünver ve S. Demirbilek, “Kömür karışımı pasaların kendiliğinden yanma riski potansiyelinin analizi”, Türkiye 9. Kömür Kongresi, Zonguldak, 1994, ss.317-318.
- [6] E. Kaymakçı, “Zonguldak havzası kömür damarlarına uygulanabilecek bir kendiliğinden yanmaya doğal yatkınlığı değerlendirme tekniğinin geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.78-84, 1998.
- [7] H. Wang, Z. B. Dlugogorski, M. E. Kennedy, “Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling”, *Progress in Energy and Combustion Science* vol. 29, pp.487–513, 2003.
- [8] L. L. Sloss, “Assessing and managing spontaneous combustion of coal”, IEA Clean Coal Centre, CCC/259, ISBN: 978-92-9029-582-2, pp.55, October, United Kingdom, 2015.
- [9] A. Bayraktar, “Yeraltı maden işletmelerinde ocak yangınları”, *Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığı*, Ankara, 55s., 2013.
- [10] S. Inal ve K. Aydın, “Spontaneous combustion of coal and effecting factors”, *Scientific Mining Journal*, vol. 58(2), pp.145-165, 2019.
- [11] İLİ, TKİ–Garp Linyitleri İşletmesi Müessesesi Ilgın Linyitleri İşletmesi-İLİ Kontrol Müdürlüğü, Açık İşletmeler, [Online] <http://www.ili.gov.tr>, [Erişim tarihi: 10.08.2013].
- [12] M. S. Delibalta, “TKİ-GLİ Ilgın linyitleri işletmesinin ekonomik ve ekolojik önemi”, II. Ulusal Ilgın Sempozyumu, Ilgın Belediyesi, Eylül 2013, Ilgın / Konya, 2013, ss.10.
- [13] J. Zhan, H. H. Wang, F. Zhu and S. N. Song, “Analysis on the governing reactions in coal oxidation at temperatures up to 400°C”. *International Journal of Clean Coal and Energy*, vol. 3, pp.19-28, 2014.
- [14] C. Şensöğüt, “Türk kömürlerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlığı - Ilgın linyitleri örneği”, *Madencilik*, cilt 38, sayı 1, s.45-52, 1999.
- [15] G. Ökten, “Kömürün kendiliğinden yanması ve önlenmesi için alınacak tedbirler”, *Kömür Kimyası ve Teknolojisi*, O. Kural (Editör), İstanbul, 1988, s.103-113.
- [16] E. Kuzoluk, “Farklı miktar ve özellikteki kömür yığınlarının kendiliğinden yanma davranışları, önlenmesi ve önceden tespit edilmesine bir örnek; Çayırhan kömür stokları”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.5-45, 2014.
- [17] M. Gündoğar, “TKİ Konya-Ilgın kömür açık işletmesinde ocak yangınları riskinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 80s., 2016.
- [18] B. Genc and A. Cook, “Spontaneous combustion risk in South African coalfields”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol.115, pp.563-568, 2015.





KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Diler KATIRCIOĞLU BAYEL^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

ÖZET

Bu makale, talkın karıştırmalı bilyalı değirmen ile kuru öğütülmesinde öğütme parametrelerinin etkilerini değerlendirmektedir. Karıştırma hızı, katı oranı, bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımı da dâhil olmak üzere dört bağımsız faktörün etkilerini incelemek amacıyla üç seviyeli bir Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır. Öğütme parametreleri ve yanıtlar arasında ampirik bir korelasyon oluşturmak amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Varyans analizi, kırılma oranı için oldukça iyi bir değer göstermiştir ($R^2=0,952$). Yazılım çözümlerine göre, kırılma oranını maksimize etmek için en uygun koşullar, karıştırıcı hızı için 599 d/dk, katı oranı için 0,07, bilya doluluk oranı için % 65,58 ve maksimum bilya boyut dağılımında elde edilmiştir. Öğütmede ki iyileşmeyi doğrulamak amacıyla, yukarıda belirtilen optimum koşullar kullanılarak iki kez doğrulama testleri yapılmış olup ortalama kırılma oranı 3,29 elde edilmiştir. Bu elde edilen ortalama kırılma oranı 29 testte elde edilen değerlerden daha büyüktür. Öğütmenin talk tanelerinin yapısal özellikleri üzerinde etki XRD analizi ile karakterize edilmiştir. XRD ölçümleri hiçbir işlem görmemiş talk numunesine kıyasla, öğütülmüş talk numunelerinin pik alanlarında herhangi bir değişiklik gözlemlenmediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Karıştırmalı bilyalı değirmen, Kuru öğütme, Talk, Box-Behnken tasarımı, Optimizasyon

MODELING AND OPTIMIZATION OF SOME GRINDING PARAMETERS ON DRY GRINDING IN STIRRED MEDIA MILL

ABSTRACT

This article evaluates the effects of operating parameters on dry grinding of talc with a stirred media mill. A three-level Box-Behnken design was used for the purpose of examining the impacts of four independent factors, including the stirrer speed, solid ratio, media filling ratio, and the media size distribution on the reduction ratio. For the purpose of establishing an empirical correlation between operating parameters and responses, a series of experiments were carried out. Variance analysis showed quite a good value for reduction ratio ($R^2=0.952$). According to the software solutions, the optimum conditions for maximizing the reduction ratio were obtained to be 599 rpm for stirrer speed, 0.07 for solid ratio, 65.58% for media filling ratio, and at maximum level of media size distribution.

To verify the improvement of grinding, verification tests were performed two times using the above-mentioned optimum conditions and an average reduction ratio of 3.29 was obtained. This average reduction ratio value obtained was greater than those obtained in the 29 tests. The impacts of grinding on structural characteristics of talc particles were characterized by XRD analysis. XRD measurements indicated that any change was not observed in the peak areas of ground talc specimens compared to the untreated talc specimen.

Keywords: Stirred media mill, Dry grinding, Talc, Box- Behnken design, Optimization

1. GİRİŞ

Talk sulu bir magnezyum silikat olup, teorik formülü $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ 'dir. Metalik olmayan bir hammadde olarak talk, çok sayıda endüstriyel uygulamada (seramik üretimi (kordierit ve steatitin sentezi), döküm ürünler, boyalar, kauçuk, kablolar, kâğıt vb.) yeri doldurulamaz bir mineral dolgu maddesidir. Talk takviye dolgu maddesi olarak bilinen kimyasal tepkisizlik, yumuşaklık, beyazlık, yüksek termal stabilite ve düşük elektrik iletkenliği gibi özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır [1]. Dolgu malzemesi kullanılması, ürünün fiyatını düşürmekte ve kompozit malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini arttırmaktadır [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dkatircioglu@ohu.edu.tr
Geliş / Recieved: 04.02.2020 Kabul / Accepted: 09.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.684618

D. Katırcıoğlu Bayel

Malzeme özellikleri (tane büyüklüğü ve şekli, Young modülü, sertlik ve kırılma dayanıklılığı gibi mekanik özellikler), öğütme haznesi ve karıştırıcının geometrileri, öğütme işlemi modu, öğütme parametreleri gibi birçok faktörün öğütme performansı üzerinde önemli etkileri vardır.

Öğütme işlemlerinde, öğütme modu yaş veya kuru olarak seçilebilmektedir. Enerji, kapasite ve boyut açısından yaş öğütme, kuru öğütmeye göre bir takım avantajlar sunmaktadır. Fakat, yaş öğütme gerçekleştirildikten sonra oluşacak kurutma maliyetleri, bazı malzemelerin kuru öğütme gerekliliği, suyun dünya üzerindeki önemi de düşünüldüğünde ki bu durum, bugün ülkeleri, su yönetimi politikalarını geliştirerek uygulamaya ve gerekli tedbirleri almaya sevk etmiş olup kuru öğütmenin geliştirilmesi yönünde ki çalışmaların önemi gün geçtikçe daha da artmaktadır. Öğütme parametreleri, ürünün inceliğini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yayımlanan çalışmaların çoğu, öğütme koşullarının karıştırmalı bilyalı değirmende, farklı malzemelerin üretiminde etkisinin olduğunu göstermiştir [3]-[16]. Bugüne kadar, karıştırmalı bilyalı değirmenlerde mikron altı ve nano-parçacıklarının üretilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak yanıt yüzey yöntemi (RSM) ile çalışma parametrelerinin değerlendirilmesinde çok az sayıda çalışma bulunmaktadır [7], [17].

Yanıt yüzey yöntemi (RSM), deneylerin tasarımında, modellerin kurulması, parametrelerin etkilerinin kontrolü ve istenen cevaplar için her bir faktörün optimum koşullarının araştırılması için kullanılan bir dizi matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir [18]. Bu nedenle, günümüzde birçok mineral zenginleştirme alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [19]-[25]. RSM'deki Box-Behnken tasarımı (BBD), deney sayısını, zamanı ve maliyeti azaltmak için kullanılan önemli bir tasarım aracıdır. BBD, daha az sayıda deney ve çalışma parametrelerinin tüm yanıtlar üzerindeki etkileşimli etkileri ile doğru bilgi sağlar [26]. Klasik yöntemlerle en ideal deney koşullarının bulunması konusunda oldukça fazla sayıda deneyler yapmak gerekir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde deney parametrelerinin birbirleri ile etkilerini anlayabilmek mümkün değildir. Sonuç üzerinde sayıca çok fazla parametrenin etkili olduğu sistemlerde, parametrelerin her birinin birbiri üzerindeki etkiyi ortaya koymak üzere geliştirilmiş olan istatistiksel yöntemler, deneyin tasarlanması ve sonuçların yorumlanması için kullanılmaktadır [27].

Bu çalışmada, karıştırmalı bilyalı değirmende talkın kuru öğütülmesinde karıştırma hızı, katı oranı, bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımı da dahil olmak üzere dört bağımsız faktörün kırılma oranı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç seviyeli Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır. Bu çalışma, öğütme işleminde malzemenin ve zamanın verimli ve etkili bir şekilde kullanılması konusuna yeni bir bakış açısı getirmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Deneyisel çalışmalarda Niğde bölgesinde faaliyet gösteren Mikron'S A.Ş firması tarafından üretilen talk örneği ($d_{50}=6,74 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Örneğin, XRF cihazı ile belirlenen kimyasal özellikleri Tablo 1'de, kuru elek analizi ile karakterize edilen beslemenin tane boyut dağılımı ise Şekil 1'de verilmiştir. Piknometre cihazı ile yapılan yoğunluk tayinleri sonucunda talk örneğinin yoğunluğu $2,78 \text{ g/cm}^3$ olarak kaydedilmiştir.

Tablo 1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan talk örneğinin kimyasal özellikleri (%)

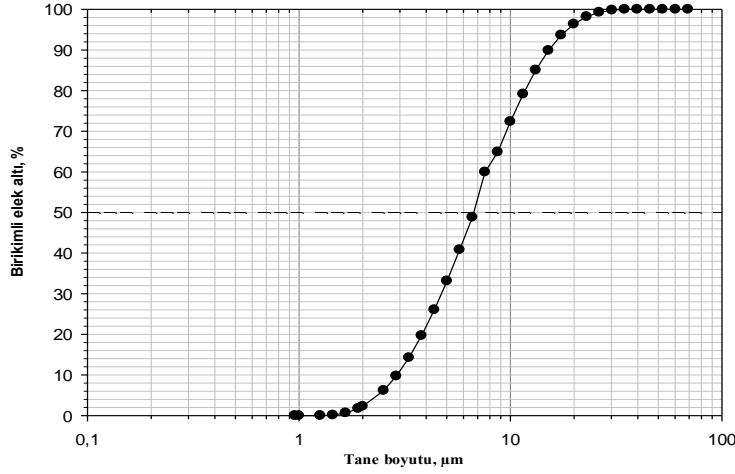
SiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	A.Z (1050 C°)
61	31	0,7	0,3	0,5	6,5

Deneylerde, yüksek yoğunluklu (6000 kg/m^3) ve dayanımı yüksek (kimyasal bileşimi: %93 ZrO₂, %5 Y₂O₃ ve %2 diğerleri) yttria stabilizeli zirkonyum oksit bilyalar kullanılmıştır.

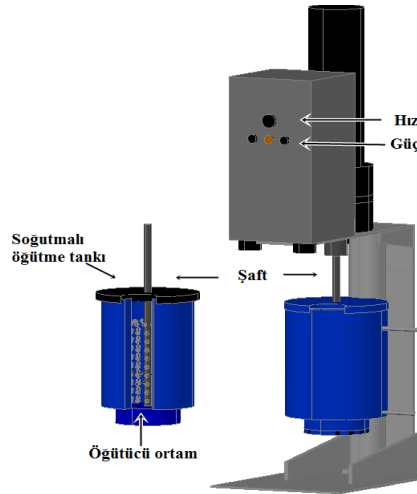
2.2. Metot

Bu çalışmada öğütme işlemleri Union Process (USA) tarafından üretilen Standart-01 model dikey pinli karıştırmalı değirmende gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 2). Değirmende öğütücü ortamı karıştırmak için dikey bir şaft (Colmonoy kaplı) ve bu şaft üzerine monte edilmiş 4 adet karıştırma kolu vardır. Şaft 0,25 HP gücünde bir motora bağlı olup, şaftın dönme hızı 100-600 d/dk arasında değiştirilebilmektedir. Soğutma amacıyla, öğütme tankı ayrıca bir su ceketini ile donatılmıştır.

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU



Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan talk örneğinin tane boyut dağılımı



Şekil 2. Değirmen ve açık kesit alanı ile öğütme tankının şematik görünümü

Şaft, öğütme tankı içine yerleştirildikten sonra istenilen oranda bilya ve malzeme tanka ilave edilmiş ve değirmen istenilen hızda çalıştırılarak öğütme süresi başlatılmıştır. Yapılan ön deneylerde herhangi bir öğütme yardımcısı kullanılmadığı için daha uzun öğütme sürelerinde, malzemenin tank çeperine yapışma eğiliminde olması nedeniyle, deneylerde öğütme süresi 15 dk olarak belirlenmiştir. Değirmenin sıcaklığı soğutma sistemi kullanılarak $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 'ye ayarlanmıştır. Öğütme sırasında ortaya çıkan ısı, soğutma suyunun öğütme tankının dış çeperi boyunca dolaştırılmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Öğütme deneyleri kesikli şekilde yürütülmüş olup her deneyin sonunda malzeme ve bilyalar tanktan dışarıya boşaltılmış, elek yardımıyla öğünmüş malzeme ile bilyaların birbirinden ayrılması sağlanmıştır.

2.3. Analiz

Öğütme deneyleri sonucunda öğünmüş malzemeler standart numune azaltma yöntemlerine göre azaltılarak, tane boyut analizi Lazer Difraktometre yöntemiyle yaş çalışan tane boyutu ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU-Malvern Co. Ltd. UK) ile ortalama tane boyut değerleri tespit edilmiştir. Her öğütme deneyi sonunda, ürünler örnek bölme kurallarına göre azaltılmıştır, azaltılan iki ayrı örnek alınıp, her biri ayrı ayrı analize tabi tutulmuştur. Ölçümler sonunda her bir deney için elde edilen analizlerin ortalamaları not alınarak sonuçların değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Talk örneklerinin X-Işını Difraksiyonu (XRD) Panalytical marka Empyrean model Cihaz ile Cu X-Işını tüpü ($\lambda = 1.5405 \text{ Angstrom}$) kullanılarak yapılmış olup 2θ açısı 5° - 70° arasında değişmektedir.

2.3. Deney Tasarımı

Yanıt yüzey yöntemi (RSM), deneylerin tasarımında, modellerin kurulması, parametrelerin etkilerinin kontrolü ve istenilen cevaplar için her bir faktörün optimum koşullarının araştırılması için kullanılan bir dizi matematiksel ve istatistiksel tekniktir [18]. Talkın kuru öğütülmesinde öğütme parametrelerinin optimizasyonunda karıştırma hızı, katı oranı, bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımı bağımsız öğütme parametreleri olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin kırılma oranına olan etkileri Yanıt Yüzey Yönteminin Box-Behnken deney tasarım tekniği kullanılarak yapılmıştır. Seçilen bağımsız öğütme parametreleri ve seviyeleri ile toplam 29 deney belirlenmiştir. Box-Behnken'in avantajlarından biri, küresel bir tasarım olmasının yanı sıra kodlanmış seviyeler olarak düşük (-1), orta (0) ve yüksek (+1) gibi yalnızca üç veri seviyesinin bulunmasıdır. Mevcut deneysel araştırmadaki faktörler ve kodlanmış seviyeler Tablo 2'de sunulmaktadır. Deneysel verilerin analizinde Design Expert (7.1.5) yazılım programı kullanılmıştır.

Tablo 2. Deneysel faktörler ve kodlanmış seviyeler

Numara	Parametre kodu	Parametreler	-1	0	+1
1	X ₁	Karıştırma hızı, (d/dk)	300	450	600
2	X ₂	Katı oranı (fc)	0,04	0,06	0,08
3	X ₃	Bilya doluluk oranı (J,%),	50	60	70
4	X ₄	Bilya boyut dağılımı,(%)	1mm(% 70)	1mm(% 40)	1mm(% 10)
			2mm(% 20)	2mm(% 20)	2mm(% 20)
			3mm(% 10)	3mm(% 40)	3mm(% 70)

Eşitlik 1, bilya doluluk oranını (J) hesaplamak için kullanılmaktadır. Sözü geçen bu eşitlik kapsamında, hacmin 0,4'ü porozite olarak düşünülerek öğütücü ortamın tank içine ne kadar doldurulduğu açıklanır.

$$\% J = \frac{\text{Bilya miktarı/Bilya yoğunluğu}}{\text{Değirmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6} \quad (1)$$

Aynı şekilde, katı oranı (fc) ile doldurulmuş değirmen hacminin oranı Eşitlik 2 ile açıklanmaktadır.

$$\%fc = \frac{\text{Malzeme miktarı/Malzeme yoğunluğu}}{\text{Değirmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6} \quad (2)$$

Beslenen malzeme ve öğütme sonrasında elde edilen ürünün tane boyut dağılımının ağırlıkça %50'yi geçtiği boyut değeri (ortalama tane boyutu, d₅₀) tespit edilmiş ve Eşitlik 3 kullanılarak kırılma oranı belirlenmiştir [16].

$$\text{Kırılma oranı} = F_{50} / P_{50} \quad (3)$$

Burada F₅₀, beslemenin ortalama tane boyutunu, P₅₀ ise ürünün ortalama tane boyutudur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üç düzeyli Box-Behnken deney tasarımı ile karıştırma hızı (X₁), katı oranı (X₂), bilya doluluk oranı (X₃) ve bilya boyut dağılımı da (X₄) dâhil olmak üzere dört faktörün birbirleriyle uygun kombinasyonları ile toplam 29 deney gerçekleştirilmiştir.

Her bir deney iki kez tekrar edilmiş ölçümler sonucunda elde edilen d₅₀ değerleri doğrultusunda kırılma oranları hesaplanmıştır. Tablo 3, her bir faktör kombinasyonu için elde edilen kırılma oranına ek olarak, deney serilerinin bir özetini, faktör kombinasyonlarını ve araştırmada kullanılan deney birimlerinin seviyelerini göstermektedir.

3.1. Model ve Anova Analizi

Tablo 3'te verilen deney sonuçlarına, kırılma oranı değerleri için çoklu regresyon analizi yapılarak kuadratik (2. derece) bir model uygulanmıştır. Elde edilen polinomiyal denklem Eşitlik 4'te verilmiştir.

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

$$Y = -0,7095 - 0,00024X_1 - 16,5X_2 + 0,11345X_3 - 0,93067X_4 + 0,037583X_1X_2 - 0,00000816667X_1X_3 + 0,001177X_1X_4 + 0,34125X_2X_3 - 1,125X_2X_4 + 0,0105X_3X_4 - 0,000000609259X_1^2 - 186,77083X_2^2 - 0,00102X_3^2 + 0,096542X_4^2 \quad (4)$$

Denklemden, Y yanıtı temsil ederken (kırılma oranı), X_1 , X_2 , X_3 ve X_4 sırasıyla karıştırma hızı, katı oranı, bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımını temsil eder.

Tablo 3. Box-Behnken tasarımı ve gerçek sonuçlar

Deney No	Parametre kodları				Gerçek Sonuçlar	Tahmini Sonuçlar
	X_1	X_2	X_3	X_4	<i>Kırılma Oranı</i>	<i>Kırılma oranı</i>
1	0	-1	+1	0	2,35	2,43
2	0	0	0	0	2,58	2,56
3	0	0	-1	+1	2,51	2,68
4	0	0	0	0	2,57	2,56
5	-1	-1	0	0	2,49	2,47
6	0	0	+1	-1	2,41	2,37
7	0	0	0	0	2,55	2,56
8	0	+1	+1	0	2,50	2,51
9	+1	0	0	-1	2,44	2,45
10	0	+1	0	-1	2,40	2,42
11	0	0	-1	-1	2,41	2,42
12	-1	+1	0	0	2,24	2,19
13	0	-1	-1	0	2,41	2,40
14	0	0	0	0	2,56	2,56
15	+1	0	+1	0	2,67	2,66
16	0	0	0	0	2,55	2,56
17	+1	+1	0	0	2,70	2,70
18	0	+1	0	+1	2,59	2,69
19	+1	-1	0	0	2,50	2,54
20	+1	0	0	+1	3,21	3,13
21	0	0	+1	+1	2,93	2,91
22	-1	0	+1	0	2,42	2,40
23	-1	0	0	+1	2,50	2,48
24	0	+1	-1	0	2,28	2,21
25	0	-1	0	-1	2,52	2,43
26	0	-1	0	+1	2,81	2,80
27	-1	0	0	-1	2,43	2,52
28	+1	0	-1	0	2,50	2,52
29	-1	0	-1	0	2,19	2,21

Elde edilen kuadratik modellerin kırılma oranı için önemi, Tablo 4'te gösterildiği gibi ANOVA analizi ve F testi ile değerlendirilmiştir. F değeri arttıkça, p değeri düşer [28]. 0,001'in altındaki modeller için p-değeri, modellerin istatistiksel önemini göstermektedir [29].

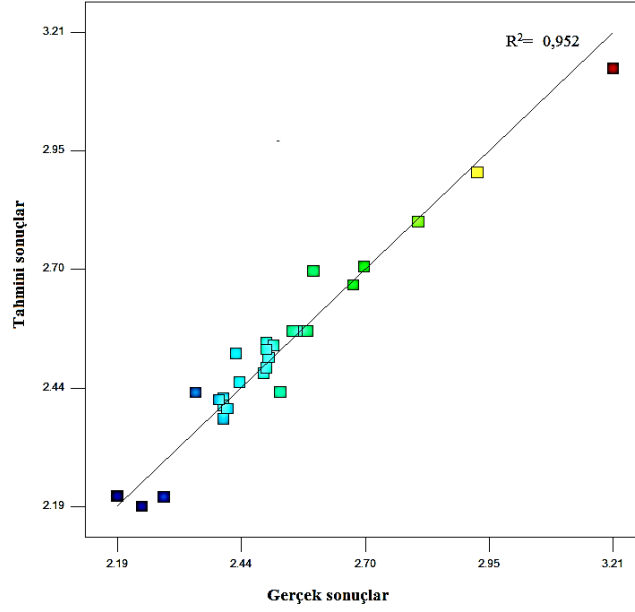
Tablo 4. Kırılma oranı için varyans analizi (ANOVA)

Kaynak	Kareler toplamı	df	Ort. karesi	F-değeri	p-değeri
Model	1,10	14	0,078	19,97	< 0,0001
Kalan	0,055	14	0,003917		
Toplam	1,15	28			

Model özeti

R-sq. R-sq. (adj)
95,23% 90,46%

D. Katırcioğlu Bayel

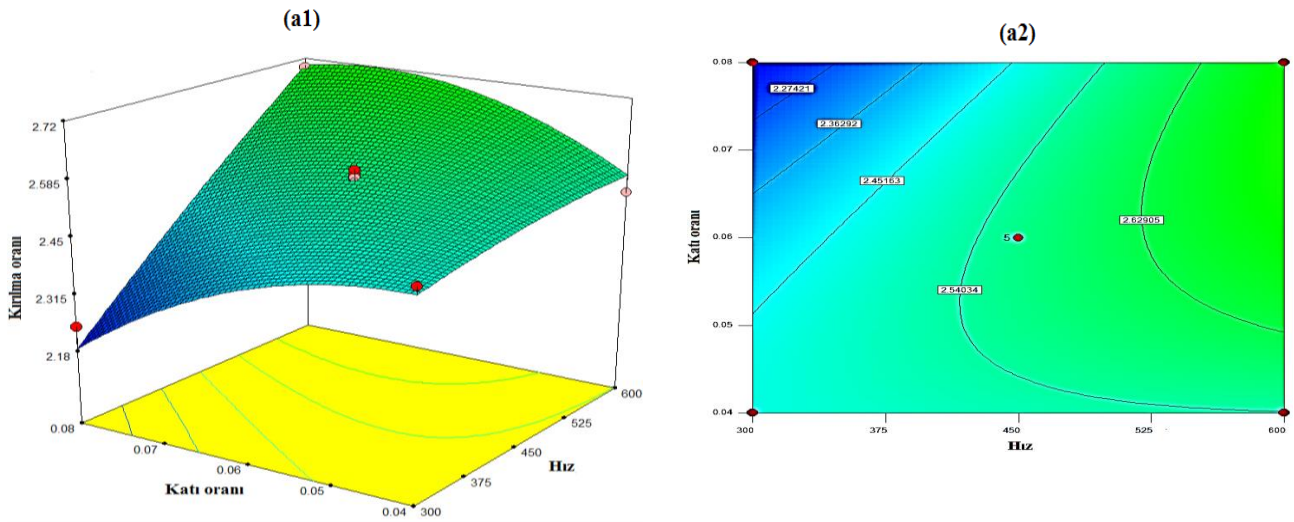


Şekil 3. Gerçek ve tahmini kırılma oranları arasındaki ilişki

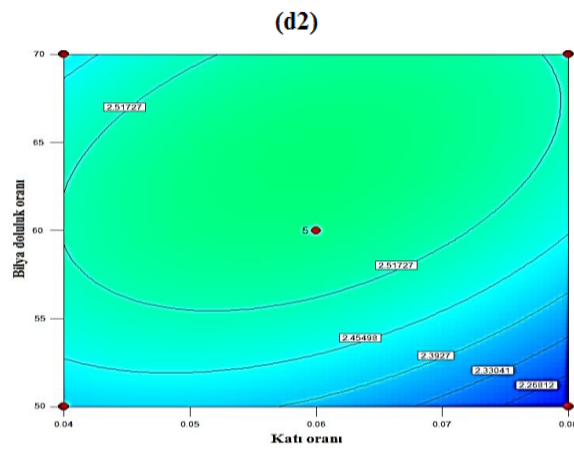
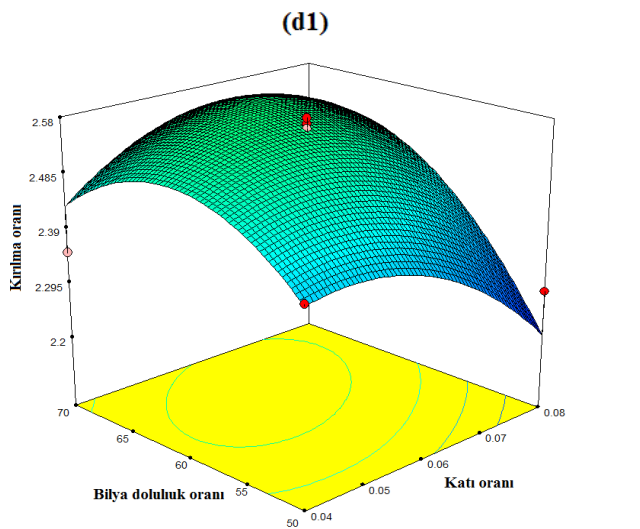
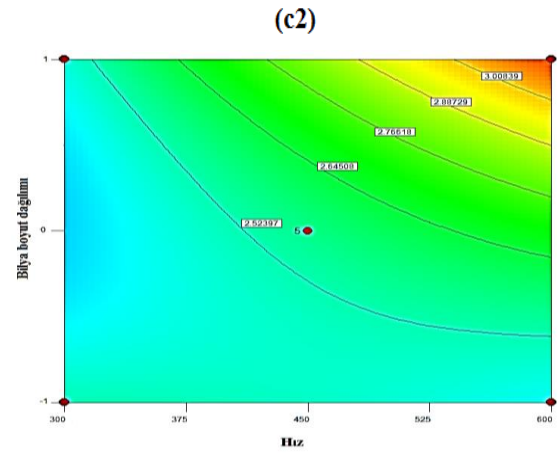
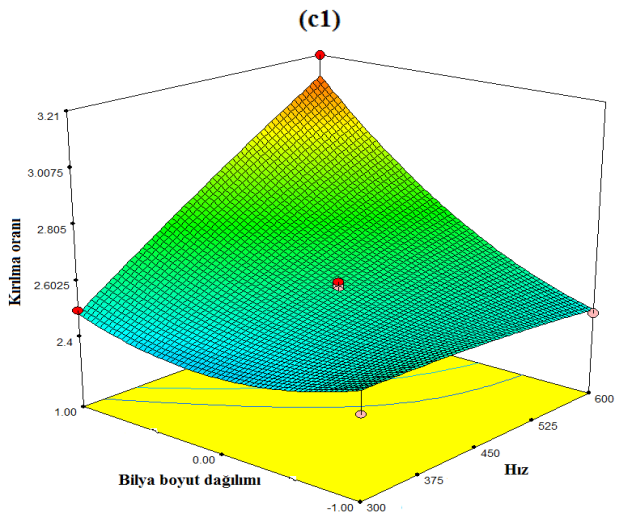
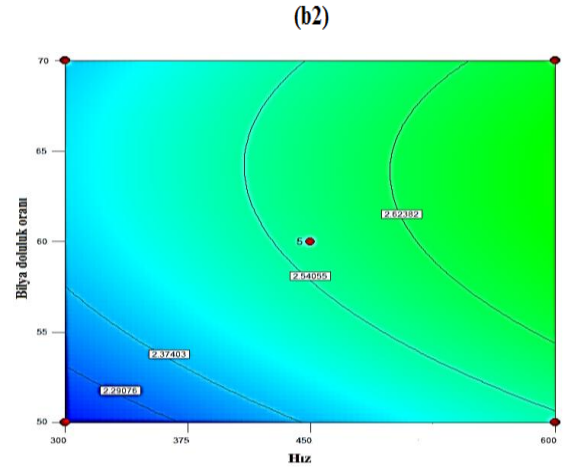
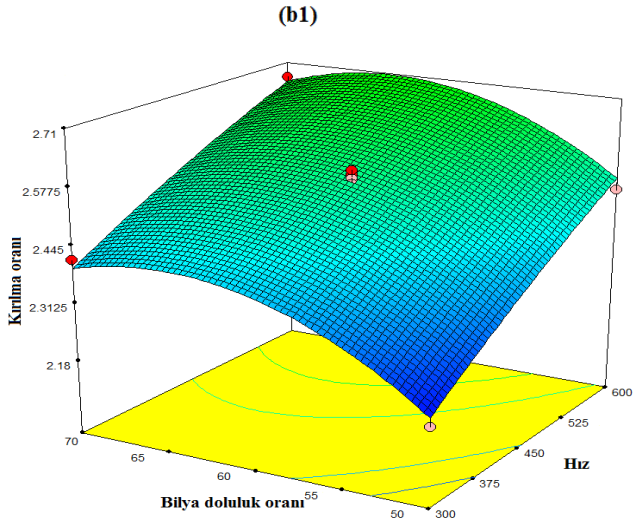
Oluşturulan modelin verileri açıklamada ne derece yeterli olduğunun görülmesi için modelin R^2 değeri hesaplanır. Hesaplanan R^2 değeri 1'e yakınsa modelin verileri açıklamakta yeterli olduğu, 0'a yakınsa yeterli olmadığı anlaşılır. Kırılma oranı için R^2 değeri 0,952 olarak belirlenmiştir (bkz. Şekil 3). Elde edilen veriler ışığında, R^2 değeri tahmin edilen değerlerle deneysel sonuçların iyi bir şekilde eşleştiğini göstermektedir.

3.2. Yanıt Yüzey Analizi

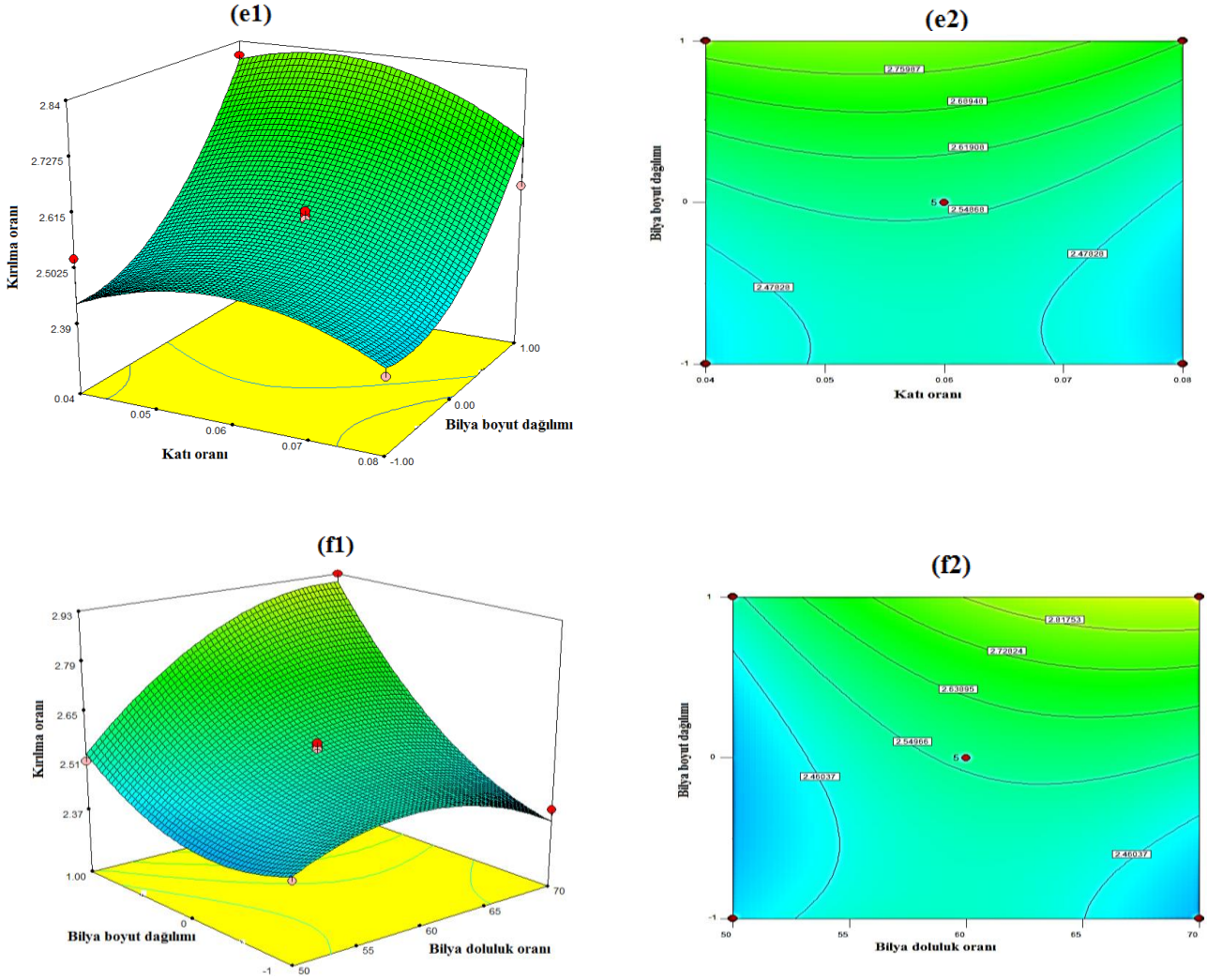
Üç boyutlu yüzey grafikleri ve iki boyutlu kontur grafikleri, regresyon modelinin grafiksel gösterimi olup parametrelerin çalışılan aralıklardaki optimum değerlerini belirlemek için kullanılır (bkz. Şekil 4(a-f)). Grafikler, iki değişkenli bir fonksiyon olarak, incelenen değişkenlerin sabit değerinde, diğer değişkenlerin ise orta seviyesinde (0) sabit tutularak elde edilmiştir.



KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU



D. Katırcıoğlu Bayel

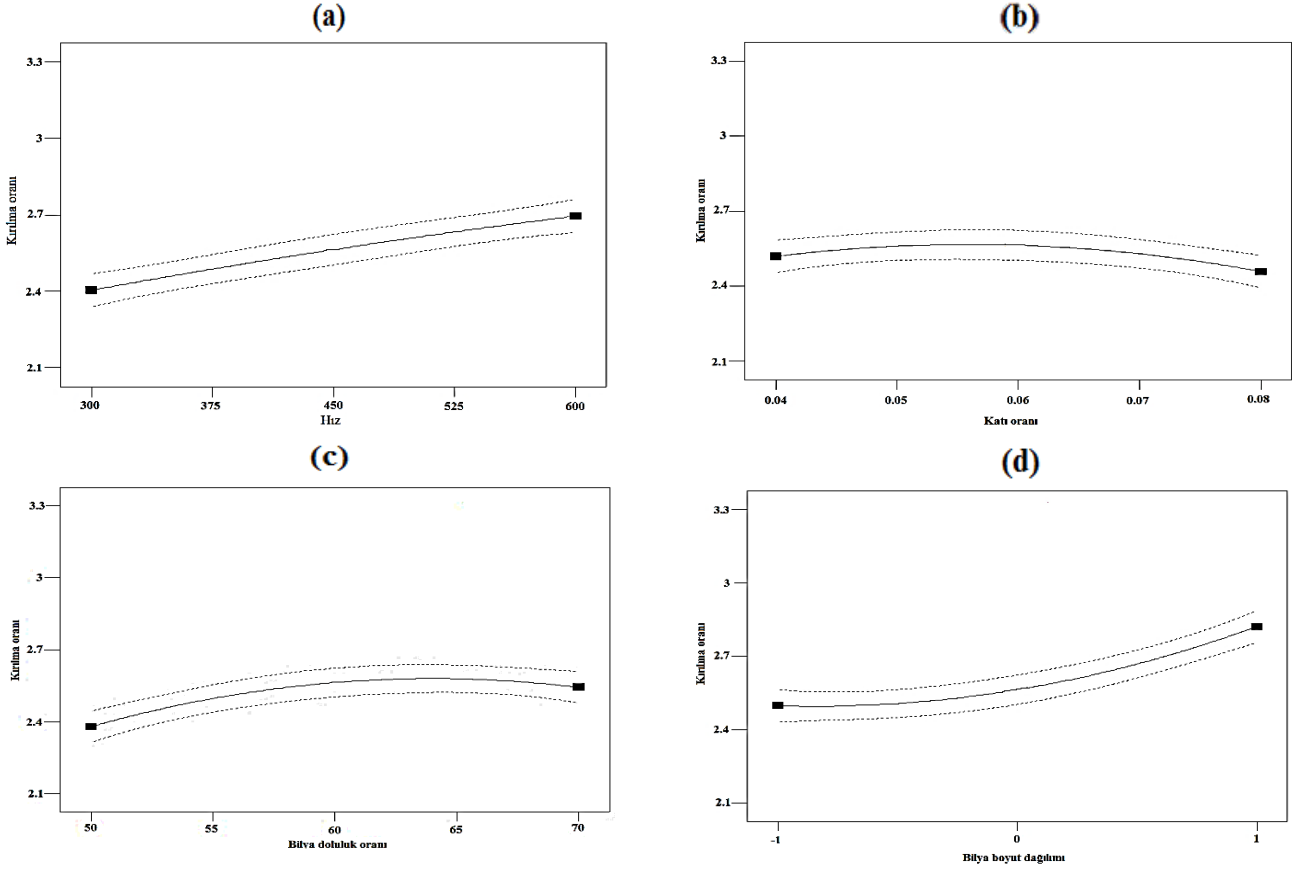


Şekil 4. Kırılma oranı için (a1-f1) 3D yüzey grafikleri ve (a2-f2) kontur grafikleri

Karıştırmalı bilyalı değirmende, hızdaki ve değirmene beslenen malzeme miktarındaki değişim ürün inceliğini etkilemektedir. Şekil 4(a) incelendiğinde karıştırma hızı 300 d/dk'dan 600 d/dk'ya arttıkça aynı zamanda kati oranı da 0,04'den 0,08'e arttıkça kırılma oranının da 2,49'dan 2,7'ye arttığı görülmektedir. En yüksek kırılma oranı, maksimum hızda ve maksimum kati oranında elde edilmiştir. Hız 600 d/dk'dan 300 d/dk'ya, bilya doluluk oranı ise %70'den %50'ye azaldıkça kırılma oranının 2,67'den 2,19'a azaldığı Şekil 4(b)'den açıkça görülmektedir. Öyle ki maksimum kırılma oranı 600 d/dk hızda ve %70 bilya doluluk oranında elde edilmiştir. Öğütücü ortam miktarındaki değişim, öğütücü ortam ile malzeme arasındaki oranı değiştirmekte ve bu etki ürün inceliğini de etkilemektedir [30]. Şekil 4(c)'den görüldüğü gibi maksimum karıştırma hızında, büyük çaplı bilyaların çoğunlukta olduğu yüksek seviyede (+1) maksimum kırılma oranı elde edilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda bazı araştırmacılar tarafından karıştırma hızı ve bilya boyutu arasında önemli bir ilişkinin olduğu ifade edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda da düşük karıştırma hızlarında iri boyutlu bilyaların, ince boyutlu bilyalardan daha etkin bir öğütme gerçekleştirdiği savunulmuştur [16], [31]. Şekil 4(d)'ye göre, kati oranı arttığında bilya doluluk oranı ise azaldığında en düşük kırılma oranına ulaşılmıştır. Arzu edilen maksimum kırılma oranı, bilya doluluk oranının ve kati oranının orta noktalarında elde edilmiştir. Minimum kati oranında büyük çaplı bilyaların maksimum olduğu yüksek seviyede (+1) maksimum kırılma oranı elde edildiği Şekil 4(e)'den açıkça görülmektedir. Optimum bilya boyutunun seçimi öğütme verimi ve enerji tüketimi açısından oldukça önemlidir [32]. Şekil 4(f)'de bilya doluluk oranının ve bilya boyut dağılımının ilişkisi detaylı incelenmiş olup bilya doluluk oranı maksimum seviyede (%70) ve bilya boyut dağılımında büyük çaplı bilyaların çoğunlukta olduğu yüksek seviyede (+1) maksimum kırılma oranı elde edilmiştir (2,93).

Şekil 5(a-d) her bir parametrenin tek faktör etkisini göstermektedir. Tek faktör etkisinde, incelenen parametre dışında kalan diğer tüm faktörler orta seviyede (0) sabit tutulmuştur.

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU



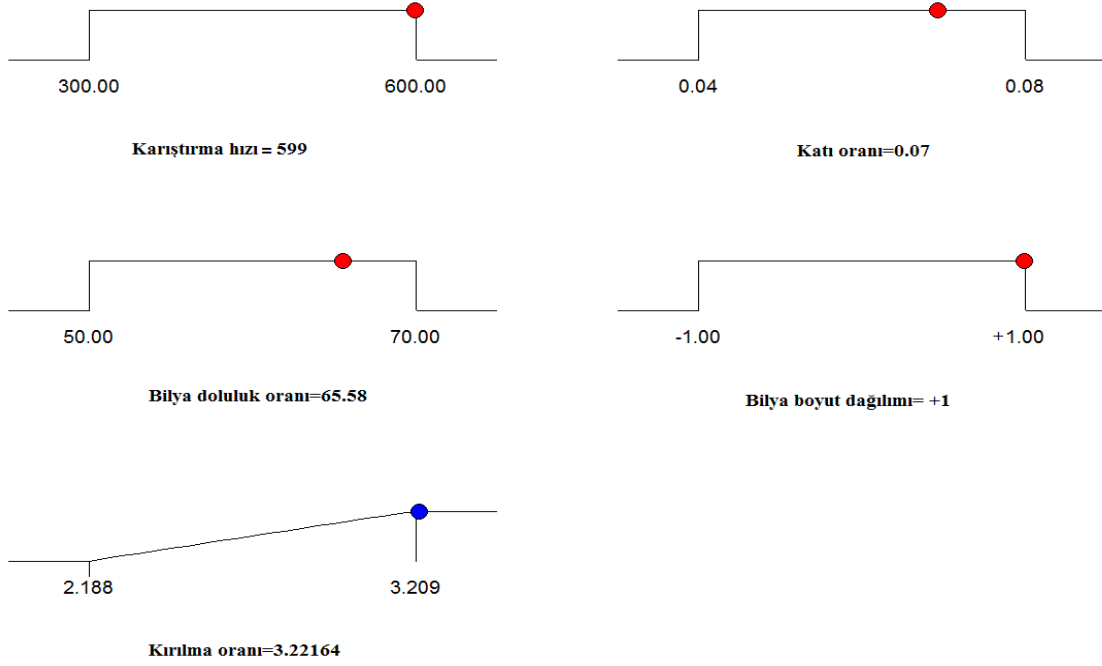
Şekil 5. Talkın kuru öğütülmesinde dört bağımsız faktörün kırılma oranı üzerindeki etkisi (a) hız (X_1), (b) kati oranı (X_2), (c) bilya doluluk oranı (X_3) ve (d) bilya boyut dağılımı (X_4)

Şekil 5(a-d) incelendiğinde hız arttıkça kırılma oranının arttığı, kati oranının ve bilya doluluk oranının orta seviyesinde maksimum kırılma oranının elde edildiği bunun yanı sıra bilya boyut dağılımında iri bilya arttıkça kırılma oranının maksimum seviyede olduğu açıkça görülmektedir.

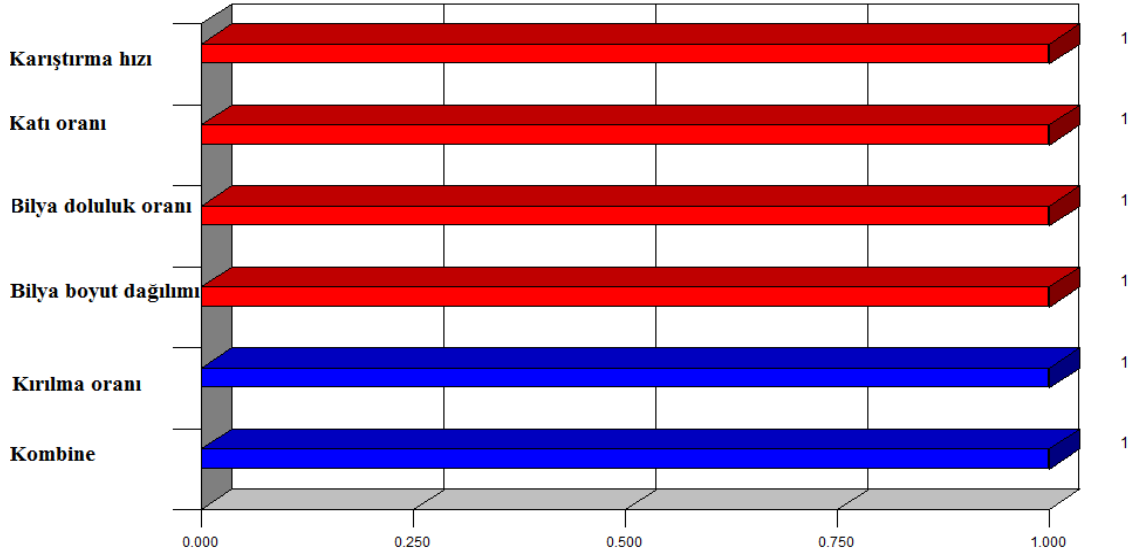
3.3. Optimizasyon ve Doğrulama Testleri

Maksimum kırılma oranı elde etmek için Design Expert yazılımı kullanarak optimizasyon işlemi yapılmıştır. Yazılım çözümlerine göre, kırılma oranını maksimize etmek için (3,22) en uygun koşulların 599 d/dk karıştırma hızı, 0,07 kati oranı, %65,58 bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımının maksimum seviyesinde elde edileceği tespit edilmiştir. Şekil 6, seçilen dört parametrenin sayısal optimizasyonu için istenilebilirlik rampasını, Şekil 7 ise tüm yanıtların bireysel olarak istenebilirliğini gösteren çubuk grafiğini göstermektedir.

D. Katırcıoğlu Bayel



Şekil 6. Seçilen dört parametrenin sayısal optimizasyonu için istenilebilirlik rampası (İstenilebilirlik=1)



Şekil 7. Yanıtların her biri için ayrı ayrı istenilebilirlik fonksiyonu

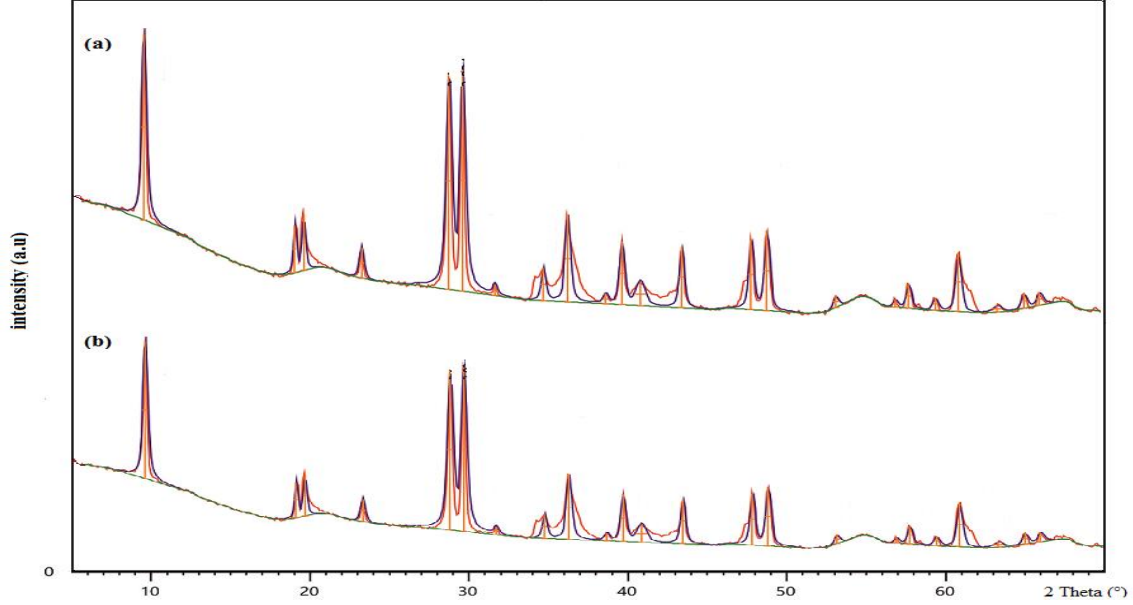
Yazılım programının belirttiği optimum koşullar kullanılarak laboratuvarında iki adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarının ortalama değerine göre kırılma oranı 3,29 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu kırılma oranı değeri 29 testte elde edilenlerden daha büyüktür.

3.4. XRD Analizi

Öğütme işleminin talkın yapısal özellikleri üzerindeki etkileri, Şekil 8'deki X-ışını difraksiyon analizi ile incelenmiştir. Talk numunesinin X-ışını Difraktometresi Rietveld yöntemine göre yazılmış ve Siroquant yazılım programından yararlanılarak oluşturulmuştur. Bu sonuçlara göre; numunede ağırlıklı olarak talk mineraline, safsızlık olarak ise klorit (% 6,1), dolomit (% 0,6) ve kuvars (% 0,3) minerallerine rastlanmıştır. Ayrıca, öğütülmüş talk numunelerinin pik alanlarında, muamele edilmemiş

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

talk numunesine kıyasla herhangi bir değişiklik gözlenmemiş olup optimum öngörülen sonucun beslemeye kıyasen tepe yoğunluğu, bir mineralin kristal boyutundaki küçülme sonucunda öğütmeden sonra azalmıştır [33].



Şekil 8. Talkın XRD analizi: (a) besleme; (b) optimum öngörülen sonuç

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, talkın karıştırmalı bilyalı değirmende mikron altı boyuta öğütülmesinde öğütme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Karıştırma hızı, katı oranı, bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımının etkisi de dâhil olmak üzere dört bağımsız faktörün kırılma oranı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç seviyeli Box-Behnken tasarımı dizayn edilmiştir. Kodlu faktörlere ilişkin cevap denkleminin nihai kuadratik modelleri kırılma oranı için elde edilmiş ve varyans analizi kırılma oranı için oldukça iyi bir değer sergilemiştir ($R^2= 0,952$).

Yazılım çözümlerine göre kırılma oranını maksimize etmek için (3,22) en uygun koşulların 599 d/dk karıştırma hızı, 0,07 katı oranı, % 65,58 bilya doluluk oranı ve bilya boyut dağılımının maksimum seviyesinde elde edileceği tespit edilmiştir. Doğrulama testinde, optimum öngörülen koşullar altında kırılma oranı 3,29 olarak tespit edilmiş olup bu sonuç optimum fiili sonuçla uyumludur. Öğütmenin talkın yapısal özellikleri üzerindeki etkisi XRD analizi ile incelenmiş olup öğütülmüş talk numunesinin pik alanlarında herhangi bir değişime rastlanmazken pik şiddetlerinde azalış gözlemlenmiştir.

Talkın yeri doldurulamaz bir mineral dolgu maddesi olduğu düşünüldüğünde, yapılan bu çalışma ile öğütme işleminde malzemenin, zamanın verimli ve etkili bir şekilde kullanılması konusuna ışık tutulmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma FEB2017/02 numaralı proje kapsamında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Yazar, numune temini konusunda katkılarından dolayı Mikron'S A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- [1] H. S. Katz and J. W. Milewski, Eds., *Handbook of Fillers for plastics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.
- [2] K. S. Özdemir and E. Özdemir "Delikli nano CaCO₃ üretimi," in 3. Sanayi Şurası, Ankara.
- [3] H. Bel Fadhel and C. Frances "Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill," *Powder Technol.*, vol. 119, no. 2-3, Sep., pp. 257-268, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00266-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00266-2)

- [4] C. T. Jayasundara, R. Y. Yang, A. B. YU and J. Rubenstein “Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill”, *Int. J. Miner. Process*, vol. 96, no. 1-4, Sep., pp. 27–35, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.07.006>
- [5] C. T. Jayasundara, R. Y., Yang and A. B. Yu “Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills,” *Miner. Eng.*, vol. 33, pp. 66–71, June, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.012>
- [6] A. Jankovic “Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills,” *Miner. Eng.*, vol. 16, no.4, Apr, pp. 337–345, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00007-4)
- [7] O. Celep, N. Aslan, I. Alp, and G. Taşdemir “Optimization of some parameters of stirred mill for ultra-fine grinding of refractory Au/Ag ores,” *Powder Technol.*, vol. 208, no. 1, Mar, pp. 121–7, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.12.009>
- [8] P. Radziszewski “Assessing the stirred mill design space,” *Miner. Eng.*, vol. 41, Feb., pp. 9–16, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.012>
- [9] C. Bernhart, E. Reinsdh, and K. Husemann “The influence of suspension properties on ultra-fine grinding in stirred ball mills”, *Powder Technol.*, vol. 105, no.1-3, Nov., 357–361, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00159-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00159-X)
- [10] W. S. Choi “Grinding rate improvement using a composite grinding ball size for an ultra-fine grinding mill”, *Journal of the Society of Powder Technol.*, vol. 33, no. 9, Sep., pp. 747–752, 1996. <http://doi.org/10.4164/sptj.33.747>
- [11] K. Shinohara, B. Golman, T. Uchiyama, and M. Otani “Fine-grinding characteristic of hard material by attrition mill,” *Powder Technol.*, vol. 103, no. 3, Jul., pp. 292–296, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00042-X)
- [12] H. Choi and L. Wang “A quantitative study of grinding characteristics on particle size and grinding consumption energy by stirred ball mill,” *Korean J. Mater. Res.*, vol.17. no. 10, Oct., pp. 532–537, 2007.
- [13] H. Choi, W. Lee, J. Lee, H. Chung, and W. Choi “Ultra-fine grinding of inorganic powders by stirred ball mill: effect of process parameters on the particle size distribution of ground products and grinding energy efficiency,” *Metals and Materials International*, vol.13, no.4, Aug., pp. 353–358, 2007. <https://doi.org/10.1007/BF03027893>
- [14] F. Shi, R. Morrison, A. Cervellin, F. Burns, and F. Musa “Comparison of energy efficiency between ball mills and stirred mills in coarse grinding,” *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 7-8, Jun.- Jul., pp. 673–680, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.002>
- [15] M. J. Mankosa, G. T. Adel, and R. H. Yoon “Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal,” *Powder Technol.*, vol. 49, no. 1, Dec., pp.75–82, 1986. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)85008-2](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)85008-2)
- [16] D. Katircioğlu-Bayel, S. G. Ozkan, and O. Y. Toraman “Effect of Operating Parameters on the Breakage Process of Calcite in a Stirred Media Mill,” *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 36, no. 2, Sep., pp. 399-408, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0008-8>
- [17] O. Celep and E. Y. Yazici “Ultra fine grinding of silver plant tailings of refractory ore using vertical stirred media mill,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, Apr., pp. 3412-3420, 2013. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62882-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62882-4)
- [18] C. M. Anderson-Cook, C. M. Borrer, and D. C. Montgomery “Response surface design evaluation and comparison,” *J. Stat. Plan. Inference*, vol. 139, no.2, Feb., pp. 629–641, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2008.04.004>
- [19] M. Hasan, S. Palaniandy, M. Hilden, and M. Powell “Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill,” *Miner. Eng.*, vol. 111, Sep., pp. 229–237, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.024>
- [20] C. E. Gibson, R. Hansuld, S. Kelebek, and M. Aghamirian “Behaviour of ilmenite as a gangue mineral in the benzohydroxamic flotation of a complex pyrochlore-bearing ore”, *Miner. Eng.*, vol. 109, Aug., pp. 98–108, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.02.009>
- [21] S. Kirboga and M. Öner “Investigating the effect of ultrasonic irradiation on synthesis of calcium carbonate using Box-Behnken experimental design,” *Powder Technol.*, vol. 308, Feb., pp. 442–450, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.042>
- [22] O. Celep, P. Altinkaya, E. Y. Yazici and H. Devenci “Thiosulphate leaching of silver from an arsenical refractory ore,” *Miner. Eng.*, vol. 122, Jun., pp. 285–295, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.011>
- [23] D. Shukla and R. Venugopal “Optimization of the process parameters for fine coal–oil agglomeration process using waste mustard oil,” *Powder technol.*, vol. 346, Mar., pp. 316-325, 2019. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1612913>
- [24] K. Pariyan, M. R., Hosseini, A. Ahmadi, and A. Zahiri “Optimization and kinetics of oxalic acid treatment of feldspar for removing the iron oxide impurities,” *Separation Science and Technol.*, 2019. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1612913>
- [25] S. Rahmati, A. Ahmadi, M. R. Hosseini, and M. M. Nasab “Optimization of continuous air-assisted solvent extraction for treating dilute Cu leach solutions using response surface methodology,” *Miner. Eng.*, vol. 131, Jan., pp. 154-163, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11>
- [26] S. L. Ferreira, R. E. Bruns, H. S. Ferreira, G. D. Matos, J. M. David, G. C. Brandão, E. G. Da Silva, L. A. Portugal, P. S. Dos Reis, A. S. Souza, and W. N. Dos Santos “Box-Behnken design: an alternative for the optimization of

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE KURU ÖĞÜTMEDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

analytical methods”, *Anal. Chim. Acta*, vol. 597, no. 2, Aug., pp. 179–186, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>

- [27] M. Erşan and Ü. R. Açikel, “Delemar’ın Asit Fosfataz Üretimi ve Zn(II) Biyobirikiminin Cevap Yüzey Yöntemi Kullanarak Optimize Edilmesi,” *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, vol. 29, no. 2, Aralık, pp. 321-329, 2014.
- [28] A.C. Atkinson and A.N. Donev, Eds., *Optimum experimental designs*, Oxford: Clarendon, 1992.
- [29] D.C. Montgomery, Eds., *Design and analysis of experiments*, John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [30] O. Altun, H. Benzer and U. Enderle “Effects of operating parameters on the efficiency of dry stirred milling,” *Miner. Eng.*, vol. 43–44, Apr., pp. 58-66, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.08.003>.
- [31] J. Yue and B. Klein “Effects of bead size on ultrafine grinding in a stirred bead mill” in *Advances in Comminution*, S. Kawatra Eds. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2006.
- [32] M. Gao, R. Holmes and J. Pease “The latest developments in fine and ultrafine grinding Technologies,” In Proc. XXIII. International Mineral Processing Congress, 2006, pp. 30-37.
- [33] V. N. Mochalin, A. Sagar, S. Gour, and Y. Gogotsi, “Manufacturing nanosized fenofibrate by salt assisted milling,” *Pharmaceutical Research*, vol. 26, no. 6, Feb., pp. 1365–1370, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11095-009-9846-x>





REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ş. Beste AYDIN^{1,*}, Deniz AYDIN², Alim GÜL¹

¹Istanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
²Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma kapsamında refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinin zenginleştirilmesinde çevreye daha dost proseslerden olan flotasyon yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çanakkale-Serçeler bölgesinden temin edilen 18,85 ppm Au ve 120 ppm Ag içeren numune üzerinde gerçekleştirilen flotasyon çalışmalarına göre, -74 µm tane boyutunda, kaba devrede 1000+1000 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 kullanımı ve 2 kademeli temizleme devresi ile konsantride %75,8 verim ile 625 ppm Au, %86,5 verim ile 4833 ppm Ag elde edilmiştir. Kaba devrede 1500+1500 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 kullanımı ve 3 kademeli temizleme devresi ile ise konsantride %69,6 verim ile 1026,5 ppm Au, %80,6 verim ile 8058,1 ppm Ag elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinden flotasyon yöntemi ile doğrudan izabaya gönderilebilecek nitelikte bir konsantride elde edilebileceği belirlenmiştir. Flotasyon kinetiği ile ilgili çalışmalarda ikinci derece kinetik modelinin bu cevher için uygulanabilir olduğu ve ikinci dereceden flotasyon kinetik sabitleri göz önüne alındığında, gümüşün altına göre 2,5 kat daha fazla flotasyon hızına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri, Flotasyon, Flotasyon kinetiği

INVESTIGATION OF FLOTATION BEHAVIOR OF NON-REFRACTORY SULPHIDE GOLD-SILVER ORE

ABSTRACT

In this study, the applicability of the flotation method, which is one of the more environmentally friendly processes, was investigated in the enrichment of non-refractory sulphide gold ore. According to the flotation tests carried out on the sample obtained from Çanakkale-Serçeler region and contained 18.85 ppm Au and 120 ppm Ag, at -74 µm particle size, with the use of Aerophine 3418 A+Aero 208 of 1000 + 1000 g/t in rougher circuit and with applying two stages cleaning circuit, the flotation concentrate assayed as 625 ppm Au and 4833 ppm Ag was obtained with recoveries of 75.8% and 86.5%, respectively. In addition, using 1500+1500 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 in rougher circuit and following 3-stage cleaning circuit, 1026.5 ppm Au with recovery of 69.6% and 8058.1 ppm Ag with recovery of 80.6% were obtained in concentrate. Considering these results, it was determined that a concentrate that could be sent directly to the smelter from the non-refractory sulphide gold ore can be produced by the flotation method. In studies related to flotation kinetics, it was concluded that the second order kinetic model is applicable for this ore and, considering the second order flotation kinetic constants, silver has a 2.5 times higher flotation rate than gold.

Keywords: Non-refractory sulphide gold-silver ore, Flotation, Flotation kinetic

1. GİRİŞ

Flotasyon yönteminin altın madenciliğindeki uygulaması 1930'lu yıllarda suda çözünen ksantat ve dithiofosfat gibi flotasyon kollektörlerinin bulunması ile başlamıştır [1]. Bundan önce Kanada, Avustralya ve Kore'de yer alan birkaç altın madeninde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: beste.aydin@itu.edu.tr

Geliş / Received: 26.02.2020 Kabul / Accepted: 29.06.2020 doi: 10.28948/ngumuh.693562

kompleks ve refrakter altın cevherinin kazanılmasında ilk aşamada flotasyon yöntemi uygulanmaktaydı. Bu tesislerde, flotasyon kollektörü olarak yağlar kullanılarak düşük içerikli kaba altın konsantreleri üretilmekteydi. Kanada, 1960'ların sonuna kadar ikinci büyük altın üreticisiydi ve ürettiği altının büyük çoğunluğu kompleks, refrakter ve bakır-altın cevherlerinin flotasyonu ile elde edilmekteydi [2]. 1980'lerde ve 1990'larda Avustralya, Afrika ve Amerika'da yeni imkânların yaratılması ile altın üretiminde büyük artışlar meydana gelmiştir. O zamanlardan beri flotasyon ile altın kazanımı için kullanılabilir selektif flotasyon kollektörleri ile ilgili araştırmalar önem kazanmıştır [3, 4]. Ancak yine de, baz metal içeren cevherlerin flotasyon davranışları hakkında çok fazla bilgi olmasına rağmen, altın- gümüş içeren cevherlerin flotasyon davranışları ile ilgili rapor edilen araştırmalar sınırlıdır.

Serbest haldeki altının flotasyon verimi, köpük kararlılığı ve altın tanelerinin şekil, boyut gibi fiziksel özelliklerinden etkilenmektedir. Reaktif türü ve pül pH'ı ise kimyasal açıdan flotasyona etki etmektedir [5, 6].

Flotasyonda önemli bir parametre olan tane boyutu, altının yüksek yoğunluğundan dolayı daha fazla önem taşımakta ve altın flotasyonu için 10-200 µm arasında olmaktadır. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda 3 µm tane boyutunda flotasyon yapılabilirse de, endüstriyel ölçekli uygulamalarda 10 µm'dan daha düşük tane boyutlarında flotasyon verimi hızlı bir şekilde azalmaktadır [7, 8].

Altın flotasyonunda, pH düzenleyici olarak genellikle kireç ve sülfürik asit tercih edilmektedir. Altın flotasyonunda pH değerinin seçimi birçok faktöre bağlıdır. pH seçiminde genellikle cevherdeki sülfürlü ve silikatlı gang bileşenlerinin miktarı ve türü dikkate alınmaktadır. Kil mineralleri pH 5-9 arasında yüzebildiğinden, cevher içerisinde bu minerallerin bulunması durumunda, bu pH aralığının dışında bir pH değeri seçilmektedir. Arsenopirit ve pirit içeren sülfürlü altın cevherlerinin flotasyonunda pH aralığı 7-9 arasında olmaktadır. Pahalı gang bastırıcılarının kullanımından kaçınmak için daha yüksek pH değerlerinde de flotasyon gerçekleştirilebilmektedir [2].

Altın flotasyonunda dithiofosfatlar ikincil kollektör olarak kullanılmaktadırlar. Aero 208, altın flotasyonunda etkili bir kollektör olarak bilinmektedir. Genellikle altın için selektif olmayan dithiofosforik asitler belirli koşullar altında altın yüzeyine adsorplanmaktadır. Monothiofosfatlar yüksek gümüş içerikli altın için iyi bir selektiflik sağlamaktadır ve bazı sülfürlü cevherlerden altın kazanılmasında kullanılmaktadır [9]. Merkaptanlar asidik ortamda piritte bağlı altın ve altın flotasyonunda tercih edilen kollektörlerdir. Oksitlenmiş veya kısmen oksitlenmiş piritik altın cevherlerinin flotasyonunda kullanılmaktadır [2]. Altın flotasyonunda ikincil kollektör olarak bilinen Aero 208, Aero 3477, Aero 407, Aero 412 ve Aerophine 3418 A kollektörlerinin yanısıra Aero Maxgold 900 serisi kollektörlerde serbest haldeki ve demir sülfürlere bağlı altının kazanılmasında kullanılmaktadır. Gümüş flotasyonunda ise Aerofloat 242 ve Aerophine 3418 A, Aero 6931, Aero MX-950 ve Aero MX-6205 gibi kollektörler tercih edilmektedir [10].

Serbest altının flotasyonunda köpüğün dayanıklılığı ve stabilitesi önemlidir. Çoğu altın tesisinde bir veya diğer köpürtücülerle kombinasyon halinde poliglikol eter bazlı köpürtücüler tercih edilmektedir. Bunun nedeni, poliglikol köpürtücüler ile diğer köpürtücülere kıyasla daha kararlı köpük elde edilebilmesidir [11]. Selektif bir altın flotasyonunda metil izobütil karbinol (MIBC) gibi daha zayıf bir köpürtücü kullanılabilir. Genel olarak, glükol veya polipropilen glükol metil eter köpürtücüleri bu uygulama için idealdir [12]. Köpürtücü karışımları Avustralya'daki altın tesislerinde üzerinde geniş kabul görmüş olup, bu uygulamadaki esas reaktif alkil aril esterlerdir [13].

Gümüş genellikle bakır ve kurşun sülfürler ile konsantre edilme eğilimi göstermektedir. Gümüş flotasyonunda Aerofloat 242 ve Aerophine 3418 A en çok tercih edilen kollektörlerdir. Aero 6931, Aero MX-950 ve Aero MX-6205 kollektörleri bakır sülfürlere bağlı gümüşün kazanılmasında etkili olmaktadır. Gümüşlü galenin flotasyonunda ise Aero 6931 ve Aerophine 3418 A kollektörleri kullanılmaktadır. Gümüş; sfalerit, arsenopirit ve piritte bağlı olarak bulunabilmektedir. Arjantit (Ag_2S), polibazit ($8Ag_2S.Sb_2S_3$), prüstit (Ag_3AsS_3), pirarjirit (Ag_3SbS_3), stefanit ($5Ag_2S.Sb_2S$) ve tetrahedrit ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$) gibi gümüş sülfürler ve gümüş-antimuan-arsenik sülfürler, flotasyon yöntemi ile kazanılabilmektedir. Sodyum sülfür, kireç, kostik soda ve nişasta gibi düzenleyici maddeler gümüşün bastırılmasına neden olmaktadır. Gümüş cevheri, baz metal sülfürlerden çok az miktarda içerdiği zaman sülfürlü cevherlerin toplu flotasyonu maksimum gümüş verimi için en iyi sonuçları vermektedir. Cevher içerisindeki gümüşün pirit, pirotin, arsenopirit ve çinko sülfürlere bağlı olması durumunda, bu minerallerin aktive olması için bakır sülfat ilave edilmesi gerekmektedir. Bu cevher türleri için, dithiofosfatların, Aerofloat 242 ve Aero 3477 gibi kollektörlerin, ksantatlara göre daha az miktarlarda kullanımı yeterli olmaktadır. Aerophine 3418 A kollektörü tek başına ya da ksantatlar ile beraber kullanılabilir. Aero MX-950 ve Aero XD-5002 kollektörleri ise gang minerallerine bağlı gümüşün kazanılmasında etkili olmaktadır. Serüzit, malakit, kuprit ve kerarjirit gibi oksit minerallerine bağlı olan gümüşün yüzdürülebilmesi için flotasyon işleminden önce sülfürleme işlemi yapılması gerekmektedir. Sülfürleme işleminden sonra bu mineraller Aero 407 ve Aero 7151 gibi kollektörlerle rahatlıkla yüzdürülebilir [10].

Son yüzyılda altın kazanımında etkin olarak siyanür liçi yöntemi tercih edilmektedir. Altın-gümüş içeren cevherler, özellikle sülfürlü olanlar genellikle siyanür liçinden önce flotasyon işlemine tabi tutulur. Flotasyon ile elde edilen düşük altın içerikli konsantre doğrudan izabeye gönderilemediği için siyanür liçi devresine gönderilmektedir. Bu çalışmanın amacı, refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinin flotasyon davranışını inceleyerek sadece flotasyon yöntemi ile doğrudan izabeye gönderilebilecek konsantre elde edebilmektir.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

2. MALZEME VE METOT

2.1. Malzeme

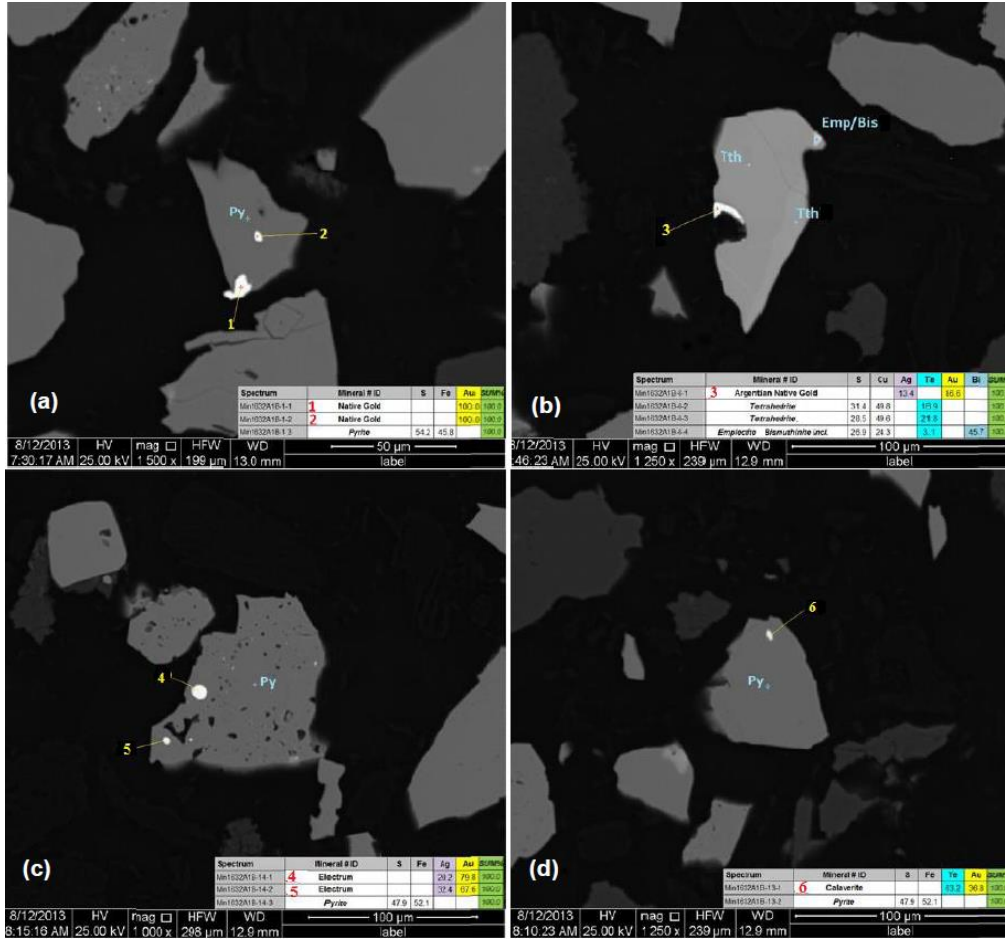
Çanakkale-Serçeler bölgesinden tedarik edilen cevher numunesi sırasıyla çeneli, konili ve merdaneli kırıcıdan geçirilerek tamamı kontrollü olarak 2 mm altına indirilmiştir. Temsili numune üzerinde kimyasal ve mineralojik analizler ALS (Australian Laboratory Services) laboratuvarlarında yapılmıştır. Tablo 1’de gösterilen kimyasal analiz sonuçlarına göre, numune 18,85 ppm Au ve 120 ppm Ag içermektedir. Parlak kesitler üzerinde QEMSCAN (taramalı elektron mikroskobu) cihazı ile mineralojik analizler gerçekleştirilmiştir. Numunenin QEMSCAN görüntüleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çanakkale-Serçeler bölgesine ait numunenin kimyasal analiz sonuçları.

Element	İçerik (ppm)	Element	İçerik (%)
Au	18,85	Al	1,04
Ag	120	Ca	0,05
As	137,5	Fe	3,51
Bi	511	K	0,03
Zn	79	Mg	0,02
Co	41,8	Na	0,01
Cu	182	S	0,8
Se	51	Si	41
Te	7,3	Ti	<0,005

Mineralojik analiz sonuçlarına göre, numune içerisinde yaygın olan mineraller pirit ve kuvars, geriye kalan ise kaolinitir. Numune içerisinde oldukça serbestleşmiş pirit taneleri, tetrahedrit, tennantit ve daha az oranda sülfürler ile kükürt tuzları bulunmaktadır. Cevher içerisindeki piritin ortalama tane boyutu 50 µm, tetrahedritin ortalama tane boyutu 27 µm ve sülfürlerin ortalama tane boyutu ise 23 µm olarak belirlenmiştir.

Altının çoğunluğu nabit altın ve elektrüm olarak bulunmaktadır. Mineral Serbestleşme Analiz (Mineral Liberation Analyzer-MLA) cihazı ile altının tane boyutunun 19-0,62 µm arasında değiştiği, d_{80} boyutunun 16,18 µm ve d_{50} boyutunun ise 12,54 µm olduğu belirlenmiştir. Gümüş geniş olarak klorarjirit ve az miktarda arjantitten oluşmaktadır. Klorarjiritin tane boyutları 75-0,87 µm arasında değişirken d_{80} boyutu 68,43 µm, arjantitin tane boyutları 13,5-0,87 µm arasında değişirken d_{80} boyutu ise 9,05 µm olmaktadır. Altın ve gümüş mineralleri çoğunlukla piritte bağlıdır. Geriye kalan altın ve gümüş taneleri kuvarsa, kaolinite, demir sülfürlere ve demir hidroksitlere bağlı bulunmaktadır. Tanımlanan demirin büyük bir kısmı pirit olarak yer almaktadır. Geriye kalan demir ise Fe-Ti oksitleri içinde kapanım halindedir. Kükürdün neredeyse tamamı (%99) piritte, çok az kısmı da diğer sülfürler ve sülfatlar içerisinde bulunur. Numunedeki altın ve gümüş oluşumları nabit altın (%95-100 Au ve %0-5 Ag), gümüşlü nabit altın (%80-95 Au ve %5-15 Ag), elektrüm (%20-80 Au ve %20-80 Ag), kalaverit ($AuTe_2$, %~37 Au), klorarjirit (AgCl), arjantit (Ag_2S) ve jalpaite-proustite ($Ag_3CuS_2-Ag_3AsS_3$) olarak gözlenmiştir.



Şekil 1. Çanakkale-Serçeler Bölgesine ait numunenin QEMSCAN görüntüleri (a) 1- nabit altın, 2-nabit altın (b) 3-gümüşlü nabit altın (c) 4-elektrum, 5-elektrum (d) 6-kalaverit.

2.2. Metot

Flotasyon deneylerinde doğrudan izabeye gidebilecek nitelikte altın ve gümüş içeren konsantrite üretmek için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneylerde tane boyutunun, kademe sayısının, kollektör türü ve miktarının etkisi incelenmiştir. En uygun koşullar değerlendirilerek, yüksek altın ve gümüş içerikli konsantrite elde etmek için çok kademeli temizleme devreli flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerinde kullanılacak malzeme %60 pülpte katı oranında bilyalı değirmende öğütülerek hazırlanmıştır. Flotasyon deneyleri, Denver marka D 12 model laboratuvar tipi flotasyon makinasında yapılmıştır. Deneyler, %30 pülpte katı oranında, 1 kg malzeme ile 2,5 L'lik flotasyon hücrelerinde 1500 dev/dk karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan bastırıcı reaktif (Na_2SiO_3) %10'luk, kollektörler ve köpürtücüler ise %1'lik derişimde hazırlanmıştır. Aerophine 3418 A, Aero 208, ATP (amino tiyo fenol), KAX (potasyum amil ksantat) kollektör olarak, MIBC (metil izobutil karbinol) ise köpürtücü olarak kullanılmıştır. Silikat bastırıcı olarak kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) ilk kademe ilave edildikten sonra pülp 10 dk kondüsyonlanmaktadır. Her kademe için pülpün kollektörler ile kondüsyonlanma süresi ve flotasyon süresi 3'er dk'dır. Flotasyon hücresine beslenen pülpün doğal pH'sı 6,5-7,0 arasındadır.

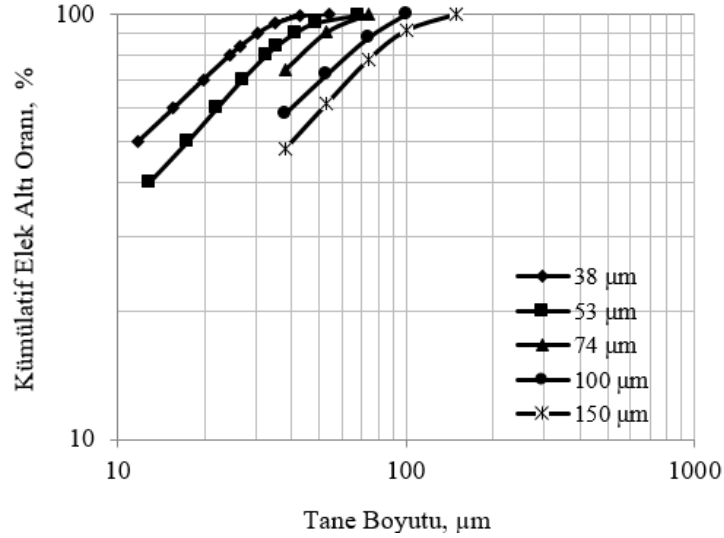
3. BULGULAR ve TARTIŞMALAR

3.1. Tane Boyutunun Etkisi

Tane boyutunun etkisini inceleyebilmek için malzemenin tamamı 150, 100, 74, 53 ve 38 μm altına öğütülmüştür. 150 μm , 100 μm ve 74 μm boyut altındaki malzemenin boyut dağılımını belirlemek için ASTM (ASTM-Amerikan Society for Testing and Materials) standartlarına göre elekler kullanılırken, 53 μm ve 38 μm boyut altındaki malzemenin boyut dağılımını belirlemek

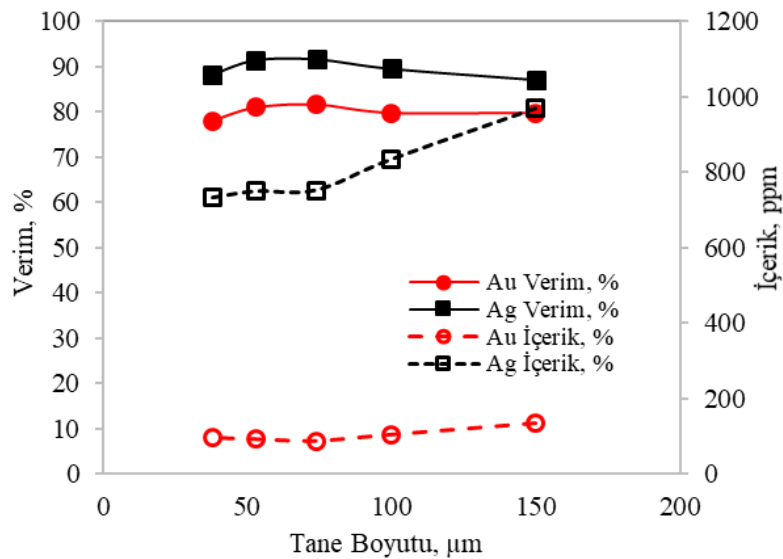
REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

için ise partikül boyut cihazı (Malvern Mastersizer) kullanılmıştır. Şekil 2’de, elde edilen veriler ile çizilen log-log eksenli kümülatif elek altı eğrileri gösterilmiştir. Öğütme sonrasında, pH 4,5-5,0 ‘de gerçekleştirilen dört kademeli flotasyon deneylerinde 1000 g/t Na_2SiO_3 , 250+250 g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 (Her iki kollektör 50+50+50+100 g/t olarak ilave edilmiştir), 50 g/t MIBC (20+10+10+10 g/t) kullanılmıştır. Her kademe için flotasyon süresi 3 dk’dır. Tane boyutunun etkisinin incelendiği flotasyon deneylerinin sonuçları Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 2. Öğütme sonucunda elde edilen malzemelerin tane boyut dağılımı.

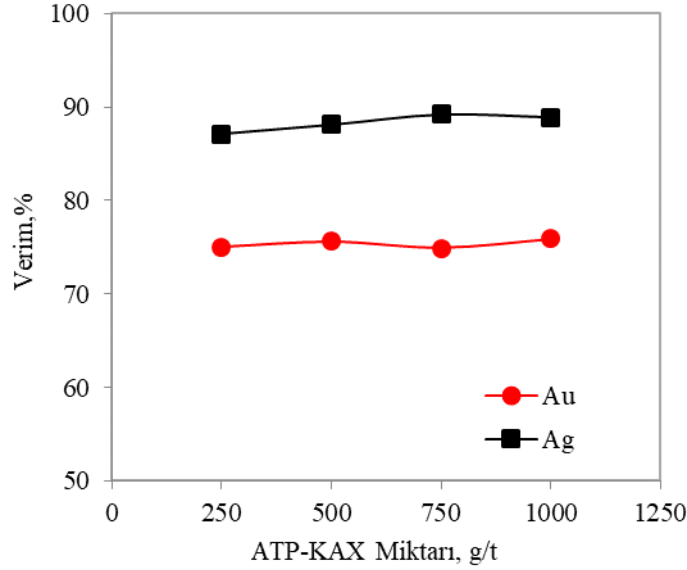
Tane boyutunun etkisinin incelendiği deneylerde, tane boyutu küçüldükçe konsantradaki altın ve gümüş kazanma verimlerinde çok önemli artışlar görülmektedir. Ancak 38 µm tane boyutu ile yapılan deneyde, altın ve gümüş verimlerinde düşüşler gözlenmiştir. İnce boyutlarda, bazı durumlarda şlam oluşumu kontrol edilerek altın kazanımının sağlanmasına rağmen, gang bileşenlerinin de flotasyonu sebebiyle altının selektivitesinin azaldığı bilinmektedir [14]. Cevher numunesi kaolinit ve kuvars ağırlıklı olduğundan, uzun süreli öğütme muhtemelen şlam etkisi yaratarak altın ve gümüş verimlerinde az miktarda düşürlere sebep olmuştur. Beş farklı boyut ile yapılan deneylere göre, %81,7 Au ve %91,7 Ag verimleri ile en uygun boyut -74 µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Tane boyutunun etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları

3.2. Kollektör Cins ve Miktarının Etkisi

Kollektör cins ve miktarlarının etkisinin incelendiği deneylerde, ATP-KAX ve Aerophine 3418 A-Aero 208 kollektör kombinasyonlarının ayrı ayrı kullanımının flotasyona etkisi araştırılmıştır. pH 6,5-7,0'de (doğal) -74 µm tane boyutunda, 1000 g/t Na₂SiO₃ ve 50 g/t MIBC (20+10+10+10 g/t) ilave edilerek, 4 kademe gerçekleştirilen deneylerde, ATP+KAX kollektörlerinden 250+250 g/t (100+50+50+50 g/t), 500+500 g/t (200+100+100+100 g/t), 750+750 g/t (300+150+150+150 g/t), 1000+1000 g/t (400+200+200+200 g/t) kullanılmıştır. Flotasyon süreleri her kademe için 3 dk'dır. Deney sonuçları, Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. ATP-KAX miktarının etkisi.

ATP+KAX kollektörleri ile gerçekleşen deneylerin sonuçları incelendiğinde, kollektör miktarının artırılmasının altın ve gümüş verimleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. 250 g/t ATP+KAX kullanımı ile %75,1 Au ve %87,1 Ag verimleri elde edilirken, kollektör miktarları 1000 g/t'a çıkarıldığında ise altın verimi %75,7'ye, gümüş verimi ise %88,8'e ulaşmıştır.

Fenilmerkaptan olarak adlandırılan ATP (Aminotiyofenol-C₆H₇NS) yapı olarak fenole benzer olan aromatik tiyol bileşiğidir. Fenollerden farkı, aromatik zincire hidroksil grupların (-OH) yerine sülfhidril (-SH) grupların bağlı olmasıdır. Özellikle oksitli kurşun-çinko minerallerinin flotasyonunda kullanılan ATP'nin oksitli kurşun ve demir minerallerine bağlı bulunan nabit altın, nabit gümüş ve elektrum gibi altın ve gümüş minerallerinin flotasyonundaki etkisi Acarkan ve vd. (2011) [15] tarafından ortaya konulmuştur. ATP-KAX kombinasyonu ile yaptıkları çalışmada, %52,5 verim ile 235 ppm altın ve %37,6 verim ile 3740 ppm gümüş konsantrasyonu elde edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, elde edilen %75 altın ve %87 gümüş verimleri ile ATP-KAX kombinasyonunun sülfürlü demir minerallerine bağlı olan altın ve gümüşün flotasyonunda daha etkili olduğu sonucuna varılmaktadır. Sonuçlara benzer olarak, O'Connor ve Dunne (1991) [16] tarafından yapılan çalışmada da asidik ortamda merkaptanların pirite bağlı altının ve diğer altın minerallerinin flotasyonunda tercih edilebileceği belirtilmiştir.

ATP+KAX kollektörlerinin kullanım miktarlarındaki değişimin, altın ve gümüş kazanımında herhangi bir artışa sebep olmamasından dolayı ortamda okside olmuş altın yüzeylerinin olabileceği düşünülmüştür. Mendiratta (2000) tarafından yapılan çalışmada, dönüşümlü voltmetri kullanılarak 10⁻⁴ M Na₂S çözeltisindeki altının yüzeyinde polisülfürler (S_{x+1}⁻²) belirlenmiştir. Flotasyon ortamına ilave edilen Na₂S yüzeydeki oksidasyon ürünlerini uzaklaştırarak, oluşan polisülfürler ile altın yüzeyini hava sever hale getirmiştir [17]. Okside olmuş altın yüzeylerinin varlığını saptayabilmek için deney koşulları sabit tutularak 2500 g/t (3x10⁻² M) Na₂S ilavesi ile flotasyon gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda %75,9 Au ve %89,4 Ag verimleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Na₂S ilavesinin belirgin bir iyileştirme yaratmadığı görülmüş ve okside olmuş altın yüzeylerinin varlığı belirlenmemiştir.

Aerophine 3418 A+Aero 208 kollektörlerinden 5 kademe 500+500 g/t (100+100+100+100+100 g/t) kullanılarak, her kademe 3 dk köpük alınarak ve diğer koşullar sabit tutularak deney yapılmıştır. ATP+KAX ve Aerophine 3418 A+Aero 208 kollektör kombinasyonlarının altın ve gümüş flotasyonu üzerindeki etkisini daha iyi karşılaştırabilmek için 500+500 g/t kollektör kullanımında elde edilen sonuçlar Tablo 2'de değerlendirilmiştir.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tablo 2. Aerophine 3418 A+Aero 208 ve ATP+KAX kollektörleri ile yapılan deneylerin değerlendirilmesi.

Kollektör Cinsi, g/t (500+500)	Ürünler	Miktar, %	İçerik, ppm		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
Aerophine 3418 A+Aero 208	Konsantre	27,6	57,40	397,40	85,9	91,6
	Artık	72,4	3,60	13,90	14,1	8,4
	Toplam	100,0	18,45	119,75	100,0	100,0
ATP+KAX	Konsantre	8,6	161,50	1160,0	75,6	88,0
	Artık	91,4	4,90	14,90	24,4	12,0
	Toplam	100,0	18,37	113,38	100,0	100,0

Tablo 2'deki deney sonuçları incelendiğinde, 500 g/t Aerophine 3418 A-Aero 208 kullanımı ile %85,9 Au ve %91,6 Ag verimlerine ulaşıldığı görülmektedir. Ancak, aynı miktardaki ATP+KAX kollektörlerinin kullanımında ise daha yüksek içerikli altın ve gümüş daha düşük verimlerle elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, verim açısından altın ve gümüş flotasyonu üzerinde Aerophine 3418 A-Aero 208 kollektörlerinin, ATP+KAX kollektörlerine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Altın flotasyonunda etkili kollektörler olarak bilinen Aero 208 (sodyumizopropildithiofosfat) dithiofosfat kökenli, Aerophine 3418 A (sodyumizobütildithiofosfin) ise dithiofosfin kökenli ikincil kollektörlerdir [10]. Aynı yapıda olan dithiofosfinlerin ve dithiofosfatların bazı özellikleri farklıdır. Aerophine 3418 A'nın metal kompleksleri daha kararlıdır ve yüzdürebilme kapasitesi Aero 208'den yüksektir [12, 18, 19]. Aero 208, bazı sülfürlü cevherlerden selektif olarak altın kazanımında etkilidir [9, 20]. Aerophine 3418 A ise gümüş ve gümüş sülfürlerin flotasyonunda kullanılmaktadır. Yüksek pirit içerikli cevherlerden altın kazanımında etkilidir [21-22]. Aerophine 3418 A ve Aero 208 kollektörlerinin ağır metallerle yaptığı tuzların çözünürlüğü genellikle ksantat tuzlarının çözünürlüğünden daha fazladır. Bu sebeple bu kollektörler ksantatlara göre daha zayıf kollektördür. Ancak Bulatovic (1997), dithiofosfatların piritte karşı daha selektif olduğunu, cevherin içerisinde pirit minerali bulunması durumunda bu kollektörlerin kullanılması ile ksantatlara göre daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini belirtmiştir [14].

3.3. Kademe Sayısının Etkisi

Aerophine 3418 A ve Aero 208 kollektörleri ile 5 kademeli deney sonuçları göz önüne alınarak, kademe sayısının etkisini belirleyebilmek için daha önce yapılan 5 kademeli flotasyon deneyine ilave olarak 10 ve 15 kademeli deneyler yapılmıştır. 10 kademeli deneyde her kademede 100'er g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 kullanarak toplam 1000+1000 g/t kollektör ilave edilirken MIBC köpürtücüsünden ise her kademede 10'ar g/t eklenerek toplamda 100 g/t kullanılmıştır. Benzer şekilde 15 kademeli flotasyon deneyinde her kademede 100'er g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 kullanmak üzere her iki kollektörden 1500'er g/t, MIBC'den ise her kademede eşit kullanılarak toplamda 150 g/t ilave edilmiştir. pH 4,5-5'de gerçekleştirilen deneylerde her kademedeki flotasyon süresi 3 dk'dır. Kademeli flotasyon deneylerinin sonuçları Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3'deki deney sonuçları incelendiğinde, kademe sayısının artırılmasının altın ve gümüşün kazanılmasında olumlu etki sağladığı görülmektedir. Bu olumlu etki, kademe sayısı arttırıldıkça kullanılan reaktif miktarının ve flotasyon süresinin de artmış olmasına bağlıdır. 5 kademeli flotasyon deneyinde artıktaki 3,60 ppm Au ve 13,90 ppm Ag, 10 kademeli flotasyon deneyinde ise artıktaki 2,90 ppm Au ve 11,80 ppm Ag saptanmıştır. 15 kademeli flotasyon deneyinde altın kazanımı açısından çok az bir iyileştirme olmasına rağmen, gümüş veriminde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

Tablo 3. Kademe sayısının etkisinin incelendiği flotasyon deneylerinin sonuçları.

Kademe Sayısı	Ürünler	Miktar, %	İçerik, ppm		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
5	Konsantre	27,6	57,40	397,40	85,9	91,6
	Artık	72,4	3,60	13,90	14,1	8,4
	Toplam	100,0	18,45	119,75	100,0	100,0
10	Konsantre	22,2	71,50	512,50	87,5	92,6
	Artık	77,8	2,90	11,80	12,5	7,4
	Toplam	100,0	18,13	122,96	100,0	100,0
15	Konsantre	28,0	56,20	394,50	89,0	92,4
	Artık	72,0	2,70	12,60	11,0	7,6
	Toplam	100,0	17,70	120,01	100,0	100,0

3.4. Temizleme Devreli Flotasyon Deneyleri

Doğrudan izabeye gönderilebilecek altın-gümüş konsantresindeki limit altın içeriğinin 100 ppm, gümüş içeriğinin ise 500 ppm olduğu bilinmektedir. Ancak mümkün olduğu kadar yüksek içerikli altın-gümüş konsantresi üretebilmek, hem altın kayıplarının azalmasını hem de izabe gelirlerinin artmasını sağlayacaktır. Bu sebeple, 10 ve 15 kademeli deneylerden elde edilen kaba konsantreye temizleme flotasyonunun uygulanması gerekmektedir. 10 kademeli deneyin kaba konsantresi 2 kademeli temizleme devresine, 15 kademeli deneyin kaba konsantresi ise 3 kademeli temizleme devresine tabi tutulmuştur. Bu deneylerde, ilk temizleme devresinde 30+30 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208, 20 g/t MIBC, ikinci temizleme devresinde ise 20+20 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208, 10 g/t MIBC ilave edilmiştir. Flotasyon süreleri sırasıyla 7 dk ve 4 dk'dır. 15 kademeli flotasyon deneyinde yapılan üçüncü temizleme devresinde ise köpürtücü ilave edilmeden 10'ar g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 kollektörleri eklenerek 3 dk boyunca köpük alınmıştır. Temizleme devreli flotasyon deneylerinin sonuçları Tablo 4'de verilmiştir.

10 ve 15 kademeli flotasyon deneylerinde elde edilen kaba konsantrelerin içerikleri ve verimleri benzerlik gösterdiğinden elde edilen sonuçlar 2 kademe ve 3 kademe temizleme devrelerinin etkisi olarak incelenebilir. 2 kademeli temizleme devresi ile konsantrede %75,8 verim ile 625 ppm Au, %86,5 verim ile 4833 ppm Ag elde edilmiştir. 3 kademe temizleme ile ise konsantrede %69,6 verim ile 1026,5 ppm Au ve %80,6 verim ile 8058,1 ppm Ag kazanılmıştır.

Tablo 4. Temizleme devreli flotasyon deneylerinin sonuçları.

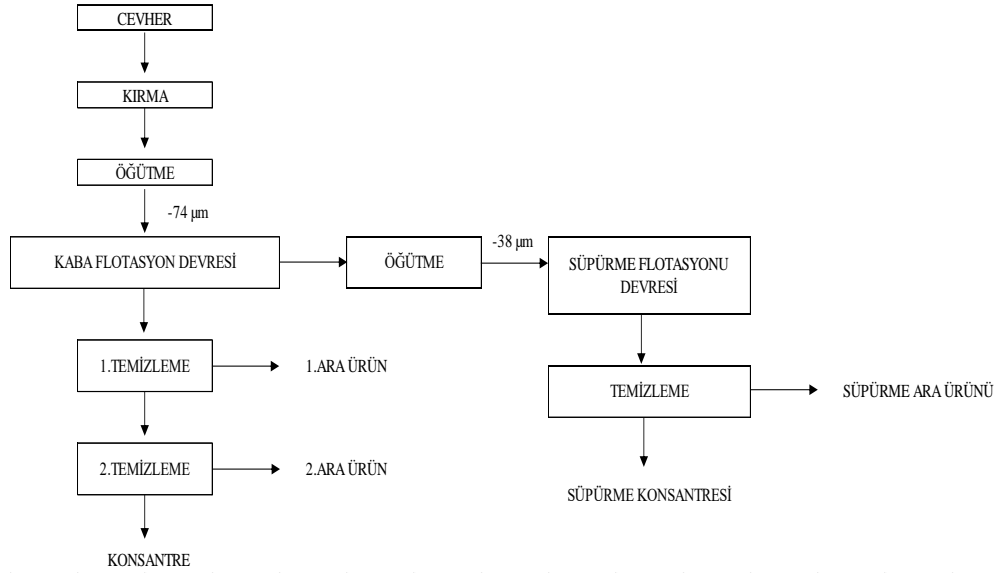
Deney Koşulları	Ürünler	Miktar, %	İçerik, ppm		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
10 kademeli kaba flotasyon ve 2 kademe temizleme flotasyonu	Konsantre	2,2	625	4833	75,8	86,5
	Ara Ürün 2	2,5	23,30	96,70	3,2	2,0
	Ara Ürün 1	17,5	8,80	28,80	8,5	4,1
	Artık	77,8	2,90	11,80	12,5	7,4
	Toplam	100,0	18,13	122,96	100,0	100,0
15 kademeli kaba flotasyon ve 3 kademe temizleme flotasyonu	Konsantre	1,2	1026,5	8058,10	69,6	80,6
	Ara Ürün 3	1,8	70,80	354	7,2	5,3
	Ara Ürün 2	13,9	14,60	52,20	11,5	6,0
	Ara Ürün 1	11,1	1,20	5,50	0,7	0,5
	Artık	72,0	2,70	12,60	11,0	7,6
Toplam	100,0	17,70	120,01	100,0	100,0	

3.5. Flotasyon Artıklarından Altın ve Gümüş Kazanımı

10 kademeli flotasyon işlemi sonucunda artıktaki 2,90 ppm altın ve 11,80 ppm gümüş bulunmaktadır. Daha sonra gerçekleştirilen 15 kademeli flotasyon deneyi ile hem kullanılan reaktif miktarı hem de flotasyon süresi arttırılmasına rağmen artıktaki altın ve gümüş içeriklerinde önemli bir iyileştirme sağlanamamıştır. Mineralojik analizlerden altın ve gümüş minerallerinin çoğunluğunun piritte bağlı olduğu bilindiğinden, pirit minerali açısından tam serbestleşmenin sağlanamadığı düşünülerek flotasyon artığı tekrar öğütülmüş ve ardından süpürme flotasyonu gerçekleştirilmiştir. 10 kademe yapılan flotasyon deneyinden elde edilen artık %60 pülpte katı oranında 60 dk boyunca bilyalı değirmende öğütülerek -38 µm tane boyutuna getirilmiştir. pH 4,5-5,0 'de 4 kademeli gerçekleştirilen süpürme flotasyonu deneyinde 200+200 g/t (50+50+50+50 g/t) Aerophine 3418 A+Aero 208 ve 80 g/t (20+20+20+20 g/t) MIBC ilave edilmiştir. Her kademe köpük alma süresi 3 dk olup, toplam flotasyon süresi 12 dk'dır. Süpürme flotasyonu devresinin ardından 10'ar g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 ve 10 g/t MIBC kullanılarak temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Temizleme devresinde flotasyon süresi 6 dk'dır. Deneyin akım şeması Şekil 5'de, sonuçları ise Tablo 5'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tekrar öğütme ve süpürme flotasyonu sonucunda nihai artıktaki altın içeriği 2,20 ppm, gümüş içeriği ise 8,40 ppm olarak bulunmuştur.

Cevher içerisindeki altın tanelerinin boyutu 19-0,62 µm arasında olup d_{50} boyutu 12,54 µm'dur. Çoğunlukla klorarjirit ve arjantit olarak bulunan gümüşün d_{50} boyutu ise özellikle arjantit için 6,05 µm gibi çok düşük tane boyutlarındadır. Bu sebeple malzemenin boyutunun 38 µm altına indirilmesi pirit haricinde kuvars, kaolinit ve demir hidroksitlere bağlı olan altın ve gümüşün serbestleşmesi için yeterli olmamıştır.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ



Şekil 5: Flotasyon artıklarından altın-gümüş kazanımı için yapılan flotasyon deneyinin akım şeması.

Tablo 5. Flotasyon artıklarından altın-gümüş kazanımı için yapılan flotasyon deneyinin sonuçları.

Ürünler	Miktar (%)	İçerik (ppm)		Verim (%)	
		Au	Ag	Au	Ag
Konsantre	2,2	625	4833	75,8	86,5
Ara Ürün 2	2,5	23,30	96,70	3,2	2,0
Ara Ürün 1	17,5	8,80	28,80	8,5	4,1
Süpürme Konsantresi	1,9	19,50	110,10	2,0	1,7
Süpürme Ara Ürün	15,0	3,40	12,30	2,9	1,6
Artık	60,9	2,20	8,40	7,6	4,1
Toplam	100,0	18,13	122,96	100,0	100,0

3.6. Flotasyon Kinetiğinin İncelenmesi

3.6.1. Kinetik Teorisi

Literatürde yaygın olarak kullanılan flotasyon modelleri flotasyon hızı ile ilgili olarak formüle edilmiştir. Flotasyon modelleri, flotasyon sisteminin hidrodinamik, kimyasal ve fiziksel parametrelerini nicel olarak ifade edebilmektedir [24]. Flotasyon hızı, zaman ile bağlantılı yüzen malzeme miktarı olarak açıklanabilir [25]. Flotasyon hız sabiti (k), cevherin yüzey kimyası, tane boyutu ve mineralojisi gibi özelliklerine bağlıdır [26]. Aynı zamanda hız sabiti reaktif miktarı ve havalandırma seviyesi gibi flotasyon değişkenleri ile de ilgilidir [27]. Flotasyon hız sabiti (k), konsantrede değerli mineral kazanma olasılığını ifade eden sayısal bir değerdir. Aynı hücre içerisinde farklı reaktif koşullarının veya malzemenin farklı tane boyutlarının flotasyondaki etkilerini karşılaştırmak için kullanılabilir. Cevher içerisinde her mineral bir k değerine sahiptir. Bu değerlerin oranları flotasyonun seçiciliğini sayısal olarak ifade etmektedir [24]. Flotasyon kinetik hız sabiti arttıkça, değerli mineralin flotasyon hücresindeki kalış süresi azalır, bu durum flotasyon hücresinin hacimsel kapasitesinin azalmasını sağlar [28].

Flotasyon kinetiğinin belirlenmesinde kullanılan denklemler kimyasal kinetik alanında kullanılan denklemler ile açıklanmaktadır. Denklem 1'de görüldüğü gibi

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C^n \quad (1)$$

C; t zamanında hücredeki değerli mineral konsantrasyonunu, n değeri; denklemin derecesini, k ise; flotasyon hız sabitini ifade etmektedir.

Zuniga'ya (1935) ve Schuhmann'a (1942) kadar uzanan birinci derece kinetik modeli, birçok flotasyon sistemi için deneysel verilere uygun sonuçlar verir [29, 30]. Birinci dereceden kinetik model, bir flotasyonda belirli bir süre içinde değerli minerallerin

Ş. Beste Aydın, Deniz Aydın, Alim Gül

konsantrasyonundaki değişime dayanır. Denklem 1 'in integralinin alınması ile oluşturulan birinci derece kinetik denklemde (denklem 2) [31];

$$R = R_{\infty} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

R; t zamanındaki verim, R_{∞} ($t \rightarrow \infty$); maksimum verim, k_1 ; birinci derece flotasyon kinetik sabiti olarak ifade edilmektedir. Denklem 2, denklem 3 ve 4'de gösterildiği gibi tekrar düzenlendikten sonra logaritması alınarak denklem 5 oluşturulmuştur. Denklem 5'in sol tarafında hesaplanan değerler t değerine (kümülatif flotasyon süresi) karşı çizildiğinde grafik düz bir çizgi olmalıdır. Elde edilen düz çizginin eğimi birinci derece kinetik sabitini (k_1) vermektedir.

$$R_{\infty} e^{-k_1 t} = R_{\infty} - R \quad (3)$$

$$e^{-k_1 t} = (R_{\infty} - R)/R_{\infty} \quad (4)$$

$$\ln[(R_{\infty} - R)/R_{\infty}] = -k_1 t \quad (5)$$

Arbiter (1951) [32] tarafından önerilen ikinci derece kinetik modeli, denklem 1'de ki n değerinin yani denklemin derecesinin 2 yapıldıktan sonra integralinin alınmasıyla elde edilen denklem 6 ile ifade edilmektedir. Denklem 6 tekrar düzenlendiğinde denklem 7 yazılmaktadır.

$$R = \frac{R_{\infty}^2 k_2 t}{1 + R_{\infty} k_2 t} \quad (6)$$

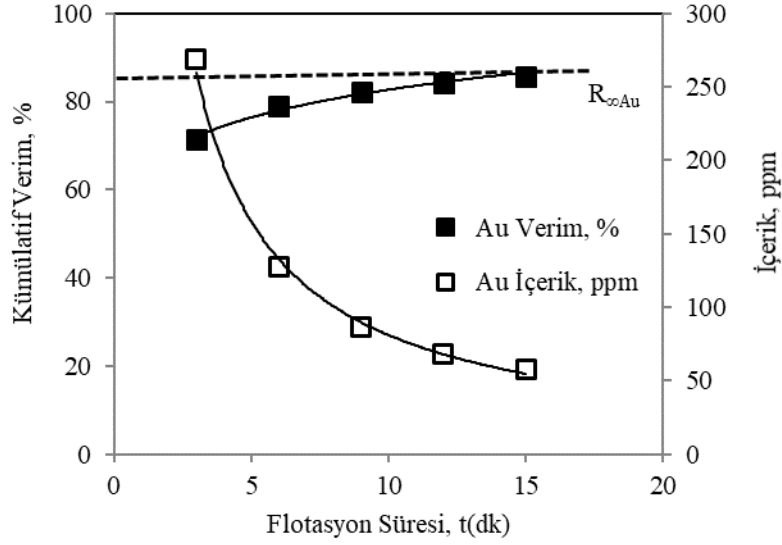
$$\frac{t}{R} = \frac{t}{R_{\infty}} + \frac{1}{R_{\infty}^2 k_2} \quad (7)$$

Denklem (7)'de, R değeri "t" anındaki kümülatif verim, R_{∞} değeri maksimum verim ve k_2 değeri ise ikinci derece kinetik hız sabitidir. İkinci dereceden denklem geçerliyse, zamana karşı çizilen t/R grafiği düz bir çizgiyle ifade edilmelidir. İkinci derece kinetik modelinde doğru eğimi $1/R_{\infty}$ 'a, kesme noktası değeri ise $1/R_{\infty}^2 k_2$ 'ye eşit olmaktadır.

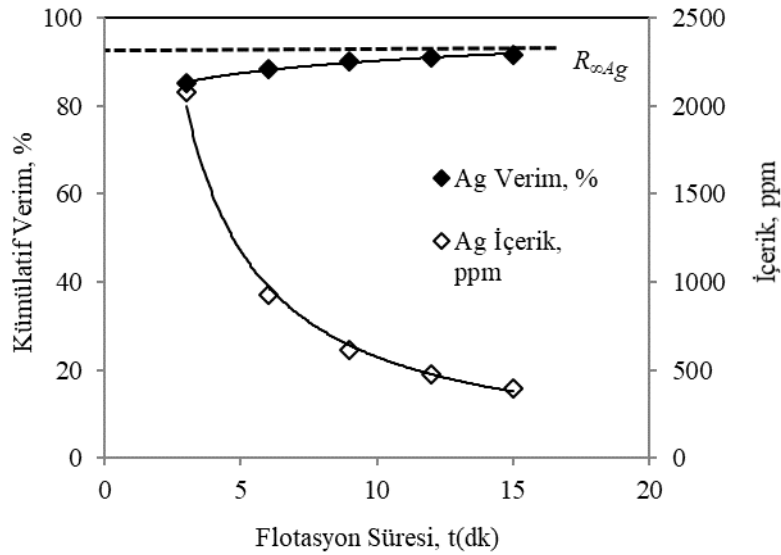
3.6.2. Kinetik Modelleme

Altın ve gümüş verimleri üzerinde flotasyon süresinin etkisi, pH 4,5-5'de, 1000 g/t Na_2SiO_3 , 500'er g/t Aero 208 ve Aerophine 3418 A, 50 g/t MIBC ilavesi ile incelenmiştir. Zamana bağlı yapılan deney, 1 kg numune ile 2,5 L'lik flotasyon hücresinde gerçekleştirilmiştir. 3, 6, 9, 12 ve 15 dk köpük alma süreleri sonunda altın için elde edilen sonuçlar Şekil 6'da, gümüş için elde edilen sonuçlar ise Şekil 7'de verilmiştir. $R_{\infty\text{Au}}$ ve $R_{\infty\text{Ag}}$ değerleri kümülatif verim eğrisinin sabitlenmeye başladığı nokta olarak ifade edilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 15 dk sonunda altın ve gümüş verimlerinin sabitlenmeye başladığı ve kabul edilebilir altın ve gümüş verimlerinin elde edildiği görülmektedir. $R_{\infty\text{Au}}$ değeri Şekil 6'dan %85,9, $R_{\infty\text{Ag}}$ değeri ise Şekil 7'den %91,7 olarak bulunmuştur.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ



Şekil 6. Altın verim ve içeriklerinin zamana bağlı fonksiyonu.



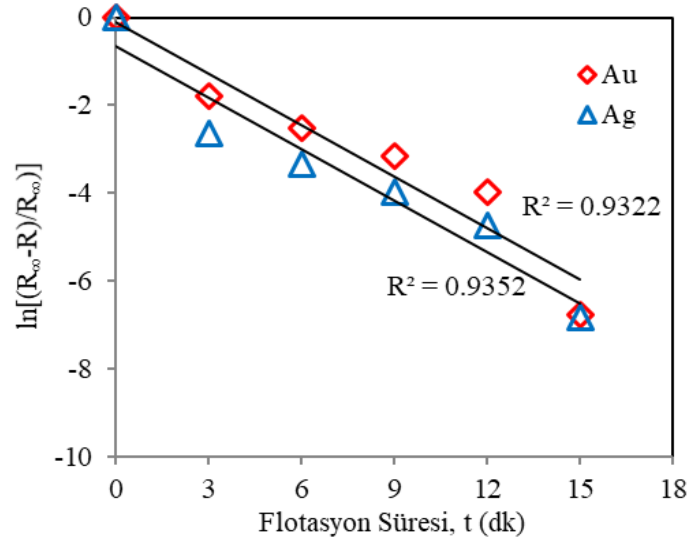
Şekil 7. Gümüş verim ve içeriklerinin zamana bağlı fonksiyonu.

Birinci derece kinetik modelinde, denklem 5'in sol tarafındaki $\ln[(R_{\infty} - R)/R_{\infty}]$ ifadesi ile hesaplanan değerler Tablo 6'da gösterilirken, bu değerlerin kümülatif flotasyon süresine karşı çizilmesi ile oluşturulan grafik Şekil 8'de gösterilmiştir. Au (k_{1Au}) ve Ag (k_{1Ag}) için birinci dereceden kinetik sabitler, Şekil 8'de verilen doğruların eğimlerinden sırasıyla $0,390 \text{ dk}^{-1}$ ve $0,391 \text{ dk}^{-1}$ olarak bulunur. Doğrusal regresyondan korelasyon katsayıları Au için $0,9322$ (r_{Au}^2) ve Ag için $0,9352$ (r_{Ag}^2) olarak elde edilmiştir.

Tablo 6. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri için birinci derece kinetik modelinde kullanılan veriler.

Au			Ag		
t	R	$\ln((R_{\infty Au}-R)/R_{\infty Au})$	t	R	$\ln((R_{\infty Ag}-R)/R_{\infty Ag})$
0	0	0	0	0	0
3	71,4	-1,779	3	85,1	-2,631
6	79,0	-2,522	6	88,4	-3,324
9	82,3	-3,172	9	90,0	-3,987
12	84,3	-3,983	12	90,9	-4,742
15	85,8	-6,756	15	91,6	-6,821

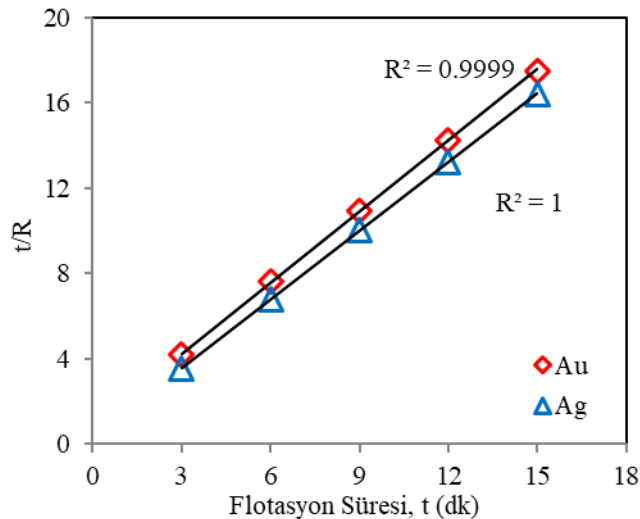
Ş. Beste Aydın, Deniz Aydın, Alim Gül



Şekil 8. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri için birinci derece kinetik modeli.

İkinci derece kinetik model için, kümülatif zamana karşı çizilen t/R (kümülatif zaman/kümülatif verim) değerleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Çizilen verilere göre, elde edilen korelasyon katsayıları 0,99'dan büyüktür, bu da ikinci derece kinetik modelin birinci derece kinetik modele kıyasla yüksek doğrusallık sağladığı anlamına gelir. $R_{\infty Au}$ ve $R_{\infty Ag}$ değerleri doğruların eğimlerinden elde edilirken ikinci dereceden flotasyon kinetik sabitleri ise (k_{2Au} ve k_{2Ag}) kesişme değerlerinden bulunur. İki kinetik model ile elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 7'de gösterilmektedir.

Birçok çalışmada, flotasyonda tek bir mineral yüzdürülecekse veya pülpün katı oranı ağırlıkça %15'den az ise flotasyon sisteminin birinci dereceden kinetik modeline uygun olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, düşük değerli mineral içerikli cevherlerin veya yüksek pülp katı oranına sahip pülpün flotasyon kinetikleri ikinci dereceden kinetik modelde ifade edilmektedir [33-34]. İkinci derece kinetik modelinde elde edilen yüksek korelasyon katsayısı haricinde, bu bilgiler de göz önüne alındığında ikinci derece kinetik modelinin uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. İkinci derece kinetik modelinde flotasyon kinetik sabiti (k_2) Au için $1,318 \text{ g}^{-1} \text{ dk}^{-1}$, Ag için ise $3,329 \text{ g}^{-1} \text{ dk}^{-1}$ olarak hesap edilmiştir. Elde edilen verilere göre gümüşün altına göre 2,5 kat daha hızlı yüzdüğü saptanmıştır.



Şekil 9. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri için ikinci derece kinetik modeli.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tablo 7. Birinci ve ikinci derece kinetik modellerden elde edilen parametreler (R_{∞} ; maksimum verim, k_1 ; birinci derece flotasyon kinetik sabiti, k_2 ; ikinci derece flotasyon kinetik sabiti, r^2 ; korelasyon katsayısı)

	Birinci derece kinetik model			İkinci derece kinetik model		
	R_{∞} , %	k_1 , dk ⁻¹	r^2	R_{∞} , %	k_2 , g ⁻¹ dk ⁻¹	r^2
Au	85,9	0,390	0,9322	90,1	1,318	0,9999
Ag	91,7	0,391	0,9352	93,3	3,329	1,0

4. SONUÇLAR

Günümüzde altın fiyatlarındaki artış eğilimi ile Dünya’da olduğu gibi Türkiye’de de altın üretimine olan ilgi artmış ve yeni altın kaynakları bulma arayışına girilmiştir. Türkiye’de altın-gümüş kazanımını siyanür liçi yöntemi ile yapan bir liç tesisinin siyanür kullanımından dolayı çevresel etki değerlendirmesi kapsamında yasal ve sosyal yükümlülükleri fazla olmakta ve bu nedenle birçok tesisin üretime geçmesinde problemler çıkabilmektedir. Bu çalışmada, Çanakkale-Serçeler bölgesinden temin edilen 18,85 ppm altın ve 120,0 ppm gümüş içeren refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinin flotasyon davranışı incelenmiştir. Cevher üzerinde yapılan mineralojik incelemeler sonucunda yaygın olan minerallerin pirit, kuvars ve kaolinit olduğu tespit edilmiştir. Altın ve gümüş minerallerinin nabit altın, gümüşlü nabit altın, elektrum, kalaverit, klorarjirit, arjantit ve jalpaite-proustite olarak bulunduğu saptanmıştır. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri üzerinde 500+500 g/t ATP+KAX ve Aerophine 3418 A+Aero 208 kollektör kombinasyonlarının etkisinin incelendiği deneylerde ATP+KAX ile yaptıkları çalışmada, %52,5 verim ile 235 ppm altın ve %37,6 verim ile 3740 ppm gümüş içeren, Aerophine 3418 A-Aero 208 kullanımı ile ise %85,9 verim ile 57,4 ppm altın ve %91,6 verim ile 397,4 ppm gümüş içeren konsantre elde edilmiştir. Tane boyutunun, kollektör cins ve miktarının, kademe sayısının etkisinin incelendiği deneylerden elde edilen optimum sonuçlar ile - 74 µm tane boyutunda, kaba devrede 1000+1000 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 kullanımı ve 2 kademeli temizleme devresi ile konsantrede %75,8 verim ile 625 ppm Au, %86,5 verim ile 4833 ppm Ag kazanılmıştır. Aynı tane boyutunda, kaba devrede 1500+1500 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 ilavesi ve 3 kademeli temizleme devresi ile %69,6 verim ile 1026,5 ppm Au ve %80,6 verim ile 8058,1 ppm Ag içeren konsantre üretilmiştir. Flotasyon kinetiği ile ilgili çalışmalarda yüksek korelasyon katsayısından dolayı ikinci derece kinetik modelinin, birinci derece kinetik modeline göre daha uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. İkinci derece kinetik modeline göre gümüşün flotasyon hızı altına göre 2,5 kat daha fazladır.

Siyanürün çevre ve insan sağlığı üzerindeki toksik etkisi nedeniyle siyanür liçi tesislerinde uygulanan ciddi yasal mevzuat dikkate alındığında siyanür liçine kıyasla daha çevre dostu bir yöntem olan flotasyon ile altın eldesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, doğrudan ergitmeye hazır bir altın konsantrinin refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinden flotasyon yöntemi ile elde edilebileceğini belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada numune temininde, mineralojik ve kimyasal analizlerde destek sağladıkları için Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. firmasına çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] A.F. Taggart, “Ores and Industrial Minerals”, in *Handbook of Mineral Dressing*, vol. 12, pp.116-119, New York: Wiley, 1945.
- [2] R. Dunne, “Flotation of gold and gold-bearing ores”, in *Advances in Gold Ore Processing*, M.D. Adams, Ed., Netherlands: Elsevier, pp. 315–338, 2016.
- [3] B. Damjonovic, J.R. Goode, “Canadian milling practice”, *CIM Special*, vol. 49, pp. 3-74, 2000.

- [4] A. Winckers, "Overview of recent developments in flotation technology and plant practice for copper ores", *Proceedings of Mineral processing plant design, practice and control, Colorado: The society for mining, metallurgy and exploration*, pp.1124-1140, 2002.
- [5] D.R. Nagaraj, "Developments of new flotation chemicals" *Transaction Indian Institute Metals*, vol. 50(5), pp. 355-363, 1997.
- [6] A.J. Teague, J.S.J. Van Deventer, C.I Swaminathan, "A conceptual model for gold flotation", *Minerals Engineering*, vol. 12, pp. 1000-1019, 1999.
- [7] G.C. Allan, J.T. Woodcock, "A review of flotation of native gold and electrum", *Minerals Engineering*, vol. 14(9), 931-962, 2001.
- [8] S.L. Chrystoulis, S. Dimov, "Speciation of sorbed gold", 36th CMP Proceedings Ottawa: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, pp. 455-472, 2004.
- [9] D.R. Nagaraj, J.S. Brinen, R.S. Farinato, J. Lee, "A study of the interactions of dithiophosphate with noble metals using electrochemical, wetting and spectroscopic methods", *Langmuir*, vol. 8, pp. 1943-1949, 1991.
- [10] Cytec, "Flotation of Sulfide Ores", in *Mining Chemical Handbook*, pp. 145-148, 2010.
- [11] F. Azgomi, C.O. Gomez, J.A. Finch, "Frother persistence: a measure using gas holdup", *Minerals Engineering*, vol. 22 (9-10), pp. 874-878, 2009.
- [12] R.R. Klimpel, "A review of sulphide mineral collector practice Advances in Flotation Technology", B.K. Parekh, J.D. Miller Eds., Littleton: SME, pp. 115-127, 1999.
- [13] L.A. Goold, Private Communication, *Chemical and Mining Services*, Sydney, 1990.
- [14] S.M. Bulatovic, "Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold bearing sulphides", *Minerals Engineering*, vol. 10(9), pp. 895-908, 1997.
- [15] N. Acarkan, G. Bulut, A. Gul, O. Kangal, F. Karakaş, O. Kökkılıç, G. Önal, "The effect of collector's type on gold and silver flotation in a complex ore", *Separation Science and Technology*, vol. 46, pp. 283-289, 2011.
- [16] C.T. O'Connor, R.C. Dunne, "The practice of pyrite flotation in South Africa and Australia", *Minerals Engineering*, vol. 4(7-11), pp. 1057-1069, 1991.
- [17] N.K. Mendiratta, "Kinetic studies of sulfide mineral oxidation and xanthate adsorption", Doctoral thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2000.
- [18] J. Leppinen, "FTIR and flotation investigation of adsorption of diethyldithiophosphate on sulfide minerals", Technical Research Centre of Finland, Report No.726., 1991.
- [19] T. Güler, C. Hiçyılmaz, "Hydrophobicity of chalcopyrite with dithiophosphate and dithiophosphinate in electrochemically controlled condition", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspect*, vol. 235, pp. 11-15, 2004.
- [20] C.I Basilio, D.S., Kim, R.H. Yoon, Studies on the use of monothiophosphates for precious metals flotation, *Minerals Engineering*, vol. 5(3-5), pp. 397-409, 1992a.
- [21] P.A. Mingione, "Use of Aerophine 3418 A promoter for sulfide minerals flotation", Proceedings of 22nd Canadian Mineral Processors Conference Montreal, pp.485-508, 1990.
- [22] C.I. Basilio, D.S. Kim, R.H. Yoon, "Interaction of thiophosphinate collectors with precious metals", SME Annual Meeting, Arizona, The Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, pp.92-174 1992b.
- [23] P. Ofori, G. O'Brien, P. Hapugoda, B. Firth, "Distributed flotation kinetics models – A new implementation approach for coal flotation", *Minerals Engineering*, vol. 66-68, pp. 77-83, 2014.
- [24] A. Gupta, D.S Yan, "Mineral Processing Design and Operations: An Introduction", Netherlands: Elsevier, 2006.
- [25] S.M. Bulatovic, "Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores", Amsterdam: Elsevier, vol. 1, pp. 235–293, 2007.
- [26] X. Bu, G. Xie, Y. Peng, L. Ge, C. Ni, "Kinetics of Flotation. Order of Process, Rate Constant Distribution and Ultimate Recovery", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53(1), pp. 342-365. 2016.
- [27] S. Kelebek, B. Nanthakumar, "Characterization of stockpile oxidation of pentlandite and pyrrhotite through kinetic analysis of their flotation", *International journal of Mineral Processing*, vol. 84, pp. 69-80, 2007.
- [28] K. Jiang, J.E. Dickinson, K.P. Galvin, "The kinetics of Fast Flotation using the Reflux Flotation Cell", *Chemical Engineering Science*, vol. 196, pp. 463-477, 2019.
- [29] H.G. Zuniga, "Flotation recovery is an exponential function of its rate", *Bo In. Soc. Nac. Min. (Santiago)*, vol. 47, pp. 83–86, 1935.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

- [30] J. R. Schuhmann, “Flotation Kinetics I: Methods for steady-state study of flotation problems”, *J. Phys. Chem*, vol. 46 (8), pp. 891-902, 1942.
- [31] X. De-gang, L. Cong, C. Yi-wan, X. Yong-fang, “Non-first-order Kinetics Modelling Method for Stibnite Flotation Process”, IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers Online, vol. 51-21, pp. 317-322, 2018.
- [32] N. Arbiter, “Flotation rates and flotation efficiency”, *Trans. AIME*. pp. 791-796. 1951.
- [33] S.P. Mehrotra, P.C. Kapur, “The effects of aeration rate, particle size and pulp density on the flotation rate distributions”, *Powder Technology*, vol. 9(74), pp. 213–219, 1974.
- [34] A.V. Nguyen, H.J., Schulze, “Colloid Science of Flotation”, Chapter 30, in *Surfactant Series* vol. 118. Marcel Dekker, Inc, New York, 2004.





KURU YÖNTEM KULLANILARAK KALSİTİN STEARİK ASİT İLE YÜZEY MODİFİKASYONU

Serkan ÇAYIRLI^{1,*} , Hasan Serkan GÖKÇEN² , Ece Burçin DAĞCI YILMAZ³ 

^{1,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 26040, Eskişehir Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, kalsitin yüzey modifikasyonu ve mikronize boyuta öğütme işlemi laboratuvar tipi karıştırmalı bilyalı değirmende gerçekleştirilmiştir. Yüzeyi modifiye edilmiş (kaplanmış) kalsitin ürün özellikleri çeşitli test ve analizler ile (tane boyutu, aktive oranı, FTIR, SEM) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kalsitin öğütme+kaplama testlerinde 750 kJ/kg enerji seviyesinde yaklaşık %99 aktive –oranına ulaşılabilmiştir. Bu enerji seviyesi ve aktive oranında d_{50} boyutu 3,67 μm , d_{97} boyutu 11,99 μm olan bir ürün elde edilmiştir. FTIR ölçümleri ile stearik asidin (SA) öğütülmüş+kaplanmış tane yüzeylerine adsorbe olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri ise öğütülmüş+kaplanmış tanelerin yüzey pürüzlülüğü ve aglomerasyonunun SA kullanılarak kontrol edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Yüzey Modifikasyonu, Kalsit, Stearik Asit, Karıştırmalı Bilyalı Değirmen

SURFACE MODIFICATION OF CALCITE WITH STEARIC ACID USING DRY METHOD

ABSTRACT

In this study, both grinding and coating (grinding+surface modification) were carried out for calcite using laboratory scale stirred ball mill. The properties of surface modified (coated) calcite were determined by various tests and analyzes (particle size, activated ratio, FTIR, SEM). According to the obtained results, in the grinding+coating tests of calcite, activation rates of approximately 99% were achieved at 750 kJ/kg energy level. At this energy level and activation ratio, a product with a d_{50} size of 3.67 μm and a d_{97} size of 11.99 μm was obtained. FTIR measurements showed that stearic acid (SA) was adsorbed on ground+coated particle surfaces. SEM images denoted that surface roughness and agglomeration of ground+coated particles could be controlled by using SA.

Keywords: Surface Modification, Calcite, Stearic Acid, Stirred Ball Mill

1. GİRİŞ

Ülkemiz endüstriyel hammaddeler açısından zengin yataklara sahip olup mineral dolgu sektöründe özellikle kalsit en çok kullanılan madenlerdendir. Plastik, boya, kâğıt vb. sanayi dallarında nihai ürünün gerek maliyetini azaltmak gerekse kalitesini iyileştirmek için şekillendirme esnasında ana hammaddeye kalsit ilave edilmektedir. Bahsi geçen endüstrilerde kalsiti dolgu maddesi olarak kullanmak için bazı fiziksel ve fizikokimyasal özellikler gerekmektedir. Bunların başında ise mikronize boyutlara öğütülmesi gelmekte ve söz konusu öğütme prosesleri birinci aşamayı oluşturmaktadır. Endüstriyel ölçekte kalsit mikronize boyutlara kuru olarak (özellikle ülkemizde) konvansiyonel bilyalı değirmenlerle ve/veya karıştırmalı bilyalı değirmenlerle üretilmektedir. Bahsi geçen öğütme süreçlerinde değirmenler kapalı devre olarak seperatör ve filtrelerle çalıştırılmaktadırlar.

İkinci aşamada özellikle plastik sektöründe kalsit bir yüzey modifikasyonu işleminden geçirildikten sonra yüzeyi kaplanmış olarak kullanılmaktadır. Mikronize boyutlara bir öğütme süreci ile indirgenen kalsit ayrı bir sistem ile yüzey modifikasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Bu sistemlerden raymond değirmen prosesinde modifikasyon işlemi mikronize kalsit ve stearik asidin (kuru-granül formda) bir karıştırma işleminden (homojenizasyon-mixerler vasıtasıyla) geçirildikten sonra direk raymond değirmenine beslenmesi suretiyle gerçekleştirilmektedir. Değirmen içerisindeki hareketli çekiçler (yüksek hızda dönen) vasıtasıyla oda içerisine beslenen stearik asit ve kalsit karışımı birbirine çarpıtılmakta ve bunun sonucunda kalsit tanelerinin yüzeyi asit ile kaplanmaktadır. Pimli değirmen prosesinde ise stearik asit ergitme tanklarında ergitilerek pimli değirmene

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: scayirli@ohu.edu.tr

Geliş / Recieved: 26.02.2020 Kabul / Accepted: 01.07.2020 doi: 10.28948/ngumuh.695163

beslenmeden önce mikronize kalsit taneciklerinin üzerine püskürtülmektedir. Pimli değirmen içerisine beslenen söz konusu malzeme yüksek hızlarda birbirine ters yönde dönen pimli iki disk tarafından karıştırmakta ve bu karıştırma sonucunda tanelerin yüzeyi kaplanmaktadır. Isıtmalı-karıştırmalı sistemlerde modifikasyon işlemi mikronize kalsit ve stearik asidin ısı ceketli bir tank içerisinde kesikli bir şekilde karıştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistemin yukarıda bahsi geçenlere göre kapasitesi düşük olup daha az tercih edilmektedirler [1].

Endüstriyel prosesler dışında kaplama işlemi mekanokimyasal yüzey modifikasyon prosesine dayalı olarak pilot ve laboratuvar ölçekli mekanik öğütme yapan değirmenlerde (titreşimli değirmen, karıştırmalı bilyalı değirmen, yörüngesel değirmen, jet değirmen) yapılmakta ve başarılı uygulama alanı bulmuştur [2-8]. Bu değirmenlere kalsit (öğütülmüş veya öğütülmemiş) ve stearik asit birlikte (granül formda) beslenmekte olup işlem kuru veya yaş şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Mekanik olarak gerçekleştirilen yüzey modifikasyonu, ince öğütme sırasında mekanik-kimyasal etkiler sonucu gerçekleşen geleneksel yöntemler kadar iyi sonuçlar verebilen bir modifikasyon yöntemidir.

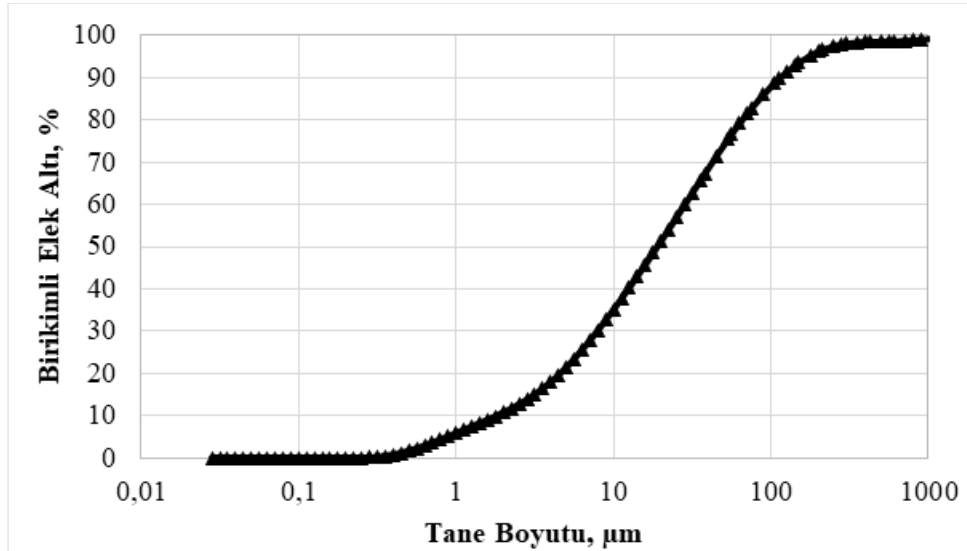
Bununla birlikte, geleneksel tekniklerin yüzey modifikasyonunda avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Öğütme ve kaplama sürecinin iki ayrı proste sağlanmasının bazı zorlukları ve maliyeti olmaktadır. Mekanokimyasal yüzey modifikasyon prosesinde, kalsitin sadece yüzey modifikasyonu yapılabildiği gibi öğütme+yüzey modifikasyonu da gerçekleştirilebilmektedir. Başka bir deyişle, geleneksel yöntemlere alternatif olarak yüksek kaliteli mikronize kaplanmış kalsit üretmek için yaygın olarak kullanılan yüzey modifikasyonu ve mikronize öğütme tekniğini bir ekipmanda birleştirilmektedir [2, 3].

Bu çalışmada laboratuvar ortamında karıştırmalı bilyalı değirmen kullanılarak tek bir ünite hem öğütme hem kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğütme+kaplama deneyleri stres yoğunluğu analizi çerçevesinde yürütülmüştür. Laboratuvar ortamında kesikli şartlarda gerçekleştirilen öğütme+kaplama işlemleri sonrasında elde edilen kaplanmış ürünlerin özellikleri tane boyutu, aktive oranı, SEM (Scanning electron microscope) ve FTIR (Fourier Transform Infrared Spektrofotometre) analizleri ile desteklenerek incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Deneylerde kullanılan kalsit numunesi (~25 kg) Niğde ilinde faaliyet gösteren Nidaş Madencilik A.Ş.'den temin edilmiştir. Firmadan temin edilen örnekler Niğde Ömer Halisdemir Üni. Maden Müh. Böl. Cevher Haz. Lab'da bulunan numune bölücü yardımıyla bölünerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Kalsit numunesinin gerçek yoğunluğu piknometre ile yapılan analiz sonucunda 2,70 g/cm³ bulunmuştur. Besleme boyutu analizleri Malvern Mastersizer 2000 (UK) model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiş olup Şekil 1'de gösterilmektedir.



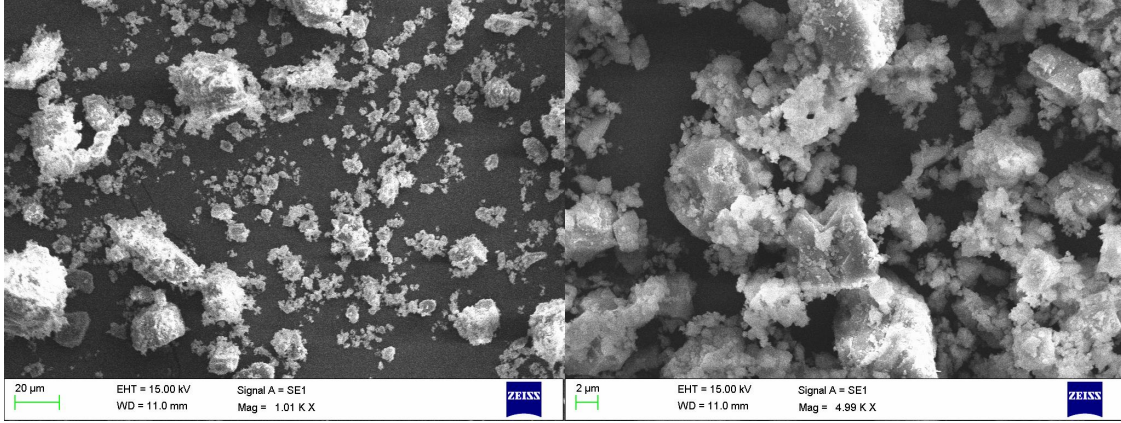
Şekil 1. Kalsit örneğinin (besleme) boyut dağılım sonuçları

Kalsit örneğinin kimyasal analizi (XRF) Tablo 1'de ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan görüntü analizi ise Şekil 2'de gösterilmektedir. Kimyasal analizi incelendiğinde kalsit örneğinde yüksek miktarda CaCO₃ bulunduğu görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde kalsit numunesinin küresel yapıya ve geniş boyut dağılımına sahip olduğu gözlenmektedir.

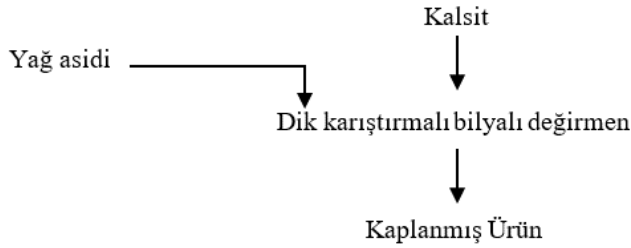
KURU YÖNTEM KULLANILARAK KALSİTİN STEARİK ASİT İLE YÜZEY MODİFİKASYONU

Tablo 1. Kalsit örneğinin kimyasal analizi

	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	K ₂ O	SO ₃	K.K
%	58,823	0,404	0,225	0,100	0,048	0,018	0,014	0,008	0,005	39,400

**Şekil 2.** Kalsit örneğinin (besleme) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri**2.2. Metot**

Bu çalışma kapsamında kalsitin karıştırmalı bilyalı değirmende bir yağ asidiyle mikronize öğütme ve yüzey modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiş, ürünlerin yüzey özellikleri araştırılmıştır. Hazırlanan numuneler ilk aşamada dik karıştırmalı bilyalı değirmende çok ince boyutlara öğütme ve yağ asidi kullanılarak yüzey modifikasyonu işlemine tabi tutulmuş olup bu işlem tek bir prosesle kuru olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Öğütme+kaplama deneylerinde yağ asidi olarak ticari katı formda stearik asit ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) kullanılmış olup, asit özelliği olarak C1865 (18 çeşit asit bulunan %65'i stearik asit) tipindedir.

**Şekil 3.** Öğütme+kaplama deneylerinin genel bir akım şeması

Öğütme+kaplama deneylerinin gerçekleştirildiği karıştırmalı bilyalı değirmen Şekil 4'te gösterilmekte olup teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Enerji ölçümleri değirmen kontrol panosu üzerine bütünleşmiş Yaskawa-V1000 marka sürücü vasıtasıyla yapılmıştır.



Şekil 4. Karıştırmalı bilyalı değirmen

Tablo 2. Karıştırmalı bilyalı değirmenin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Motor gücü	3 kW
Motor devri (max.)	3000 d/d
Tank Hacmi (Şaft hariç)	1350 cm ³
Tank Hacmi (Şaft dâhil)	1200 cm ³
Şaft Tipi	Pin
Şaft (pin) çapı	8,5 cm
Pin sayısı	5

Öğütme deneyleri kesikli şekilde yürütülmüştür. Deney başlangıcında numune ve 3 veya 4 mm 'lik bilyalar tartılmıştır. Tartıldıktan sonra tankın içine önce bilyalar ikinci olarak numune konulmuştur. Daha sonra stearik asit eklenmiştir. Karıştırmalı bilyalı değirmenin hızı ~100 dev/dk'ya ayarlanarak şaft aşağıya indirilmiştir. Kapağı kapatılan değirmen tüm ayarları yapıldıktan sonra istenilen devir ayarlanarak öğütme işlemine başlanmıştır. Öğütme deneyleri kapsamında karıştırma hızı ve bilya boyutuna bağlı olarak stres yoğunlukları değiştirilip üç farklı enerji seviyesinde testler gerçekleştirilmiştir. Deney koşulları Tablo 3'te verilmiştir. Deney sonunda malzeme ve bilyalar öğütme haznesinden çıkartılarak birbirlerinden ayrımı eleme işlemi ile yapılmıştır. Elde edilen ürünlerden aktive oranı deneyi ve boyut analizleri için örnek bölme yöntemlerine uygun olarak temsili numuneler alınmıştır.

Tablo 3. Farklı stres yoğunluklarında yapılan deneylerin çalışma şartları

Enerji seviyesi (kJ/kg)	Hız (m/s)	Öğütme süresi (dk.)		Bilya yükü (J)	Boşluk doldurma oranı (U)	Stearik asit miktarı (%)
		3 mm bilya	4 mm bilya			
375	1		50,42	0,60	0,80	1
	2		22,25			
	4	9,41	7,33			
	8	1,58	1,08			
	10					
750	1	101,75	100,75	0,60	0,80	0,6/0,8/1,0/1,2/1,4
	2	46,33	44,52			
	4	18,83	13,50			
	8	3,15	2,16			
	10	2,11	1,58			
1500	1		284,81	0,60	0,80	1
	2		126,58			
	4	51,91	47,23			
	8	9,85	8,05			
	10	5,08				

KURU YÖNTEM KULLANILARAK KALSİTİN STEARİK ASİT İLE YÜZEY MODİFİKASYONU

Öğütme+kaplama deney şartlarının belirlenmesinde kullanılan bilya doluluk oranı, malzeme yükü ve boşluk doldurma oranı parametreleri Eşitlik (1), (2) ve (3) yardımıyla hesaplanmıştır [9].

$$f_c = \frac{\text{Malzeme Miktarı/Malzeme yoğunluğu}}{\text{Değirmen hacmi}} \times \frac{1,0}{0,6} \quad (1)$$

$$J = \frac{\text{Bilya Miktarı/Bilya yoğunluğu}}{\text{Değirmen hacmi}} \times \frac{1,0}{0,6} \quad (2)$$

$$U = \frac{f_c}{0,4 \times J} \quad (3)$$

J: Bilya doluluk oranı (bilya yükü)

f_c: Malzeme yükü

U: Boşluk doldurma oranı

Öğütme+kaplama deneyleri stres yoğunluğu analizi çerçevesinde yürütülmüş olup stres yoğunluğu-aktifte oranı ilişkisi ve stress yoğunluğu-boyut arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için farklı stres yoğunlukları farklı enerji seviyelerinde (375, 750, 1500 kJ/kg) oluşturularak testler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 5 farklı hız (1-2-4-8-10 m/s) ve 2 farklı alümina (aynı yoğunluğa sahip-3,6 g/cm³) bilya boyutu (3 ve 4 mm) kullanılmıştır. Kullanılan stres yoğunlukları Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada; “v_{tip}” karıştırıcı hızı, “d_{GM}” kullanılan öğütücü ortamın boyutu ve “ρ_{GM}” öğütücü ortamın yoğunluğudur [10].

$$SI_{\infty} SI_{GM} = v_{tip}^2 \times d_{GM}^3 \times \rho_{GM} \quad (4)$$

Öğütülmüş ve/veya kaplanmış kalsit ürünlerinin aktive oranı deneyi temsili numunelerden yaklaşık 5 gr tartılarak bir beher içerisine konulup 250-300 cc su eklenerek mekanik bir karıştırıcı vasıtasıyla yüksek hızda 15 sn karıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Aktive oranı karıştırma sonrasında suyun içerisinde yüzen ve batan kalsitin ağırlığı esas alınarak Eşitlik (5) yardımıyla hesaplanmıştır [11,12]. Belirtilen eşitlikteki kullanılan “M_p” su içerisindeki yüzen ürün miktarı (g), “M_t” batan ürün miktarını (g) göstermektedir.

$$AO(\%) = (M_p/M_p + M_t) * 100 \quad (5)$$

Öğütülmüş ve/veya kaplanmış kalsit ürünlerinin boyut analizleri ise Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Müh. Böl. Cevher Haz. Lab.’da bulunan Malvern Mastersizer 2000 model cihaz kullanılarak yaş yöntem ile ultrasonik dağıtıcı kullanılarak yapılmıştır. Ürünlerin boyut ölçümleri cihaz tarafından belli aralıklarda tekrarlanmış (üç kere) ve bu ölçümlerin ortalaması kaydedilmiştir.

Kalsitin öğütme ve yüzey modifikasyonu sonrası işlemlerinde SA’nın tane yüzeylerin de adsorpsiyonlarını belirleyebilmek için FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analizler FTIR (Perkin Elmer 2000) model cihaz kullanılarak, aktive oranı en iyi olan kalsit numunelerinin, kaplanmamış olanların ve kullanılan kimyasalın analizleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler doğrudan ATR (Attenuated Total Reflectance) ataçmanı kullanılarak analiz edilmiştir.

Öğütme+kaplama işlemi sonucunda elde edilen tane özelliklerini incelemek, kaplanmamış ve kaplanmış numuneler aralarındaki farkları tespit edebilmek için SEM analizi yapılmıştır. Niğde Ömer Halis Demir Üni. Merkezi Araştırma Lab.’da bulunan SEM (Zeiss Evo 40) model cihaz kullanılarak aktive oranı en iyi olan kalsit numunelerinin ve kaplanmamış olanların analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizden önce toz numuneler Au-Pd kaplanarak analize hazır hale getirilmiştir.

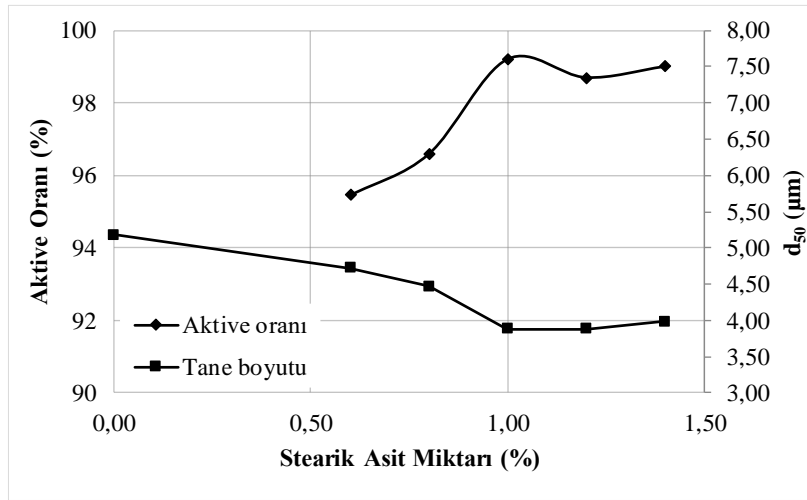
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Stres Yoğunluğunun Kalsitin Aktive Oranına Etkisi

Stres yoğunluğu yaklaşımında, yeterli boyut küçültmenin olabilmesi için iki önemli şartın gerçekleşmesi gerekmektedir. Bunlardan biri değirmen içinde birim zamanda meydana gelen tane ile öğütücü ortam arasında oluşan “çarpması sayısı” (stres sayısı, SN)’dir. Diğer durum ise stres yoğunluğu “SI” olarak adlandırılan her çarpışmada açığa çıkan enerji miktarıdır.

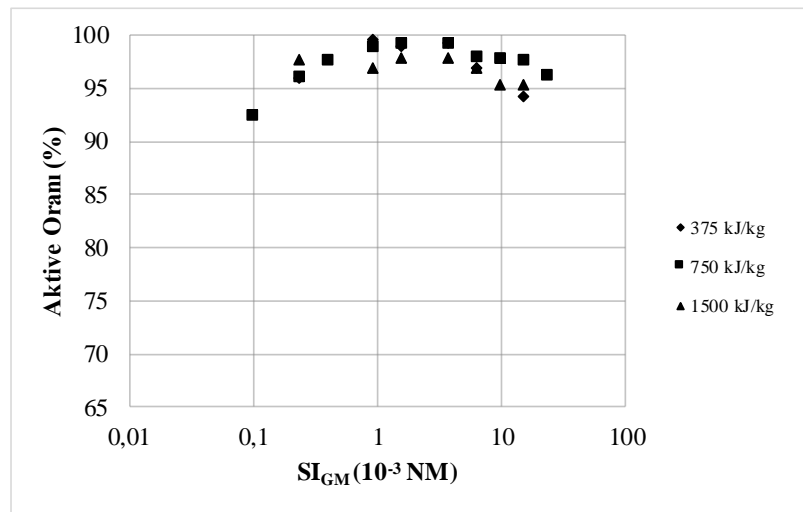
Değirmene beslenen malzemenin (tanelerin) kırılabilmesi (öğütülebilmesi) için tanenin iki bilya veya bilya ile değirmen çeperi arasında yakalanması ve bu çarpışmaların neden olduğu enerji yoğunluğunun taneleri kıracak kadar yüksek olması gerekmektedir [13,14]. Bu düşünceden yola çıkılarak farklı stres yoğunluklarında malzemenin kaplanması üzerine olan davranışı bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

Bu çalışmada öğütme+kaplama deneyleri sabit asit miktarında gerçekleştirilmiştir. Asit miktarını belirlemek üzere sabit enerji ve stres yoğunluğunda deneyler yapılarak aktive oranı ve tane boyutu değişiminin asit miktarı ile ilişkisi incelenmiştir (Şekil 5). Şekil 5 incelendiğinde asit miktarı arttıkça aktive oranının yükseldiği ve ürün d_{50} boyutunun incelendiği gözükmektedir. Öğütme sırasında kaplama işlemi için kullanılan SA'nın öğütme yardımcısı gibi davranarak öğütme performansını da etkilediği gözükmektedir. En yüksek aktive oranına %1 stearik asit miktarında ulaşıldığı için stres yoğunluğu deneylerine %1 asit miktarında devam edilmiştir. Ayrıca endüstride de maliyet açısından da genel olarak %1 asit miktarında çalışılmaktadır.



Şekil 5. Stearik asit miktarı ile aktive oranı ve d_{50} boyutu ilişkisi (750 kJ/kg- $3,63 \cdot 10^{-3}$ NM)

Stres yoğunluğunun kalsitin aktive oranına etkisini incelemek amacıyla farklı stres ortamı (stres yoğunlukları) oluşturularak üç farklı enerji seviyesinde deneyler yapılmıştır. Stres yoğunluğu deneylerinden elde edilen ürünler ise aktive oranı testine tabi tutulmuş, sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde 750 kJ/kg ve 375 kJ/kg enerji seviyelerinin de aktive oranlarının yüksek olduğu gözlenmektedir. Enerji seviyesi arttığında ise aktive oranların da düşüşler oluşmuştur. 1500 kJ/kg enerji seviyesindeki bu düşüşün tane boyutunun incelenmesiyle kullanılan stearik asit miktarının yeterli olmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üç enerji seviyesinde de belirli bir noktaya kadar aktive oranlarının arttığı ve daha sonra düşüşlerin gerçekleştiği gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak da düşük ve yüksek stres yoğunluklarında tane boyutunun irileştiği ve topaklanmaların arttığı düşünülmektedir.



Şekil 6. Farklı enerji seviyelerinde stres yoğunluğu aktive oranı ilişkisi

KURU YÖNTEM KULLANILARAK KALSİTİN STEARİK ASİT İLE YÜZEY MODİFİKASYONU

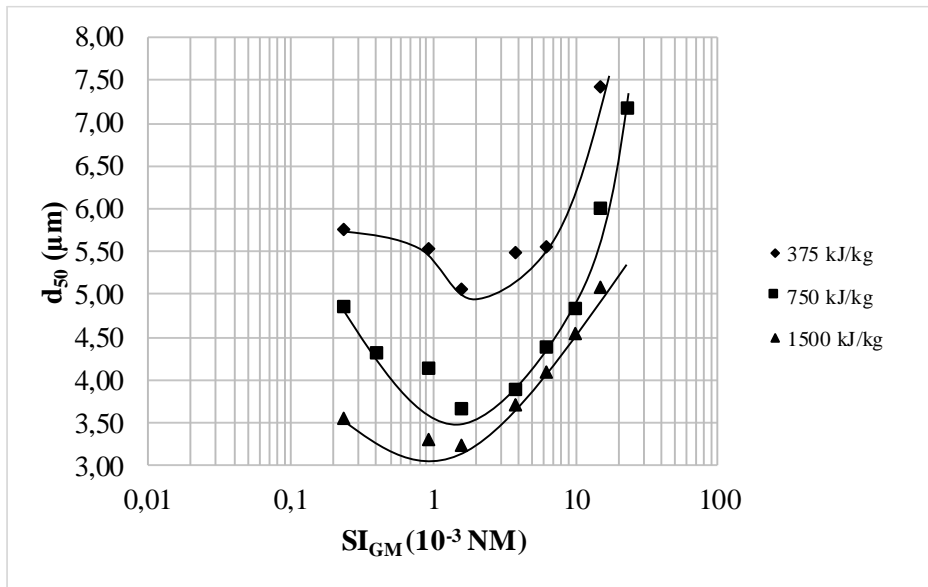
3.2. Stres Yoğunluğunun Kalsitin Tane Boyutuna Etkisi

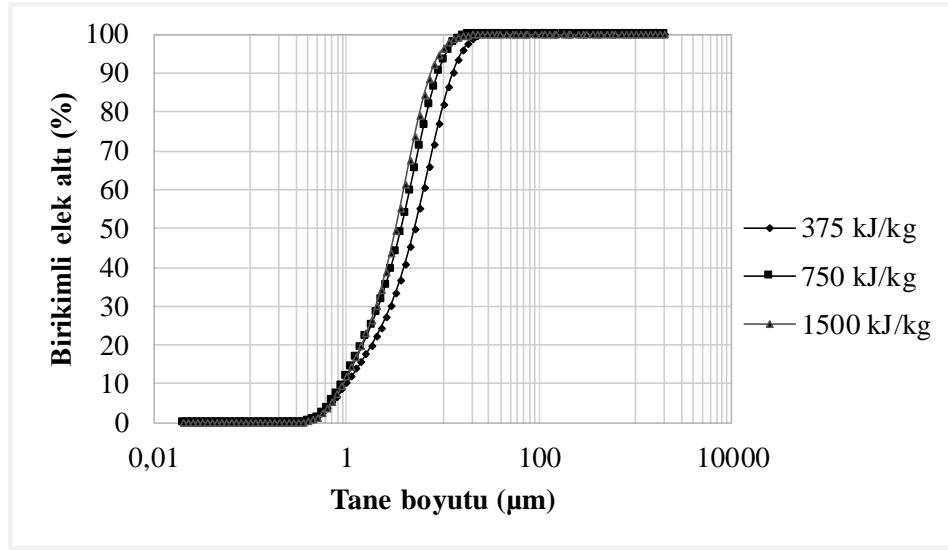
Geleneksel bilyalı değirmenlerde yapılan öğütme işlemlerinde öğütmeyi etkileyen faktörlerden biri de değirmenin dönüş hızıdır. Bilyaların değirmenin dönmesi ile kazandığı kinetik enerji öğütülecek malzemeye çarpma, ezme, sürtünme ve kesme kuvveti olarak aktarılır.

Geleneksel bilyalı değirmenin verimliliğini öğütme ortamının çarpışma hızı belirler. Öğütmenin çok yavaş bir dönüş hızı ile yapılması, bilyaların kabın yüzeyinde yuvarlanmasına (çarpışmanın olmamasına); çok yüksek bir dönüş hızı ise merkezkaç kuvvetinin etkisiyle bilyaların kap yüzeyinde düşmeden durmalarına sebep olur. Geleneksel bilyalı değirmenler ince malzemelerin öğütülmesinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, düşük hızlarda çalıştırıldıklarından öğütme süresi uzundur. Bu süreyi kısaltmak için titreşimli değirmenler ve atritörler (karıştırmalı bilyalı değirmenler) geliştirilmiştir. Atritörler diğer öğütücülere göre daha kısa zamanda öğütme özelliğine sahip, yüksek enerjili ve verimli öğütücülerdir. Geleneksel bilyalı değirmenlerde optimum bir dönme hızı söz konusu iken, atritörlerde karıştırıcı kolların hızı ne kadar yüksek ise öğütme verimliliği de o kadar yüksek olmaktadır [15]. Karıştırma hızı arttıkça yüksek enerji yoğunluklu bir ortam oluşmakta, öğütücü ortam ile tane çarpışma olasılığı artmaktadır [16].

Stres yoğunluğu yaklaşımında ise iki ana değişken olan özgül enerji ve stres yoğunluğu öğütme performansını belirlemektedir. Düşük yoğunluklarında taneleri kırmak için gereken stres yeterli olmadığı için stres sayısı veya enerji seviyesinin artırılması gerekmektedir. Stres yoğunluğunun çok daha fazla artırılması durumunda ise ürün inceliği azalmaktadır. Stres yoğunluğunun optimum değerinde olması maksimum ürün inceliğinin elde edilmesi ile sonuçlanmaktadır [13].

Tablo 3'te verilen öğütme+kaplama çalışma şartları altında yapılan deneylerin stres yoğunluğu kalsit tane boyutu ilişkisi Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde stres yoğunluğu arttıkça tane boyutunun belirli bir değer aralığına kadar düştüğü ve sonra tekrar artışa geçtiği tüm enerji seviyeleri için görülmektedir. Bu değerler arasında stres yoğunluğu optimum değerindedir. Bu aralık tüm enerji seviyelerinde $1-3 \cdot 10^{-3}$ Nm olarak belirlenmiştir. Söz konusu üç enerji seviyesi için tespit edilen optimum aralıktaki (stres yoğunluğu: $1,55 \cdot 10^{-3}$ Nm) deneylerin boyut dağılımları Şekil 8'de verilmiştir. Üç enerji seviyesi için yüksek stres yoğunluklarında tane boyutundaki artış da gözlenmektedir. Bu artış 1500 kJ/kg enerji seviyesinde oldukça yüksek seyretmiştir. Deneysel gözlemler sonucunda ısı artışından kaynaklı olarak 1500 kJ/kg enerji seviyesinde özellikle yüksek stres yoğunluklarında değirmen içi topaklanmaların ve birikmelerin (powder caking) fazla olduğu tespit edilmiştir. Kwade [10] bu durumu karıştırmalı bilyalı değirmende yapılan öğütme işlemi için şu şekilde açıklamıştır: karıştırıcı tarafından bilyalar ve süspansiyon yoğun bir şekilde hareket ettirilmektedir. Karıştırıcı tarafından tüketilen enerji, karıştırıcıdan süspansiyona ve bilyalara aktarılmaktadır. Ancak karıştırıcı tarafından tüketilen bu enerjinin sadece bir kısmı bilyalara kinetik enerji olarak aktarılır. Sonuç olarak, söz konusu enerjinin büyük bir kısmının süspansiyona veya sürtünme işlemiyle ısıya yayıldığı vurgulanmıştır. 375 kJ/kg enerji seviyesinde ise tane boyutunun diğer enerjilere göre daha iri kaldığı görülmüştür. Kalsitin stearik asit kullanılarak karıştırmalı bilyalı değirmende öğütülüp kaplanmasından elde edilen sonuçlar (stres yoğunluğu-tane boyutu) stres yoğunluğu yaklaşımı ile uyum içerisindedir. Ayrıca Cayirli and Gokcen [17], Cayirli et al. [18] kalsitin mikronize boyutlara öğütülmesi ile ilgili yaptıkları çalışmalarda da benzer sonuçlar gözlenmiştir. Buna ek olarak Racz and Csöke [19] çimentonun karıştırmalı bilyalı değirmen de kuru öğütülmesinde benzer sonuçları elde etmiştir.

Şekil 7. Stres yoğunluğu d₅₀ boyutu ilişkisi



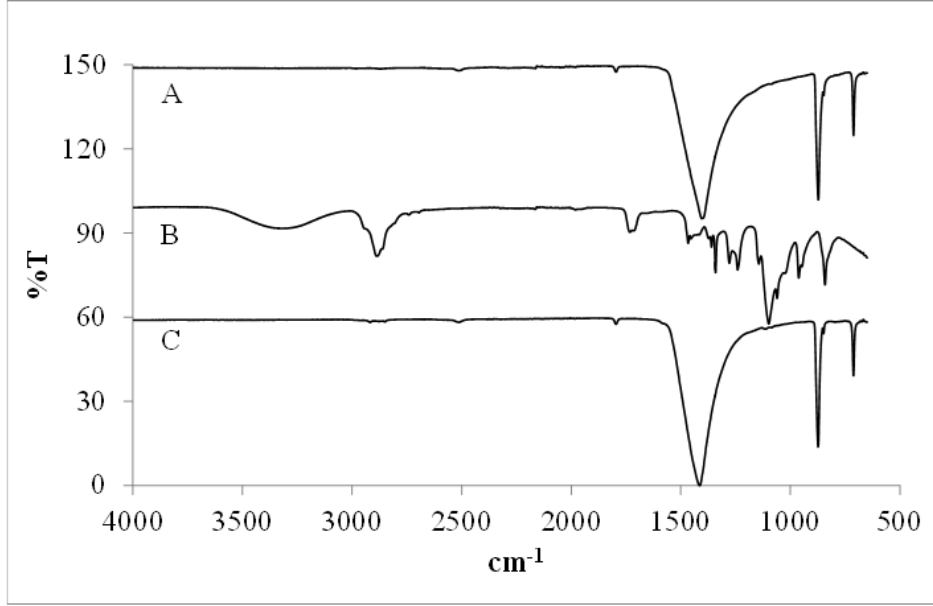
Şekil 8. Farklı enerji seviyelerinde ki ürünlerin tane boyut dağılımları (stres yoğunluğu: $1,55 \cdot 10^{-3}$ Nm)

Şekil 6 ile Şekil 7 birlikte incelendiğinde kalsit için ince boyutlara inildikçe aktive oranının daha verimli olduğu fakat daha ileri seviye öğütme+kaplama işleminde (1500 kJ/kg) verimli olmadığı, aktive oranında düşüşler yaşandığı gözlenmiştir. Daha ince boyutlar da daha fazla yüzey alanı elde edildiği için stearik asit miktarının artırılmasıyla daha verimli kaplamaların elde edilebileceği düşünülmektedir. Yapılan kalsit öğütme+kaplama testlerinde 750 kJ/kg enerji seviyesinde %99 aktive oranlarına ulaşılabilmektedir. Bu enerji seviyesi ve aktive oranında d_{50} boyutu 3,67 μm , d_{97} boyutu 11,99 μm (stres yoğunluğu: $1,55 \cdot 10^{-3}$ Nm) olan bir ürün elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde tane boyutu açısından belirlenen optimum stres yoğunluğunda maksimum aktive oranının elde edildiği gözlemlenmiştir.

3.3. Öğütülmüş ve Kaplanmış Kalsitin FTIR Analizi

Kalsitin öğütme ve yüzey modifikasyonu sonrası işlemlerinde SA'nın tane yüzeyine adsorpsiyonunu belirleyebilmek için FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'de kalsitin SA ile öğütme+kaplama öncesi ve sonrası FTIR analizi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kalsitin (A) karakteristik pikleri yaklaşık 1395, 874 ve 711 cm^{-1} dalga sayılarında gözlenmektedir [5]. SA ile öğütülmüş+kaplanmış kalsit FTIR spektrumu (C) incelendiğinde SA varlığında 2933 ve 2844 cm^{-1} dalga boylarında zayıf iki pik gözükmemekte olup, bu piklerin $-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ titreşimlerinin olması muhtemeldir. Mihajlović et al. [4] kalsitin SA ile yüzey modifikasyonu çalışmasında yüzey özellikleri FTIR analizi ile belirlenmiş olup bu çalışmaya benzer şekilde (2950 ve 2850 cm^{-1}) asimetric ve simetric gerilme titreşimlerinin ($\text{C}-\text{CH}_2$) gözlemlendiğini bildirmiştir. Bir diğer çalışmada Jeon et al. [20] kalsitin yüzey modifikasyonu işlemini SA ile iki farklı (2-propanol ve kloroform) çözücü yardımıyla gerçekleştirmişlerdir. Yapılan FTIR analizlerine göre $-\text{CH}_2$ and $-\text{CH}_3$ absorpsiyon pikleri 2-propanol çözücü ortamında zayıf, kloroform çözücü ortamında ise daha güçlü (belirgin) olarak tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada ise kalsitin yüzey modifikasyon işlemi sodyum stearatla gerçekleştirilmiş, yüzey özellikleri FTIR analizleri ile incelenmiştir. Modifiye kalsitin FTIR spektrumu modifikasyon öncesi ile benzer şekilde elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak kimyasal bağ yapısının modifikasyon öncesi ve sonrasında çok fazla değişikliğe uğramaması (hidroksil bağının karakteristik bandının modifikasyon sonrası aynı yoğunlukta olması) olarak açıklanmıştır [5].

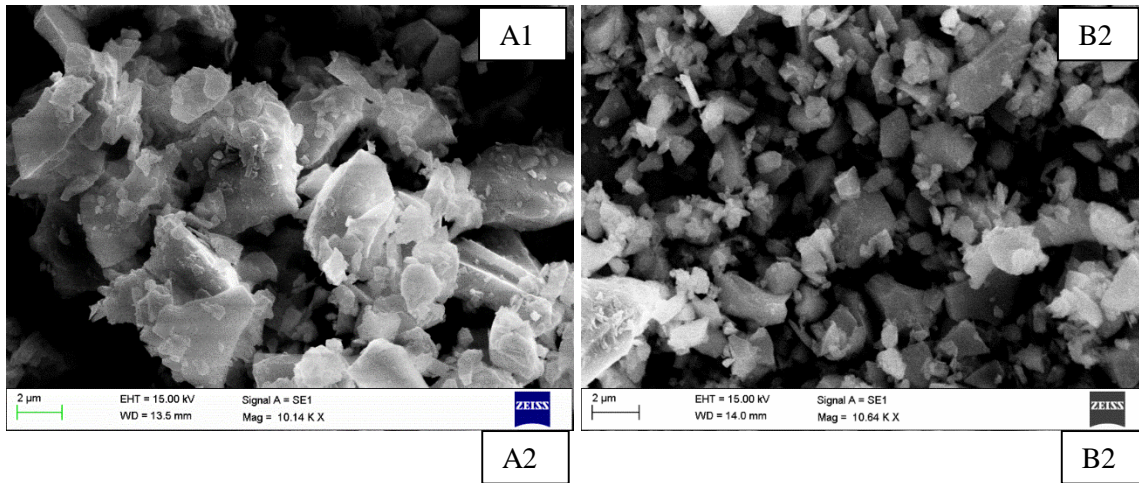
KURU YÖNTEM KULLANILARAK KALSİTİN STEARİK ASİT İLE YÜZEY MODİFİKASYONU

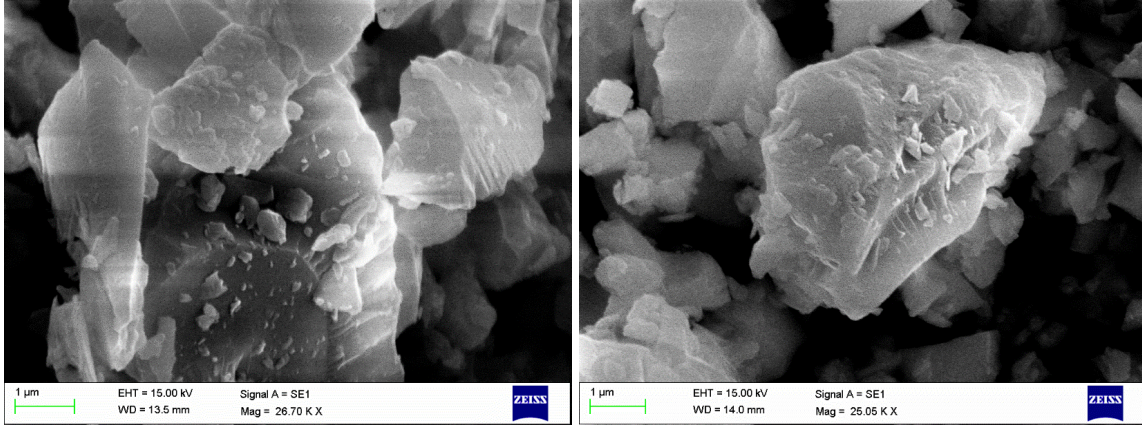


Şekil 9. Kalsitin SA ile öğütme+kaplama öncesi ve sonrası FTIR analizi (A: Kalsit, B: SA, C: Öğütme+kaplama { %1 SA })

3.4. Öğütülmüş ve Kaplanmış Kalsitin SEM Analizi

Kalsitin öğütme ve yüzey modifikasyonu sonrası işlemlerinde SA'nın taneler arası etkileşimlere, tane boyutuna ve tane şekline etkilerini inceleyebilmek için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 10' da kalsitin öğütme+kaplama sonrası SEM analizi görüntüleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde SA kullanımı katkısız olarak yapılan öğütme işlemi ile karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğünü ve aglomerasyonu azalttığı gözlenmiştir. Wu and Lu [2] kuru proses kullanarak yaptıkları kalsit yüzey modifikasyonu işleminde (karıştırmalı bilyalı değirmen kullanarak) modifikasyon sonrasında pürüzsüz ve üniform yüzeylerin elde edildiğini SEM görüntüleri ile tespit etmişlerdir. Bu çalışmaya benzer şekilde elde edilen bulgular mekano-kimyasal etkiye dayandırılmıştır. Jeong et al. [21] kuru pin değirmen kaplama prosesinde modifikasyon öncesi ve sonrası farklılıkları SEM görüntüleri ile göstermişlerdir. Bir diğer çalışmada Sayan [22] kalsiyum karbonat yüzeylerini Na-Oleat ile yaş proses uygulayarak modifiye etmiştir. Modifikasyon sonrası SEM görüntüleri Na-Oleat konsantrasyonunun artmasıyla birlikte, CaCO₃ kristallerinin yüzeyinin önce pürüzsüzlüğünü kaybetmeye başladığını, daha sonra bazı pürüzlü yapıların ortaya çıktığını ve son olarak da yüzeyin küçük Ca-Oleat çekirdekleriyle kaplanmış olduğunu göstermiştir.





Şekil 10. Kalsitin öğütme+kaplama sonrası SEM analizi (A: %1 SA, B: Katkısız)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında karıştırmalı bilyalı değirmen kullanılarak tek bir ünite de hem öğütme hem kaplama işlemi kalsit minerali için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar stres yoğunluğu analizi kapsamında değerlendirilmiştir.

► Kalsit öğütme+kaplama deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde enerji seviyesi arttığında aktive oranların da belirgin bir artış oluşmuştur. 750 kJ/kg enerji seviyesinde en iyi sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir. Stres yoğunluğunun d_{50} boyutu üzerine etkisi incelendiğinde, optimum stres yoğunluğu aralığı tüm enerji seviyeleri için $1-3 \cdot 10^{-3}$ Nm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde tane boyutu açısından belirlenen optimum stres yoğunluğunda maksimum aktive oranının elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan kalsit öğütme+kaplama testlerinde 750 kJ/kg enerji seviyesinde yaklaşık %99 aktive oranlarına ulaşılabilmektedir. Bu enerji seviyesi ve aktive oranında d_{50} boyutu 3,67 µm, d_{97} boyutu 11,99 µm olan ürün elde edilmiştir.

► Kalsit numunesinin öğütme+kaplama testleri üzerinde stres yoğunluğu- d_{50} boyutu ilişkisi (optimum aralıklar belirlenerek) incelenerek mevcut deney şartlarında öğütme performansları da ortaya konmuştur. Ayrıca ileriki çalışmalarda yüzey alanları da incelenerek stearik asit miktarı ile yüzey alanı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılacaktır.

► FTIR analizleri sonucunda SA kullanımında $\sim 2900-2800$ cm^{-1} dalga sayılarında zayıf iki pikin varlığı tespit edilmiştir.

► SEM analizleri sonucunda SA kullanımında katkısız yapılan deneye kıyasla kalsitin yüzey pürüzlülüğü ve aglomerasyonun azaldığı tespit edilmiş olup yüzeyler üzerinde mekano-kimyasal etkinin meydana gelmesi olasıdır.

► Sonuç olarak kalsit minerallerinin kuru karıştırmalı bilyalı değirmende mikronize öğütülmesi yanında stearik asit ile başarıyla kaplanabildiği anlaşılmakta olup deneysel veriler stres yoğunluğu analizi, aktive oranı, enerji tüketimi, FTIR ve SEM analizi açısından yorumlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmayı FEB 2019/02/BAGEP no'lu proje kapsamında maddi olarak destekleyen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve deneysel çalışmalarda kullanılan malzemenin temini için Nidaş Madencilik A.Ş'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- [1] S. Çayırılı, "Kalsitin yüzey modifikasyonu: Bölüm I. üretim teknolojisi ve kullanılan donanımlar", *Bilimsel Madencilik Dergisi*, vol. 59, no. 1, pp. 51-64, 2020.
- [2] W. Wu, and S. C. Lu, "Mechano-chemical surface modification of calcium carbonate particles by polymer grafting", *Powder Technol.*, vol. 137, pp. 41-48, 2003.
- [3] H. Ding, S. Lu, Y. Deng, and G. Du, "Mechano activated surface modification of calcium carbonate in wet stirred mill and its properties", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 17, pp. 1100-1104, 2007.

KURU YÖNTEM KULLANILARAK KALSİTİN STEARİK ASİT İLE YÜZEY MODİFİKASYONU

- [4] S. Mihajlovic, Z. Sekulić, A. Daković, D. Vučinić, V. Jovanović, and J. Stojanović, "Surface properties of natural calcite filler treated with stearic acid", *Ceramics-silikaty*, vol. 53, no. 4, pp. 268-275, 2009.
- [5] E. Yoğurtcuoğlu, "Karıştırmalı bilyeli değirmende kalsitin yüzey modifikasyonu ve ürün özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2010.
- [6] H. Ding, H. Zhou, Y. X. Zheng, and M. M. Wang, "Effect of sodium stearate on grinding behaviour of calcium carbonate in wet stirred mill", *Materials Research Innovations*, vol. 17, pp. 292-296, 2013.
- [7] K. A. Selim, F. H. Abd El-Rahiem, and N. A. Abdel-Khalek, "Surface modification of egyptian calcium carbonate with stearic acid", *Journal of Ore*, vol. 15, no. 30, pp. 31-36, 2013.
- [8] S. K. H. Deepika, and Y. Chen, "Optimization of milling parameters on the synthesis of stearic acid coated CaCO_3 nanoparticles", *J. Coat. Technol. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 273-282, 2014.
- [9] L.G. Austin, R. R. Klimpel, and P.T. Luckie, "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", SME, New York, 1984.
- [10] A. Kwade, "Basic Course Grinding and Dispersing with Stirred Media Mills", Technische Universität Braunschweig, Germany, 2013.
- [11] Y. Sheng, J. Zhou, N. Tao, K. Yu, Y. Tian, and Z., Wang, "Influence of octadecyl dihydrogen phosphate on the formation of active super-fine calcium carbonate", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 272, pp. 326-329, 2004.
- [12] M. Uçurum, "Kaplı kalsit üretimi ve ürün özellikleri", *Yer Altı Kaynaklar Dergisi*, vol. 6, pp. 1-10, 2014.
- [13] A. Kwade, L. Blecher, And J. Schwedes, "Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. part 2: stress intensity and its effect on comminution", *Powder Technology*, vol. 86, no. 1, pp. 69-76, 1996.
- [14] S. Dikmen, ve Ş. L. Ergün, "Karıştırmalı bilyalı değirmenler", *Madencilik*, vol. 43, no. 4, pp. 3-15, 2004.
- [15] Y. Kılınç ve İ. Uslan, "Titreşimli yatay atritör imalatı ve alumina öğütme davranışının incelenmesi", *Mühendis ve Makina*, vol. 44, no. 517, pp. 25-32, 2003.
- [16] O. Altun, H. Benzer, and U. Enderle, "Effects of operating parameters on the efficiency of dry stirred milling", *Minerals Engineering*, vol. 43-44, pp. 58-66, 2013.
- [17] S. Cayirli, and H. S. Gokcen, "The effect of stirred mill orientation on calcite grinding", 15th European Symposium on Comminution Classification, 2017.
- [18] S. Cayirli, and H. S. Gokcen, and N. Yüce, "The effect of stirrer design in different stirred mill orientations", IMCET (Türkiye 26. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi), 2019, pp. 1017-1024.
- [19] A. Racz, and B. Csöke, "Application of the product related stress model for product dispersity control in dry stirred media milling", *Int. J. Mineral Process.*, vol. 157, pp. 28-35, 2016.
- [20] C. W. Jeon, S. Park, J. BAng, S. Chae, K. Song, and S. Lee, "Nonpolar surface modification using fatty acids and its effect on calcite from mineral carbonation of desulfurized gypsum", *Coatings*, vol. 8, no. 43, pp. 2-13, 2018.
- [21] S. Jeong, Y. Yang, Y. Chae, and B. Kim, "Characteristics of the treated ground calcium carbonate powder with stearic acid using the dry process coating system", *Materials Transactions*, vol. 50, no. 2, pp. 409-414, 2009.
- [22] P. Sayan, "Effect of sodium oleate on the agglomeration of calcium carbonate", *Cryst. Res. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 226 - 232, 2005.





İKİ BOYUTLU FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN YAPAY SİNİR AĞI ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE ISIL GERİLME MODELLEMESİ

Munise Didem DEMİRBAŞ^{1,*} , Didem ÇAKIR² 

¹Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Belirli bir hacimsel dağılım fonksiyonuna göre oluşturulan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FKM) günümüz yüksek sıcaklık uygulamalarına dayanımlı malzeme üretiminde önemli bir yere sahiptir. Amaç fonksiyonuna bağlı olarak FKM'de maksimum çalışma performansı, yapısal varyasyonlar ve emniyetli gerilme değerleri gibi önemli özelliklerin sağlanabilmesi için hacimsel dağılımın belirlenmesi çok önemlidir. Hacimsel dağılımın belirlenmesi ve uygun hacimsel dağılımın test edilebilmesi için nümerik analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sonlu farklar metodu ile iki boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısı akısı tesirinde ısıl-mekanik davranışının tespit edilmesinde önemli bir parametre olan eşdeğer gerilme seviyeleri için malzemenin hacimsel dağılımına bağlı modeller oluşturulmuştur. Bu modeller yapay sinir ağına iki farklı eğitim algoritması ile elde edilmiştir. Bu eğitim algoritmaları Levenberg-Marquart ve Geriye Yayılım algoritmasıdır. FKM'lerin hacimsel dağılımını belirleyen kompozisyonel gradyant üst değerleri n ve m 'dir. Sonlu farklar metodu ile sayısal analizde n ve m değerlerini belirlemek 1800 s iken Yapay Sinir ağı modeli ile 900 s olup verimlilik önemli derecede artmaktadır. Kullanılan eğitim algoritmalarının iş-zaman-performans değerleri açısından ileride yapılacak bilimsel çalışmalar için fikir verici nitelikte olması önemlidir. Önerilen eğitilmiş modeller henüz seri üretimi gerçekleştirilemeyen FKM için hem üretimde hem de yapılacak teorik çalışmalarda optimum hacimsel dağılıma ulaşmada yol gösterici olacaktır.

Anahtar kelimeler: İki boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş plaka, Yapay sinir ağı, Levenberg-Marquart algoritması, Geriye yayılım algoritması, Sonlu farklar metodu, Isıl gerilme analizi

THERMAL STRESS MODELLING WITH NEURAL NETWORK LEARNING ALGORITHMS OF TWO-DIRECTIONAL FUNCTIONALLY GRADED PLATES

ABSTRACT

Functionally graded materials (FGM) which are formed according to a specific volumetric distribution function have an important place in the production of materials resistant to high temperature applications. Depending on the objective function, it is very important to determine the volumetric distribution in order to provide important features such as maximum operating performance, structural variations and safe stress values in FGM. Numerical analysis methods are used to determine the volumetric distribution and to test the appropriate volumetric distribution. In this study, volumetric distribution models were created for the equivalent stress levels which are the most important parameter in determining the thermo-mechanical behavior of two-dimensional functionally graded plates in heat flux by finite difference method. These models were obtained by two different training algorithms in artificial neural network (ANN). These training algorithms are Levenberg-Marquart and Gradient Descent Backpropagation algorithm. While it takes 1800 s to determine n and m values in numerical analysis by finite difference method, this time is 900 s with an artificial neural network model and productivity increases significantly. It is important that used training algorithms are informative for scientific studies in terms of work-time-performance values. The proposed training models will guide researchers in achieving optimum volumetric distribution in both production and theoretical studies

Keywords: Two-directional functionally graded plate, Artificial neural network, Levenberg-Marquardt algorithm, Gradient descent backpropagation algorithm, Finite difference method, Thermal stress analysis

1. GİRİŞ

Malzemelerin çalışma koşullarının zorlaşması ile birlikte performans değerlerinin optimum olabilmesi için teknik literatürde pek çok sayısal optimizasyon yöntemi önerilmektedir. Algoritmaların temel amacı zaman açısından verimliliği artırmaktır.

Yüksek sıcaklık uygulamalarında malzeme direncinin fazla ve deformasyonun az olması amacıyla fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler üretilmektedir [1]. Bu malzemeler ile seramik malzemenin özelliklerinden faydalanılarak, malzemenin bağlama yüzeyinde ortaya çıkan ara yüzey çatlaklarının minimum seviyeye düşmesini sağlamıştır. FKM'lerin malzeme bileşimi ile ilgili kompozisyonel gradyant üst değerinin önceden bir varsayım ile belirlenmediği sürece, amaç işlevi ve tasarım değişkenleri arasında açık bir ilişki elde etmek neredeyse imkansızdır. Bunun için FKM'lerin optimum hacimsel dağılımını belirlemek için literatürde farklı yöntemler kullanılmaktadır [2,3]. Isıl-mekanik analizde, malzemede meydana gelen deformasyonları minimuma indirmek için optimum malzeme kompozisyonunu bulmak önem arz etmektedir. Yapılan birçok çalışma bu alana odaklanmıştır [4]. Literatürde yer alan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Moita ve arkadaşları [5], FKM'lerin hacimsel dağılımını bulmak için sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile YSA algoritmasını kullandılar. Onlar çalışmalarında doğrusal ve geometrik olmayan davranış, serbest titreşimler ve doğrusal burkulma analizleri için kompozisyonel gradyant üst değerinin hesaplanmasını sağlayan bir model önerdiler.

Na ve Kim [6], FKM'lerin burkulma analizi için gerilme ve kritik sıcaklıkları dikkate alınarak hacimsel dağılım optimizasyonunu SEM ile sundular. FKM'nin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı değiştiğini kabul ettiler ve hacimsel dağılımın kalınlık yönünde değiştiğini ifade ettiler. Do ve arkadaşları [7], FKM'lerin doğal frekansı ve maksimum burkulma yükünü dikkate alarak optimum hacimsel dağılım için simbiyotik organizmalar arama algoritması ve derin yapay sinir ağı yöntemini kullandılar. Sayısal yöntem olarak SEM kullandılar ve elde ettikleri değerler ile derin yapay sinir ağı yöntemi için model oluşturdular. Onlar modellerin yüksek doğrulukta ve hızlı bir şekilde çalıştığını gösterdiler. Yu ve Wu [8], fonksiyonel kademelendirilmiş boruların yönlendirilmiş çevresel dalga dağılım karakteristiklerini kullanarak Legendre yöntemi ile ileri doğru frekansı için YSA'yı kullandılar. Kurdukları yapay sinir ağı modelinde Levenberg-Marquart algoritmasını kullandılar. Kompozisyonel gradyant üst değerinin gerçek değer ile tahmini değerlerinin oldukça yakın olduğunu vurguladılar. Khoshnoodi ve arkadaşları [9], çok yönlü FKM panellerin dinamik analizini yarı-analitik bir sayısal yöntem ve YSA ile karşılaştırmalı davranış modellemesi kullanılarak incelediler. Onlar elde ettikleri sayısal sonuçları ile optimal bir YSA modeli sundular. Bu model ile panelin geometrik özelliklerinin, kompozisyonel gradyant üst değerinin ve çevresel dalga sayısının boyutsuz doğal frekansı üzerindeki etkisini araştırdılar. Cho ve Shin [10], YSA yöntemini kullanarak ısıya dayanıklı FKM'lerin kompozisyonel gradyant üst değerinin optimizasyonu üzerine çalıştılar. Onlar verileri deneysel olarak elde ettiler ve geri-yayınımı optimizasyon tekniklerini FEM ile uyguladılar. Analiz sonuçlarında yapay sinir ağı yönteminin deneysel veriler ile uygun sonuçlar verdiğini ve CPU-zaman açısından YSA'nın önemini vurguladılar. Jodaei ve arkadaşları [11], üç boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş FKM plakaların titreşim analizini yarı analitik bir yöntem ile araştırdılar ve farklı malzeme kompozisyonları için YSA ile doğal frekansı belirlediler. Onlar YSA ile elde ettikleri modelleri farklı sınır koşulları için doğruladılar ve YSA'nın verimliliğini gösterdiler. Demirbaş ve Çakır [12], tek yönde fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl gerilme davranışının belirlenmesinde sonlu farklar yöntemini kullanarak elde ettikleri sayısal sonuçları kullanarak YSA ile model oluşturdular. Bu model ile farklı kompozisyonel gradyant üst değerleri için eşdeğer gerilme seviyelerini veren modeller kurdular. Kurdukları modellerin tahmin ettiği değerlerin gerçek değerlere çok yakın sonuçlar bulduğunu ifade ettiler.

Literatürde incelendiği üzere, FKM'nin malzeme kompozisyonunun belirlenmesi sadece ısıl gerilme davranışı için değil mekanik davranış için oldukça önem arz etmektedir. Mekanik davranış sayısal veya deneysel olarak belirlendikten sonra zaman verimliliğini artırmak için çeşitli algoritmalar ile ilgili çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Bu amaçla mevcut çalışmamızda FKM'lerin ısıl gerilme analizlerinde önemli bir değişken olan n ve m kompozisyonel gradyant üst değerlerinin sayısal analiz yöntemi ile elde edilenden daha az bir sürede elde etmek için YSA optimizasyon yönteminden faydalanılmıştır. Çalışmamızda literatürden farklı olarak FKM'lerin ısıl gerilme davranışının belirlenmesi için sayısal yöntem olarak sonlu farklar metodu kullanılmıştır ve ısıl gerilme analizinde önem arz eden eşdeğer gerilme değerleri hesaplanmıştır. Oluşturulan veri seti YSA'da iki farklı eğitim algoritması ile değerlendirilmeye alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzemeler

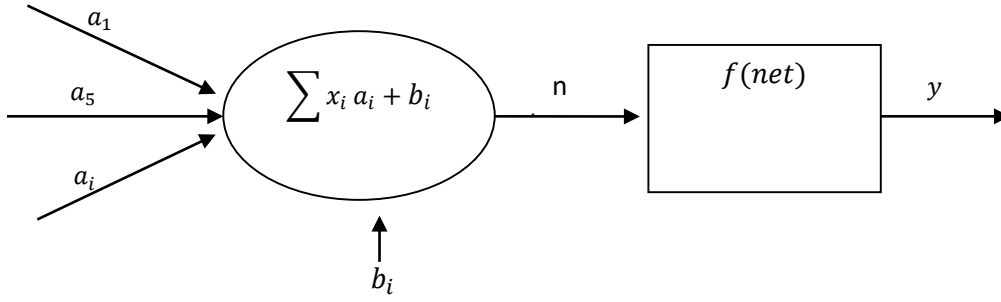
Teknolojinin ilerlemesi ile var olan malzemelerde iyileştirme ve geliştirme olanakları artmış ve farklı çalışma şartlarına uygun malzemeler üretilmiştir. Geleneksel malzemeden daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler önerilmiştir. Bilinen kompozit malzemelerde katmanlar arasındaki geçiş bölgelerinde malzeme süreksizliklerine bağlı olarak ara yüzey çatlakları meydana gelmektedir. Kademelendirilmiş malzemeler kullanarak ara yüzey geçiş bölgesindeki süreksizlikleri ortadan kaldırmak ayrıca ara yüzey hatalarını ve çatlaklarını önlemek amacıyla FKM'ler önerilmiştir [13]. FKM'ler, özellikle yüksek sıcaklıklarda

İKİ BOYUTLU FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN YAPAY SİNİR AĞI ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE ISIL GERİLME MODELLEMESİ

termal dayanımın artırılması için, ihtiyaca uygun malzeme özelliğinin sağlanabilmesi amacıyla iki veya daha fazla farklı malzemenin özelliklerinden faydalanarak belli sınırlar altında bir hacimsel oranla sürekli olarak konum fonksiyonu ile değiştirilerek üretilmektedirler.

2.2 Yapay Sinir Ağı Algoritması (YSA)

Optimizasyon, evrensel küme içinde birbirine bağlı olarak gerçekleşen birkaç olayda yani birden fazla parametrenin etki ettiği bir sistemde en uygun şekli verme işlemidir. Çok geniş ve farklı alanlarda optimizasyon yapma ihtiyacı beraberinde birçok zorlu parametreyi de getirebilir. Böylelikle optimizasyon problemindeki zorluk seviyesi yükseldikçe optimum sonuca ulaşmak güçleşmekte ve uzun vakit almaktadır. Bu sebeple problem çözümündeki zaman faktörünün önemi ve optimizasyon yönteminin yetersizliği gibi nedenlerle farklı optimizasyon teknikleri oluşturulmuştur. Bu nedenlerle geliştirilen optimizasyon yöntemlerinden biri de yapay sinir ağı algoritmasıdır. Yapay sinir ağı, insan beyninin çalışma yapısında yer alan bilgi edinme, karar verme ve öğrenme yeteneklerinin modellenmesi ve bilgisayar diline aktarılmasıdır [14]. Yapay sinir ağı robotik sistemler, doğrusal olmayan sistemler, veri madenciliği, askeri sistemler, finansal sistemler, kontrol teknikleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 1. Basit bir yapay sinir hücresi [15]

Şekil'de 1 de gösterilen örnek YSA hücresinde a_i giriş verileri, x_i ağırlık vektörü ve b_i eşik değerini temsil etmektedir. YSA'da ağa gelen verileri farklı toplam fonksiyonları kullanarak net girdiye ulaşmak amaçlanır. Bu fonksiyonları belirlemenin sabit bir yöntemi yoktur ve deneme yoluyla belirlenir. Literatürde yaygın olarak kullanılan kümülatif toplam fonksiyonu aşağıda yer almaktadır.

$$net = \sum x_i a_i + b_i \quad (1)$$

Net girdi hesaplandıktan sonra yapay sinir ağının bir sonraki aşaması olan aktivasyon fonksiyonuna gönderilir. Burada problemin türüne göre bir fonksiyon belirlenir ve işleme alınarak çıktı değeri hesaplanır. Çoğunlukla problemlere yanıt vermesi için doğrusal olmayan fonksiyonlar tercih edilir. Sigmoid fonksiyonu da bu fonksiyonlardan biridir. Aşağıda eşitlik (2)' de f sigmoid fonksiyonu gösterilmektedir.

$$f(net) = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (2)$$

Bu hesaplamalardan sonra oluşturulan çıktı değerleri gerçek değerlerle kıyaslanır ve gerçek değerlere ne kadar yakınsadığına bakılır. Yapılan bu işleme öğrenme süreci denir. Öğrenme sürecinin gerçekleşmesini sağlamak için hata fonksiyonu belirlenir. Hata fonksiyonunda (E), tahmini değer (y_d) ve gerçek değer (y) arasındaki fark hesaplanarak belirlenen uygunluk değeri hesaplanır. Eşitlik (3)' te hata fonksiyonu olarak ortalama kareli hata seçilmiştir.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^m (y_d - y)^2 \quad (3)$$

Levenberg-Marquardt (LM) Algoritması Gauss-Newton algoritması ve gradyant azaltma metodunun birleştirilmesiyle ortaya çıkan bir yapay sinir ağı eğitim algoritmasıdır [16]. Gauss-Newton algoritması eşitlik (4)'te görülmekte olup H hessian matrisini ve g gradyant azaltma fonksiyonunu göstermektedir [17]. İleri beslemeli ağlarda en hızlı öğrenme algoritmasıdır. Bu

M. D. Demirbaş, D. Çakır

algoritma hessian matrisini hesaplamaya gerek duymadan daha doğru sonuçları bulmaktadır. Ağın performansını ikinci dereceden türevleri belirler. J jacobian matrisini, I birim matrisi, μ marquardt katsayısını göstermektedir [18].

$$x_{k+1} = x_k - H^{-1}g \quad (4)$$

$$g = \left| \frac{\partial E(w)}{\partial w_1} \quad \frac{\partial E(w)}{\partial w_2} \quad \dots \quad \frac{\partial E(w)}{\partial w_n} \right|^T \quad (5)$$

$$H = \begin{vmatrix} \frac{\partial E(w)}{\partial w_1^2} & \frac{\partial E(w)}{\partial w_1 \partial w_2} & \dots & \frac{\partial E(w)}{\partial w_1 \partial w_n} \\ \frac{\partial E(w)}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial E(w)}{\partial w_2^2} & \dots & \frac{\partial E(w)}{\partial w_2 \partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial E(w)}{\partial w_n \partial w_1} & \frac{\partial E(w)}{\partial w_n \partial w_2} & \dots & \frac{\partial E(w)}{\partial w_n^2} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_n} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_n}{\partial w_1} & \frac{\partial e_n}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_n}{\partial w_n} \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$H \cong J^T J \quad (8)$$

$$g = J^T e \quad (9)$$

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (10)$$

Geriye Yayılım Algoritması (Gradient Descent Backpropagation-GY) Rumelhart ve arkadaşları tarafından bulunan ve günümüzde de yaygın olarak kullanılan nöronlardaki öğrenme algoritmasıdır. Nöronlarda gradyant azaltma tekniğini kullanır [19]. Bu algoritma tahmini değerlerle gerçek değerler arasındaki farkı çıkıştan girişe doğru azaltma işlemi gerçekleştirir. Bu sebepten geriye yayılım algoritması olarak adlandırılmıştır [14]. Hata oranları, ağırlık değerlerinin kısmi türevi üzerinden gerçekleşir ve doğrusal olmayan programda hata oranının türevinin minimum olması hedeflenmektedir. Bu algoritma gradyant azaltma tekniğini kullandığı için ilk şartlara duyarlıdır. Yakınsama hızı yavaş olup yerel minimuma takılma ihtimali yüksektir. Başlangıçta belirlenen ağırlık vektörleri durdurma kriteri olan hata değerine çok yakın ise öğrenmesi hızlı olmaktadır. Bu durum tam tersi olması durumunda optimum sonuca ulaşması uzun zamanlar alabilir. Öğrenme katsayısı n olup, her problem için farklı belirlenir ama genelde 0.1-0.9 arasında seçilebilir [15]. Eşitlik (11) ve (12)' de hata ve ağırlık fonksiyonları detaylandırılmıştır.

$$E_t = yd_t - y_t \quad (11)$$

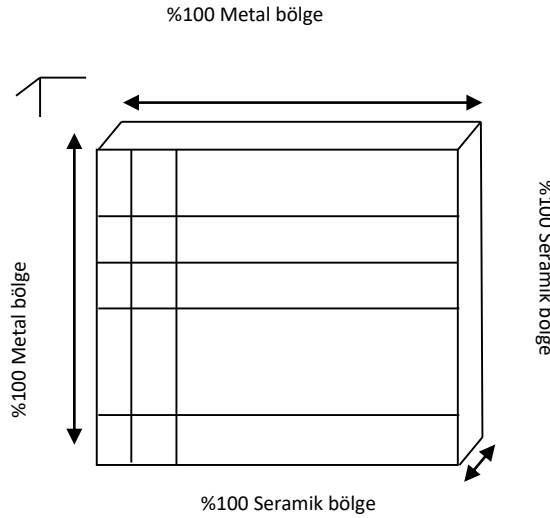
$$w_t = w_{t-1} + n \left(\frac{\partial E_t}{\partial w_{t-1}} \right) \quad (12)$$

İKİ BOYUTLU FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN YAPAY SİNİR AĞI ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE ISIL GERİLME MODELLEMESİ

3. YSA İLE MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMASI

3.1 YSA ile Modelleme

Bu çalışmada boyutları 100 mm*100 mm olan plakanın BD seramik kenarı boyunca 50 kW/m² sabit ısı akısına maruz bırakılmıştır. Malzememiz başlangıç olarak 298 K sıcaklığında (oda sıcaklığında) olup AC metal kenarı 600 K'e ulaşmaya kadar ısıtılmıştır. İki yönlü kademelendirilmiş plakanın tüm kenarları sabitlenerek yapılan ısı gerilme analizinde yapay sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2'de, iki yönde fonksiyonel kademelendirilmiş plaka görülmektedir.

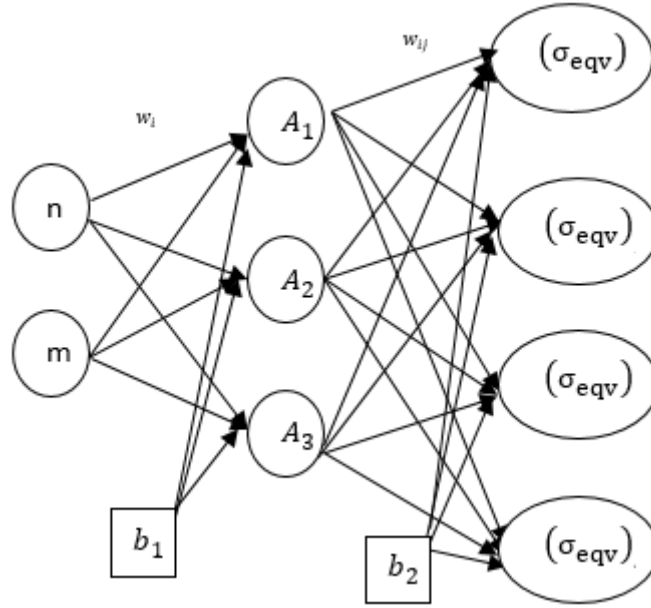


Şekil 2. İki yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plaka [13]

$$Vs(x, y) = \left(\frac{x}{l}\right)^n \left(\frac{y}{h}\right)^m \quad (13)$$

$$Vm(x, y) = 1 - Vs(x, y) \quad (14)$$

İki yönde kademelendirilen plakada n, x-yönünde ve m ise y-yönünde kompozisyonel gradyant üst değerini temsil etmektedir. Eşitlik (13) ve (14)'te, n ve m değerlerindeki seramik (Vs) ve metalin (Vm) hacimsel dağılım formülü gösterilmektedir. Plakada seramik malzeme olarak zirkonyum oksit (ZrO₂) ve metal malzeme olarak titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) 'dır. Şekil 3'de, oluşturulan yapay sinir ağı modeli görülmektedir. Kurulan YSA modeli plakamız iki yönde kademelendirildiği için iki girişten oluşmaktadır. Tek katmanlı algılayıcı modelde 3 nöron tercih edilmiştir [20]. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın ısıl-mekanik analizinde malzeme yapısında deformasyonu belirleyen en önemli dört eşdeğer gerilme değerleri belirlenmiştir. Bunlar; maksimum değerinin maksimumu (σ_{eqv})₁, maksimum değerinin minimumu (σ_{eqv})₂, minimum değerinin maksimumu (σ_{eqv})₃, minimum değerinin minimumu (σ_{eqv})₄'dur. Yani iki giriş ve dört çıkış değeri olan, tek katmanlı ve üç nörondan oluşan yapay sinir ağı modeli kurulmuştur. İki boyutlu olarak x ve y yönünde kademelendirilen plakamızın n ve m değerleri sınır şartları olarak [0.0001-1.5] aralığında rassal olarak dağılmış 200 farklı değer için hesaplanmıştır. Kurulan YSA modelinde veri seti oluşturmak için nümerik yöntem olarak sonlu farklar metodu uygulanmıştır. Tüm analiz çalışmaları MATLAB 2009a programlama dilinde yapılmıştır [21]. 200 veri %50 eğitim seti, %50 test seti olarak kullanılmıştır. Programımızın durdurma kriteri verilerdeki doğrulama oranının %10 olması ve maksimum çevrim sayısının 1000 olması olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. İki yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın tek katmanlı yapay sinir ağı modeli

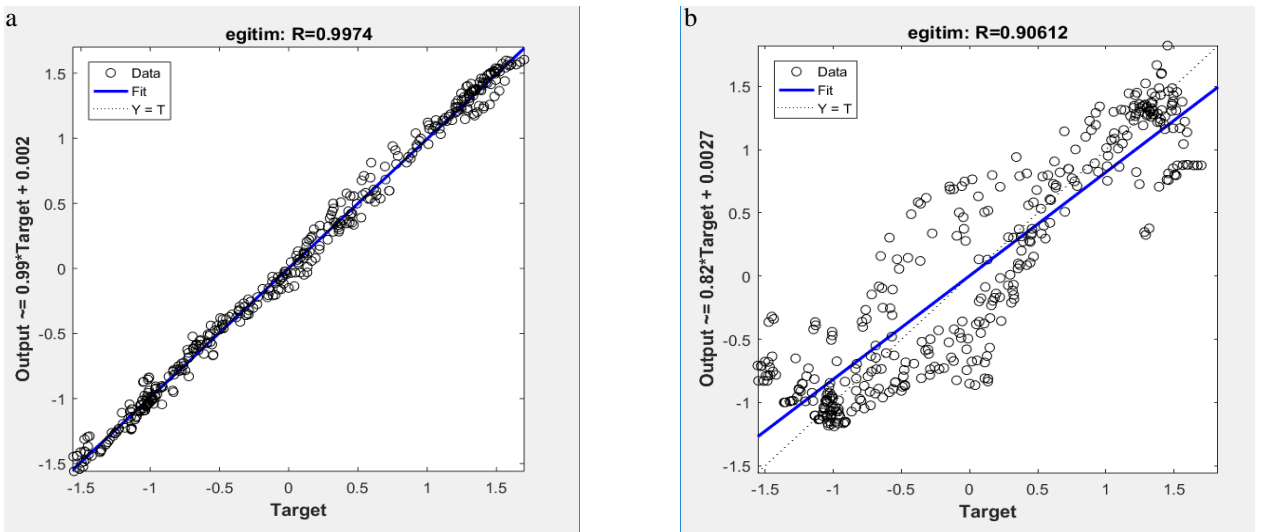
Şekil 3’de, n ve m giriş ve b_n eşik değerleridir. A_n ara katman ve $(\sigma_{eqv})_n$ çıkış nöronlarıdır. Eşitlik (15) ve (16)’ da nöronlar üzerindeki yapılan işlemlerin gösterimi verilmiştir.

$$\sum (n_i w_i + m_i w_i + b_i) = \left(\frac{1}{1 + e^{-m}} \right)^{A_i} \quad (15)$$

$$\sum (A_i a w_{ij} + b_i) = \left(\frac{1}{1 + e^{-m}} \right)^{(\sigma_{eqv})_i} \quad (16)$$

3.2 Analiz Çalışması

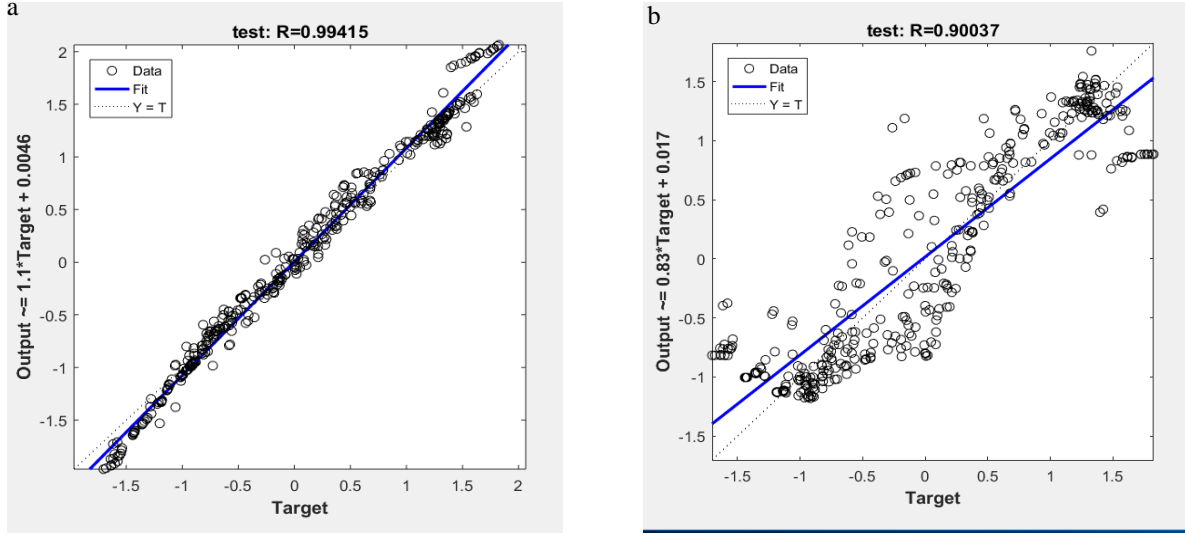
Kurulan modellerin sonuç çıktıları ve grafikleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4. YSA’nın eğitim tahmin değerleri a)LM; b) GY

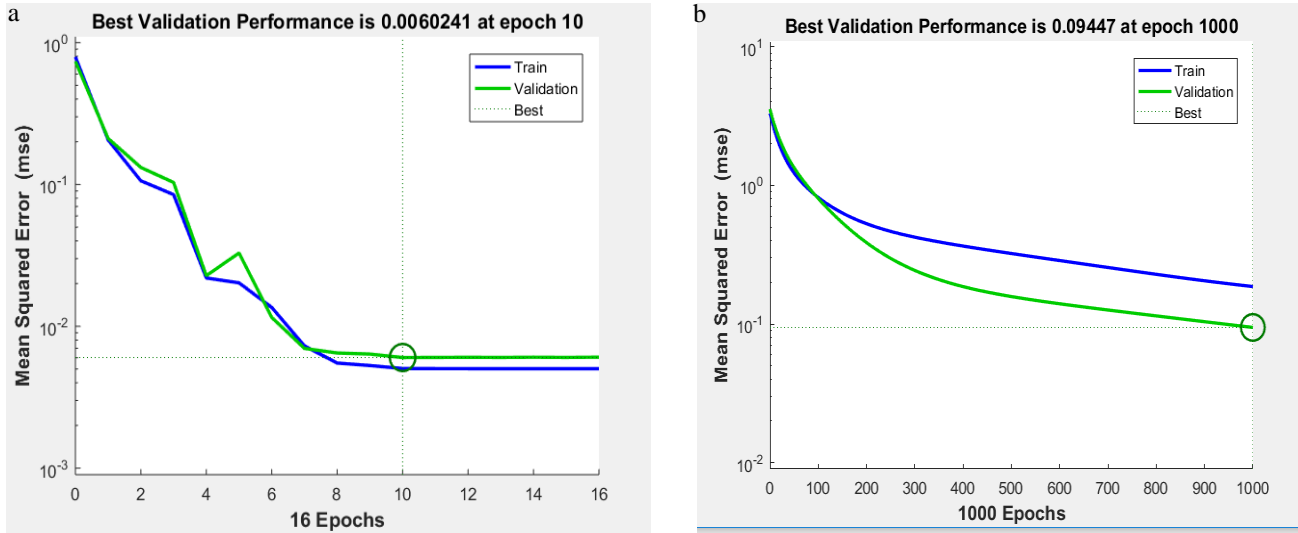
İKİ BOYUTLU FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN YAPAY SİNİR AĞI ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE ISIL GERİLME MODELLEMESİ

Şekil 4’de, ağların eğitim tahmin değerleri gösterilmektedir. LM algoritmasının eğitim tahmin değerleri gerçek değerlere %99.7’nin üzerinde bir oranla yaklaşmıştır. GY algoritması % 90.6 oranla ulaşmıştır. Eğitilmiş programda test kümesine gönderilen verilerden çıkan sonuçlardaki doğruluk oranının şekil 5’de, gösterildiği gibi LM algoritması için %99.4 ve GY algoritması için ise %90.0 olduğu görülmektedir. İki algoritmaya bakıldığında LM algoritmasının eğitim ve test performansının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5. YSA'nın test tahmin değerleri a)LM; b) GY

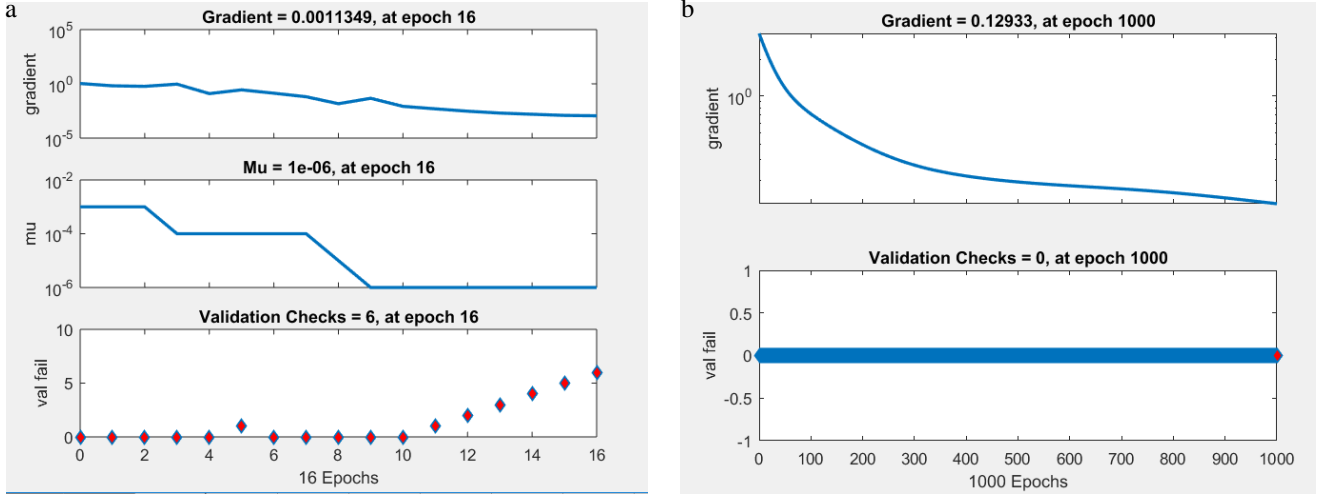
Şekil 6’da, ortalama kareli hata (MSE) eşitliğinin sonucuna göre en iyi doğrulama performansı LM algoritması için 0.00602 ve GY algoritması için 0.09447’dir. En iyi doğrulama hata oranına LM algoritması 10. çevrimde ulaşmıştır ve maksimum çevrim sayısı 16 olmuştur. GY algoritması en iyi doğrulama oranına ve maksimum çevrim sayısına 1000 çevrimde varmıştır.



Şekil 6. YSA'nın performansı a)LM; b) GY

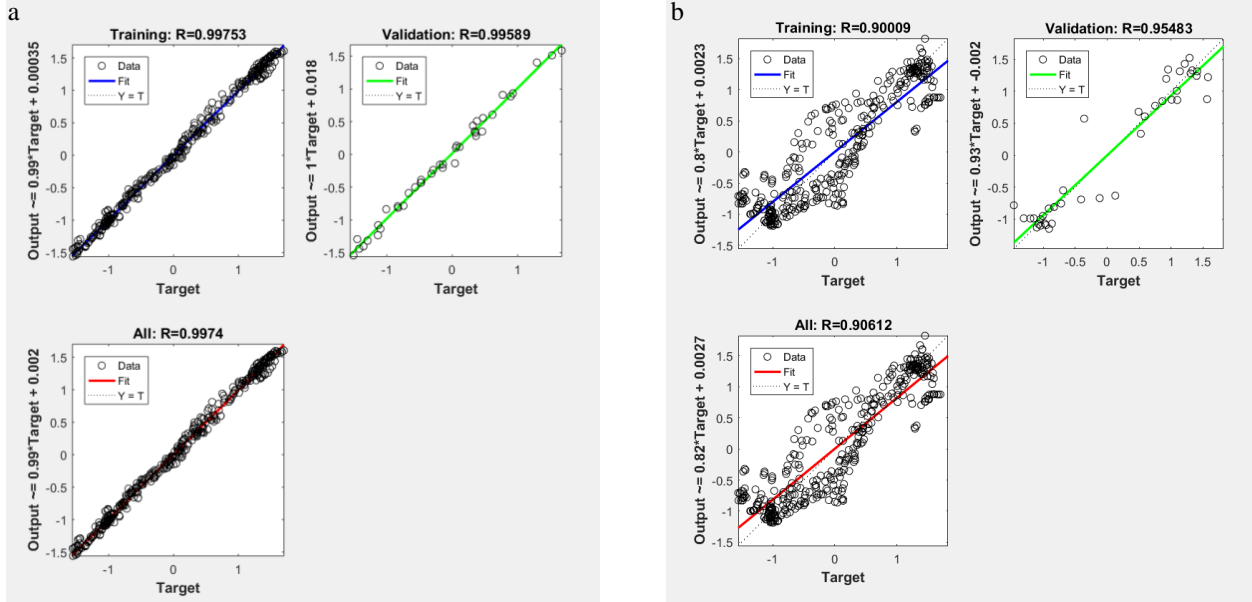
Şekil 7’de, momentum ve başarısız doğrulamanın çevrim sayısına bağlı değişimi gösterilmektedir. LM algoritmasının Momentum (Mu) 0.000006, gradyant (Gradient) 0.0011349, başarısız doğrulama (validation fail) 6’dır. GY algoritmasının gradyant (Gradient) 0.12933’dür.

M. D. Demirbaş, D. Çakır



Şekil 7. YSA'da gradyant, momentum ve başarısız doğrulamanın çevrim sayısına bağlı değişimi a)LM; b) GY

Şekil 8, iki yönlü işlevsel kademelendirilmiş plakada Levenberg-Marquardt ve Geriye Yayılım Algoritması eğitim algoritmasının tüm tahmin değerlerini göstermektedir. Geriye yayılım algoritmasının eğitim tahmin değeri 0.90009, doğrulama tahmin değeri 0.95483 ve toplam değeri 0.90612'dir. Levenberg-Marquardt algoritmasının eğitim için tahmin değeri 0.99753, doğrulama için tahmin değeri 0.99589 ve toplam tahmin değeri 0.9974'dür. Mükemmel eğitim tahmin oranı 1 değerine çok çok yakın olmasıdır. Bu çalışmada çıkış verilerimize göre, en iyi hedeflenen eğitim değeri, doğrulama değeri ve tüm tahmin değerine bakıldığında %99 üzerinde tahmin ile Levenberg-Marquardt algoritmasının hesapladığı görülmektedir. Bu durum LM algoritmasının GY algoritmasına göre daha iyi eğitildiğini göstermektedir.



Şekil 8. YSA'nın eğitilen model için tüm tahmin değerleri a)LM; b) GY

Tablo 1'de $(\sigma_{eqv})_1$ eşdeğer gerilme değeri için gerçek, tahmini ve hata değerleri görülmektedir. Tablo 1'de Levenberg-Marquardt algoritmasının minimum hata değeri 0.005 ve hata oranı %0.001, maksimum hata değeri 4.036 ve hata oranı %0.95'dir. MSE değeri 0.978'dir. Geriye Yayılım Algoritması minimum hata değeri 0.004 ve hata oranı %0.001, maksimum hata değeri 14.02 ve hata oranı %33.75'dir. MSE değeri 6.12'dir.

İKİ BOYUTLU FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN YAPAY SİNİR AĞI ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE ISIL GERİLME MODELLEMESİ

Tablo 1. Gerçek, tahmin ve hata değerleri $(\sigma_{\text{eqv}})_1$

n	m	$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ LM	$(\sigma_{\text{eqv}})_1$ GY	LM Hata	GY Hata
0.06	0.29	406.2	404.74	414.84	1.454	8.64
0.65	0.81	392.91	393.68	393.79	0.771	0.89
0.81	0.24	405.75	405.54	410.86	0.214	5.11
0.14	0.48	399.62	399.62	412.65	0.005	13.03
0.01	0.28	406.82	405.11	414.85	1.709	8.03
1.02	1.48	388.71	387.38	386.82	1.326	1.88
1.22	1.49	388.68	387.87	388.68	0.808	0.004
1.26	1.16	389.89	389.39	387.33	0.498	2.57
1.46	1.08	390.23	389.59	388.42	0.643	1.81
0.49	0.004	426.18	428.48	415.6	2.293	10.58
1.36	0.0037	422.99	426.82	408.98	3.838	14
1.38	0.005	422.63	426.57	408.62	3.94	14.02
1.39	0.006	422.38	426.4	408.42	4.014	13.97
0.09	0.98	391.78	391.28	394.99	0.507	3.21

Tablo 2'de Levenberg-Marquardt algoritması $(\sigma_{\text{eqv}})_2$ değerlerinin minimum hata değeri 0.007 ve hata oranı %0.006 olduğu gösterilmektedir. Maksimum hata değeri 8.41, hata oranı %0.25 ve MSE değeri 2.700'dır. Geriye Yayılım Algoritmasının minimum hata değeri 0.24 ve hata oranı %0.19, maksimum değeri 34.08 ve hata oranı %187'dir. MSE değeri 11.03'dir.

Tablo 2. Gerçek, tahmin ve hata değerleri $(\sigma_{\text{eqv}})_2$

n	m	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ FDM	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ LM	$(\sigma_{\text{eqv}})_2$ GY	LM Hata	GY Hata
0.06	0.29	37.78	46.08	28.57	1.454	9.21
0.65	0.81	97.37	97.89	102.43	0.771	5.06
0.81	0.24	55.1	52.24	43.62	0.214	11.48
0.14	0.48	57.6	60.65	35.82	0.005	21.78
0.006	0.28	35.1	44.04	28.18	1.709	6.91
1.02	1.48	126.93	126.92	128.67	1.326	1.74
1.22	1.49	130.51	131.35	125.2	0.808	5.31
1.26	1.16	124.33	125.77	127.54	0.498	3.22
1.46	1.08	125.7	124.84	125.46	0.643	0.24
0.49	0.004	11.27	6.72	27.15	2.293	15.88
1.36	0.0037	17.26	15.7	50.24	3.838	32.99
1.38	0.005	17.79	16.31	51.54	3.94	33.75
1.39	0.006	18.16	16.71	52.23	4.014	34.08
0.09	0.98	86.87	89.63	89.51	0.257	2.64

Tablo 3. Gerçek, tahmin ve hata değerleri $(\sigma_{\text{eqv}})_3$

n	m	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$	$(\sigma_{\text{eqv}})_3$	LM Hata	GY Hata
		FDM	LM	GY		
0.06	0.29	155.87	152.39	128.63	3.484	27.24
0.65	0.81	179.25	189.62	177.51	10.37	1.74
0.81	0.24	157.21	155.37	141.19	1.839	16.02
0.14	0.48	163.75	163.74	132.38	0.009	31.37
0.006	0.28	154.56	150.01	127.58	4.544	26.98
1.02	1.48	202.28	200.79	205.69	1.49	3.41
1.22	1.49	210.31	207.87	218.09	2.44	7.78
1.26	1.16	206.75	206.94	206.72	0.185	0.028
1.46	1.08	213.22	206.55	214.38	6.676	1.16
0.49	0.004	98.85	94.76	130.67	4.096	31.82
1.36	0.0037	98.83	100.4	145.92	1.577	47.09
1.38	0.005	100.25	101.09	146.79	0.836	46.54
1.39	0.006	101.15	101.57	147.26	0.421	46.11
0.09	0.98	164.7	171.1	148.35	2.757	16.35

$(\sigma_{\text{eqv}})_3$ eşdeğer gerilme değeri için gerçek, tahmin ve hata değerleri tablo 3'de görülmektedir. Levenberg-Marquardt algoritmasının minimum hata değeri 0.009 ve hata oranı %0.006, maksimum hata değeri 10.370 ve hata oranı %5.78'dir. MSE değeri 4.3'dür. Geriye Yayılım Algoritmasının minimum hata değeri 0.28 ve hata oranı %0.013, maksimum değeri 47.09 ve hata oranı %47.65'dir. MSE değeri 16.41'dir. Tablo 4'de $(\sigma_{\text{eqv}})_4$ eşdeğer gerilme değerinin hata değerlerine bakıldığında minimum hata değeri 0.003 ve hata oranı %0.04 olduğu gösterilmektedir. Maksimum hata değeri 2.748 ve hata oranı %9.5'dir. MSE değeri 0.608'dir. Geriye Yayılım Algoritması minimum hata değeri 0.009 ve hata oranı %0.75, maksimum değeri 14.51 ve hata oranı %47.65'dir. MSE değeri 16.41'dir.

Tablo 4. Gerçek, tahmin ve hata değerleri $(\sigma_{\text{eqv}})_4$

n	m	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$	$(\sigma_{\text{eqv}})_4$
		FDM	LM	GY	LM Hata	GY Hata
0.06	0.29	4.17	4.85	2.45	0.677	1.72
0.65	0.81	18.21	19.17	21.72	0.967	3.51
0.81	0.24	7.74	7.74	5.58	0.003	2.16
0.14	0.48	6.87	7.69	4.67	0.814	2.21
0.006	0.28	3.65	4.15	2.6	0.497	1.05
1.02	1.48	28.87	26.12	28.2	2.748	0.66
1.22	1.49	29.55	28.66	26.15	0.885	3.39
1.26	1.16	27.23	27.65	27.49	0.423	0.25
1.46	1.08	26.91	27.42	26.35	0.514	0.56
0.49	0.004	1.16	0.64	1.15	0.516	0.009
1.36	0.0037	1.91	3.21	7.32	1.296	5.41
1.38	0.005	1.97	3.33	7.66	1.355	5.69
1.39	0.006	2.01	3.4	7.85	1.385	5.84
0.09	0.98	10.24	12.92	24.75	2.685	14.51

İKİ BOYUTLU FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN YAPAY SİNİR AĞI ÖĞRENME ALGORİTMALARI İLE ISIL GERİLME MODELLEMESİ

4. SONUÇ

YSA yöntemi ile ısıl-mekanik davranışın belirlenmesinde önem arz eden eşdeğer gerilme değerinin, mevcut sınır koşulları altında, en iyi tahmin değerlerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Modellerin ortalama kareli hata (MSE), minimum hata ve maksimum hata değerleri kıyaslanmıştır. MSE değeri en iyi Levenberg-Marquardt algoritmasının $(\sigma_{eqv})_4$ değerlerinde üretilmiştir. Levenberg-Marquardt algoritmasında minimum ve maksimum hata değerleri sırasıyla $(\sigma_{eqv})_4$ ve $(\sigma_{eqv})_3$ değerlerinde bulunmuştur. Genel olarak tüm eşdeğer gerilme değerlerine bakıldığında Levenberg-Marquardt algoritmasının daha iyi performans gösterdiği Tablo 5’de görülmektedir. Levenberg-Marquardt algoritması Geriye yayılım algoritmasına göre gerçek değerlere daha yakın sonuçlar vermiştir. Kurulan modellerde CPU sürelerini azaltmak ve doğru veriye ulaşmak amaçlanmıştır. Sonlu farklar metodu ile bir n ve m değerine ulaşmak yaklaşık 1800 s sürerken model kurulduktan sonra bin değere yaklaşık 900 s’ de ulaşılmaktadır. Hata oranları göze alındığında LM algoritması optimum hacimsel dağılımı bulmada etkin bir yöntem olduğu görülmektedir.

Tablo 5. MSE, minimum ve maksimum hata değerleri

		$(\sigma_{eqv})_1$	$(\sigma_{eqv})_2$	$(\sigma_{eqv})_3$	$(\sigma_{eqv})_4$
Levenberg-Marquardt algoritması	MSE	0.978	2.700	4.35	0.608
	Min Hata	0.005	0.007	0.009	0.003
	Mak Hata	4.036	8.941	10.37	2.75
Geriye Yayılım Algoritması (Gradient Descent Backpropagation)	MSE	6.12	11.03	16.41	2.71
	Min Hata	0.004	0.24	0.028	0.009
	Mak Hata	14.019	34.08	47.09	14.51

KAYNAKLAR

- [1] S. Kakac, A. Pramuanjaroenkij A, and X. Y. Zhou, “A review of numerical modeling of solid oxide fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 761-786, 2007.
- [2] A. Ruys, E. Popov, D. Sun, J. Russell, and C. Murray, “Functionally graded electrical/thermal ceramic systems,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 21, no. 10-11, pp. 2025-2029, 2001.
- [3] M. Koizumi, M. Niino, “Overview of FGM research in Japan,” *MRS Bulletin*, vol. 20, no. 1, pp. 19-21, 1995.
- [4] Y.M. Shabana, N. Noda, “Thermo-elastic-plastic stresses in functionally graded materials subjected to thermal loading taking residual stresses of the fabrication process into consideration,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 111-121, 2001.
- [5] J. S. Moita, A.L. Araújo, F. V. Correia, C. M. M. Soares, and J. Herskovits, “Material, distribution and sizing optimization of functionally graded plateshell structures,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 142, pp. 263-272, 2018.
- [6] K. S. Na, J. H. Kim, “Optimization of volume fractions for functionally graded panels considering stress and critical temperature,” *Composite Structures*, vol. 89, pp. 509-516, 2009.
- [7] D. T. T. Do, D. Lee, J. Lee, “Material optimization of functionally graded plates using deep neural network and modified symbiotic organisms search for eigenvalue problems,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 159, pp. 300-326, 2019.
- [8] J. Yu, B. Wu, “The inverse of material properties of functionally graded pipes using the dispersion of guided waves and an artificial neural network,” *NDT&E International*, vol. 42, pp. 452-458, 2009.
- [9] H. Khoshnoodi, M.H. Yas, and A. Samadinejad, “Dynamic analysis of multi-directional functionally graded panels and comparative modeling by ANN,” *Journal of Solid Mechanics*, vol. 8, no. 3, pp. 482-494, 2016.
- [10] J.R. Cho, S.W. Shin, “Material composition optimization for heat-resisting FGMs by artificial neural network,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 5, pp. 585-594, 2004.
- [11] A. Jodaei, M. Jalal, M.H. Yas, “Free vibration analysis of functionally graded annular plates by state-space based differential quadrature method and comparative modeling by ANN,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, pp. 340-353, 2012.
- [12] M.D. Demirbaş and D. Çakır, “Thermal stress control in functionally graded plates with artificial neural network ,” *ISVOS Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 39-55, 2018.
- [13] M.D. Demirbaş, “Düzlem içi ısı yüküne maruz iki yönlü işlevsel kademelendirilmiş dikdörtgen ve dairesel plakanın ısıl gerilme analizi,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Kayseri, Türkiye, 2012.

M. D. Demirbaş, D. Çakır

- [14] C. Öztürk, “Yapay sinir ağlarının yapay arı kolonisi algoritması ile eğitilmesi,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği, Kayseri, Türkiye, 2011.
- [15] K. Metrotra, C.K. Mohan, and S. Ranka, *Elements of Artificial Neural Networks*. MIT Press, 1997.
- [16] M.T. Hagan and M. Menhaj, “Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no. 6, pp. 989-993, 1994.
- [17] R.C. Ümütlü, “Fault diagnosis of a power transmission system using artificial neural networks,” YL Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2016.
- [18] S. Haykin, *Neural Networks*. Prentice Hall, New Jersey, Indian, 2005.
- [19] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, “Learning representations by backpropagation errors,” *Nature*, vol. 323, pp. 533-536, 1986.
- [20] D. Çakır, “Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda malzeme kompozisyonunun yapay sinir ağı ve genetik programlama ile belirlenmesi,” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Kayseri, Türkiye, 2018.
- [21] *MATLAB. Mathematical software, version 2009a*, TheMathWorks. Retrieved from: <http://www.mathworks.com>.





ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

Hasan DEMİRTAŞ^{1,*} 

¹ Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55420, Samsun, Türkiye

ÖZET

Robotik işleme yönteminde kullanılan robotlar hareket tiplerine göre seri ve paralel kinematik tip olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Bu çalışmada robotik işleme yönteminin geliştirilerek verimliliğinin artırılması için literatürde yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Paralel kinematik robotlarda düşük çalışma alanına sahip olmasından dolayı işlemin yerinde yapılması ve konumlandırma (kalibrasyonun) hassas bir şekilde için geliştirilen bazı yöntemler bu derlemede sunulmuştur. Seri kinematik robotlarda ise düşük dayanımlarından dolayı tırlama problemi ön plana çıkmakta olup tırlamanın engellenmesi üzerine yapılan çalışmalar yine bu derlemede sunulmaktadır. Robotik işleme uygulamalarında seri kinematik robotların inceleme sahasının paralel kinematik robotlara göre daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Hexapod tip robotların paralel kinematik robotlar içinde en çok kullanılan robot tipi olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte tırlamaların önlenmesi için temassız işleme yöntemlerinin robot kollara adaptasyonu son yıllarda uygulanmaya başlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Robotik işleme, Tırlama, Dayanım, Kalibrasyon, Çalışma alanı

A REVIEW ON ROBOTIC MACHINING

ABSTRACT

Robots used in robotic machining can be classified in two main titles as serial and parallel kinetic types due to the movement method. This study summarizes the works related to improve the productivity of the robotic machining. Due to the limited working space in parallel kinematic robots, the developed methods for performing in situ operation and precise positioning (calibration) are presented in this review. Chattering due to low stiffness of the serial kinematic robots is the most encountered problem therefore this study also presents the works related to prevent this problem. In robotic machining applications, it has been observed that the field of study of serial kinematic robots is wider than the parallel kinematic robots. Hexapods are the most used robot type in the parallel kinematic robots. In addition, the adaptation of non-contact machining methods to robots has been introduced in recent years to prevent the chatter.

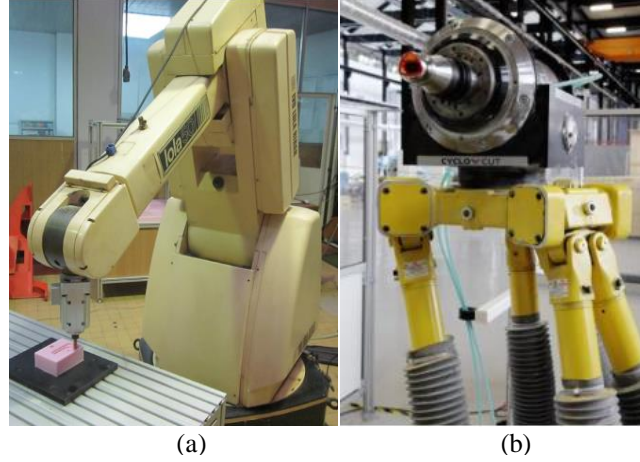
Keywords: Robotic machining, Chatter, Stiffness, Calibration, Working space

1. GİRİŞ

Üretimin önemli bir kısmını oluşturan talaşlı imalat sektörü günümüzde ekonomi için önemli bir yer tutmaktadır. Bu sektörde en çok kullanılan yöntem ise computer numerical control (CNC) adı ile anılan bilgisayar destekli, sayısal veriler yardımı ile kesici ucun kontrol edildiği sistemlerdir. Yıllar ilerledikçe geliştirilen bu sistemler yüksek dayanım ve hassasiyete sahipken yüksek ağırlıklara, yüksek maliyetleri ve düşük esnekliklere sahiptirler. Robotlar ise (seri ve paralel kinematik) yüksek hareket kabiliyeti, esneklik ve yazılımsal gelişime açık olmalarından dolayı dünya çapında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Uluslararası robotik federasyonunun 2018 yılı raporuna göre 2017 yılında dünya genelinde yapılan robot satışı 2016 yılına göre yaklaşık %30 artış göstermiştir. Aynı raporda Türkiye’de robot kullanımının önemli oranda artış gösterdiğine dikkat çekilmiştir [1]. Özellikle otomotiv sektöründe, kaynaklama, montaj ve boyama işlemlerinde kullanılan robotlar, son otuz yıldır talaşlı imalat sektöründe kesici takıma yön veren eleman olarak kullanılmaktadır. Robotik İşleme (Rİ) adı verilen bu yöntemde fener mili (Spindle) robot kol (seri kinematik) uç işlevcisine veya hexapod robot (paralel kinematik) üst kısmına yerleştirilerek malzemenin işlenmesi gerçekleştirilmektedir. Şekil 1’de hexapod ve robot kol ile Rİ uygulamaları gösterilmiştir. Fakat kullanılan robotun işleme bölgesinde oluşan kuvvetlere karşı düşük dayanımı (stiffness) ve alışılmış CNC tezgâhlarına göre daha karmaşık hareket yapılarına sahip olması bu yöntemin kısıtlarındandır [2, 3].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasan.demirtas@samsun.edu.tr
Geliş / Received: 02.08.2019 Kabul / Accepted: 29.03.2020 doi: 10.28948/ngumuh.600588

H. Demirtaş



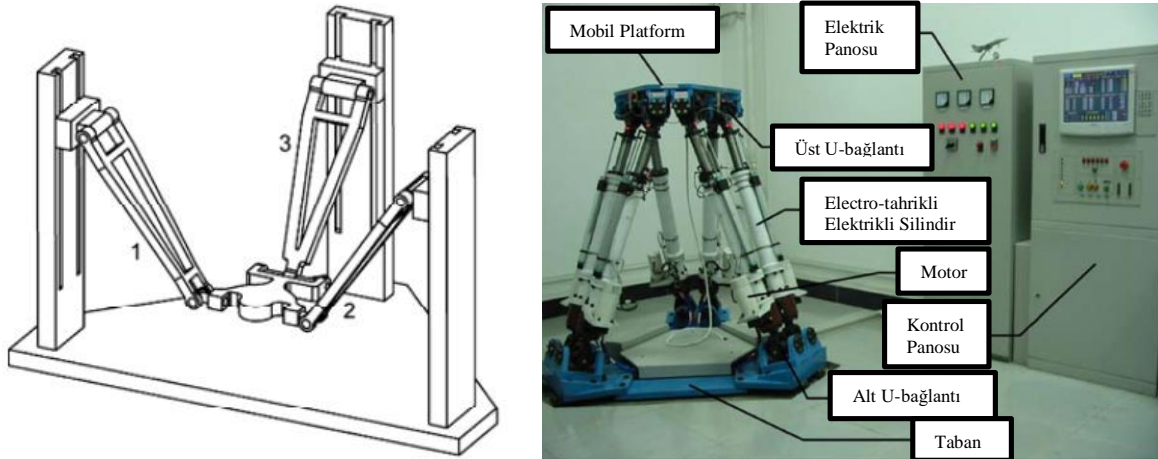
Şekil 1. Rİ yöntemi için (a) robot kol ve (b) hexapod robot kullanımı [1]

Ji ve Wang [5] yaptıkları derleme çalışmasında robotik kollar üzerine yapılan çalışmaları ülke bazında sıralamış, Almanya, Çin ve Fransa gibi ülkelerden araştırmacıların bu konuda öncülük ettiği belirtilmiş, aynı çalışma incelendiğinde Türkiye’de bu konuda (seri kinematik robotlar için) herhangi bir çalışma bulunmadığı gözlenmektedir. Türkiye’de Hexapod uygulanarak yapılan Rİ yöntemini inceleyen araştırmacı sayısı ise çok azdır. Bu çalışmada ise; Rİ yönteminde hassasiyetin ve üretim verimliliğinin artırılması için yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

2. ROBOTİK İŞLEME

2.1. Paralel Kinematik Robotik İşleme

Paralel kinematik robot (PKR) sistemlerinde gövdenin hareketi birbirine paralel olarak tabana yerleştirilmiş en az iki bağımsız kinematik bağ sayesinde gerçekleştirilir. PKR her kol kendi üzerine düşen yükü kaldırmakta böylece bu sistemler ağır yükler taşıyabilmektedir. Ancak düşük hareket alanı, karmaşık mekanik tasarım, kinematik denklem hesaplamaları ve kontrol algoritmaları PKR olumsuzluklarından öne çıkanlardır [2]. Şekil 2’de farklı kinematik bağ sayılarına sahip PKR gösterilmiştir.

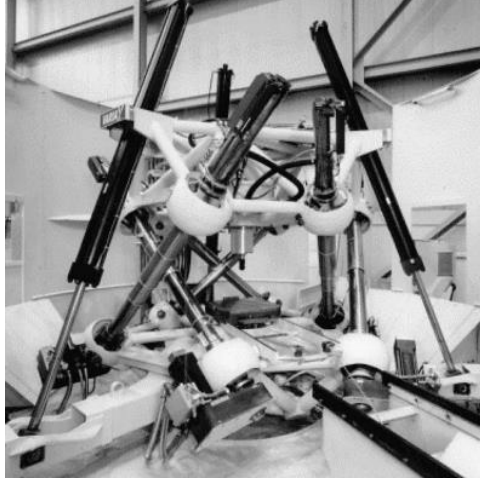


Şekil 2. Üç ve altı bağ yapısına sahip PKR örnekleri [3], [4]

Gelbart vd. [5] yaptıkları çalışmada 3 ve 5 eksenli CNC tezgahları ile bir paralel kinematik işleme tezgahı (PKİT) tipi olan Giddings ve Lewis Variax işleme merkezinin performanslarını bir ISO test parçası üzerinde yaptıkları deneyler ile karşılaştırmışlardır. Yüksek dayanıma sahip Variax işleme merkezinin sert malzemeler için diğer tezgahlara göre kullanılabilirliğinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışmada Variax işleme merkezinde hareket yörüngesinin

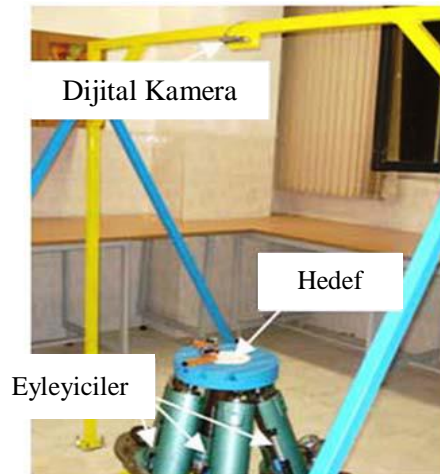
ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

karmaşık matematik modellemelere bağlı olduğu ve bu yüzden düz bir doğrultuda yapılan işlemin hassas bir şekilde gerçekleştirilemediği belirtilmiştir.



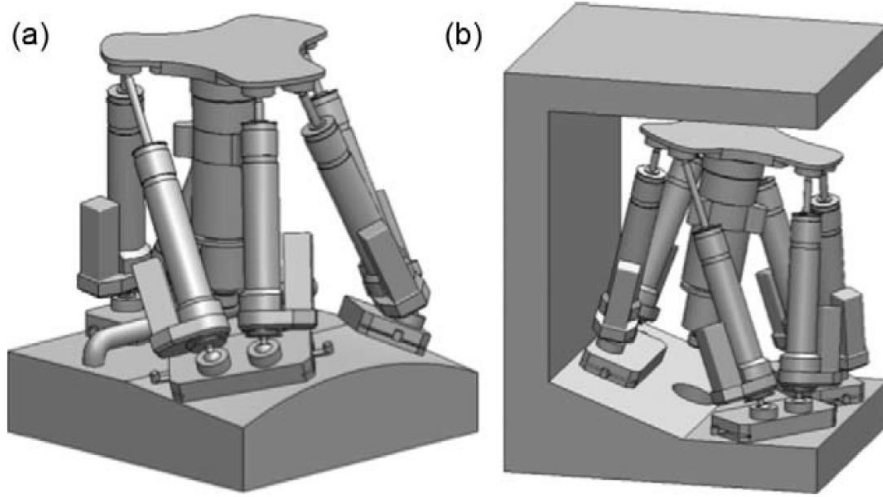
Şekil 3. Giddings ve Lewis Variax işleme merkezi [5]

Fu vd. [6] yaptıkları çalışmada PKR için yapı dikkate alındığında oluşan hataları üç başlık altında incelemişlerdir. Bunlar; i) Geometrik/kinematik hatalar, ii) Sıcaklığa bağlı hatalar, iii) Yerçekimine bağlı hatalar şeklinde sınıflandırılmıştır. PKR kollarındaki vidalı millerdeki ısınmanın, ısıl hatanın temel kaynağı olduğu belirtilmiş [7] ve sıcaklık değişiminin önüne geçilmeye çalışılmıştır [8]–[11]. Karmaşık geometriye sahip PKR için geometrik ve yerçekimi kaynaklı hatalar ise kalibrasyon ve kinematik modellemeler yapılarak engellenmeye çalışılmıştır. Song vd. [12] yaptıkları teorik çalışmada minimum kolineer dayanım katsayısı adında yeni bir boyutsuz mühendislik katsayısı geliştirmişler ve bir simülasyon programında seri, paralel ve tümleşik (hybrid) kinematik işleme sistemlerinde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Agheli ve Nategh [13] yaptıkları çalışmada PKR için gerekli kalibrasyonlama işlemleri için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmanın geliştirilmesi için tersine kinematik hata modeli uygulanmıştır. Fakat bu algoritmanın doğrulama işlemi gerçek çalışma ortamında değil simülasyon ortamında yapılmıştır. PKR kalibrasyonu için yapılan bir diğer çalışmada ise [14] tersine ve ileri kinematik modelleri uygulanarak bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ile HRİT simülasyonu yapılmış ve gürültü genişletme kriteri (Noise amplification criterion) yardımıyla yapılandırma şekilleri belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre algoritmanın doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda HR üzerinde tanımlanmış dört noktanın konumundaki boyutsal hatalar, robottan belirli bir yükseklikte olan bir kamera yardımıyla görüntü işleme yöntemi uygulanarak ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kalibrasyon işlemi sonunda hata oranının 0.1 mm altına indirilebildiği belirtilmiştir. Ayrıca PKİT hassas bir şekilde kalibrasyonun yapılabilmesi için lazer kontrolü [15], [16] ve genetik algoritma [17] gibi farklı yöntemler de geliştirilmiştir.



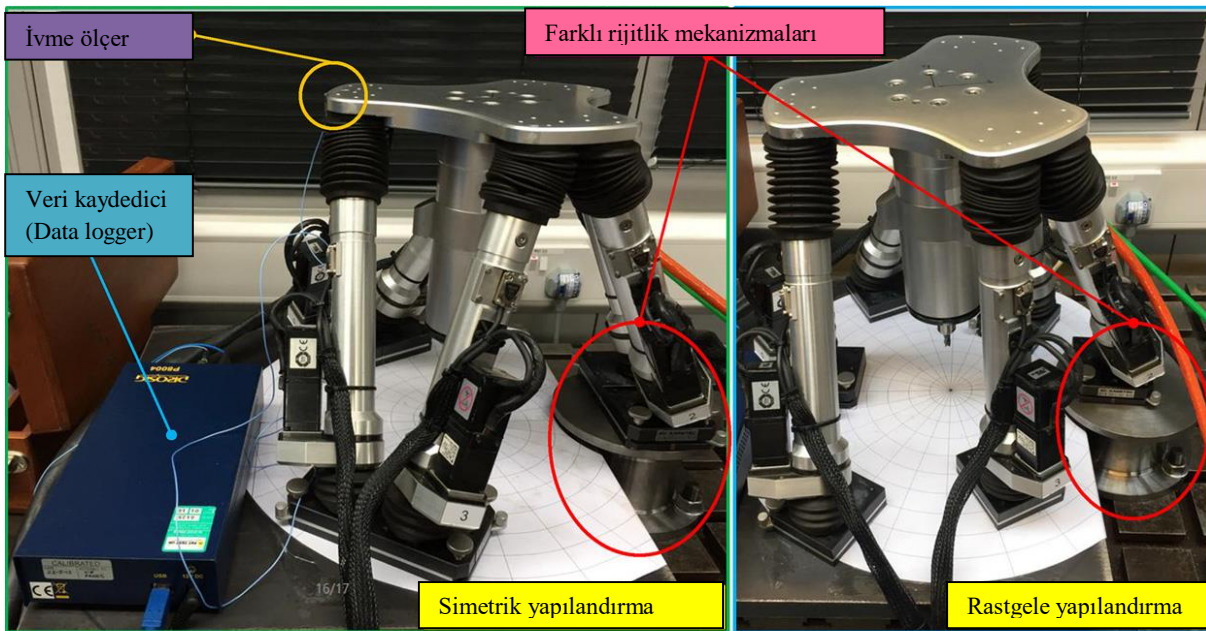
Şekil 4. Ölçüm için geliştirilmiş deney düzeneği [14]

Axinte vd. yaptıkları çalışmada [18] büyük iş parçalarının yerinde işlenmesi için FreeHex isiminde küçük boyutlarda bir PKR tasarlamışlardır. Geliştirilen bu sistem ile robotun bacakları birbirine bağlantılı olacak şekilde sadece düz bir yüzeye değil, birbirlerinden bağımsız şekilde kavisli ve eğimli yüzeylere de konumlandırılabilir. Robotun kalibrasyonu ise robot ayaklarında bulunan referans noktalarına göre belirlenmektedir. Geliştirilen robotun kavisli ve eğimli yüzeylerde konumlama örnekleri Şekil 5’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. FreeHex robotun (a) kavisli ve (b) eğimli yüzeylere konumlandırılması [18]

Ma vd. yaptıkları çalışmada [19] FreeHex robotun farklı rijitliklere sahip yüzeylere sabitlenmesi sonrasında oluşabilecek titreşimlerin tahmini için dinamik model geliştirmişlerdir. Bu modelde her bir bacakta ve üst bölgenin kinematik modelleri oluşturulmuş konum, hız ve ivme değerleri elde edilmiştir. Bu değer daha sonra serbest titreşim modeline uygulanmıştır. Bu denklemlerde yer alan eylemsizlik momenti ve kütle matrisi kinetik ve potansiyel enerji denklemlerinden elde edilmiştir. Geliştirilen model önce deneysel daha sonra simülasyon ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken robot Şekil 6’da görüldüğü gibi iki farklı yapılandırma yöntemi dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda geliştirilen modelin yüksek tutarlılık ile titreşim frekanslarını tahmin edebildiği belirtilmiştir.

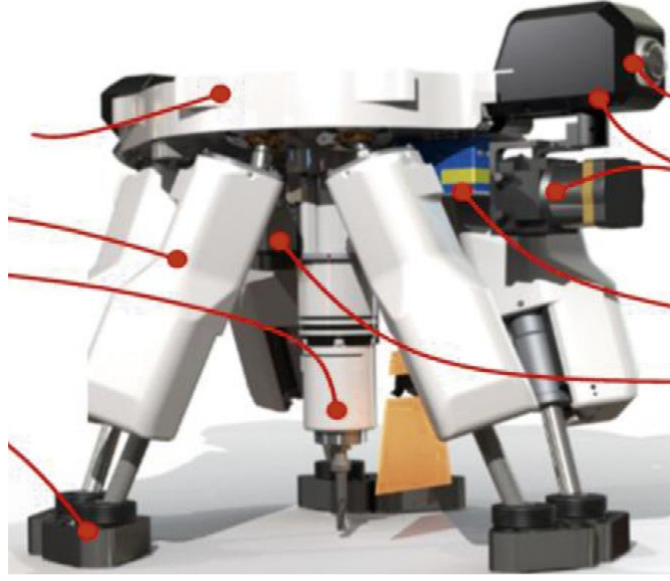


Şekil 6. FreeHex robot için farklı bacak yapılandırmaları [19].

ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

PKR düşük çalışma alanlarını arttırmak ve insanların müdahale edemeyeceği bölgelerde kullanılabilmesi için yürüme kabiliyeti olan bir robot Olarra vd. [20] tarafından tasarlanmıştır. Bu robot yönünü üzerinde bulunan kamera ve lazer sensörü yardımı ile yaparken, kalibrasyonunu ise bacaklarda bulunan 3 kamera yardımıyla, ayaklardaki referans noktalarına göre kendi kendine yapabilmektedir [21]. Robot yürüme hareketini eyleyiciler yardımı ile çelik kabloları çekerek yapmakta işleme bölgesine ulaştığında ise ayaklarda bulunan mıknatıslar yardımı ile konumunu sabitleyebilmektedir. Sabitlenme işlemi tamamlandıktan sonra G-kodları kullanılarak robot gövdesindeki fener mili ile iş parçası yüzeyi işlenebilmektedir. WalkingHex adlı bu robotun fotoğrafı

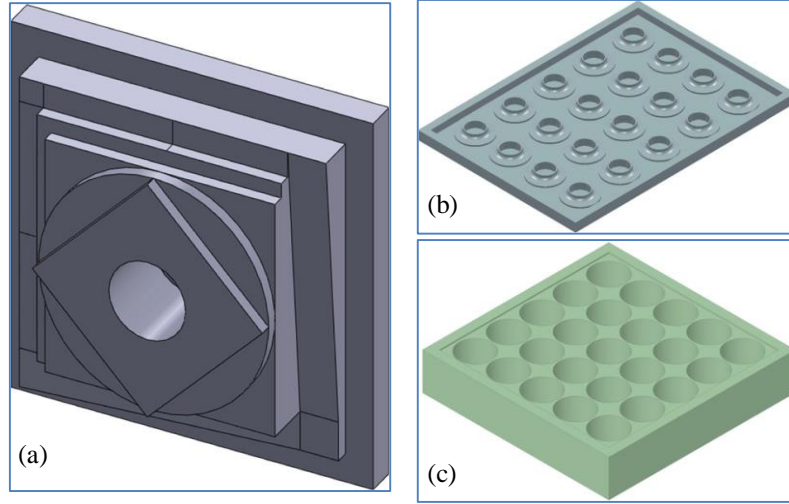
Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. WalkingHex robotu prototipi [20].

Ayrıca paslanmaz çelikten yapılmış bir termonükleer kabinin hassas bir şekilde tamiri (kaynak ve işlenebilmesi) için Wu vd. [22] bir 5 eksenli PKR geliştirmişlerdir. Bu robotta bacakların hareketini su basıncı yardımı ile pistonlardan almaktadır. Robotun pozisyonlama sırasında konumlanması tüm pistonlar için ± 0.01 mm altında gerçekleştirilmiştir. Robotun yüksek hassasiyeti hız, basınç gibi geri beslemeler kullanılarak yapılmıştır. Pessi vd. [23] ise bu PKR için vakum kabini içindeki taşıyıcı gövdeyi sonlu elemanlar yöntemini kullanarak uç işlevcisine 0-2000N arasında kuvvetler uygulamışlar ve robotun 0.09-0.12 mm arasında yer değiştirme yaptığını gözlemlemişlerdir. İşlem sırasında taşıyıcı ve piston uzunluklarının tespiti için tersine kinematik yöntemi uygulanmıştır.

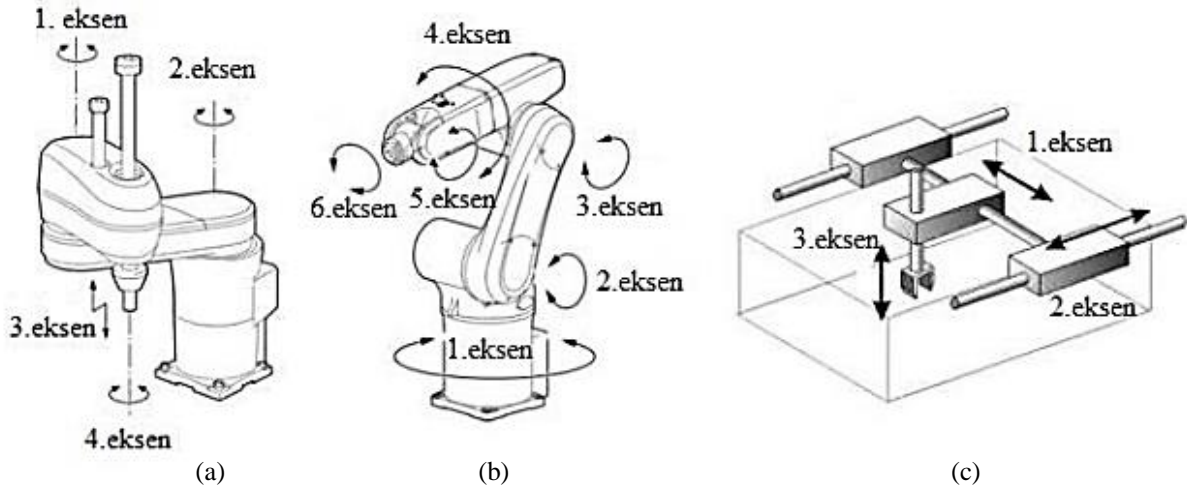
PKR ile işlem sonucunda elde edilen hassasiyetlerin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; radyal kesme derinliğinin takım çapının %50 altında olduğunda çapraz transfer fonksiyonunun tezgahın kararlılığının tahmininde öneminin arttığı tespit edilmiştir [24]. Ayrıca aynı çalışmada kararlılık diyagramları kullanılarak fener milinin hızı tespit edilebilmiş ve kararlı kesme derinliği ile birlikte üretim verimliliğinin artırılabilirdiği belirlenmiştir. 7075 tipte alüminyum için yapılan cep açma (pocket) işlemlerinde optimum takım ilerleme yönü (feed direction) ve takım ilerleme şablonu (tool pattern) seçerek PKR kararlılığının önemli derecede artırılabilirdiği gözlemlenmiştir [25]. Barnfather vd. [26] ise bir hexapod robotun üç farklı master kalıp kullanarak elde edebileceği tolerans değerlerini tespit etmişlerdir. Deneylerde takım tezgahı test mastarı, silindirik cep açma ve nozzle test mastarları kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda hata miktarının 400 μ m üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan master kalıpları Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Master kalıpları (a) takım tezgah (b) nozzle ve (c) silindirik cep açma [26].

3.2. Seri Kinematik Paralel Robotik İşleme

Seri kinematik robotlarda (SKR) her bir hareketlendiricisi birbiri ardına bağlanan ve her biri bağımsız olarak kontrol edilebilen sistemlerdir. SKR en büyük avantajı çalışma alanlarının PKR göre daha geniş olmasıdır. SKR günümüzde hemen hemen tüm sektörlerde kendilerine yer edinmişlerdir. Günümüzde kullanılan SKR kol-omuz mekanizmasına benzetilerek (Şekil 9 (b)) kinematik modeller basitleştirilmiş böylece görevlerin daha hızlı ve doğru bir şekilde yapılması sağlanmıştır. SKR günümüzde karşılaşılan en büyük dezavantajları; i) düşük dayanıma neden olan her uzuvdaki hareketlendirici ağırlığı ve tasarım problemleri ii) genel mukavemet problemleriyle meydana çıkan hataların sürekli olarak değerlendirilmesi zorunluluğudur [27].

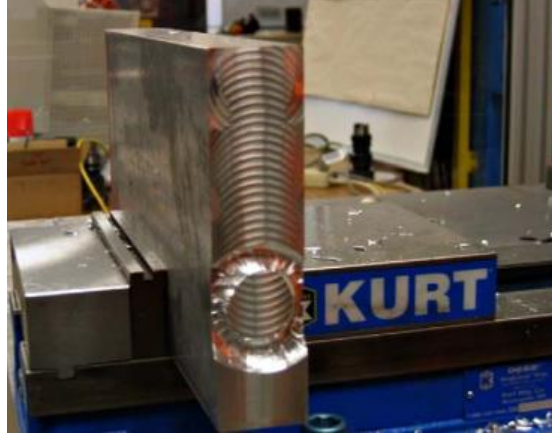


Şekil 9. SKR örnekleri (a) SCARA (b) 6 eksenli robot kol (c) 3 eksenli Kartezyen robot [27].

SKR da düşük dayanımından dolayı işlem sırasında en çok karşılaşılan problem tırlamalardır. Teknolojideki gelişmeler, daha önce geniş toleranslarla çalışılabilirken bu tolerans aralığının giderek kapanmasına doğal olarak üretim sistemlerinden beklentilerin de artmasına neden olmuştur. 2000'li yıllarda, son kırk yıla göre istenilen yüzey kalitesi 10 kat artırılarak $10\ \mu\text{m}$ 'ye kadar düşürülmüştür. Bu artan beklentileri karşılama zorunluluğu da üretim yöntemleri üzerinde farklı araştırmalar yapılmasını zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır [28]. İş parçasının istenilen hassasiyetlerde işlenememesinin nedenlerinden biri de tırlama (chatter) olayıdır. Birbirinden farklı özelliklerde iki cismin (kesici takım ve iş parçası) birbirine teması sonucunda uygun olmayan işlem parametrelerinde (takım işleme hızı, talaş derinliği, takım uzunluğu vs.) titreşimlerin oluşmasına neden olur. Bu tip titreşimlere tırlama (chatter) adı verilmekte olup malzeme, takım ve tezgah üzerinde kalıcı hasarlara neden olabilmektedir [29].

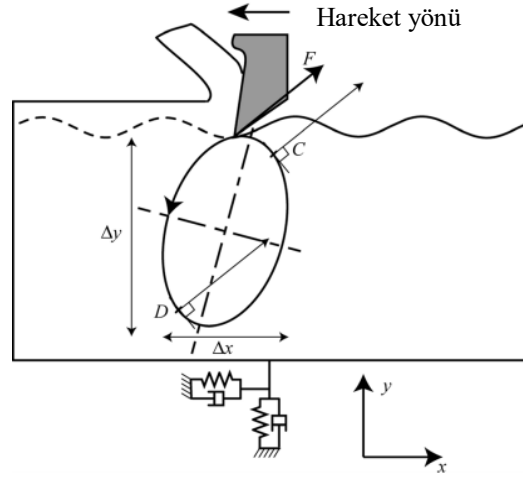
ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

CNC tezgahlarında tırlama olayı iş parçası ve takım arasındaki kuvvet dağılımları sonucunda gerçekleşirken, SKR tırlama bağlantı bölgelerinde oluşmaktadır [30], [31]. Şekil 10'da SKR ile işleme sonrasında tırlamadan dolayı gerçekleşen yüzey üzerindeki hatalar gösterilmiştir.



Şekil 10. Rİ yönteminde tırlamalardan dolayı oluşan yüzey üzerindeki hatalar [32]

SKR en sık karşılaşılan tırlama tipi olan bağlantı bölgelerindeki tırlamalar (Mode Coupling Chatter) ise sistemin serbestlik derecesi doğrultusunda farklı genlikler ve fazlar ile sistemin kütlesindeki titreşimlerin aynı anda oluşması ile gerçekleşir.



Şekil 11. 2 serbestlik derecesi için bağlantı bölgelerinde tırlama oluşumu [33].

Geniş çalışma alanı ve PKR göre daha basit kinematik modellerin uygulanması gibi avantajlarından dolayı SKR sistemlerin Rİ için adapte edilmesi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Fakat tırlamalara karşı düşük dayanım bu sistemlerin en büyük dezavantajı olarak dikkat çekmektedir. Literatürde kullanılan robotun dayanımını arttırmaya yönelik farklı çalışmalar (matematiksel modeller, takım güzergâhının manipülasyonu, görsel geri beslemeler vb.) bulunmakta ve bu uygulamaların çoğunda işlenmesi nispeten daha kolay olan alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Denkena vd. [34] bir robot kol için yaptıkları topoloji optimizasyonunda kaldıraç kol için ağırlık merkezi ve rulmanlara gelen kuvvet arasındaki mesafeyi azaltmışlar böylece SKR dayanımını %25 arttırmışlardır. Kaldestad vd. [35] frezeleme işleme sırasında robot kol üzerine gelen elastik deformasyonun yük altında iken tahmin, analiz ve engellenmesi üzerine bir model geliştirmişlerdir. Bununla birlikte kuvvet sensörleri kullanılarak SKR performansının artırılabilirdiği gözlemlenmiş [36]–[38] ve delik delme taşlama ve çapak alma gibi farklı işlemlerde uygulanmıştır [35]. Brunete vd. [39] geliştirdikleri bir SKR için süper alaşımlardan biri olan Inconel malzeme üzerine delikler delmişlerdir. Kuvvet ve tork verilerine bağlı geliştirilmiş algoritmalar [40], [41] kullanarak delik delme sırasında tırlamalardan dolayı oluşan ovalleşme problemini önemli ölçüde azaltmışlardır. Terrier vd. [42] SKR ve PKR ile serbest formlu yüzeylerin frezeleme yöntemi ile işlenmesini incelemişlerdir. İşlem hassasiyetinin artırılması için takımın planlanan takım yolundan normal doğrultuda ne kadar uzakta (contour error) hareket ettiğini tespit etmek için konum algılayıcıları ile NC

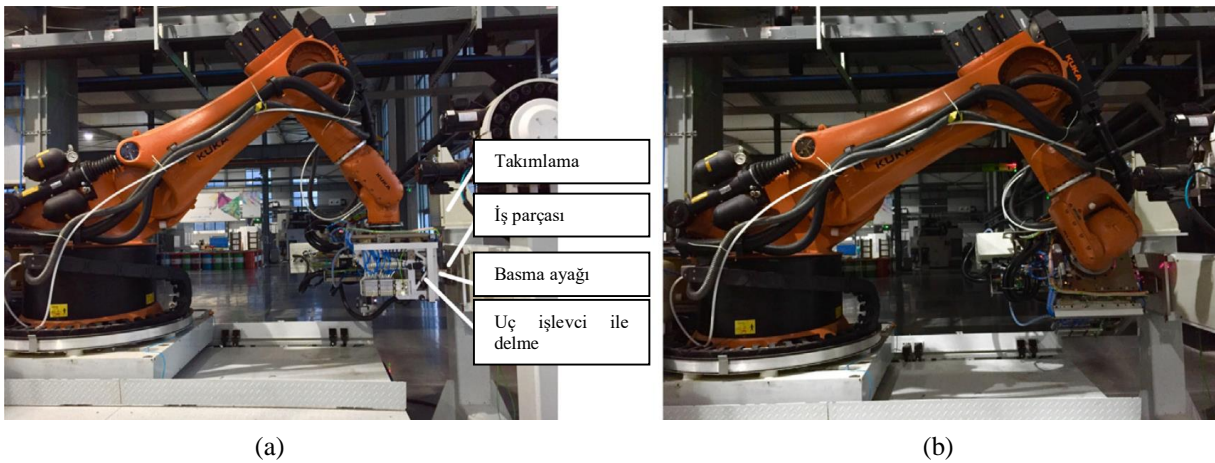
H. Demirtaş

kodlamalarını karşılaştırmışlardır. Sörnmo vd. [43] yaptıkları çalışmada iş parçasının hareketini bir robotik kol yardımı ile fener milinin hareketini ise mikro uyarıcılar (micro manipulator) yardımı ile gerçekleştirmiştir. Mikro uyarıcılar robot kol hareketini görsel sistemler ve motorlardaki frekans değişimine göre gerçekleştirerek işlem sırasında robot kolun konumlanma hatalarının önüne geçilmesi hedeflenmiş fakat frekans değişiminin anlık olduğu durumlarda mikro uyarıcılar devreye girememiş ve yüzeyde hata oluşumu engellenememiştir. Yapılan bir diğer çalışmada [44] SKR hareket hatalarının tahmini için çevrimiçi (online) bir model geliştirilmiştir. Bu model işlem sırasında fener miline gelen kuvvet ve robot kinematikleri dikkate alınarak geliştirilmiş olup alüminyum blok için yüzey hata miktarı önemli ölçüde azaltılmıştır.



Şekil 12. Kuvvet kontrollü SKR uygulaması [44]

Schindlbeck vd. [45] yaptıkları çalışmada kameralardan elde edilen görsel verileri geri besleme olarak kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde interferometre, mikro pozisyonlama ünitesi, kameralar ve piezoelektrik tipte mikro hareketlendiriciler (micro actuators) kullanılarak soğutma sıvısı kullanılmadan alüminyum malzeme üzerinde frezeleme işlemi yapılmıştır. Fakat daha sert malzemelerde takım ve iş parçasının zarar görmemesi için kullanılacak soğutma sıvıları kameraların çalışma veriminin azaltacak ve bu ise yöntemin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu vd. [46] is delik delme işlemi sırasında etki eden baskı ve toplam kesme kuvvetini dikkate alarak robot kolun dayanımı üzerine modelleme geliştirmişlerdir. Ayrıca robotun kuvvete dayanımının robot pozisyonu (robot posture) ile doğrudan ilgili olduğunu göstermişlerdir. Chen vd. [47] geliştirdikleri bir performans indeksini iki farklı robot başlangıç pozisyonu ve farklı takım ilerleme doğrultularındaki (feed orientation) kullanılabilirliğini incelemişler ve artan performans indeksleri ile işleme hata miktarlarının düştüğü belirtilmiştir.

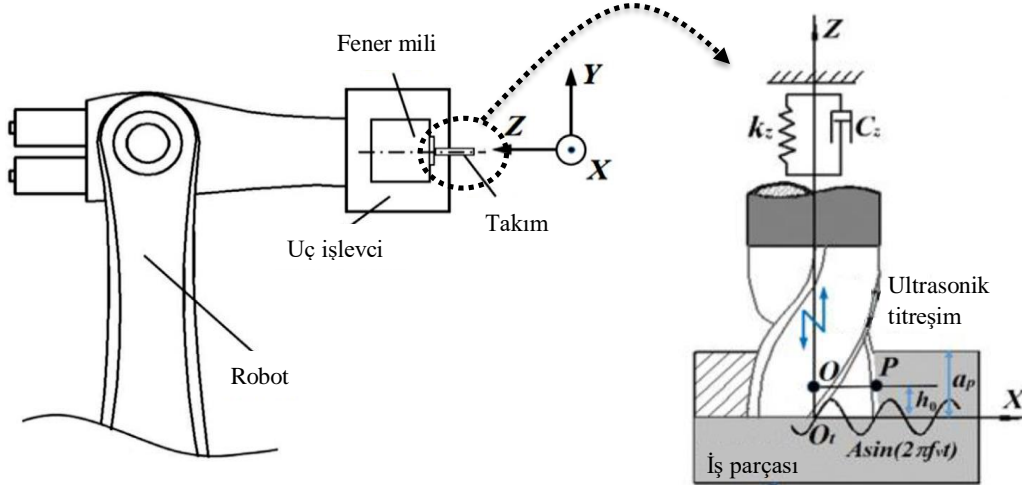


Şekil 13. Robotun delik delme pozisyonları (a) ilk pozisyonu ve (b) optimize edilmiş pozisyonu [46].

Robotun Inconel 718 alaşımını tutarak taşlandığı bir çalışmada [48] işlem sırasında oluşan ses sinyalleri yardımı ile aşındırıcıya hareketi veren kayışın aşınmasını tespit etmeyi hedeflemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise geliştirilen bir dinamik model yardımı ile tahmini kararlılık diyagramları oluşturulmuştur [49]. Böylece SKR için yüksek kesme hızlarında alüminyum, düşük kesme hızlarında ise titanyum alaşımlarındaki tırlama oluşumunu tespit etmeye çalışmışlardır. Fakat geliştirilen modeli

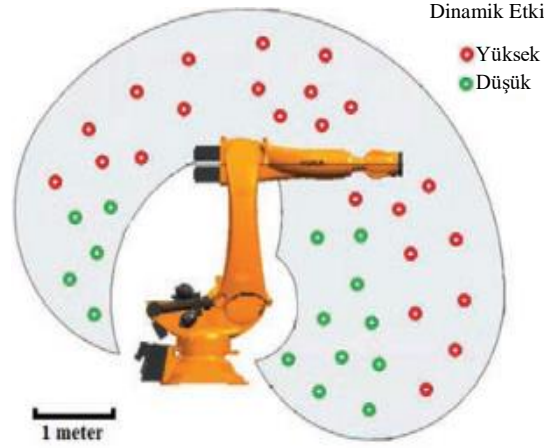
ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

titanyum alaşımlarında verimli bir şekilde uygulanamadığı gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise yarı aktif manyetoreolojik bir elastomer sönümleyici tasarlanmış ve robotik işleme sırasında oluşan tırlama miktarı azaltılmıştır [50]. Fakat yapılan çalışmalar belirli frekans aralıklarında yapılmış olup, kullanım alanının sınırlı olduğu düşünülmektedir. Sun vd. [51] yaptıkları çalışmada ise robotik ultrasonik frezeleme yöntemi için takımın ultrasonik titreşim yaptığı doğrultudaki hareketi dikkate alarak bir model geliştirmişlerdir. Bu model yardımı ile oluşturulan kararlılık diyagramlarında tırlama oluşumunu büyük oranda tahmin edebilmişler ayrıca sistemin kararlılığının önemli oranda artırıldığını tespit etmişlerdir.



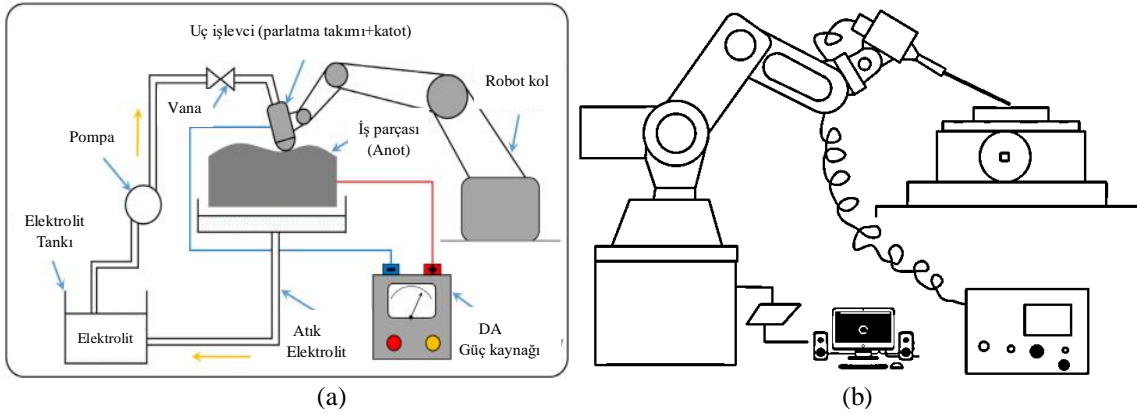
Şekil 14. Robotik ultrasonik frezeleme [51].

Liu ve He yaptıkları çalışmada [52] olasılıksal yöntem modelini uygulayarak tırlamaların tahmini üzerine çalışmışlardır. Sistemde oluşan tırlamaların kesme kuvveti ile diğer parametrelere göre daha çok ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada fener mili hızı, kesme derinliği, kesme hızı, takım boyu, yukarı-aşağı frezeleme ve iş parçası malzemesi gibi parametrelerin bağlantı bölgeleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [53]. Bu çalışmada ise fener mili hızı ve takım boyunun diğer değişkenlerden daha etkili olduğu belirtilmiştir. Mohammadi ve Ahmadi [54] yaptıkları çalışmada takım ucunda oluşan tekrarlanabilir kuvvetleri doğrusal olmadığını kabul ederek sıfır üstel tahmini (zero order approximation) yöntemini uygulayarak tahmini kararlılık diyagramlarını oluşturmuşlardır. Oluşturulan diyagramlar ile alüminyumun işlenebilmesi üzerine çalışmışlar ve yüksek fener mili hızlarında tutarlılığın %10 kadar artırılabilirdiği belirtilmiştir. Cen ve Melkote [55] yaptıkları çalışmada tırlama oluşumunda önemli bir rolü olan takıma gelen kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemi uygulayarak modellemişler ve robot dayanımı üzerindeki etkilerini tanımlamak için konservatif eşleşim dönüşümü (conservative congruence transformation (CCT)) yöntemini uygulamışlardır. Modelin uygunluğunun tespiti için robot dört farklı konumda farklı takım ilerleme hızları ve kesme derinliklerinde 12 farklı test koşuluna tabii tutulmuştur. Her test koşulunda CCT ile yapılan öteleme işleminin deneysel ve geliştirilen model ile elde edilen kuvvetler ile arasındaki farkı azalttığını dolayısıyla modelin kullanılabilirliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca her deney şartı için dinamik etkinin robot pozisyonu üzerindeki etkilerini simüle etmişlerdir. Bir test koşulu için oluşturulmuş dinamik etki büyüklükleri Şekil 15'te gösterilmiştir. CCT yönteminin uygulandığı bir diğer çalışmada [56] kesici takım eksen doğrultusunda gelen kuvvet dikkate alınarak yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir böylece takım doğrultusu ve iş parçasının yönlendirilmesine gerek kalmadan tırlamayı önemli ölçüde azalttıklarını belirtmişlerdir.



Şekil 15. CCT yöntemi uygulanarak bir deney koşulu için elde edilen dinamik etki büyüklükleri [55].

SKR için literatür incelediğinde çalışmaların çoğu Inconel 718, Ti6Al4V gibi süper alaşımlar ile karşılaştırıldığında nispeten CNC tezgahlarında işlenmesi daha kolay olan alüminyumun hassas bir şekilde işlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların genel amacı malzemenin işlenmesi sırasında fener miline gelen kuvvetler sonucunda robotun işleme yörüngesinden uzaklaşmasını önlemektir. Bu kapsamda; robot kolun yukarıdaki avantajlarından faydalanabilmek için işleme sırasında kuvvetlerin en aza indirgenmesi veya ortadan kaldırılması ile gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Literatür incelendiğinde ise temassız işleme tiplerinden elektroerezyon işleme (EDM) ve elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemlerinin, robotik kol ile birleştirilmiş çalışma sayısı ise çok azdır. Tespit edilen çalışmalar ise belirtilen işleme yöntemleri kullanarak yüzey parlatma performanslarının incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır [57], [58]. Şekil 16’ da EKİ ve EDM uygulanarak yapılan parlatma işleminin şematikleri gösterilmiştir.



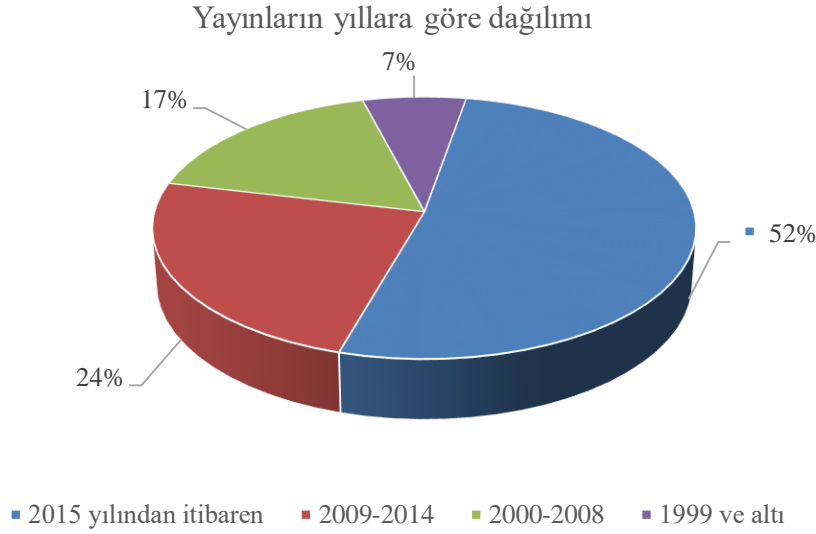
Şekil 16. Robot kol kullanılarak geliştirilen (a) EKİ [57] ve (b) EDM tezgahları [58].

3. SONUÇLAR

Günümüz endüstrisindeki hızlı gelişmeler ile birlikte üstün özellikli takım tezgahlarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda robotların kullanıldığı RİT üzerine son otuz yıldır yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. Bu çalışmada RİT kinematik model tipine göre iki başlık altında incelenmiştir. Yüksek dayanıma sahip PKR sistemler için pozisyonlama (kalibrasyon) ve düşük çalışma alanı, SKR sistemlerinde ise düşük dayanım ve buna bağlı tırlamaların önlenmesi için yapılan bazı çalışmalar bu derlemede sunulmuştur. SKR için tırlamaların önlenmesine yönelik çalışmalar dış kaynaklı kontrol sistemlerinin uygulanması (kuvvet sensörleri, lazer takip sistemleri vb.), tasarımsal geliştirmeler ve matematiksel modeller şeklinde sınıflandırılabilir. Özellikle işlem bölgesinde oluşan takım hareketi, kesme kuvveti ve robot dinamikleri üzerinde bazı kabuller yapılarak sistemin kararlılık tahmin diyagramları oluşturulmuştur. Böylece işlem sırasında tırlama oluşumunun

ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

engellenebilmesi hedeflenmiştir. Fakat yapılan çalışmaların çoğunun işlenmesi kolay olan alüminyum malzemeler üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Yürüyeblen veya taşınabilir (FreeHex, WalkingHex) sistemler tasarlanmış böylece çalışma yerinde işleme yapabilen PKR kullanım alanının artırılabilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tersine kinematik modeller veya ayaklara yerleştirilen referans noktalarının kameralar yardımı ile de konumlandırma (kalibrasyon) problemlerinin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Genel olarak incelendiğinde PKR için en çok kullanılan robot tipinin altı bağ yapıllı hexapodlar olduğu gözlemlenmiştir. Fakat Rİ uygulamalarında SKR türünün yüksek hareket kabiliyetleri ve daha basit kinematik modelleme yapısına sahip olmalarından dolayı inceleme sahasının PKR göre daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden SKR'ın endüstride günümüz şartlarında kullanımı için daha fazla çalışma yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte tırlamaların önlenmesi için temassız işleme yöntemlerinin (EDM, EKİ gibi) robot kollara adaptasyonu son yıllarda uygulanmaya başlanmış böylece robotlar kullanılarak farklı tümleşik sistemlerin oluşturulabileceği ön görülmektedir. Ayrıca bu derleme çalışması incelendiğinde Rİ için yapılan çalışmaların gün geçtikçe arttığı ve gelişiminin devam ettiği gözlemlenmektedir.



Şekil 17. İncelenmiş olan çalışmaların yıllara göre dağılımı

KAYNAKLAR

- [1] S. Zivanovic, N. Slavkovic, and D. Milutinovic, "An approach for applying STEP-NC in robot machining," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 49, no. July 2016, pp. 361–373, 2018.
- [2] C. Sunguray, S. Urgan, H. Demirtas, and S. Gungor, "Design, Modelling And Simulation Of Position Controlled 6x6 Degree Of Freedom Stewart Platform," *SDÜ Int. Technol. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 49–61, 2014.
- [3] F. Xie, X. Liu, H. Zhang, and J. Wang, "Design and experimental study of the SPKM165, a five-axis serial-parallel kinematic milling machine," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 1193–1205, 2011.
- [4] X. D. Ren, Z. R. Feng, and C. P. Su, "A new calibration method for parallel kinematics machine tools using orientation constraint," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, pp. 708–721, 2009.
- [5] M. Geldart, P. Webb, H. Larsson, M. Backstrom, N. Gindy, and K. Rask, "A direct comparison of the machining performance of a variax 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, pp. 1107–1116, 2003.
- [6] R. Fu, Y. Jin, L. Yang, D. Sun, A. Murphy, and C. Higgins, "Review on Structure-Based Errors of Parallel Kinematic Machines in Comparison with Traditional NC Machines," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 923, pp. 249–256, 2018.
- [7] A. J. Wavering, "Parallel kinematic machine research at NIST: past, present, and future," *Adv. Manuf.*, pp. 17–31, 1999.
- [8] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, pp. 1235–1256, 2000.
- [9] R. G. Landers, B. M., and Y. Koren, "Reconfigurable Machine Tools," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 269–274, 2001.
- [10] Y. Pan and F. Gao, "A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 4, pp. 753–764, May 2013.

- [11] J. A. Soons, "Error analysis of a hexapod machine tool," *Trans. Eng. Sci.*, vol. 16, pp. 347–358, 1997.
- [12] Y. Shneur and V. T. Portman, "Stiffness of 5-axis machines with serial, parallel, and hybrid kinematics: Evaluation and comparison," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 59, pp. 409–412, 2010.
- [13] M. Agheli and M. Nategh, "Identifying the kinematic parameters of hexapod machine tool," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 392–397, 2009.
- [14] M. J. Nategh and M. M. Agheli, "A total solution to kinematic calibration of hexapod machine tools with a minimum number of measurement configurations and superior accuracies," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 15, pp. 1155–1164, 2009.
- [15] T. Li, F. Li, Y. Jiang, J. Zhang, and H. Wang, "Kinematic calibration of a 3-P(Pa)S parallel-type spindle head considering the thermal error," *Mechatronics*, vol. 43, pp. 86–98, 2017.
- [16] T. Sun, Y. Zhai, Y. Song, and J. Zhang, "Kinematic calibration of a 3-DoF rotational parallel manipulator using laser tracker," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 41, pp. 78–91, 2016.
- [17] C. Fan, G. Zhao, J. Zhao, L. Zhang, and L. Sun, "Calibration of a parallel mechanism in a serial-parallel polishing machine tool based on genetic algorithm," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, pp. 27–37, 2015.
- [18] D. A. Axinte, J. M. Allen, R. Anderson, I. Dane, L. Uriarte, and A. Olara, "Free-leg Hexapod: A novel approach of using parallel kinematic platforms for developing miniature machine tools for special purpose operations," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, pp. 395–398, 2011.
- [19] N. Ma *et al.*, "Parametric vibration analysis and validation for a novel portable hexapod machine tool attached to surfaces with unequal stiffness," *J. Manuf. Process.*, vol. 47, no. October, pp. 192–201, 2019.
- [20] A. Olarra, D. Axinte, L. Uriarte, and R. Bueno, "Machining with the WalkingHex: A walking parallel kinematic machine tool for in situ operations," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 1, pp. 361–364, 2017.
- [21] A. Olarra, D. Axinte, and G. Kortaberria, "Geometrical calibration and uncertainty estimation methodology for a novel self-propelled miniature robotic machine tool," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 49, no. July 2017, pp. 204–214, 2018.
- [22] H. Wu, H. Handroos, P. Pessi, J. Kilkki, and L. Jones, "Development and control towards a parallel water hydraulic weld/cut robot for machining processes in ITER vacuum vessel," *Fusion Eng. Des.*, vol. 75–79, no. SUPPL., pp. 625–631, 2005.
- [23] P. Pessi, H. Wu, H. Handroos, and L. Jones, "A mobile robot with parallel kinematics to meet the requirements for assembling and machining the ITER vacuum vessel," *Fusion Eng. Des.*, vol. 82, no. 15–24, pp. 2047–2054, 2007.
- [24] L. T. Tunc and J. Shaw, "Investigation of the effects of Stewart platform-type industrial robot on stability of robotic milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 1–4, pp. 189–199, 2016.
- [25] L. T. Tunc and D. Stoddart, "Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 9–12, pp. 2907–2918, 2017.
- [26] J. D. Barnfather, M. J. Goodfellow, and T. Abram, "Achievable tolerances in robotic feature machining operations using a low-cost hexapod," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, no. 1–4, pp. 1421–1436, 2018.
- [27] E. Uguroglu, "6 Serbestlik Dereceli Rotasyonel Stewart Platformu Tasarımı Ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümlerinde Eğitim Sensörü İle Konum Kontrolü," İstanbul Technical University, 2015.
- [28] F. Gok, "The Analysis of the Effect of Cutting Tools Material to Chatter Vibrations in Turning Operations," Eskisehir Osmangazi University, 2015.
- [29] S. Neseli and S. Yaldiz, "The Effects of Approach Angle and Rake Angle Due to Chatter Vibrations on Surface Roughness in Turning," *J. Polytech.*, vol. 10, no. 4, pp. 383–389, 2007.
- [30] S. A. Tobias and W. Fishwick, "The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions," *Trans. ASME*, vol. 80, pp. 1079–1088, 1958.
- [31] J. Tlustý and M. Poláček, "The stability of machine tools against self excited vibrations in machining," *Int. Res. Prod. Eng., ASME*, pp. 465–474, 1963.
- [32] W. Pan, H. Zhang, Z. Zhu, and J. Wang, "Chatter analysis of robotic machining process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 173, pp. 301–309, 2006.
- [33] S. Seguy, L. Arnaud, and T. Insperger, "Chatter in interrupted turning with geometrical defects: an industrial case study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 75, no. 1–4, pp. 45–56, 2014.
- [34] B. Denkena, B. Bergmann, and T. Lepper, "Design and optimization of a machining robot," *Procedia Manuf.*, vol. 14, pp. 89–96, 2017.
- [35] K. B. Kaldestad, I. Tyapin, and G. Hovland, "Robotic face milling path correction and vibration reduction," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2015, pp. 543–548.
- [36] J. Radojčić, D. Surdilović, and G. Schreck, "Modular Hybrid Robots for Safe Human-Robot Interaction," *Int. J. World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 12, pp. 1601–1607, 2009.
- [37] D. Surdilović, R. Bernhardt, and L. Zhang, "New intelligent power-assist systems based on differential transmission," *Robotica*, vol. 21, no. 3, pp. 295–302, Jun. 2003.

ROBOTİK İŞLEME YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR DERLEME

- [38] I. Tyapin, G. Hovland, P. Kosonen, and T. Linna, "Identification of a static tool force model for robotic face milling," in *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 2014, pp. 1–6.
- [39] A. Brunete *et al.*, "Hard material small-batch industrial machining robot," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 54, no. March 2017, pp. 185–199, 2018.
- [40] M. Vukobratovic, *Dynamics and robust control of robot-environment interaction*, vol. 2. Singapore: World Scientific, 2009.
- [41] J. M. Ahola, J. Koskinen, T. Seppälä, and T. Heikkilä, "Development of Impedance Control for Human/Robot Interactive Handling of Heavy Parts and Loads," in *ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 9: 2015 ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, 2015.
- [42] M. Terrier, A. Dugas, and J. Y. Hascoët, "Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, pp. 865–877, 2004.
- [43] O. Sornmo, B. Olofsson, U. Schneider, A. Robertsson, and R. Johansson, "Increasing the milling accuracy for industrial robots using a piezo-actuated high-dynamic micro manipulator," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2012, pp. 104–110.
- [44] Z. P. Z. Pan and H. Z. H. Zhang, "Improving robotic machining accuracy by real-time compensation," in *2009 Iccas-Sice International Joint Conference*, 2009, pp. 4289–4294.
- [45] C. Schindlbeck, A. Janz, C. Pape, and E. Reithmeier, "Increasing milling precision for macro-micro-manipulators with disturbance rejection control via visual feedback," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2017, vol. 2017-Sept, pp. 4686–4693.
- [46] Y. Bu, W. Liao, W. Tian, J. Zhang, and L. Zhang, "Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application," *Precis. Eng.*, vol. 49, pp. 388–400, 2017.
- [47] C. Chen *et al.*, "Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 55, pp. 29–40, 2019.
- [48] X. Zhang, H. Chen, J. Xu, X. Song, J. Wang, and X. Chen, "A novel sound-based belt condition monitoring method for robotic grinding using optimally pruned extreme learning machine," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 260, pp. 9–19, 2018.
- [49] M. Cordes, W. Hintze, and Y. Altintas, "Chatter stability in robotic milling," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 55, pp. 11–18, 2019.
- [50] L. Yuan, S. Sun, Z. Pan, D. Ding, O. Gienke, and W. Li, "Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 117, pp. 221–237, 2019.
- [51] L. Sun, K. Zheng, W. Liao, J. Liu, J. Feng, and S. Dong, "Investigation on chatter stability of robotic rotary ultrasonic milling," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 63, p. 101911, 2020.
- [52] Y. Liu and F. He, "Study on the chatter stability of robotic milling based on the probability method," *J. Northeast. Univ.*, vol. 40, pp. 683–687, 2019.
- [53] Y. Liu and F. He, "Research on the influencing factors of robot milling stability," *J. Northeast. Univ.*, vol. 40, pp. 991–996, 2019.
- [54] Y. Mohammadi and K. Ahmadi, "Effect of axial vibrations on regenerative chatter in robotic milling," *Procedia CIRP*, vol. 82, pp. 503–508, 2019.
- [55] L. Cen and S. N. Melkote, "Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling," in *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 486–496.
- [56] L. Cen and S. N. Melkote, "CCT-based mode coupling chatter avoidance in robotic milling," *J. Manuf. Process.*, vol. 29, pp. 50–61, 2017.
- [57] A. E. K. Mohammad, J. Hong, D. Wang, and Y. Guan, "Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 55, no. July 2018, pp. 65–75, 2019.
- [58] J. M. Zhan, J. Zhao, S. X. Xu, and P. X. Zhu, "Study of the contact force in free-form-surfaces compliant EDM polishing by robot," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 129, pp. 186–189, 2002.





POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ

Ersoy Fatih ERDURCAN^{1,*}, Yusuf CUNEDİOĞLU²

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 51240, Niğde Türkiye
²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada çekirdek tabakası alüminyum ve yüzeyleri porosite ihtiva eden fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) ile kaplı simetrik yapıda ankastre sandviç bir kirişin serbest titreşim analizi incelenmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğu kirişin tabaka kalınlığı boyunca bir polinom fonksiyonla değiştiği kabul edilmiştir. FDM'yi gerçeğe yakın bir şekilde temsil etmek için kaplama kalınlığının 25 tabakadan oluştuğu ve her bir tabaka kendi içinde homojen izotrop olarak modellenmiştir. Bu yapılara ait efektif yoğunluk ve elastisite modülü tabakalı kompozit kiriş teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada birinci mertbe kayma deformasyonu içeren Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak problemin çözümü sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilmiştir. Kirişin doğal frekanslarının hesaplanması için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılmıştır. Çalışmada porosite hacim oranının (a), çekirdek tabaka kalınlığının FDM kalınlık oranına (h/H), kiriş açıklığının yüksekliğine oranının (L/H) ve FDM'nin mekanik özelliklerini belirleyen polinom parametresinin (n) doğal frekansların üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen parametrelerin kirişin doğal frekanslarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Serbest titreşim, Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, Porosite, Sonlu elemanlar metodu.

INVESTIGATION OF THE FREE VIBRATION OF AN ALUMINUM BEAM COATED WITH FGM CONTAINING POROSITIES

ABSTRACT

In this study, the free vibration analysis of an aluminum beam coated with functionally graded material (FGM) containing porosities was investigated. The modulus of elasticity and density of the functionally graded material is assumed to vary with a polynomial function along the layer thickness of the beam. In order to represent the FGM in a realistic way, the coating thickness consists of 25 layers and each layer is modeled as homogeneous isotropic in itself. The effective density and modulus of elasticity of the FGM is determined using classical lamination theory. In this study, the solution of the problem was realized by using the finite element method using Timoshenko beam theory which includes first order shear deformation. The FEM code is written in MATLAB and the natural frequencies of the beam are calculated. A parametric study is conducted to show the influences of porosity (a), core thickness to FGM thickness ratio (h/H), beam span to height ratio (L/H) and power law index (n) on the natural beam frequencies. It was observed that the studied parameters had a significant effect on the natural frequencies.

Keywords: Free vibration, Functionally graded material, Porosity, Finite element method.

1. GİRİŞ

Kompozit, farklı malzemelerin öne çıkan özelliklerini tek bir malzemede toplama çabasıyla ortaya çıkan yapılardır. Kompozit malzemeler homojen malzemelere göre hafiflik, rijitlik ve yüksek mukavemetleri ile üstün oldukları için tercih edilirler. Maliyetlerinden dolayı geçmişte sadece özel uygulamalarda kullanılmışlarsa da üretim teknolojisi gelişip malzeme ucuzladıkça kompozitlerin günlük kullanıma da taşındığı gözlemlenmektedir. Yeni nesil elektrikli araçlarda ve yolcu uçaklarında yapının en az %50'si kompozitten oluşması bariz örneklerdendir.

Farklı tabakalardan oluşan kompozitlerde, kullanım esnasında tabakalar arasında yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Örneğin yüksek sıcaklığa maruz kalan bir metal, seramik ile kaplandığında bu metal bu sıcaklığa karşı dayanabilmektedir ama tabakalar arasında yüksek gerilmelere, çatlaklara ve ayrışmalara (delaminasyon) neden olmaktadır. Metal ve seramik malzeme

*Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: fatih.erdurcan@gmail.com

Geliş / Received: 12.12.2019 Kabul / Accepted: 05.07.2020 doi: 10.28948/ngmuh.658473

E. F. Erdurcan, Y. Cunedioğlu

özelliklerinin farklı olması ve tabakalarda ani özellik değişimi buna yol açmaktadır. Bu problemi bertaraf etmek için bir grup Japon bilim adamı 1984'te termal bariyer tasarımı sırasında FDM fikrini ortaya koymuştur. FDM bir yüzeyi metal, diğer yüzeyi seramik ve iki yüzey arası bu iki malzemenin karışımından oluşan tabakalardan oluşturulur. Tabakalar arası malzeme özelliklerinin değişimi matematiksel bir fonksiyonla tanımlandığı için tabakalar arası malzeme özelliklerin birbirine yakın olması nedeniyle tabakalar arası ayrışma sorunu önemli derecede azalmış olur. Bu şekilde tasarlanmış yeni bir malzeme olan FDM'nin dinamik davranışlarının tasarım yaparken önceden bilinmesi önem arz etmektedir. Örneğin dinamik (değişken) kuvvetlere maruz kalan bir yapıda en önemli unsurlardan biri sistemin doğal frekanslarıdır. Doğal frekanslar doğru belirlenmediği takdirde dinamik kuvvetlerin etkisinde sistem rezonansa yakalanırsa, yapının ani ve beklenmedik hasar görmesi kaçınılmaz bir durumdur.

Literatürde homojen ve izotrop malzemeli kirişlerin dinamik ve serbest titreşimleri etraflıca araştırılmıştır. FDM kirişlerinin dinamik ve serbest titreşimini araştıran birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Demir [1] fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin dinamik karakteristiklerini incelemiştir. Bu deneysel çalışmada sinterleme teknikleri ile üç farklı kiriş üretilip, serbest titreşim deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarını ticari bir sonlu eleman analizi programıyla teyit etmiştir. Rajasekaran ve ark. [2] çift yöne fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin dinamik karakteristiklerini incelemişler. Bu çalışmada, malzeme özelliklerinin dağılımı uzunluk ve kalınlık boyunca üstel bir (n) kuvvet parametrelili fonksiyonlarla tanımlanmıştır. Euler Bernoulli kiriş teorisi kabulüne dayanarak virtüel iş prensibiyle çalışmanın formülasyonu yapılmıştır. Benzeri bir çalışmayı Wang ve ark. [3] malzeme özelliklerinin dağılımı uzunluk ve kalınlık boyunca exponansiyel fonksiyonlarla tanımlanarak yapmışlardır. Al Rjoub ve ark. [4] yapısı gözenekli (porositeli) olan fonksiyonel derecelendirilmiş bir kirişin dinamik karakteristiklerini incelemişlerdir. Dört farklı sınır şartı kullanarak çözümleri Euler Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorisi kabulüne dayanarak matris transfer metodu ile çözmüşlerdir. Mohcine ve ark. [5] porositeli bir FDM kirişe çatlak da ekleyerek simetrik olmayan bir kirişin dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Bouakkaz ve ark. [6] sandviç yapıli FDM kirişlerin serbest titreşimi için analitik bir çözüm bulmuşlardır. Kirişin iç kısmı homojen ve izotropik malzemeden, dış tabakaları da FD malzemeden yapılmıştır. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca bir kuvvet parametrelili fonksiyonla tanımlanmıştır. Kayma gerilme dağılımı için hiperbolik deformasyon kiriş teorisini kullanıp, diferansiyel denklemleri Hamilton prensibiyle bulup Navier yöntemiyle çözmüşlerdir. Su ve ark. [7] elastik zemine oturan FDM kirişler için genel bir Fourier serisi çözümü üretmişlerdir. Bu çözümün her türlü sınır şartlarına uyması çözümün özelliklerindedir. Kirişin iç kısmı homojen ve izotropik, dış kısımları FDM ve bunun tam tersi olan kirişler incelenmiştir. Soltanpour ve ark. [8] elastik zemine oturan çatlaklı bir FDM nanokirişin serbest titreşimini incelemişlerdir. Timoshenko kiriş teorisini kullanarak diferansiyel denklemleri Hamilton prensibiyle üretmişlerdir. Akbaş [9] çatlaklı bir FDM mikro kirişin serbest titreşimini değiştirilmiş stres teorisi (modified couple stress theory) ve klasik kiriş teorisine incelemiştir. Malzeme dağılımı kalınlık boyunca exponansiyel bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Van Lien ve ark. [10] birden çok çatlak ihtiva eden ve simetrik olmayan FDM kirişin serbest titreşimini farklı sınır şartları için araştırmıştır. Çalışmada Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Shabani ve ark. [11] kesiti uzunluk boyunca değişken kesitli çatlaklı kirişlerin serbest titreşim analizini Timoshenko kiriş teorisine incelemişlerdir.

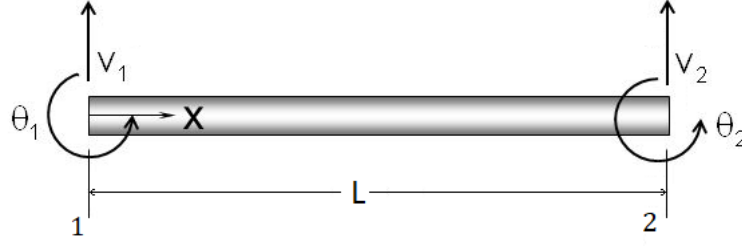
Bu çalışmada çekirdek tabakası izotrop alüminyum ve kaplama tabakası porositeli FDM'den yapılmış ankastre kirişin Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak serbest titreşim analizi incelenmiştir. Kaplama malzemesinin elastisite modülü ve yoğunluğu kalınlık boyunca bir polinom fonksiyon ile değiştiği kabul edilmiştir. Kirişin doğal frekanslarının hesaplanması için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılmıştır. Literatürde sandviç yapıda çekirdeği izotrop yüzey kaplaması FDM'den yapılmış kirişlerin serbest titreşimi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca klasik laminasyon teorisi yaklaşımıyla bir inceleme yapılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmayla literatürdeki bu boşluk doldurulmuş olacaktır. Bu çalışmada laminasyon teorisi yaklaşımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada porositenin, çekirdek tabaka kalınlığının FDM kalınlık oranına (h/H), kiriş açıklığının yüksekliğine oranının (L/H) ve FDM'nin mekanik özelliklerini belirleyen polinom parametresinin (n) doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen parametrelerin kirişin doğal frekanslarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kirişin Sonlu Elemanlar Modellemesi

Kayma deformasyonunu etkisini dikkate alan Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Şekil 1'den görüleceği üzere kirişin her iki düğümü düşey yer değiştirme ve dönme serbestlik derecelerine sahiptir.

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ



Şekil 1. Kiriş serbestlik dereceleri

Rijitlik ve kütle matrisleri analitik olarak [14] verilmektedir.

$$[K_1] = \frac{EI_z}{2a^3(1+3\beta)} \begin{bmatrix} 3 & 3a & -3 & 3a \\ 3a & (4+3\beta)a^2 & -3a & (2-3\beta)a^2 \\ -3 & -3a & 3 & -3a \\ 3a & (2-3\beta)a^2 & -3a & (4+3\beta)a^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[M_1] = \frac{\rho A a}{210(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_2 & m_5 & -m_4 & m_6 \\ m_3 & -m_4 & m_1 & -m_2 \\ m_4 & m_6 & -m_2 & m_5 \end{bmatrix} + \frac{\rho I_z}{30a(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_7 & m_8 & -m_7 & m_8 \\ m_8 & m_9 & -m_8 & m_{10} \\ -m_7 & -m_8 & m_7 & -m_8 \\ m_8 & m_{10} & -m_8 & m_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada a kiriş uzunluğunun yarısı, E elastik modülünü, A kiriş kesit alanını ve I alan atalet momentini ifade etmektedir [14].

$$\beta = \frac{EI_z}{\kappa A G a^2} \quad (3)$$

Burada β kayma deformasyon faktörü, G kayma modülü ve (2) no'lu denklemdeki kütle matrisinin ifadeleri aşağıdaki gibidir [14];

$$\begin{aligned} m_1 &= 156 + 882\beta + 1260\beta^2 & m_2 &= (44 + 231\beta + 315\beta^2)a & m_3 &= 54 + 378\beta + 630\beta^2 \\ m_4 &= (-26 - 189\beta - 315\beta^2)a & m_5 &= (16 + 84\beta + 126\beta^2)a^2 & m_6 &= (-12 - 84\beta - 126\beta^2)a \\ m_7 &= 18 & m_8 &= (3 - 45\beta)a & m_9 &= (8 + 30\beta + 180\beta^2)a^2 & m_{10} &= (-2 - 30\beta + 90\beta^2)a \end{aligned} \quad (4)$$

Eksenel olarak yüklenen kiriş elemanların rijitlik ve kütle matrisleri ise aşağıdaki denklemlerle belirtilmiştir [14];

$$[K_2] = \frac{EA}{a} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \\ -1 & 1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix} \quad [M_2] = \rho A a \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 3 \\ 1 & 2 \\ 3 & 3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Çözümün doğruluğunu artırmak için kiriş elemanın her düğümü üç serbestlik derecesine sahiptir. Bunun için serbestlik derecesine göre rijitlik ve kütle matrisleri birleştirilirse nihai ifadeler aşağıdaki gibi olur [11];

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ

$$\rho(y) = (\rho_c - \rho_m) \left(y + \frac{1}{2} \right)^n + \rho_m - \frac{a}{2} (\rho_c + \rho_m) \quad E(y) = (E_c - E_m) \left(y + \frac{1}{2} \right)^n + E_m - \frac{a}{2} (E_c + E_m) \quad (10)$$

Burada ρ_c seramiğin, ρ_m metalin yoğunluğunu, E_c seramiğin, E_m metalin elastisite modülünü, a porosite hacim oranını, y koordinat eksenini ve n polinom derecesini ifade etmektedir. y değişkeni aşağıda ifade edilen değerler ile verilmektedir;

$$y = -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} + \frac{1}{\eta}, -\frac{1}{2} + \frac{2}{\eta}, \dots, \frac{1}{2} \quad \text{ve} \quad \eta = \left(\frac{N}{2} \right) - 1 \quad (11)$$

Kiriş tarafsız eksene göre simetrik olup, kirişe ait boyutlar L kiriş uzunluğunu, H kiriş kalınlığını, h çekirdek tabaka kalınlığını, b genişliği ve N tabaka sayısını temsil etmektedir. Kirişin yoğunluğunu ve elastisite modülünü elde etmek için klasik laminasyon teorisi kullanılarak, efektif yoğunluk ve elastisite aşağıdaki ifadelerle hesaplanmaktadır [16].

$$\rho_{ef} = \frac{8}{(H-h)^3} \sum_{i=1}^{N/2} (\rho_y)_i (y_i^3 - y_{i-1}^3) \quad E_{ef} = \frac{8}{(H-h)^3} \sum_{i=1}^{N/2} (E_y)_i (y_i^3 - y_{i-1}^3) \quad (12)$$

2.3. Kiriş Modelin Doğrulanması

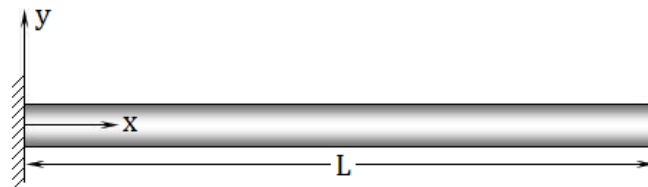
Modelin doğrulanması için literatürde var olan basit mesnetli tarafsız eksene göre simetrik bir FDM kiriş örneği ele alınmıştır [12]. Kiriş modele ait boyutlar $L = 200$ mm, $H = 5$ mm, $b = 20$ mm olarak verilmiştir. Kiriş modele ait doğal frekansların hesaplanması için MATLAB'ta sonlu elemanlar kodu yazılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere MATLAB'ta yazılan sonlu elemanlar kodunun doğruluğu sağlanmış olmaktadır.

Tablo 1.FDM kirişin doğal frekansları (Hz).

Polinom derecesi		1.doğal frekans	2.doğal frekans	3.doğal frekans	4.doğal frekans
n = 1	Demir [12]	518.20	2065.88	4624.09	8162
	Bu çalışma	518.09	2065.70	4623.29	8159.59
n = 5	Demir [12]	443.06	1766.61	3954.27	6979.69
	Bu çalışma	443.04	1766.47	3953.58	6977.63
n = 10	Demir [12]	404.67	1613.63	3611.82	6375.24
	Bu çalışma	404.67	1613.49	3611.20	6373.37

2.4. Problemin Tanımlanması ve İrdelenmesi

Ele alınan ankastre kiriş Şekil 3'de verilmiş olup çekirdek tabakası alüminyum yüzey kaplama tabakaları da porositeli FDM'den yapılmıştır. Kiriş tarafsız eksene göre simetrik yapıdadır. Kaplama FDM'nin elastisite modülü ve yoğunluğu kalınlık boyunca değişim polinom bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Ankastre sandviç kirişe ait kesit Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 3.Ankastre FDM kiriş

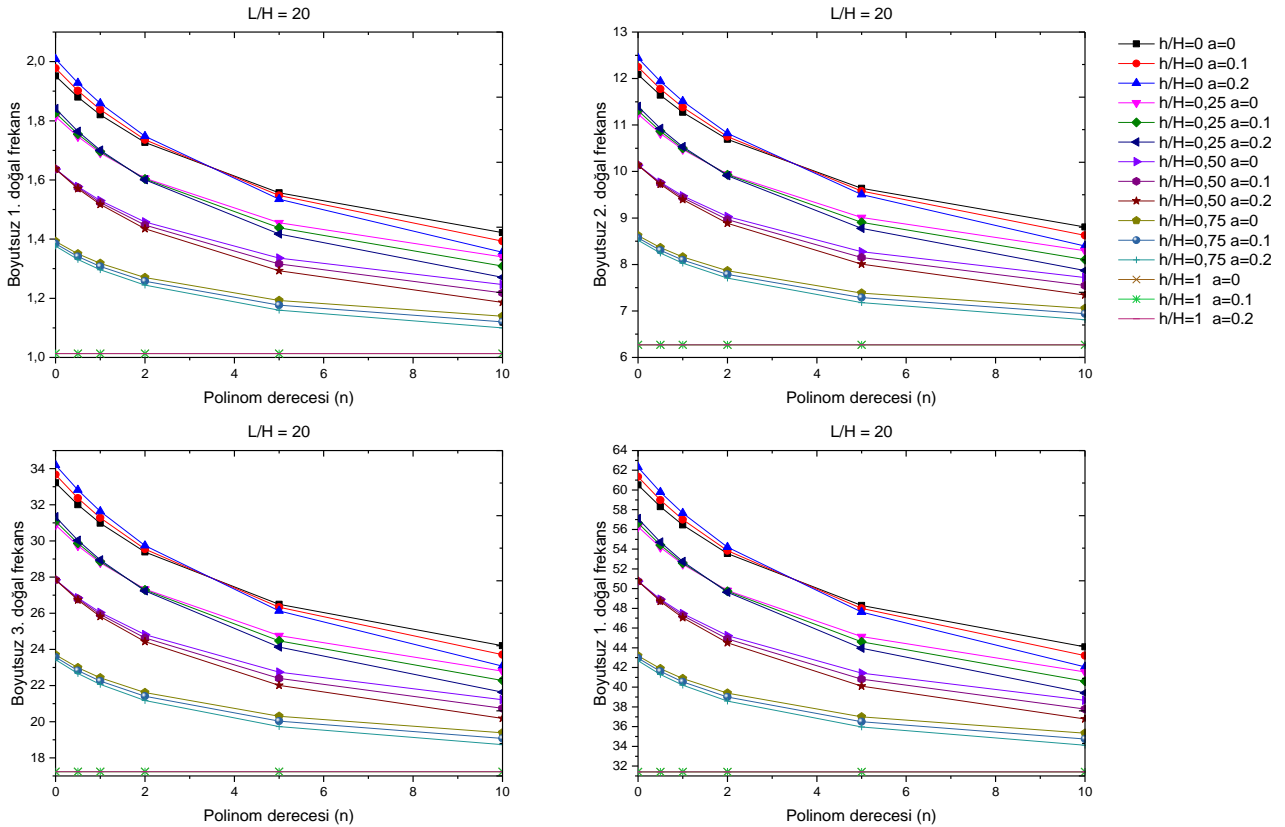
Kirişin geometrik boyutları, kiriş yüksekliği $H=0.005$ m ve kiriş genişliği $b = 0.02$. Alüminyum ve seramik malzemelerin özellikleri $E_c = 380$ Gpa, $\rho_c = 3950$ kg/m³, $E_m = 70$ Gpa, $\rho_m = 2700$ kg/m³ olarak alınmıştır. Analizlerde kiriş 100 elemana bölünmüştür ve sonuçların yakınsaması sağlanmıştır. Çalışmada FDM'nin porosite hacim oranının (a), kiriş narinlik (L/H)

E. F. Erdurcan, Y. Cunedioğlu

oranının, çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının ve polinom derecesinin (n) doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. FDM'deki porositenin etkisini görmek için $a = 0, 0.1, 0.2$ değerleri seçilmiştir. Kiriş narinlik (L/H) oranlarının doğal frekanslar üzerindeki etkilerini görmek için $L/H = 5, 10, 20, 40, 60$ değerleri seçilmiştir. Alüminyum çekirdek tabakasının ve kiriş yüksekliğine (h/H) oranlarının frekanslar üzerindeki etkilerini görmek için $0, 0.25, 0.50, 0.75, 1$ değerleri seçilmiştir. $h/H = 0$ durumu kirişin tamamen FDM, $h/H = 1$ durumu ise kirişin tamamen alüminyum olduğu anlamına gelmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

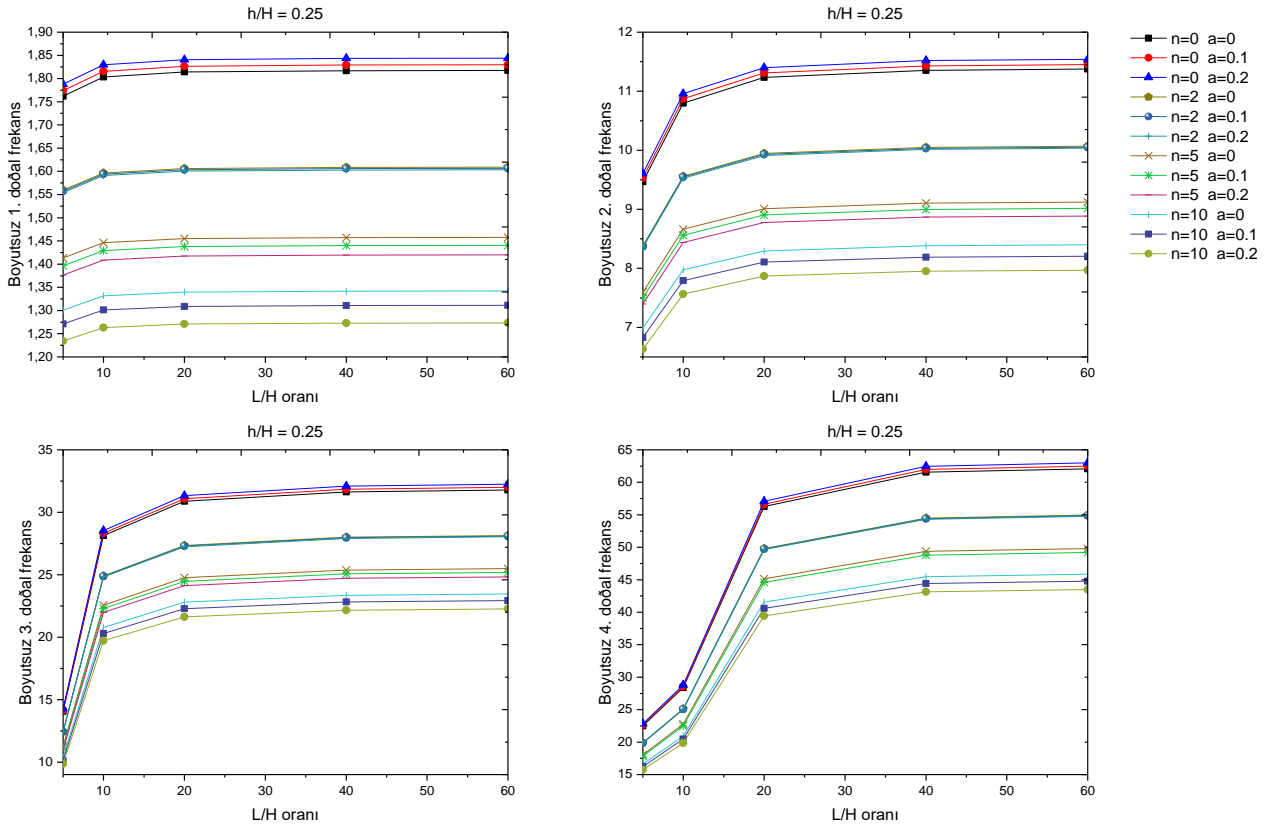
Polinom derecesinin $L/H = 20$ ve farklı h/H ve porosite hacim oranlarında boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini görmek açısından ankastre kiriş için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'ten görüleceği gibi narinlik oranı $L/H = 20$ değerinde h/H oranları düştükçe boyutsuz doğal frekanslar yükselmektedir. Bir diğer ifadeyle kirişteki FDM'nin oranının artmasıyla birlikte boyutsuz doğal frekansların yükseldiği gözlemlenmektedir. Yine Şekil 4'ten görüleceği üzere porositenin etkisi polinom derecesine ve h/H oranına bağlıdır. $h/H=0$ oranında, yani kiriş tamamen FDM'den oluşunca, yaklaşık olarak $n=3.5$ değerinden önce porosite boyutsuz doğal frekanslarını arttırırken, $n=3.5$ değerinden sonra boyutsuz doğal frekanslarını düşürmektedir. Alüminyum çekirdek tabaka en az kirişin %50'sini teşkil edince, yani $h/H = 0,50$ değerinden itibaren, her polinom derecesi için porosite boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürmektedir. Şekil 4'ten görüleceği üzere $h/H = 1$ oranı haricinde polinom derecesi (n) artarken boyutsuz doğal frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. $h/H=1$ değerinde kiriş tamamen alüminyumdan oluşmaktadır ve polinom derecesinden ve FDM'nin porositesinden tamamen bağımsız olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Ankastre kirişte $L/H = 20$ narinlik oranı için farklı a değerlerinde ve h/H oranlarında ilk dört boyutsuz doğal frekansların polinom derecesi (n) ile değişimi

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ

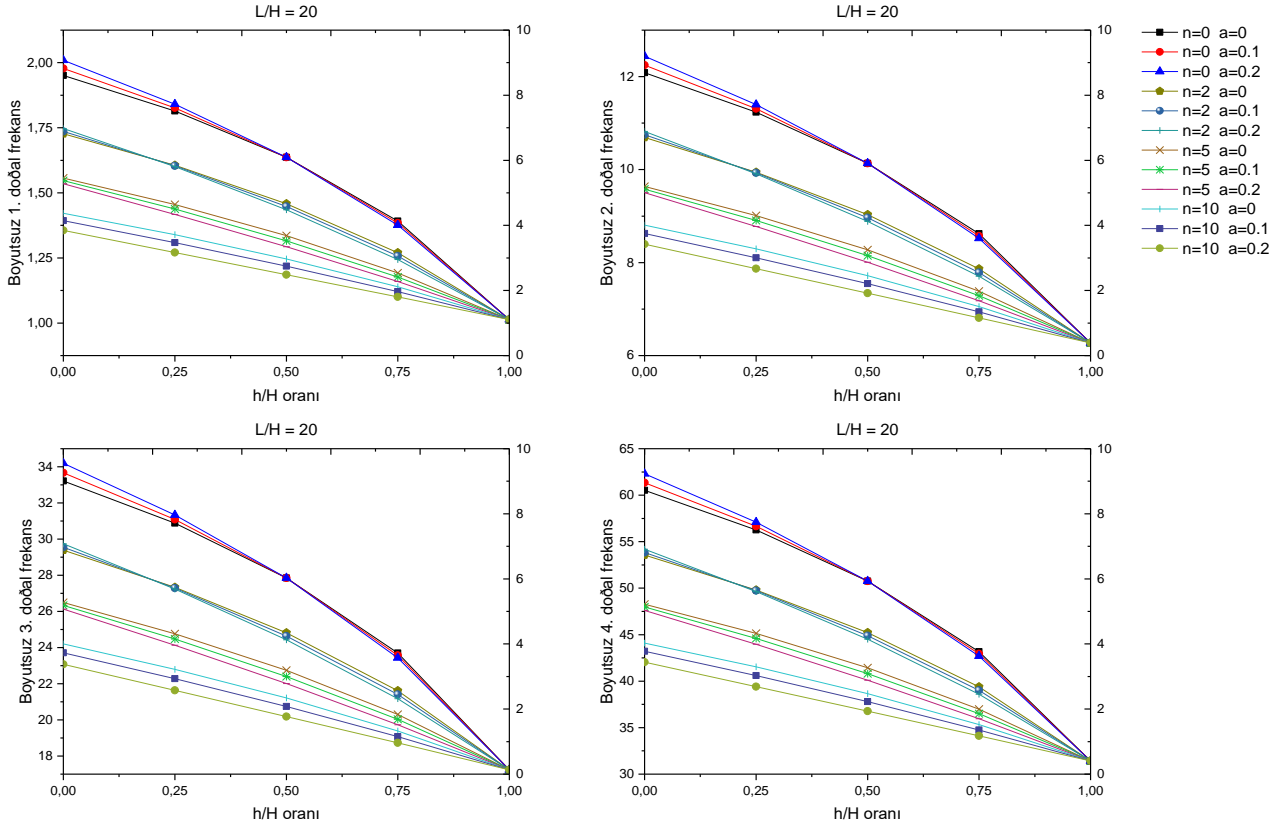
L/H narinlik oranının $h/H = 0.25$ ve farklı polinom derecelerinde ve porosite hacim oranlarında boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini incelemek açısından analizler yapılmıştır. Şekil 5'ten görüleceği gibi $h/H = 0.25$ değerinde polinom derecesi n yükseldikçe boyutsuz doğal frekanslar düşmektedir. L/H narinlik oranları arttıkça boyutsuz doğal frekanslar da yükselmektedir. Ancak ilk üç boyutsuz doğal frekans değerleri L/H = 20 narinlik oranına kadar, dördüncü boyutsuz doğal frekans değeri L/H = 40 oranına kadar ciddi bir artış sergilerken bu oranlardan sonra boyutsuz doğal frekans değerleri neredeyse yatay seyretmektedir. Şekil 5'ten yine görüleceği gibi porosite, polinom derecesi yaklaşık olarak $n=2$ 'den küçük değerlerde boyutsuz doğal frekans değerlerini yükseltirken, $n=2$ 'den itibaren boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürmektedir.



Şekil 5. Ankastre kirişte $h/H = 0.25$ oranı için farklı a değerlerinde ve polinom derecelerinde ilk dört boyutsuz doğal frekans değerlerinin L/H narinlik oranları ile değişimi

Çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının L/H = 20 ve farklı porosite hacim oranlarında ve polinom derecelerinde boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini görmek için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'dan görüleceği gibi narinlik oranı L/H = 20 değerinde polinom derecesi düşükçe doğal frekanslar yükselmektedir. Bu tüm h/H oranları için geçerlidir. Şekil 6'dan yine görüleceği üzere h/H oranı yükseldikçe doğal frekans değerleri düşmektedir. $h/H = 1$ oranında kiriş tamamen homojen izotrop çekirdek tabakasından ibaret olup (n) polinom derecesinden bağımsız olmaktadır. Porositenin etkisi polinom derecesine ve h/H oranına bağlıdır. Düşük polinom derecelerinde $h/H = 0.50$ oranına kadar porosite boyutsuz doğal frekansları yükseltirken, $h/H = 0.50$ oranından büyük değerlerde porosite boyutsuz doğal frekansları düşürmektedir. Polinom derecesi 3.5 değerinden yüksek olunca porosite her h/H oranında boyutsuz doğal frekanslarını düşürmektedir.

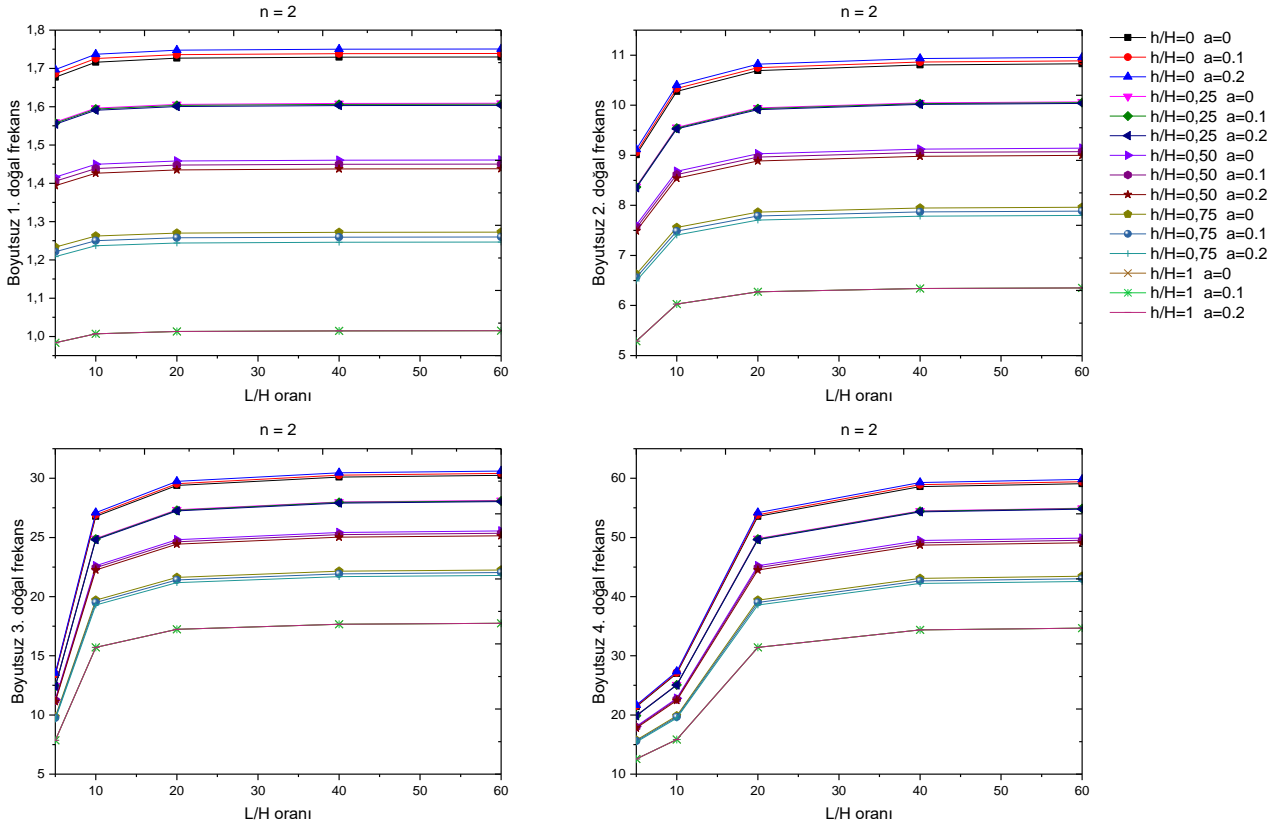
E. F. Erdurcan, Y. Cunedioğlu



Şekil 6. Ankastré kirişte $L/H = 20$ oranı için farklı a değerlerinde ve polinom derecelerinde ilk dört boyutsuz doğal frekans değerlerinin h/H oranları ile değişimi

L/H narinlik oranının $n = 2$ ve farklı çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının ve porositenin boyutsuz doğal frekanslar üzerindeki etkisini görmek açısından analizler yapılmıştır. Şekil 7'den görüleceği gibi boyutsuz doğal frekans değerleri narinlik oranı L/H arttıkça yükselmektedir. Ancak ilk üç boyutsuz doğal frekans değerleri $L/H = 20$ oranına, dördüncü boyutsuz doğal frekans değeri $L/H=40$ kadar ciddi bir artış sergilerken bu oranlardan sonra boyutsuz doğal frekans değerleri neredeyse yatay seyretmektedir. Şekil 7'den yine görüleceği üzere h/H oranı yükseldikçe boyutsuz doğal frekans değerleri düşmektedir. Porosite $h/H = 0.25$ değerine kadar boyutsuz doğal frekans değerlerini yükseltirken, $h/H = 0.50$ değerinden itibaren boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürmektedir.

POROSİTELİ FDM İLE KAPLI ALÜMİNYUM KİRİŞİN SERBEST TİTREŞİMİNİN İNCELENMESİ



Şekil 7. Ankastre kirişten = 2 polinom derecesi için farklı h/H oranlarında ve a değerlerinde ilk dört boyutsuz doğal frekans değerlerinin narinlik oranı L/H ile değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Timoshenko kiriş teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yüzeyleri porositeli FDM ile kaplı bir kirişin serbest titreşim durumu incelenmiştir. Doğal frekanslar rijitliğin ve kütle'nin bir fonksiyonu olduğundan ve alüminyumdan rijit ve ağır olan FDM'nin kirişe eklenmesi ile doğal frekans değerleri etkilenmektedir. Çalışmada kiriş narinlik (L/H) oranının, çekirdek tabaka kalınlığının kiriş yüksekliğine (h/H) oranının porosite hacim oranının (a) ve polinom derecesinin (n) doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi maddeler halinde özetlenebilir:

- Polinom derecesi n'nin artmasıyla boyutsuz doğal frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Kirişte FDM tabaka kalınlığının artması, yani h/H oranının düşmesi, boyutsuz doğal frekans değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır.
- Kirişte L/H narinlik oranları arttıkça boyutsuz doğal frekans değerlerinin yükseldiği görülmüştür.
- İlk üç boyutsuz doğal frekans değerleri L/H= 20, dördüncü boyutsuz doğal frekans değeri L/H= 40 oranından sonra kiriş narinlik oranının pek bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
- Porositenin etkisi h/H oranına ve polinom derecesine bağlıdır. Düşük h/H oranlarında porosite boyutsuz doğal frekans değerlerini belirli bir polinom derecesine kadar artırıp sonra azaltırken, yüksek h/H oranlarında porositenin her polinom derecesinde boyutsuz doğal frekans değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

İncelenen parametrelerde değişiklikler yapılarak arzu edilen tasarımlar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] E. Demir, "Vibration and damping behaviors of symmetric layered functional graded sandwich beams," *Struct Eng Mech*, vol. 62(6), pp. 771-780, 2017.
- [2] S. Rajasekaran and H. B. Khaniki, "Free vibration analysis of bi-directional functionally graded single/multi-cracked beams," *Int Journal of Mech Sci*, vol. 144, pp. 341–356, 2018.
- [3] Z. Wang, X. Wang, G. Xu, S. Cheng and T. Zeng "Free vibration of two-directional functionally graded beams," *Composite Structures*, vol. 135, pp. 191–198, 2016.
- [4] Y. S. Al Rjoub and A. G. Hamad, "Free Vibration of Functionally Euler-Bernoulli and Timoshenko Graded Porous Beams using the Transfer Matrix Method," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol 21(3), pp. 792-806, 2017.
- [5] C. Mohcine, M. El Bekkaye and K. El Bikri, "Geometrically Non-Linear Free and Forced Vibration of Clamped-Clamped Functionally Graded Beam with Discontinuities," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 1870–1875, 2017.
- [6] K. Bouakkaz, L. Hadji, N. Zouatnia and E. A. Adda Bedia, "An analytical method for free vibration analysis of functionally graded sandwich beams," *Wind and Structures*, vol. 23(1), pp. 59-73, 2016.
- [7] Z. Su, G. Jin, Y. Wang and X. Ye, "A general Fourier formulation for vibration analysis of functionally graded sandwich beams with arbitrary boundary condition and resting on elastic foundations," *Acta Mech*, vol. 227, pp. 1493–1514, 2016.
- [8] M. Soltanpour, M. Ghadiri, A. Yazdi and M. Safi, "Free transverse vibration analysis of size dependent Timoshenko FG cracked nanobeams resting on elastic medium," *Microsyst Technol*, vol. 23, pp. 1813–1830, 2017.
- [9] S. D. Akbaş, "Free vibration of edge cracked functionally graded microscale beams based on the modified couple stress theory," *Int Journal of Str Stab and Dynamics*, vol. 16(10), 1750033, 2016.
- [10] T. Van Lien, N. T. Duc, and N.T. Khiem, "Free vibration analysis of multiple cracked functionally graded timoshenko beams," *Lat Am Journal of Solids and Structures*, vol. 14, pp. 1752-1766, 2017.
- [11] S. Shabani, Y. Cunedioğlu, "Free vibration analysis of cracked functionally graded non-uniform beams," *Materials Research Express*, Vol. 17(1), pp 1-15, 2020.
- [12] H. Çallıoğlu, E. Demir, Y. Yılmaz and M. Sayer, "Vibration analysis of functionally graded sandwich beam with variable cross-section," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 18(3), pp. 351-360, 2013.
- [13] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Boston: Cengage Learning, 2015.
- [14] M. Petyt, *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*, New York: Cambridge, 2010.
- [15] E.F.Erdurcan, Y.Cunedioğlu, "Free Vibration Analysis of a Functionally Graded Material Coated Aluminum Beam," *AIAA Journal*, vol. 58(2), 2020.
- [16] R.F. Gibson, *Principles of Composite Materials*, Boca Raton: CRC Press, 2016.





VAKUMLU İNFİLTRASYON YA ÜRETİLEN AA 1050 ESASLI GNP+TiB₂ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ABRASİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Muharrem PUL^{1,*} 

*Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 41750 Kırıkkale, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada vakumlu infiltrasyon yöntemi kullanılarak alüminyum matrisli, % 0.5 GNP (Nano Grafen Plaka) tozları ile %5- %10 - %20 TiB₂ (Titanium diborid) tozları birlikte takviye edilerek hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Daha sonra, kompozit malzemelerin SEM ile mikroyapıları incelemeleri yapılmış ve porozite oranları belirlenmiştir. Son aşamada sertlik ölçümleri yapılarak abrasif aşınma deneylerine geçilmiştir. Aşınma deneyleri; 600 mesh zımpara üzerinde, 0.5 m/s kayma hızında, 10-20 ve 40 N yükler uygulanarak, 60-90 ve 120 saniye deney sürelerinde yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, TiB₂ takviye oranının artmasıyla, kompozitlerin porozite miktarı artmıştır. Sertlik değerlerinin ise %10 TiB₂ oranına kadar arttığı, daha sonra azaldığı görülmüştür. Aşınma kayıpları ise, %10 TiB₂ takviye oranına kadar azalırken, %20 takviye oranında tekrar artış göstermiştir. Hibrit kompozitler içerisindeki GNP, deney yükü ve süresinin artmasıyla, aşınma kayıplarının azalmasına sebep olmuştur. Bu durum grafinin yağlayıcı ve kaydırıcı özelliğiyle ilişkilendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hibrit kompozit, Vakumlu infiltrasyon, Al 1050, TiB₂, Aşınma

INVESTIGATION OF ABRASIVE WEAR BEHAVIOR OF AA 1050 BASED GNP + TiB₂ REINFORCED HYBRID COMPOSITES PRODUCED FOR VACUUM INFILTRATION

ABSTRACT

In this study, hybrid composite materials were produced by reinforcing aluminum matrix, 0.5% GNP (Nano Graphene Plate) powders together with 5-10% - 20% TiB₂ (Titanium diboride) powders together using vacuum infiltration method. Afterwards, microstructures of composite materials were examined by SEM and porosity ratios were determined. In the last stage, hardness measurements were made and abrasive wear tests were started. Wear tests; 600 mesh sanding, 0.5 m / s shear rate, 10-20 and 40 N loads were applied, 60-90 and 120 seconds were performed in the test period. According to the test results, the porosity of the composites increased with increasing TiB₂ reinforcement ratio. Hardness values increased up to 10% TiB₂ and then decreased. Wear losses decreased by up to 10% TiB₂ reinforcement ratio and increased again by 20% reinforcement ratio. GNP in the hybrid composites resulted in a decrease in wear losses with increasing test load and time. This is related to the lubricant and lubricant properties of graphene.

Keywords: Hybrid composite, Vacuum infiltration, Al 1050, TiB₂, Wear

1. GİRİŞ

Son yıllarda giderek yaygınlaşan kompozit malzeme kullanımı ile endüstrinin çeşitli alanlarındaki gelişmeler hız kazanmıştır. Özellikle savunma, otomotiv, havacılık, enerji ve ulaştırma gibi stratejik endüstri sahalarında hafif metal esaslı kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu tür metal esaslı (matrisli) kompozitlerin içerisine karılan takviye malzemeleri içerisinde toz parçacık şeklindeki seramik esaslı malzemeler çok geniş yer tutmaktadır. Bu malzemelerin başlıcaları, B₄C, SiC, Al₂O₃, MgO, TiB₂ olmakla birlikte son zamanlarda nano boyuttaki grafen ve karbon nano tüplerde rabet görmeye başlamıştır. Bu takviye malzemeleri arasında TiB₂, üstün özellikleri sayesinde ön plana çıkmaktadır. TiB₂ erime noktasının, sertliğinin, mukavemet/yoğunluk oranının ve aşınma direncinin nispeten yüksek değerleri ile karakterize edilen yüksek mukavemet ve

*Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: mpul@kku.edu.tr

Geliş / Recieved: 01.01.2020 Kabul / Accepted: 16.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.669072

dayanıklılığa sahip bir seramik malzeme olarak bilinmektedir. Bu özelliklerinden dolayı genellikle, darbelere dayanıklı zırhlar, kesici aletler, potalar ve aşınmaya dayanıklı kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır [1].

Grafen ise karbon esaslı bir malzeme olup bir atom kalınlığındadır. Grafen çok esnek, sağlam, hafif ve ince olup, bal peteği şeklindeki yapısı sayesinde çok kuvvetli bir malzemedir. Grafen elastik ve esnek olması yanında aynı zamanda çok serttir ve çelikten çok daha kuvvetlidir. Elektriği çok iyi iletir, erime noktası ise 3000°C civarındadır [2]. Literatürde alüminyum matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda grafen ve seramik esaslı bir takviye elemanının birlikte yer aldığı çalışmalar nadiren yer almaktadır. Subramani ve ark. [3] yaptığı çalışmada Al 2024 matris içerisine B₄C ve grafen birlikte takviye edilerek kompozit malzemeler üretilmiştir.

Metal Matrisli Kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması üzerine yapılan ve literatürde yer alan çalışmalarda, farklı alüminyum matris malzemeleri ve takviye elemanları kullanıldığı görülmüştür [4-11]. Bu çalışmalarda; takviye elemanının kompozit içerisindeki dağılımı, mikroyapı üzerindeki etkisi, kompozit yapının yoğunluğu (gözeneklilik), sertlik, abrasif aşınma davranışı, kopma ve çapraz kırılma dayanımı gibi mekanik özellikleri araştırılmıştır. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri içerisinde sıvı faz yöntemleri önemli yer tutmaktadır. Sıvı faz yöntemlerinden biri olan vakumlu infiltrasyon yöntemi ise diğer yöntemlere göre daha az uygulanan ve literatürde en az yer alan yöntem olma özelliğindedir. Yapılan çalışmaların çoğunluğunu karıştırılmalı döküm, basınçlı döküm, basınçlı ve basınçsız infiltrasyon gibi teknikler oluşturmaktadır. Vakumlu infiltrasyon bu tekniklere göre daha yeni olup çok fazla çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada, ticari saflıktaki Al 1050 matris malzemesi içerisine, grafen ve TiB₂ birlikte takviye edilerek bu iki takviye elemanının üstün özelliklerinden bir arada yararlanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, vakumlu infiltrasyon yöntemi kullanılarak, biri nano boyutta olmak üzere iki takviye elemanı kullanılan Al 1050+GNP+TiB₂ hibrit kompozitler üretilmiştir. %5, %10 ve %20 olmak üzere üç farklı TiB₂ oranında üretilmiş olan kompozit malzemelerin önemli mekanik kriterlerden birisi olan abrasif aşınma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

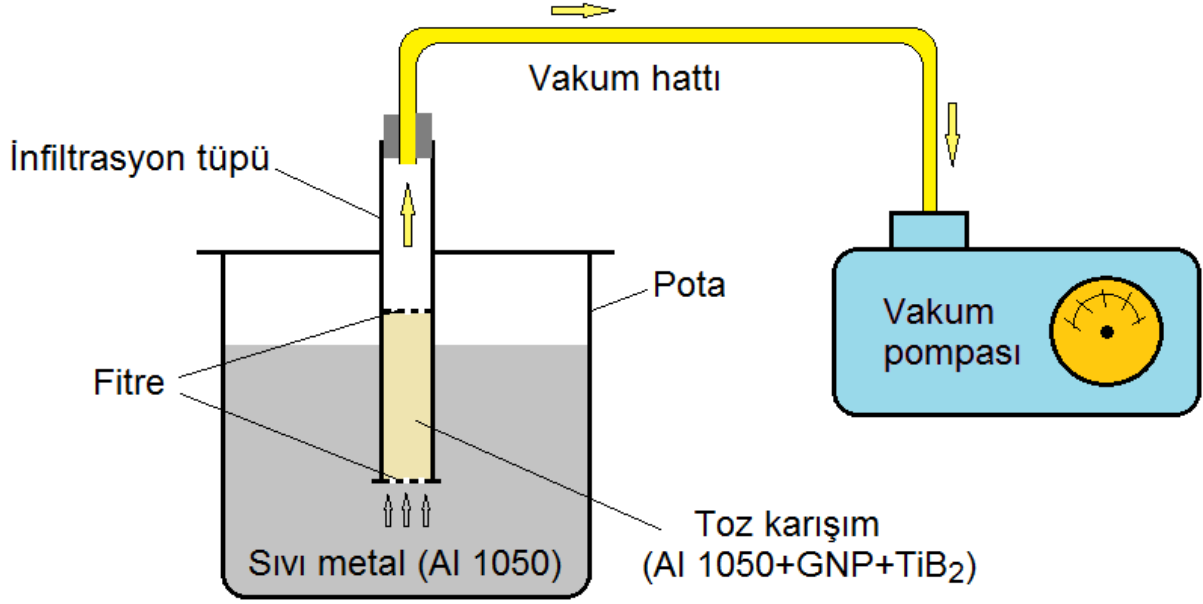
Hibrit kompozitlerin üretiminde kullanılan matris malzemesi AA1050, nano grafen plaka (GNP) ve TiB₂'ye ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir

Tablo 1. Deney malzemelerinin teknik özellikleri

AA 1050						
Fe%	Si%	Cu%	Mn%	Mg%	Zn%	Ti%
0.40	0.25	0.05	0.05	0.05	0.07	0.04
Erime noktası, °C		Sertlik, HB	Yoğunluk, g/cm ³		Çekme Dayanımı	
650		34	2.71		105-145 Mpa	
TiB ₂						
Ti%			B%			
67-69			29-32			
Erime noktası, °C	Sertlik, knoop		Yoğunluk, g/cm ³	Parçacık Şekli	Tane Boyutu, µm	
2980	1800		4.52	Köşeli	10-37	
GNP						
Erime noktası, °C	Çekme Dayanımı		Spesifik Yüzey Alanı	Saflık	Tane Boyutu, nm	
3000	130 GPa		260 m ² /g	% 99.5	6-16	

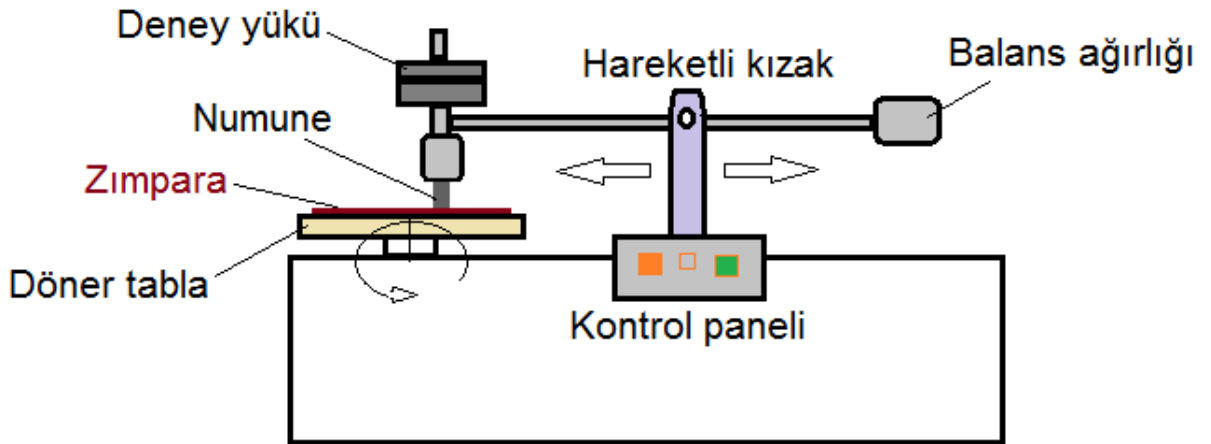
Vakumlu infiltrasyon deneylerinde, sıvı matris malzemesi olarak % 99.5 saflığında Al 1050, takviye elemanı olarak %0.5 ağırlık oranında GNP ve %5, %10 ve %20 ağırlık oranlarında TiB₂ (titanyum diborid) kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında alüminyum matrisli kompozitlerde grafen katkısının %0.5 oranından fazla olmasının, kompozit yapının mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği yönünde sonuçlara rastlandığından, grafen takviye oranı ağırlıkça % 0.5 olarak belirlenmiştir [12]. Hibrit kompozitlerin üretiminde ilk aşamada kullanılacak olan Al 1050, TiB₂ ve GNP tozları belirlenen ağırlık oranlarında tartılıp hazırlandıktan sonra döner tamburlu karıştırıcıda 2 saat süreyle 300 dev/dak dönme hızında karıştırılmıştır. İkinci aşamada, takviye oranlarına göre karıştırılarak hazırlanmış olan toz karışımlar çelik infiltrasyon tüpleri içerisine doldurulmuştur. Alttan ve üstten paslanmaz filtre elemanı ile kapatılan deney tüpleri 750+/-10°C de erimiş sıvı Al1050 içerisine daldırılarak infiltrasyon işlemi başlatılmıştır. Her takviye oranındaki kompozit numune için 10 dakika boyunca 650 mmHg vakum ile infiltrasyon işlemi tekrar edilerek kompozitlerin üretimi tamamlanmıştır. Hibrit kompozitlerin ürettiği vakumlu infiltrasyon sistemine ait deney düzeneğinin şemetik gösterilişi Şekil 1'de verilmiştir.

VAKUMLU İNFİLTASYONYA ÜRETİLEN AA 1050 ESASLI GNP+TiB₂ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ABRASİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ



Şekil 1. Vakumlu infiltrasyon deney düzeneği

Üretimi tamamlanarak deney tüpleri içerisinde çıkarılan hibrit kompozit malzemelerden numuneler hazırlanarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri çekilmiştir. SEM incelemesinden sonra, aşınma davranışını etkileyen teknik özelliklerden olan porozite ve sertlik değerlerinin belirleyecek deneylere geçilmiştir. Bu amaçla her takviye oranına ait numunelerin Arşimed prensibine göre yoğunlukları ölçülerek porozite (gözenek) oranları tespit edilmiştir. Daha sonra yoğunlukları belirlenen hibrit kompozit numunelerin sertlik ölçümleri Brinell yöntemine göre yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde her numune üzerinden 5 farklı noktada ölçümler yapılarak aritmetik ortalamaları alınmıştır. Deneylerin son aşamasında abrasif aşınma deneylerine geçilmiştir. Aşınma deney parametreleri olarak; 10-20-40 N yükler, 600 mesh zımpara, 0.5 m/s hız, 30-60-120 saniye olarak üç farklı süre seçilmiş olup pin on disk yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2’de pin on disk aşınma cihazının şematik gösterilişi verilmiştir.

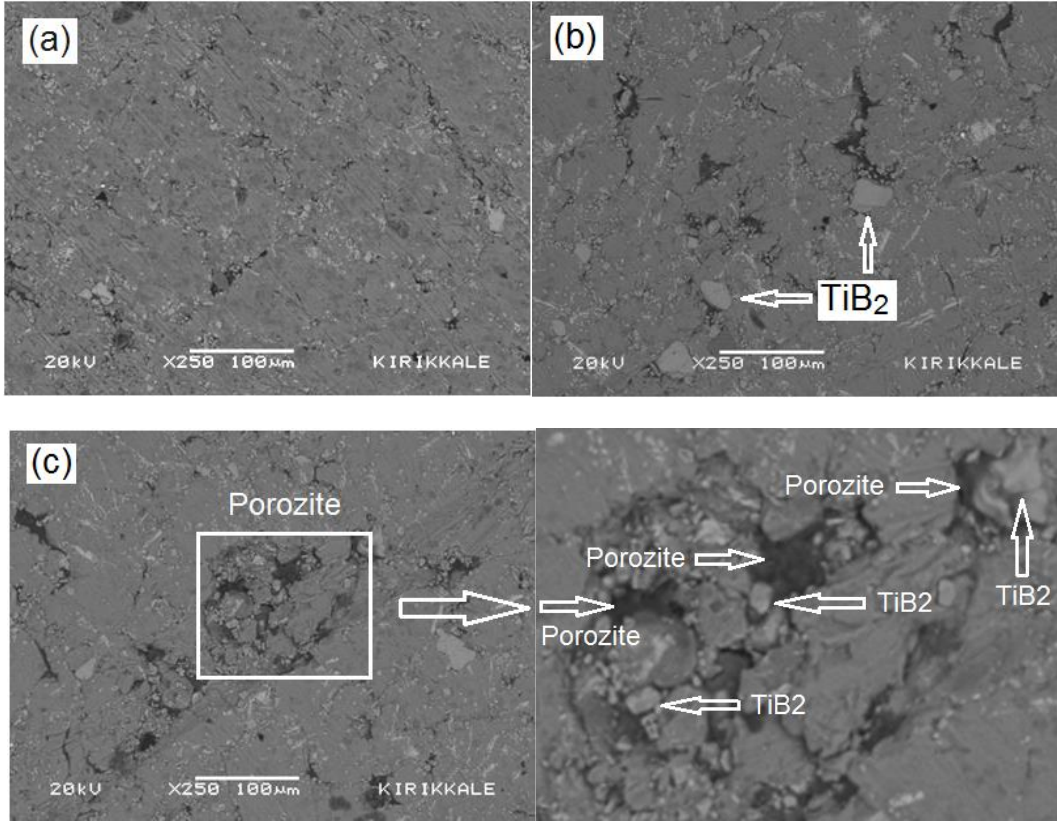


Şekil 2. Pin on disk aşınma deney düzeneği

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Mikroyapıların İncelenmesi

Üretimi tamamlanan hibrit kompozit malzemelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri çekilmiştir. Şekil 3'te %0.5 GNP ilave edilmiş, %5, %10 ve %20 TiB₂ takviyeli kompozitlerin $\times 250$ büyütmede SEM görüntüleri verilmiştir.



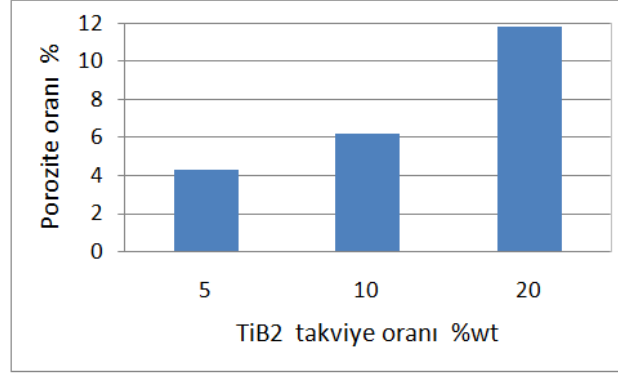
Şekil 3. (a) %5 TiB₂, (b) %10 TiB₂, (c) %20 TiB₂ takviyeli kompozitlerin SEM görüntüsü

Şekil 3'te yer alan SEM görüntüleri incelendiğinde, TiB₂ takviye oranının artmasıyla etkisini gösteren porozite (gözenekli yapı) dikkati çekmektedir. Aynı zamanda TiB₂ takviye parçacıklarının çok homojen dağılım sergileyemediği görülmektedir. Bu tür parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde, homojen takviye dağılımı elde etmek, kompozitlerin üretimindeki en önemli zorlukların başında gelmektedir. Porozitenin yoğun olduğu bölgelerde takviye ile matris arasındaki ıslatmanın çok zayıf meydana geldiği, hatta hiç olamadığı ifade edilebilir. Bu durum alüminyum matrisli ve seramik esaslı parçacık takviyeli kompozitlerin, infiltrasyon ve karıştırmalı döküm gibi sıvı faz üretim yöntemlerinde sıklıkla karşımıza çıkabilmektedir. Şekil 3 (c)'deki poroziteyi gösteren bölge incelendiğinde TiB₂ takviye parçacıklarının Al1050 matris fazıyla birleşemediği ve gözenegin içerisinde serbest halde bulunduğu görülmektedir. Bir diğer husus ise kompozit yapı içerisinde bulunan GNP'nin etkisidir. Nano boyuttaki malzemeler ile matris elemanı arasındaki ıslatma problemiyle, mikron boyutundaki seramik parçacıklara göre daha fazla karşılaşmaktadır. Özellikle grafen gibi yağlayıcı özelliği olan malzemelerde bu problem en üst deviyede kendini göstermektedir. Dolayısıyla, SEM görüntülerinde görünemese de GNP parçacıklarının TiB₂ takviye fazı üzerine yerleşerek ıslatmayı dahada zor hale getirdiği ifade edilebilir. Sonuç olarak vakumlu infiltrasyon deneylerinden elde edilen bu mikroyapının mekanik özellikler üzerinde bazı olumsuz etkiler yapabileceği düşünülmektedir.

3.2. Yoğunluk ve Porozite Miktarlarının Değerlendirilmesi

Hibrit kompozit numunelerin Arşimed prensibine göre belirlenen porozite değerlerini gösteren grafik Şekil 4'te verilmektedir.

VAKUMLU İNFİLTASYONYA ÜRETİLEN AA 1050 ESASLI GNP+TiB₂ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ABRASİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

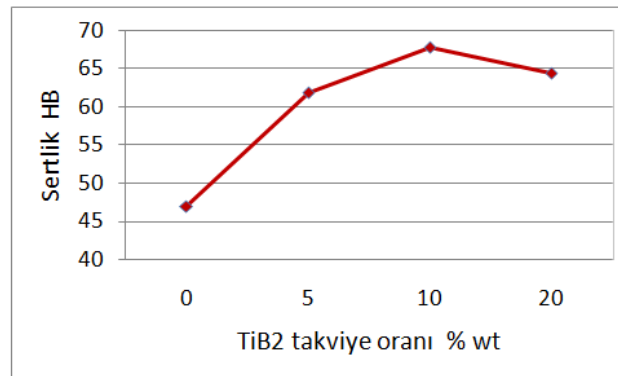


Şekil 4. TiB₂ takviye oranına göre hibrit kompozitlerin porozite miktarı

Şekil 4'teki grafiğe bakıldığında, ilk göze çarpan TiB₂ takviye oranının artışına bağlı olarak porozite (gözenek) miktarlarındaki artıştır. Sahin ve Acılar [11], vakumlu infiltrasyon ile kompozit üretimi çalışmalarında, SiC parçacık oranının artmasıyla kompozit yapı içerisindeki porozite miktarının arttığını ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Gomez ve ark. [4], çalışmalarında B₄C parçacık oranının artmasıyla porozite miktarının yükseldiği rapor edilmiştir. Bu tür parçacık takviyeli kompozitlerde genellikle takviye oranının artmasıyla yapı içerisindeki takviye topaklanmasına bağlı olarak porozite miktarları artmakta ve kompozitlerin yoğunluk değerleri azalmaktadır. Bu durum tüm metal matrisli ve parçacık takviyeli kompozit üretim tekniklerinde ortaya çıkabilmektedir. Poroziteye neden olan sebeplerden birisi takviye topaklanması ve buna bağlı olarak takviye parçacıkları arasında meydana gelen gözenekli yapıdır. Diğeri ise matris malzemesi ile takviye elemanı parçacıkları arasındaki zayıf ıslatmaya bağlı olarak oluşan ara yüzeylerdeki boşluklu yapıdır. Bu çalışmada üretilen hibrit kompozit malzemelerde en yüksek porozite oranı %11.8 ile %20 TiB₂ takviyeli numuneden elde edilmiştir. Porozite oranları, %5 TiB₂ takviyeli numunede %4.4 iken %10 TiB₂ takviyeli numunede %6.2 olarak gerçekleşmiştir. Kompozit yapı içerisindeki TiB₂ takviye oranı her defasında %100 artmasına karşın %5 ile %10 takviye arasındaki porozite artışı %40 civarında olmuştur. Ancak %10 ile %20 takviye arasındaki porozite artışı %90 olarak karşımıza çıkmaktadır. TiB₂ takviye oranının %10'un üzerine çıkmasıyla parçacıklı takviyenin olumsuz yönü daha fazla ön plana çıkarak, takviye topaklanması ve yetersiz ıslatma etkisini göstermeye başlamıştır. Bu tür parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozit yapılarda yüksek takviye oranları ile olumlu sonuçların elde edilmesinin zor olacağı söylenebilir.

3.3.Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hibrit kompozit numunelerin Brinell yöntemine göre ölçülen sertlik değerlerini gösteren grafik Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Hibrit kompozitlerin TiB₂ takviye oranına göre sertlikleri

Şekil 5'teki grafik incelendiğinde, TiB₂ takviye oranının artmasıyla sertlik değerlerinin yükseldiği, ancak %10 TiB₂ takviye oranından sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Benzer bir sonuç Subramani ve ark [3]; Rajesh ve Kaleemulla [13]; Ravindra Sagar ve Chandrashekar'ın [14] yaptığı çalışmalarda ifade edilmiştir. Gomez ve ark. [4] yaptığı başka bir çalışmada alüminyum matris içerisine ilave edilen B₄C ve SiC parçacık miktarlarının artmasıyla, kompozitlerin sertlik değerlerinde devamlı bir yükselme rapor edilmiştir. Benzer şekilde Hasırcı ve Gül'ün [5] çalışmalarında benzer sonuç yer almaktadır. Bu tür

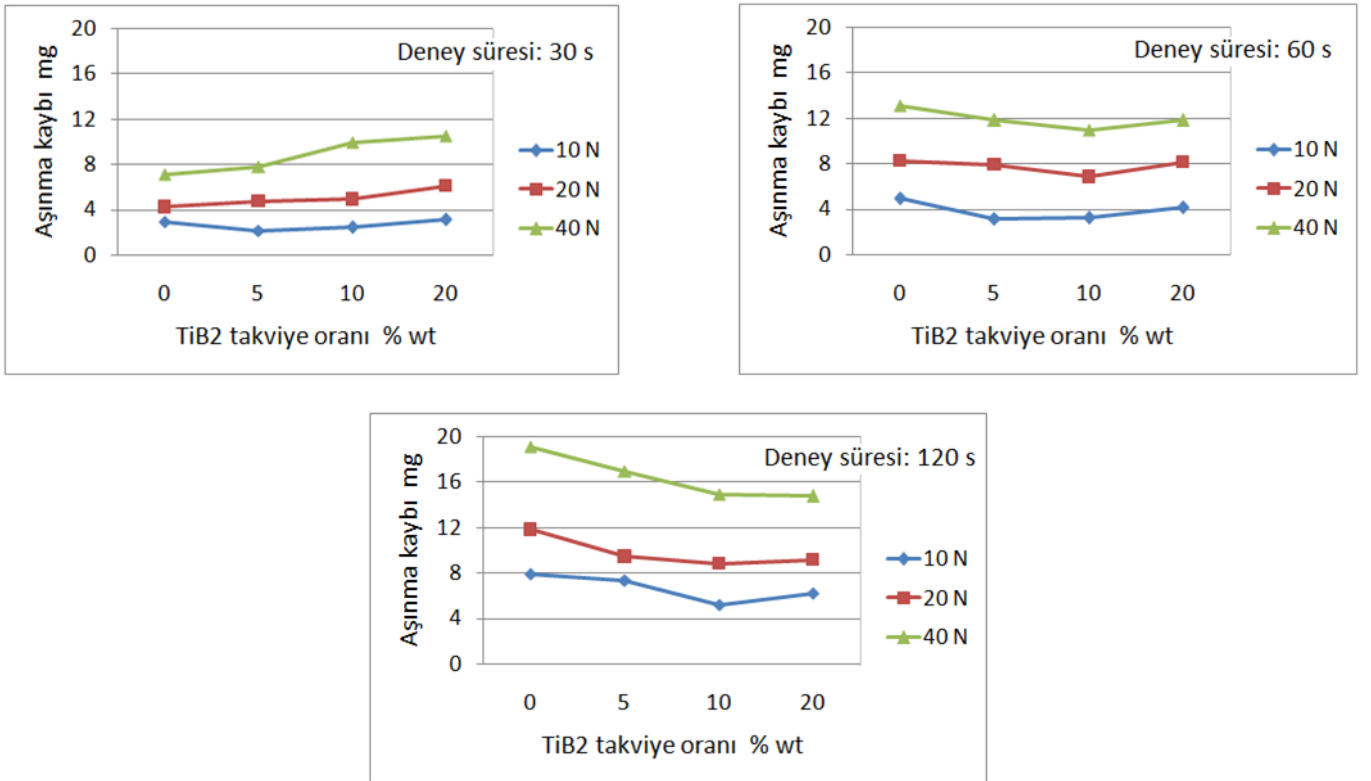
M. Pul

alüminyum matrisli ve seramik esaslı parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini inceleyen çalışmalarda, genel olarak parçacık takviye oranının artmasıyla kompozit yapının sertlik değerinin artmakta olduğu başka çalışmalarda da rapor edilmektedir [15, 16].

Bu deneysel çalışmada da TiB_2 takviye malzemesinin çok sert fazda olması sebebiyle hibrit kompozit numunelerin sertlik değerleri artma eğilimi sergilemiştir. %20 TiB_2 takviye oranındaki sertlik değerinin de bu durumda %10 TiB_2 takviyeli numuneye göre artış göstermesi beklenirken böyle olmamıştır. Bu duruma kompozit yapı içerisindeki porozitenin etki ettiği ve sertlik değerini düşürdüğü değerlendirilmektedir. Benzer şekilde Xiaozhou ve ark. [7] yaptıkları vakumlu infiltrasyon çalışmasında en düşük porozite oranında, en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. En yüksek porozite oranı %20 TiB_2 takviyeli numunede meydana gelmiştir. Porozite oranı ile sertlik değeri arasında bir ilişki kurulsa da, bu tür parçacık takviyeli kompozitlerdeki homojen olamayan takviye dağılımlarının sertlik sonuçları üzerinde kararsızlıklar meydana getirdiği de bilinmektedir. Üretilen hibrit kompozitlerde en yüksek sertlik değeri %10 TiB_2 takviyeli numunede 67.7 HB olarak ölçülürken, en düşük sertlik değeri %5 TiB_2 takviyeli numunede 61.8 HB olarak ölçülmüştür. TiB_2 takviye edilmemiş Al 1050 matris malzemesinin sertlik değerinin 46,9 HB olarak ölçüldüğü dikkate alınırsa, TiB_2 takviyesi ile %20 TiB_2 takviyeli hibrit kompozit numunenin sertlik değeri %45 oranında artmıştır. Sertlik değerinin yükselmiş olmasının, mekanik özelliğin geliştirilmesi olarak değerlendirildiği durumda, sertlik yönünden olumlu sonuç alındığı ifade edilebilir.

3.4.Abrasif Aşınma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hibrit kompozit numunelerin pin on disk yöntemine göre yapılan aşınma deneylerinden elde edilen aşınma kayıplarını gösteren grafikler Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Hibrit kompozitlerin TiB_2 takviye oranı, deney yükü ve deney süresine göre aşınma kayıpları

Şekil 6'daki grafiklere bakıldığında, kompozit yapı içerisindeki TiB_2 takviye oranındaki değişimin aşınma kayıplarını aşırı miktarda etkilemediği göze çarpmaktadır. Benzer bir sonuç Şahin ve Acılar'ın [11] yaptıkları çalışmada görülmüştür. Bununla birlikte, TiB_2 takviye oranına bağlı olarak ilk etapta aşınma kayıpları azalmış, daha sonra artmaya başlamıştır. Hasırcı ve Gül'ün [5] yaptığı çalışmada benzer sonuçlar çıkmış olup, kompozit yapı içerisindeki %10 B_4C takviye miktarına kadar aşınma kayıpları azalırken, %20 B_4C takviyeli kompozitte tekrar artış göstermiştir. Literatürde yer alan başka bir çalışmada Özyürek ve Çiftçi [15], TiB_2 takviye miktarının artmasıyla kompozit yapının aşınma direncinin arttığı yer almaktadır.

YAKUMLU İNFİLTASYONYA ÜRETİLEN AA 1050 ESASLI GNP+TiB₂ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ABRASİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Bu deneysel çalışmada ise literatüre uygun sonuçlar elde edilmekle beraber, deney süresindeki artışlar, TiB₂ takviye oranı açısından farklı aşınma kaybı davranışlarına neden olmuştur. Özellikle 30 ve 60 s sürede yapılan aşınma deneylerinde bu husus daha belirgin olarak görünmektedir. 30 s'lik deneyde, 40 N deney yükü dikkate alındığında %5 TiB₂ takviyeli numunede aşınma kaybı 7,8 mg iken, %20 TiB₂ takviyeli numunede 8.8 mg olarak kaydedilmiştir. TiB₂ takviye oranı % 400 artmasına rağmen aşınma kaybındaki değişim % 13 civarında olmuştur. Aynı şekilde, 120 s'lik deneyde, 40 N deney yükü dikkate alındığında %5 TiB₂ takviyeli numunede aşınma kaybı 16,9 mg iken, %20 TiB₂ takviyeli numunede 14,7 mg olarak meydana gelmiştir. Burada da aşınma kaybındaki değişim % 15 civarında gerçekleşmiştir. Yukarıda verilen örneklere bakıldığında TiB₂ takviye oranının 4 kat artması, aşınma kayıpları üzerinde çok önemli farklara sebep olmamıştır. Genel olarak sert fazdaki takviye elemanı ilavesinin metal matrisli kompozitlerdeki aşınma kayıplarını azalttığı literatürdeki bazı çalışmalarda yer almaktadır [17, 18].

Grafiklerde göze çarpan diğer önemli husus ise deney süresinin artmasıyla, grafiklerdeki eğilimin yön değiştirmesidir. 30 s süreyle yapılan deneylerde genel eğilim, tüm deney yüklerinde, TiB₂ takviye oranının artmasına bağlı olarak aşınma kayıplarının da artış göstermesi yönündedir. Ancak, deney süresinin artmasıyla bu durum terse dönmeye başlamış ve 120 s deney süresinde ise genel olarak aşınma kayıplarında azalma meydana gelmiştir. Benzer bir sonuç Rajesh ve Kaleemulla'nın [13] yaptığı çalışmada yer almıştır. Özellikle 120 s süreli deneydeki 40 N deney yükü ile yapılan abrasif aşınma deneyinde bu durum göze çarpmaktadır. Deney süresinin artmasıyla kompozit yapı içerisindeki grafenin yağlayıcı ve kayganlaştırıcı özelliğinin ortaya çıktığı düşünülmektedir. Deney süresi uzadıkça ve deney yükü arttıkça kompozit yapı içerisindeki TiB₂ parçacıklarının daha fazla miktarda aşınma yüzeyinden uzaklaştığı ve bu boşluklara yağlayıcı özelliği olan GNP partiküllerinin yerleştiği, dolayısıyla GNP'nin aşınma yüzeyine sıvanarak kaygan bölgeleri meydana getirdiği varsayılmaktadır. Literatürde yer alan başka bir çalışmada ise kayma hızındaki artışın aşınma kayıpları üzerinde azaltıcı tesir yaptığı ifade edilmiştir [19].

Bir başka husus ise deney yüklerindeki değişim ile aşınma kayıpları arasındaki ilişkidir. Deney yükleri her defasında % 100 artmasına rağmen aşınma kayıpları aynı oranda değişim göstermemiştir. Örneğin 120 s sürede yapılan aşınma deneyindeki %10 TiB₂ takviyeli numuneyi dikkate alırsak; 10 N yükte 5.2 mg, 20 N yükte 8.8 mg, 40 N yükte 14.9 mg aşınma kaybı meydana gelmiştir. Bu örnekte aşınma kayıplarındaki değişim % 70 civarındadır. İkinci bir örnekte 30 s sürede yapılan aşınma deneyindeki %10 TiB₂ takviyeli numuneyi dikkate alırsak; 10 N yükte 2.4 mg, 20 N yükte 4.9 mg, 40 N yükte 9.9 mg aşınma kaybı meydana gelmiştir. Bu örnekte ise aşınma kayıplarındaki değişim % 100 civarındadır. Yukarıda verilen iki örnek birlikte ele alındığında ortaya çıkan kararsız durumu öncelikle deney süresindeki artışa dayandırmak mümkündür. Zira daha öncede belirtildiği gibi deney süresinin artmasıyla kompozit yapı içerisindeki nano grafenin yağlayıcı ve kaymaya yardımcı özelliği burada da ortaya çıkmıştır. Ayrıca abrasif aşınma deneylerinde kullanılan 600 mesh tane boyutundaki zımparanın üzerindeki aşındırıcı Al₂O₃ tanecikleri, deney süresi uzadıkça keskin köşeli özelliğini giderek yitirmekte, hatta bir kısmı zımpara üzerinden koparak uzaklaşmaktadır. Bu durumda aşınma kayıpları, deney süresindeki artmaya bağlı olarak kendi içerisinde giderek azalma eğilimi sergilemektedir. Bu durumda GNP takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin daha fazla süre ve aşınma yükleri altında çalışmasının daha uygun olabileceği değerlendirilmiştir.

Hibrit kompozitlerin aşınma davranışlarının sertlik değerleri ve porozite oranlarıyla ilişkisine bakıldığında çok net bir sonuç görülmektedir. Ancak en yüksek sertlik değerine sahip %10 TiB₂ takviyeli hibrit kompozit, genel olarak en az aşınma kayıplarını sergilemiştir. Benzer bir sonuç Mondal ve Das'ın [17], yaptığı çalışmada ifade edilmektedir. Aşınma ile porozite arasındaki ilişki yönünden bakıldığında ise, %10 TiB₂ takviyeli kompozit numune en az porozite oranı olarak ta ikinci sırada yer almıştır.

4. SONUÇLAR

Al 1050 matrisli ve GNP+TiB₂ hibrit kompozitler vakumlu infiltrasyon tekniği kullanılarak, % 0.5 sabit oranda GNP ve %5- %10 - %20 olmak üzere üç farklı oranda TiB₂ birlikte takviye edilerek başarıyla üretilmiştir. Üretilen hibrit kompozit malzemeler üzerinde yapılan sertlik ölçümleri ve aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

TiB₂ takviye oranı arttıkça kompozit yapı içerisindeki porozite oranı artış göstermiştir. En yüksek porozite oranı %20 TiB₂ takviyeli kompozitte %11.8 olarak kaydedilmiştir.

Hibrit kompozitler içerisindeki TiB₂ takviye oranının artmasıyla sertlik değeri önce yükselmiş daha sonra bir miktar düşmüştür. En yüksek sertlik değeri %10 TiB₂ takviyeli kompozitte 67.7 HB olarak ölçülmüştür. Bu sertlik değeri takviyesiz Al 1050 malzemenin sertliğini %45 oranında arttırmıştır.

Hibrit kompozitlerin aşınma davranışları deney süresi ve TiB₂ takviye oranına göre değişim göstermiştir. 30 s deney süresinde TiB₂ takviye oranı arttıkça aşınma kayıpları artış gösterirken, deney süresi arttırılıp 120 s'ye çıktığında TiB₂ takviye oranının artmasıyla aşınma kayıpları azalma eğilimi göstermiştir.

Aşınma deney süresinin ve deney yükünün artışı ile hibrit kompozit yapı içerisindeki nano grafen takviye elemanının yağlayıcı ve kaydırıcı özelliği ön plana çıkmaya başlamış ve aşınma kayıpları üzerinde bir miktar azaltıcı etki yapmıştır.

Bu tür grafen ve parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde uzun çalışma sürelerinin aşınma kaybının azalması yönünden daha olumlu olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ronald G. Munro, "Material properties of Titanium Diboride," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 105, no. 5, pp. 709-720, 2000.
- [2] K. Dharsan and S. Santhosh Kumar, "An exploration of the influence in aluminium metal matrix composite reinforced with graphene," 5th National Conference on Trends in Automotive Parts Systems and Applications (TAPSA-2017), *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 6, Special Issue 7, pp.141-142, 2017.
- [3] N.Subramani, K.Vijayaraghavan, V.V.Arumsankar and K.Sudha, "Analysis and investigation on A2024 metal matrix composites with B4C and Graphite," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 4636-4642, 2013
- [4] L. Gomez, D. Busquets-Mataix, V. Amigo and M.D. Salvador, "Analysis of boron carbide aluminium matrix composites", *Journal of Composite Materials*, vol.43, no. 9, pp. 987-995, 2009.
- [5] H. Hasırcı ve F. Gül, "B4C /Al kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı olarak abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi," *SDU International Journal of Technologic Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 15-21, 2010.
- [6] K. Gündoğan ve A. R. B. Özseri, "Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilen AA2024 ve AA6061 matrisli, B4C ve SiC takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı, mekanik ve ısıl iletkenlik özelliklerine basıncın etkisi," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, cilt. 11, sayı. 2, ss. 657-669, 2019.
- [7] C. Xiaozhou, W. Chao, X. Xiangxin and C. Gongjin, "Effect of Ti addition on the residual aluminium content and mechanical properties of the B4C-Al composites produced by vacuum infiltration," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 60, no. 4, pp. 2493-2497, 2015.
- [8] P. Kulkarni, "Evaluation of mechanical properties of AL 2024 based hybrid metal composites," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 12, no. 5, ver. IV, pp. 108-122, 2015.
- [9] M. C. Şenel ve M. Gürbüz, "Fabrication and mechanical behavior of aluminum matrix composites reinforced with nano alumina particles," *Düzce University Journal of Science & Technology*, vol. 7, pp. 1341-1350, 2019.
- [10] Sheng-ming Zhou, Xiao-bin Zhang, Zhi-peng Ding, Chun-yan Min, Guo-liang Xu and Wen-ming Zhu, "Fabrication and tribological properties of carbon nanotubes reinforced Al composites prepared by pressureless infiltration technique," *Composites: Part A*, vol.38, pp. 301-306, 2007.
- [11] Y. Sahin ve M. Acılar, "Production and properties of SiCp-reinforced aluminium alloy composites", *Composites: Part A*, vol.34, pp. 709-718, 2003.
- [12] S. Korucu ve G. Soy, "Alüminyum matrisli kompozitlerde tungsten karbür ve grafen takviyelerinin mekanik özelliklere etkileri üzerine bir araştırma," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt.7, sayı 3, ss.1466-1487, 2019.
- [13] A. M, Rajesh and M. Kaleemulla, "Experimental investigations on mechanical behavior of aluminium metal matrix composites," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol.149, no.012121, 2016.
- [14] C. S. Ravindra Sagar and T. K Chandrashekar, "Effect of heat treatment on mechanical properties of aluminum LM13-MgOp metal matrix composites," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 8, no. 2, pp. 284-288, 2018.
- [15] D. Özyürek and İ. Çiftçi, "An investigation into the wear behaviour of TiB2 particle reinforced aluminium composites produced by mechanical alloying," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 18, pp. 5-12, 2011.
- [16] T. Raviteja, N. Radhika and R. Raghu, "Fabrication and mechanical properties of stir cast Al-Si12Cu/B4C composites," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03 no 7, pp 343-346, 2014.
- [17] D.P. Mondal and S. Das, "High stress abrasive wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect of experimental parameters, particle size and volume fraction," *Tribology International*, vol. 39, pp. 470-478, 2006.
- [18] S. Gargatte, R. R. Upadhye, V. S. Dandagi, S. R. Desai and B. S. Waghmode, "Preparation & characterization of Al-5083 alloy composites," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol.1, pp. 8-14, 2013.
- [19] M. Uthayakumar, S. Aravindan and K. Rajkumar, "Wear performance of Al-SiC-B4C hybrid composites under dry sliding conditions", *Materials and Design*, vol. 47, pp. 456-464, 2013.





DRY SLIDING FRICTION and WEAR PROPERTIES of CaCO₃ NANOPARTICLE FILLED EPOXY/CARBON FIBER COMPOSITES

Emine Feyza ŞÜKÜR^{1,*} 

¹Konya Technical University, Mechanical Engineering Department, 42250, Konya, Turkey

ABSTRACT

Metal/Fiber-reinforced polymer (FRP) composite joints with lower coefficients of friction are increasingly replaced metal-metal couples in a variety of fields. The wear performance of metal/FRP tribo-contacts becomes a key design parameter for their service life, and the improvement in the wear performance of metal-FRP friction pairs is needed to extend their applications. In this paper, sliding friction and wear characteristics of carbon fiber (CF) reinforced epoxy composites against metallic counterparts were investigated. Tests were performed on a ball-on-disk tester at a constant normal load and velocity against chromium steel under dry ambient. Moreover, calcium carbonate (CaCO₃) nano reinforcements were introduced into Epoxy/CF composites to improve their wear performance. The coefficient of friction (65%) and the specific wear rate (75%) were drastically reduced with the addition of CaCO₃ nano reinforcements. Worn surfaces were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) to evaluate the wear mechanisms. It was concluded that the abrasion dominated wear mechanism of the neat Epoxy/CF composites transformed into adhesion for the multi-scale composites with the addition of cubic CaCO₃ nanoparticles, which is responsible for the increased wear performance of neat Epoxy/CF composites. This impact was most likely attributed to two main factors: “nano CaCO₃ particles facilitate sliding” and “act as a solid lubricant”.

Keywords: Carbon fiber, nano CaCO₃, Polymer matrix composite, Sliding wear, Wear mechanism

CACO₃ NANOPARTİKÜL DOLGULU EPOKSİ/KARBON FİBER KOMPOZİTLERİN KURU SÜRTÜNME ve AŞINMA ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Düşük sürtünme katsayılı metal/fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit bağlantılar, çeşitli alanlarda giderek metal-metal çiftlerin yerini almaktadır. Metal/FRP çiftlerinin aşınma performansı servis ömürlerine etki eden anahtar bir tasarım parametresi haline gelmiştir ve metal/FRP sürtünme çiftlerinin kullanım alanlarının genişletilmesi için aşınma performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu makalede, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin metalik karşıt yüzeylere karşı kayma sürtünmesi ve aşınma özellikleri araştırılmıştır. Testler, sabit bir normal yükte ve hızda kuru ortam altında krom çeliğe karşı ball-on-disk test cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Epoksi/CF kompozitlere aşınma performanslarını artırmak için kalsiyum karbonat (CaCO₃) nano takviyeleri eklenmiştir. CaCO₃ nano takviyelerin eklenmesiyle sürtünme katsayısı (%65) ve özgül aşınma oranı (%75) önemli ölçüde azaltılmıştır. Aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesi için aşınmış yüzeyler taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, yalın Epoksi/CF kompozitlerde ana aşınma mekanizması olarak gözlemlenen abrazif aşınma, kübik CaCO₃ nano takviyelerin ilavesiyle üretilen çok-ölçekli kompozitlerde adhezif aşınma mekanizmasına dönüşmüş ve aşınma mekanizmasındaki dönüşüm yalın kompozitlerin aşınma performansının artmasında temel rolü oynamıştır. Bu etki: “CaCO₃ partiküllerin kaymayı mümkün kılması” ve “katı yağlayıcı görevi görmesi” olmak üzere büyük oranda iki temel faktöre dayandırılmıştır:

Anahtar kelimeler: Karbon fiber, nano CaCO₃, Polimer matris kompozit, Kayma aşınması, Aşınma mekanizması

1. INTRODUCTION

It is well known that the coefficients of friction (~0.7-1.0) are comparatively high for the steel-steel contacts [1]. Recently, metal-fiber reinforced polymer (FRP) pairs that have lower coefficients of friction are coupled together in advanced industrial applications such as automotive, aircraft, aerospace, and electrical components [2]. Carbon fiber reinforced epoxy composite

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: efsukur@ktun.edu.tr

Geliş / Received: 24.04.2020 Kabul / Accepted: 26.06.2020 doi: 10.28948/ngumuh.725631

materials are replacing traditional metallic materials in automotive, aerospace, marine, defense, and various industrial fields due to their high weight resistance rates [3]. Although it has many advantages compared to metallic materials, it may be necessary to improve the tribological properties of fiber-reinforced composites for specific applications. The improvement of the tribological performance of fiber-reinforced composites is through enhancing the physical, thermal, and mechanical properties [4]. It is prominent to introduce micro- and nano-scale particles as additives into the matrix, which is one of the methods used in improving the mechanical and tribological performance of composite materials recently [5]. The hardness, modulus, and strength of the matrix can be enhanced by adding ceramic-based nano reinforcements with high wear performance [6]. In addition to reinforcing the matrix, forming wear debris containing nano reinforcements is a useful strategy, which reduces friction between the peer surfaces. In recent years, studies examining especially nano-sized reinforcements have been increasing. Carbon nanotube [7, 8], graphene [3, 9, 10], and clay [11, 12] are among the most researched inorganic nano additives. Recently, nano-CaCO₃, which is of interest among inorganic fillers, is used in the polymer applications due to its low cost [13] as well as reinforcing and hardening effects [14].

In various studies, it was stated that the introduction of nano-sized CaCO₃ to different composites generally improved their mechanical performance. CaCO₃ nanofillers significantly increased impact resistance in polypropylene composites [15, 16]. In the case of CaCO₃, nanofillers were introduced to the epoxy matrix, compressive strength, elasticity modulus, flexural modulus, impact strength, and thermal stability [17-19] have been improved, particularly with low concentrations. In studies on glass [20] and carbon [18] fiber-reinforced composites, it was stated that the CaCO₃ additive also positively improved the impact strength, thermal stability, fracture toughness, and bending properties of the composites. The wear resistance of thermoplastic polymer composites such as polyether-ether-ketone (PEEK) [21], poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) [22], acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) [23], polyamide 66 (PA66) [24] and polycarbonate (PC) [25] with CaCO₃ additive has increased in dry sliding conditions, thereby improving their tribological properties.

However, there is very limited information on the tribological properties of CaCO₃ nanoparticle filled thermoset polymers. Therefore, it is imperative to investigate the effects of CaCO₃ reinforcements on the tribological behaviour of CaCO₃ nanoparticle filled epoxy and their carbon fiber composites. In this paper, the tribological properties of Epoxy/CF multi-scale composites modified with various amounts of CaCO₃ nanoparticles were investigated. Wear tests were performed on a ball-on-disc wear tester under different test conditions. In the observed wear mechanisms based on nanofiller content and test, parameters were interpreted with SEM images captured from wear surfaces.

2. MATERIAL and METHOD

2.1. Materials

Epoxy (MGS-L160) and curing agent (MGS-M160) as matrix material were commercially supplied from Momentive Hexion Inc. CaCO₃ nanoparticles (98% purity) with cubic morphology and 100 nm size were purchased from the Chengdu Kelong Chemical Co., Ltd. company. Plain weave carbon fiber fabric with 300g/m² areal density was obtained from the DowAksa company.

2.2. Production of Multi-Scale Composites

The production scheme of nano-CaCO₃ modified multi-scale Epoxy/CF composite laminates is given in Fig. 1. The Vacuum-Assisted Resin Infusion Molding (VARIM) process was used to produce the multi-scale laminate plates consisting of ten plies of carbon fabrics, and the procedure in similar studies previously conducted in the literature has been applied [26]. First, the epoxy matrix was modified with CaCO₃ nanoparticles. The particles were mixed in acetone with an ultra sonicator for 15 minutes to prevent agglomeration. Following, the epoxy resin was introduced into the mixture, and the resultant mixture was further stirred with epoxy for another 30 min. To evaporate acetone, the solution was kept in a vacuum oven at 70 °C for 24 hours. After the evaporation process, the curing agent was added into the mixture in accordance with the manufacturer's recommendations, and the mixture is mixed mechanically for 5 min. To minimize the air bubbles formed during the mixing process, the mixture was degassed in a vacuum oven at 70 °C for 15 minutes, and degassing was performed. During the production of multi-scale carbon fiber reinforced composite material, the stainless steel mold was heated up to 70 °C to reduce the viscosity of the matrix polymer. The prepared epoxy matrix is impregnated with fiber-reinforced composite layers. The samples cured at 70 °C for 1 h and post-cured at 120 °C for 4 h. Through this production process, 1wt%, 3wt%, and 5wt% CaCO₃ nano-reinforced Epoxy-CF multi-scale laminates were obtained. Also, the production of epoxy composite material without nanoparticle additives was carried out by similar processes.

DRY SLIDING FRICTION and WEAR PROPERTIES of CaCO₃ NANOPARTICLE FILLED EPOXY/CARBON FIBER COMPOSITES

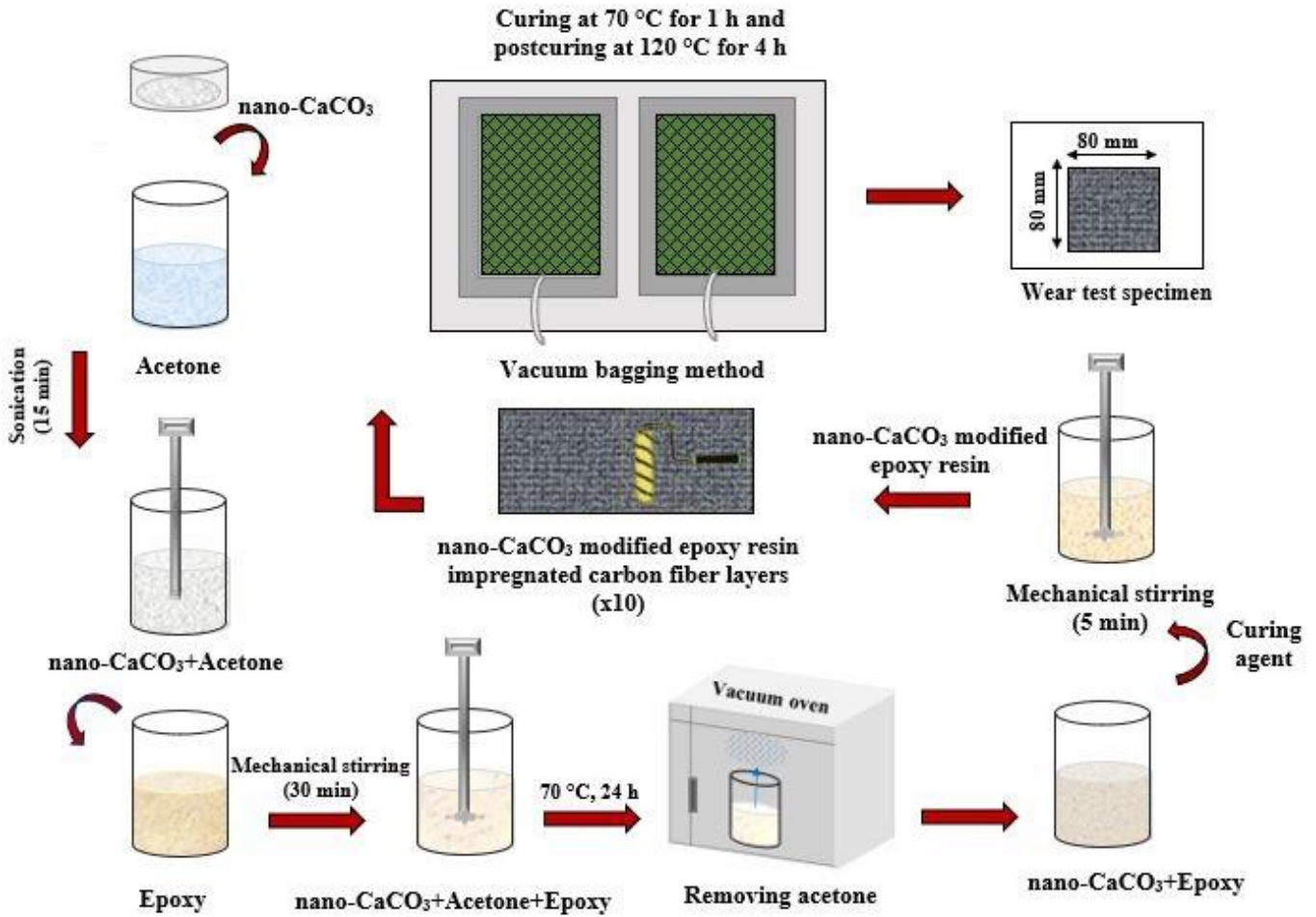


Figure 1. Production scheme of composite materials

2.3. Friction and Wear Tests

The tribological performance of the samples was determined under dry sliding conditions with the ball-on-disc wear tester (ASTM-G99) shown in Fig. 2. As an abrasive ball, a 6 mm diameter 62 HRC hardness chrome steel ball is used. The friction and wear tests were performed at ambient temperature under a load of 10 N at a sliding velocity of 0.75 m/s and a sliding distance of 2700 m.

After the experiments, the weights of the samples were measured with the help of precision scales, the weight losses were determined and Eq. 1 was used in the wear rate calculation.

$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F_N \cdot L} \text{ mm}^3/\text{Nm} \tag{1}$$

Here, L represents the sliding distance (m), F_N applied load (N), ρ sample density (gr/mm³), and Δ_m the weight loss (gr) of the wearing sample.

The morphologies of the worn surfaces of the samples were analyzed using a Zeiss LS 10 scanning electron microscope (SEM).

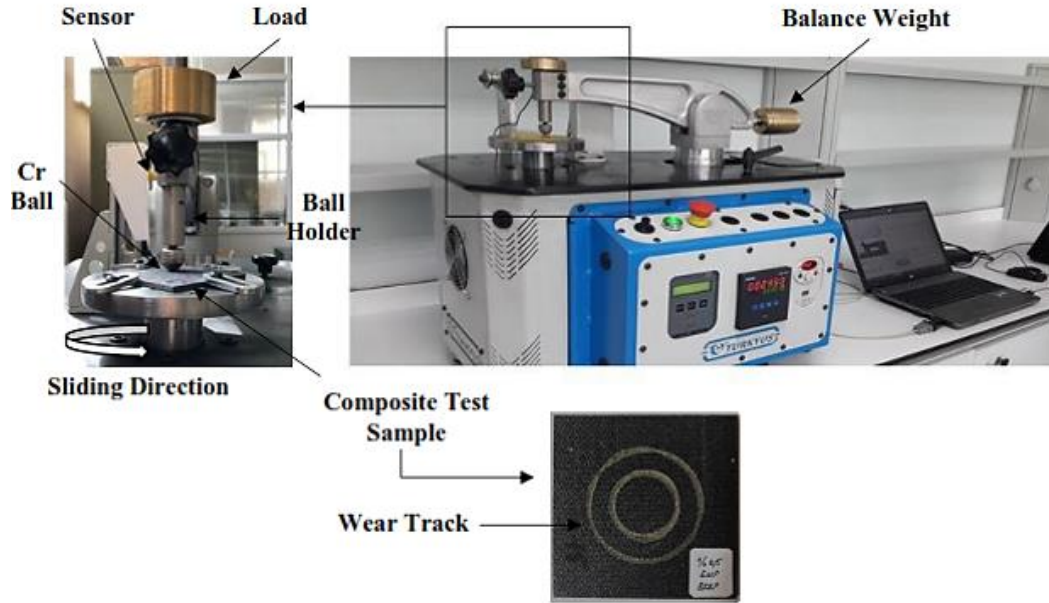


Figure 2. Ball-on-disc wear tester

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1. Dry Sliding Wear Tests

Figure 3 represents the variation of characteristic coefficients of friction to time. It is observed that the neat Epoxy/CF (Fig. 3.a) and 5wt% nano-CaCO₃ modified multi-scale composite samples (Fig. 3.d) composites exhibit steady wear performance after a short initial running-in period. However, the 5% nanofiller content provided a serious stabilization in the coefficient of friction curve. In the case of 1wt% (Fig 3.b) and 3wt% nano-CaCO₃ (Fig. 3.c) modified multi-scale composites, reaching the steady-wear stage took longer initial periods. Steady-wear stage data are essential in interpreting the friction behaviour of the material and characterizing the long-term properties of the system. [27]. The steel ball, which contacts the surface in dry sliding wear, is initially embedded in the surface and forms a wear track during the running-in period. During the running-in period, the coefficient of friction depends on parameters such as hardness, surface roughness, sliding speed, and applied load. In this study, wear tests were performed under the same sliding velocity and load. In general, therefore, these findings suggest that the most crucial factor in the transition to the stable wear zone is the surface morphology of the composites. Composites are not standardized materials, and the epoxy layer on their surfaces may differ from each other after vacuuming during the production phase. It is attributed to the fact that the Epoxy /CF composite is in the stable wear zone from the start.

In all cases, the addition of CaCO₃ nanofillers facilitates sliding due to its friction-reducing properties [28], which is effective in the transition from the running-in zone to the stable wear zone. For the multi-scale composites with 5wt% nano-CaCO₃, both the short running-in period and the stabilization in the coefficient of friction curve in the steady wear stage reveal the positive impacts of the nano-CaCO₃ additive.

DRY SLIDING FRICTION and WEAR PROPERTIES of CaCO₃ NANOPARTICLE FILLED EPOXY/CARBON FIBER COMPOSITES

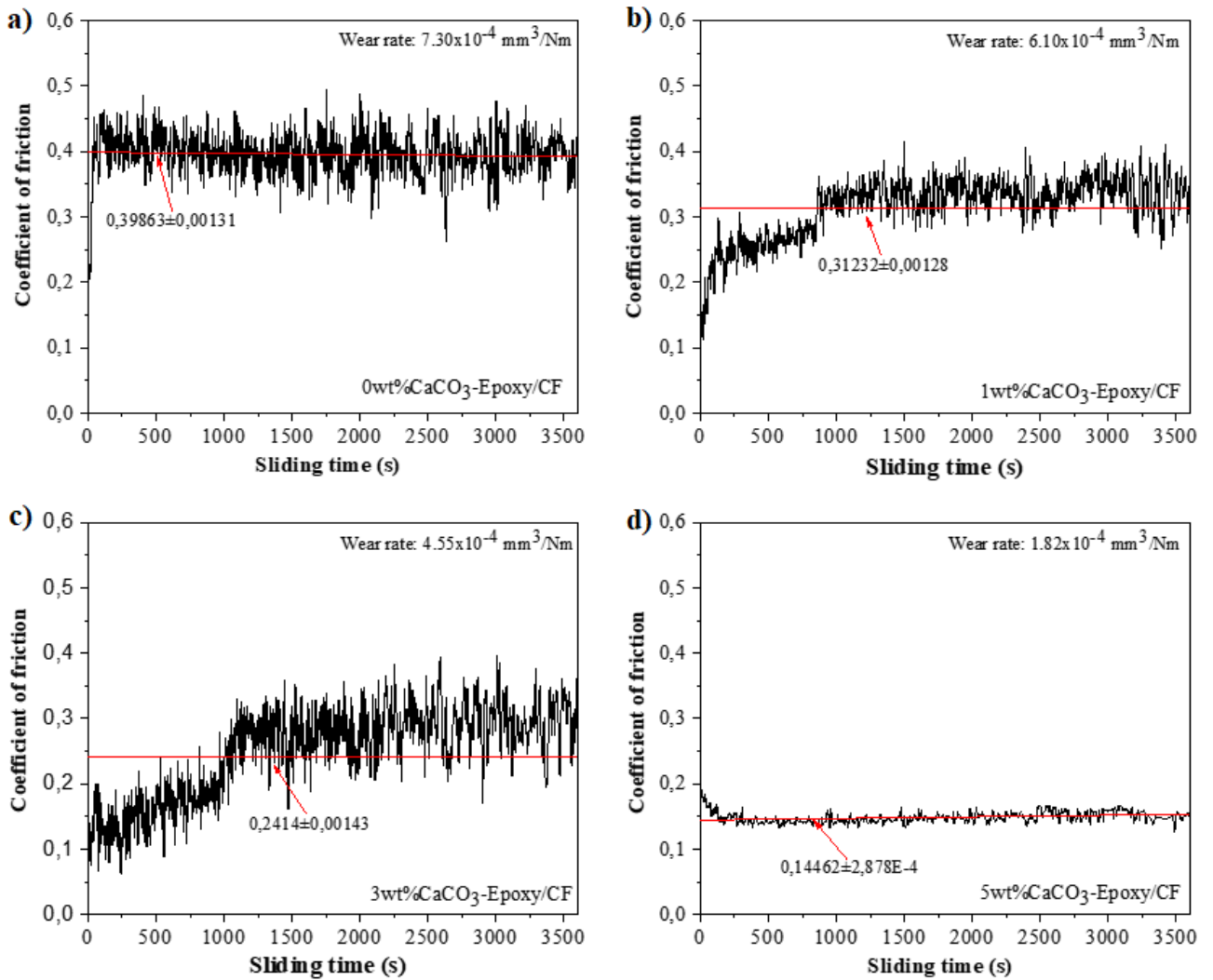


Figure 3. Variation of the coefficient of friction of the **a)** 0wt% CaCO₃-Epoxy/CF **b)** 1wt% CaCO₃-Epoxy/CF **c)** 3wt% CaCO₃-Epoxy/CF and **d)** 5wt% CaCO₃-Epoxy/CF composites with sliding time.

The correlations of the coefficient of friction and wear rates of composites with increasing nano-CaCO₃ content are given in Fig. 4. Both coefficients of friction and wear rates of multi-scale composites show a decreasing trend with increasing weight percentage.

The mean coefficient of friction of the neat Epoxy/CF composite is calculated as 0.4. Compared to the neat samples, dramatic reductions are achieved for the multi-scale composites. The lowest coefficient of friction is calculated as 0.14 for the multi-scale composites containing 5 wt% nano-CaCO₃, which is approximately 65% lower than that of the neat composite laminates (Fig. 4.a). The wear rate of the neat Epoxy/CF composite is calculated as $7.30 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. The lowest wear rate is calculated as $1.82 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ for the multi-scale composites containing 5 wt% nano-CaCO₃, which is approximately 75% lower than that of the neat composite laminates (Fig. 4.b). The change in tribological properties is thought to be caused by the change in the mechanical properties of the composites with the nano-CaCO₃ additive [26] and internal structures such as the homogeneous dispersion of nano-CaCO₃ in the nanocomposites [29]. Here, the nano-CaCO₃ additive with good dispersing properties [28, 30] has two important impacts on the wear performance of Epoxy/CF composite laminates. These are, with its antiwear and friction-reducing properties [28], nano-CaCO₃ facilitates sliding and provides lubrication under dry sliding conditions with its solid lubricant feature. [31, 32].

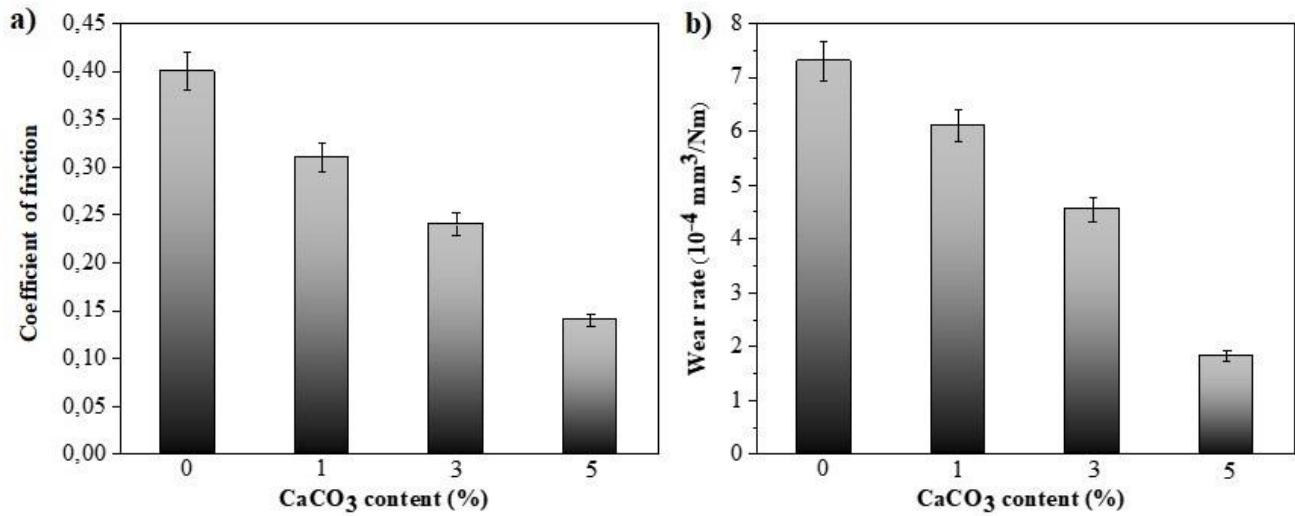


Figure 4. Effect of nano-CaCO₃ content on **a)** coefficient of friction and **b)** specific wear rate of the Epoxy/CF composites

SEM images of neat Epoxy/CF and nano-CaCO₃-Epoxy/CF composites are given in Fig. 5. Abrasive wear, which is the primary wear mechanism for the neat Epoxy/CF composite, has removed the epoxy matrix locally from the surface as the sliding continues (Fig 5.a). Fiber breakages are observed in those regions, and micro-crack formations and wear debris are seen where the matrix is not completely removed (Fig. 6.b). In the case of multi-scale composite samples with 1%wt nano-CaCO₃ content, both abrasive and adhesive wear types are observed. (Fig 5.c). Matrix cracks are seen on the surface with abrasive wear. The matrix cracks were observed close to the worn surface; no fiber damage was obtained. CaCO₃ nanofillers cover the matrix region, allowing the matrix to protect the fibers in areas where abrasive wear is active. (Fig. 5.d). In the adhesive wear zones, wear debris are plastered on the abrasive ball surface as the sliding continues. The adhesive wear mechanism is effective in 3wt% (Fig. 5.e) and 5wt% nano-CaCO₃ modified Epoxy/CF (Fig. 5.g) multi-scale composites. As the abrasive ball continues to slide on the contact surface, the temperature at the contact point increases with the effect of friction. Ceramic nanoparticles with high thermal conductivity can increase the thermal conductivity of the composite into which they are added. Increased thermal conductivity can contribute to a reduction in the contact area temperature during sliding [5]. He et al. stated that thermal properties improved up to 4wt% nanofiller content, a decrease in the thermal properties occurred with the increasing CaCO₃ content due to the agglomeration. Possible agglomerations at high nanofiller contents do not limit molecular mobility, so the decomposition temperature decreases [33]. The reduction in thermal conductivity caused by possible agglomerations in 3 wt% nano-CaCO₃-Epoxy/CF composites restricts the homogeneous dissipation of the heat generated at the contact point during wear, contact point temperature increases. High frictional heat and contact zone temperature causes thermal softening in the matrix [34]. Significant plastic deformation zones appear with the effect of thermal softening (Fig. 5.f) In their study where the mechanical properties of CaCO₃ reinforced carbon fiber composites were examined, Eskizeybek et al. achieved the highest mechanical performance with the addition of 2wt% nanofiller content. After 2% additive, there were decreases in properties [26].

Possible reductions in mechanical properties in 5 wt% nano-CaCO₃-Epoxy/CF composites facilitate deformation during adhesive wear and subsequent adhesion of the deformed particles to the surface. Thus, marked sliding tracks (Fig. 5.g) and scratches (Fig 5.h) are observed on the wear surfaces.

DRY SLIDING FRICTION and WEAR PROPERTIES of CaCO₃ NANOPARTICLE FILLED EPOXY/CARBON FIBER COMPOSITES

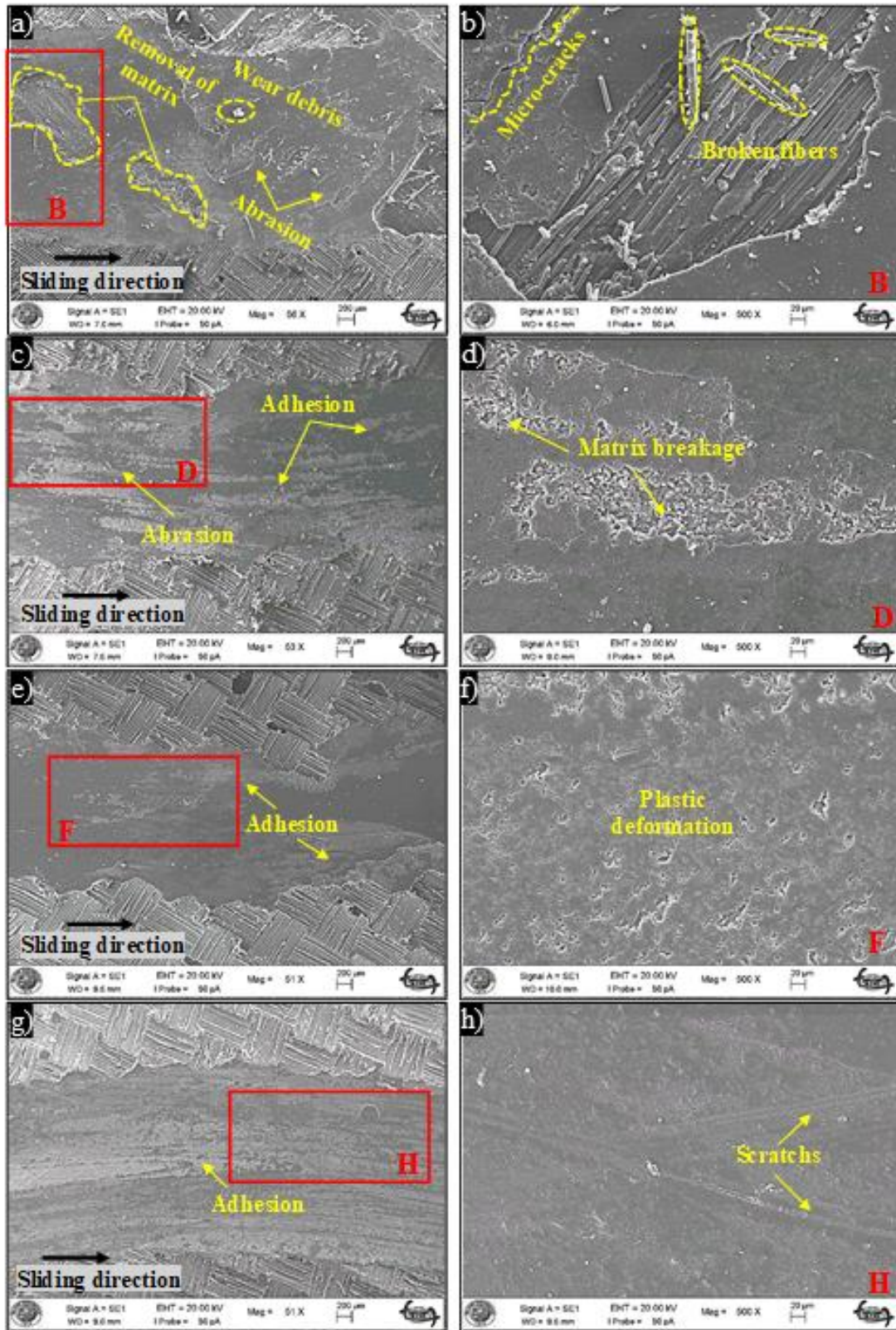


Figure 5. SEM images of worn surfaces of the **a)-b)** 0wt% CaCO₃-Epoxy/CF, **c)-d)** 1wt% CaCO₃-Epoxy/CF, **e)-f)** 3wt% CaCO₃-Epoxy/CF, **g)- h)** 5wt% CaCO₃-Epoxy/CF composites

The possible wear mechanism that occurred is given schematically in Fig. 6, Figure 6.a) represents dry sliding wear and wear track formation. The primary mechanism for the neat Epoxy/CF composites is abrasion, as given in Figure 6.b) The incompatibility and weak bonding between the fiber-matrix allow the matrix to be easily removed from the surface under the influence of abrasion. Besides, micro-cracks can be seen on the surface. In areas where the matrix is removed, breaks may occur in the fibers along with the matrix. The fibers and matrix, which are broken down under the effect of the sliding that continues after breaking, appear as wear debris on the surface. In nano-CaCO₃-Epoxy/CF composites, adhesion wear dominates the contact surfaces. During adhesion wear, it is easier for particles to break off from the surface and then re-plastered to the surface, due to the effect of agglomerations and mechanical properties that increase as the additive rate increases. The debris that forms a film layer by plastering on the surface makes it easy to slide with the solid lubricant effect of CaCO₃.

Sliding tracks and scratches are observed on the surface in line with wear. Thermal properties worsening in increasing additive ratios cause the heat generated by the effect of friction at the contact point not to be distributed homogeneously. The contact point temperature increases. Increased temperature causes thermal softening of the polymer, and softening causes plastic deformations.

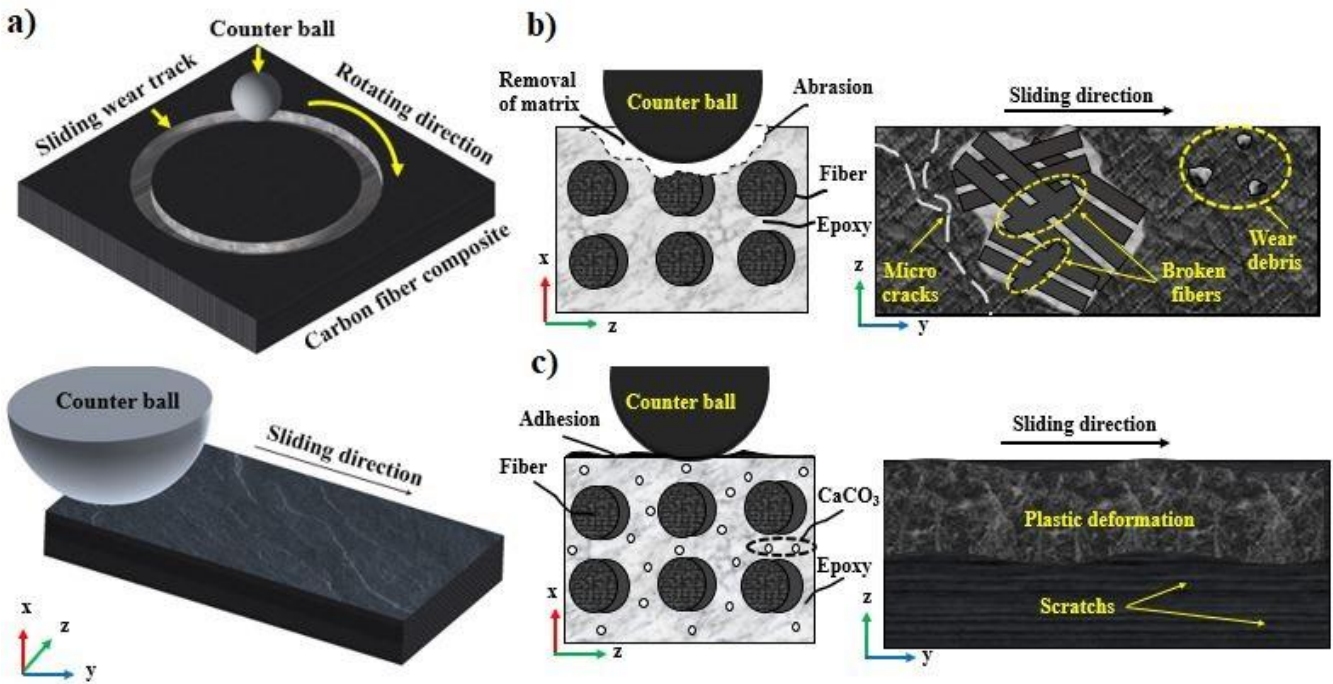


Figure 6. Schematic illustration of dry sliding wear mechanism
 a) schematic of ball-on-disk wear test b) neat Epoxy/CF and c) multi-scale CaCO₃-Epoxy/CF

4. CONCLUSIONS

In this work, the effect of nano-CaCO₃ particles on the tribological properties of carbon fiber reinforced epoxy composites were studied. The experimental data reveals the following conclusions:

- The dispersion of nano CaCO₃ in the matrix improves friction and wear performance of Epoxy/CF composites.
- It is clear, for all nano-CaCO₃-Epoxy/CF composites, that the coefficient of friction and specific wear rate decreases with an increase in the percentage of nano-CaCO₃-Epoxy/CF.
- The nano-CaCO₃ particle reinforcement was reduced the mean coefficients of friction and wear rates of Epoxy/CF composites by 22.5%-65% and 16%-75%, respectively.
- The 5 wt% nano-CaCO₃ content dramatically reduced the mean coefficients of friction and wear rate by 65% and 75%, respectively.

DRY SLIDING FRICTION and WEAR PROPERTIES of CaCO₃ NANOPARTICLE FILLED EPOXY/CARBON FIBER COMPOSITES

- Several wear mechanisms such as abrasion, ploughing, crack formation, the fracturing of fiber and matrix, adhesion, and plastic deformation were observed. Abrasion and adhesion are the primary wear mechanism for neat Epoxy/CF and nano-CaCO₃-Epoxy/CF composites, respectively.

ACKNOWLEDGE

The author is grateful for the technical support of the Selcuk University Advanced Technology Research & Application Center.

REFERENCES

- [1] A. S. Rathaur, V. K. Patel, and J. K. Katiyar, "Tribo-mechanical properties of graphite/talc modified polymer composite bearing balls," *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, pp. 1-8, 2019, Art. no. 015305.
- [2] A. Prenleloup, T. Gmür, J. Botsis, K. O. Papailiou, and K. Obrist, "Stress and failure analysis of crimped metal-composite joints used in electrical insulators subjected to bending," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 5, pp. 644-652, 2009.
- [3] A. Ashori, H. Rahmani, and R. Bahrani, "Preparation and characterization of functionalized graphene oxide/carbon fiber/epoxy nanocomposites," *Polymer Testing*, vol. 48, pp. 82-88, 2015.
- [4] C. Su, F. Xue, T. Li, Y. Xin, and M. Wang, "Study on the tribological properties of carbon fabric/polyimide composites filled with SiC nanoparticles," *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 55, no. 6, pp. 627-641, 2016.
- [5] K. Friedrich, "Polymer composites for tribological applications," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 1, no. 1, pp. 3-39, 2018.
- [6] B. Suresha, G. Chandramohan, Kishore, P. Sampathkumaran, and S. Seetharamu, "Mechanical and three-body abrasive wear behaviour of SiC filled glass-epoxy composites," vol. 29, no. 9, pp. 1020-1025, 2008.
- [7] M. Sánchez, M. Campo, A. Jiménez-Suárez, and A. Ureña, "Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 1613-1619, 2013.
- [8] H. Ulus, T. Üstün, Ö. S. Şahin, S. E. Karabulut, V. Eskizeybek, and A. Avcı, "Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates," *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 6, pp. 761-770, 2016.
- [9] J. Cho, J. Y. Chen, and I. M. Daniel, "Mechanical enhancement of carbon fiber/epoxy composites by graphite nanoplatelet reinforcement," *Scripta Materialia*, vol. 56, no. 8, pp. 685-688, 2007.
- [10] D. Jiang *et al.*, "Mechanical properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide in the interphase," *Polymer Composites*, vol. 38, no. 11, pp. 2425-2432, 2017.
- [11] Y. Xu and S. V. Hoa, "Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy/clay nanocomposites," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 3, pp. 854-861, 2008.
- [12] M. H. Gabr, W. Okumura, H. Ueda, W. Kuriyama, K. Uzawa, and I. Kimpara, "Mechanical and thermal properties of carbon fiber/polypropylene composite filled with nano-clay," *Composites Part B: Engineering*, vol. 69, pp. 94-100, 2015.
- [13] H. Al-Kaisy and A. Al-Zubaidi, "Mechanical, thermal and wear characteristics of polymer composite material reinforced with calcium carbonate powder," *Information Technology Journal*, vol. 32, p. 519, 2014.
- [14] J.-Z. Liang, L. Zhou, C.-Y. Tang, C.-P. Tsui, and F.-J. Li, "Melt flow behavior in capillary extrusion of nanometer calcium carbonate filled PCL bio-composites," *Polymer Testing*, vol. 31, no. 1, pp. 149-154, 2012.
- [15] C.-M. Chan, J. Wu, J.-X. Li, and Y.-K. Cheung, "Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites," *Polymer*, vol. 43, no. 10, pp. 2981-2992, 2002.
- [16] Y. Lin, H. Chen, C.-M. Chan, and J. Wu, "High impact toughness polypropylene/CaCO₃ nanocomposites and the toughening mechanism," *Macromolecules*, vol. 41, no. 23, pp. 9204-9213, 2008.
- [17] H. He, Z. Zhang, J. Wang, and K. Li, "Compressive properties of nano-calcium carbonate/epoxy and its fibre composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 919-924, 2013.
- [18] H. He, K. Li, J. Wang, G. Sun, Y. Li, and J. Wang, "Study on thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate/epoxy composites," *Materials & Design*, vol. 32, no. 8, pp. 4521-4527, 2011.
- [19] L. Li, H. Zou, L. Shao, G. Wang, and J. Chen, "Study on mechanical property of epoxy composite filled with nano-sized calcium carbonate particles," *Journal of Materials Science*, journal article vol. 40, no. 5, pp. 1297-1299, 2005.

- [20] N. H. M. Zulfli, A. A. Bakar, and W. S. Chow, "Mechanical and thermal properties improvement of nano calcium carbonate-filled epoxy/glass fiber composite laminates," *High Performance Polymers*, vol. 26, no. 2, pp. 223-229, 2014.
- [21] Y. Lin, C. Gao, and N. Li, *Influence of CaCO₃ whisker content on mechanical and tribological properties of polyetheretherketone composites*. 2006, pp. 584-588.
- [22] Y. Lin, C. Gao, and Y. Li, *Effect of CaCO₃ whisker and PTFE on dry friction behavior of PEEK*. 2007, pp. 643-648.
- [23] J. Sudeepan, K. Kumar, T. K. Barman, and P. Sahoo, "Study of tribological behavior of ABS/ CaCO₃ composite using grey relational analysis," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 682-691, 2014.
- [24] Y. N. Kaito Itagakia, Takeshi Kitanoc, and Kenichiro Eguchid, "Tribological properties of nanosized calcium carbonate filled polyamide 66 nanocomposites," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1713, no. 1, 2016.
- [25] S. J. Charde, S. S. Sonawane, S. H. Sonawane, and S. Navin, "Influence of functionalized calcium carbonate nanofillers on the properties of melt-extruded polycarbonate composites," *Chemical Engineering Communications*, vol. 205, no. 4, pp. 492-505, 2018.
- [26] V. Eskizeybek, H. Ulus, H. B. Kaybal, Ö. S. Şahin, and A. Avcı, "Static and dynamic mechanical responses of CaCO₃ nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 140, pp. 223-231, 2018.
- [27] G. Kalacska, "An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties," *Express Polymer Letters*, vol. 7, pp. 199-210, 2012.
- [28] Q. Sunqing, D. Junxiu, and C. Guoxu, "Wear and friction behaviour of CaCO₃ nanoparticles used as additives in lubricating oils," *Lubrication Science*, vol. 12, pp. 205-212, 2000.
- [29] K. Itagaki, Y. Nishitani, T. Kitano, and K. Eguchi, *Tribological properties of nanosized calcium carbonate filled polyamide 66 nanocomposites*. 2016.
- [30] D. Jin and L. Yue, "Tribological properties study of spherical calcium carbonate composite as lubricant additive," *Materials Letters* vol. 62, pp. 1565-1568, 2008.
- [31] K. Palanikumar, R. AshokGandhi, B. K. Raghunath, and V. Jayaseelan, "Role of calcium carbonate(CaCO₃) in improving wear resistance of polypropylene (PP) components used in automobiles," *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, pp. 1363-1371, 2019.
- [32] X. Ji, Y. Chen, G. Zhao, X. Wang, and W. Liu, "Tribological properties of CaCO₃ nanoparticles as an additive in lithium grease," *Tribology Letters*, vol. 41, pp. 113-119, 2010.
- [33] H. He, K. Li, J. Wang, G. Sun, Y. Li, and J. Wang, "Study on thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate/epoxy composites," *Materials & Design* vol. 32, pp. 4521-4527, 2011.
- [34] S. Kumar and K. Panneerselvam, "Two-body abrasive wear behavior of nylon 6 and glass fiber reinforced (GFR) nylon 6 composite," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 1129-1136, 2016.





SICAKLIK GRADYENTİNİN MİKROYAPI VE MİKROSERTLİĞE ETKİSİ

Sevda ENGİN^{1,*} , Uğur BÜYÜK² , Necmettin MARAŞLI³ 

¹ Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kütahya, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Kayseri, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Malzeme ve Metalurji Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Al-6.5Ni-1.5Fe (ağ.) ötektik bileşiminde hazırlanan alaşım sabit katılaştırma hızında ($V = 16.57 \mu\text{m/s}$) ve beş farklı sıcaklık gradyentinde ($G = 3.23-8.52 \text{ K/mm}$) Bridgman Tipi fırın yardımıyla kontrollü doğrusal katılaştırılarak sıcaklık gradyentinin (G) alaşımın mikroyapı (λ) ve mikrosertlik (HV) özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda oluşan mikroyapılar arası mesafe ve mikrosertlik değerleri ölçülerek sıcaklık gradyentinin mikroyapı ve mikrosertlik üzerine etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu fiziksel özellikler arasındaki ilişki ise lineer regresyon analizi ile belirlenerek benzer deneysel sonuçlarla elde edilen veriler kıyaslanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kontrollü katılaştırma, Sıcaklık gradyenti, Mikroyapı, Mikrosertlik.

THE EFFECT OF TEMPERATURE GRADIENT ON MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS

ABSTRACT

Al-6.5Ni-1.5Fe (wt.) alloy was directionally solidified upward at a constant growth rate ($V = 16.57 \mu\text{m/s}$) and with five different temperature gradients ($G = 3.23-8.52 \text{ K/mm}$) by using a Bridgman type directional solidification furnace. In this way it was investigated effect of temperature gradient (G) on microstructure (λ) and microhardness (HV). The distance between microstructures and microhardness values were measured and the effect of temperature gradient on microstructure and microhardness was determined. The relationship between physical properties was determined by linear regression analysis and with the data obtained similar experimental results were compared.

Keywords: Solidification, Temperature gradient, Microstructure, Microhardness.

1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan pek çok malzeme katılaştırma ve katılaştırma sonrası uygulanan işlemler neticesinde istenilen özelliklere ulaştırılan alaşımlardır. Alaşımların ise genellikle çok bileşenli yapıya sahip olmaları nedeniyle, alaşımı oluşturulacak elementlerin bileşen miktarları (C_0), işlem parametreleri (sıcaklık gradyenti G , katılaştırma hızı V) ve bunların nasıl kontrol edileceği malzeme biliminin temel zorluklarını oluşturmaktadır.

Katılaştırma süreci, temelde saf malzemelerde tek fazlı büyütme işlemi için veya ikili ötektik ve peritektik sistemlerde oluşan iki fazlı sistemlerde meydana gelen reaksiyonları anlamak için öncülük etse de çok bileşenli malzemeleri incelemek için de kullanılan yöntemler arasındadır [1-22]. Bu nedenle özellikle son zamanlarda çok bileşenli alaşımların katılaştırılması ve alaşımların katılaştırma sürecindeki davranışları, malzemelerin farklı özelliklerini anlamak bakımından oldukça dikkat çekmektedir [22]. Bu amaç doğrultusunda literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında farklı katılaştırma hızlarında, sabit bileşen ve sabit sıcaklık gradyentinde hazırlanmış oldukça fazla çalışma görülmekle birlikte sıcaklık gradyentinin alaşımların fiziksel özelliklerini nasıl etkilediğini inceleyen çalışmalar daha sınırlıdır [1-21].

Son yıllarda alüminyum içerisine farklı oranlarda elementler katılanarak oluşturulan alaşımların yüksek sıcaklıklarda dayanımını, mekanik mukavemetini, iletkenlik özelliğini çok etkilenmeden korozyon özelliklerini artırmak için kullanılabileceği belirtilmektedir [23-26]. Katkı oranlarının düşük olması maliyeti de çok artırmayacağı için ticari olarak katkılı Al alaşımlarının kullanımını ayrıca artırmaktadır [23-26]. Özellikle endüstride yapılacak işlem ve kullanılacakları bölgelere göre alaşımların özelliklerini bilmek malzemeleri kullanacak mühendisler için çok büyük önem taşımaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sevda.engin@dpu.edu.tr

Geliş / Recieved: 11.10.2019 Kabul / Accepted: 27.01.2020 doi: 10.28948/ngmuh.632128

S: Engin, U. Büyük, N. Maraşlı

Ayrıca malzemelerin özelliklerini belirleyebileceğimiz simülasyonlar ve teorik modeller geliştirilebilmesi için veri tabanlarını oluşturacak bilgiler toplanmış olacaktır. Böylece özel şartlar için kullanılacak malzemelerin verileri önceden belirleneceğinden endüstride zaman ve maliyet kazanımı sağlayacaktır [22].

Verilen bilgiler kapsamında bu araştırmanın amacı Al-Fe-Ni (Al-ağ.%6.5Ni- ağ.%1.5Fe) ötektik alaşımı kontrollü katılaştırma yöntemi ile sabit katılaştırma hızında beş farklı sıcaklık gradyentinin etkisinde kontrollü doğrusal katılaştırılarak alaşımın mikroyapı ve mikrosertlik değerleri belirlemektir. Özellikle ötektik bileşim tercih edilerek aynı zamanda alaşım içerisinde meydana gelen mikroyapı (λ), mikroyapının düzeni, oluşan intermetalik bileşiklerin alaşımın mikrosertlik değerine katkısı incelenecektir.

2. DENEYSSEL SÜREÇ

2.1. Alaşımın Hazırlanması, Doğrusal Katılaştırma ve Metalografi

Bu çalışma kapsamında faz diyagramı ile belirlenen Al-%6.5ağ.Ni-%1.5ağ.Fe ($T_e = 638 \text{ }^\circ\text{C}$) ötektik bileşime göre stokiometrik hesaplamalar yapılarak elementlerin kütlece miktarları belirlenmiştir. Ötektik bileşime ait alaşımı oluştururken *Alfa Aesar* marka %99.99 saflıktaki alüminyum, %99.95 saflıktaki nikel ve %99.97 saflıktaki demir elementleri kullanılmış ve *AND GX 600* markalı hassas terazi ile tartılmıştır. Kütle miktarları belirlenen ve ergime sıcaklığı en düşük olan alüminyum elementi ($T_e = 660 \text{ }^\circ\text{C}$) silindir biçimli grafit kalıba (dış çapı 40 mm, iç çapı 30 mm ve 250 mm uzunluğunda) konularak Şekil 1.(a)'da şematik gösterimi verilen vakumlu ergitme fırını içine yerleştirilmiştir. Bu süreçte vakumlu ergitme fırınının sıcaklığı Al-Ni-Fe ötektik alaşımın erime sıcaklığının 100–150 °C üzerindeki sıcaklığa ayarlanmıştır. Vakumlu ergitme fırını içerisinde ergiyen alüminyuma belirlenen miktarlardaki nikel ($T_e = 1455 \text{ }^\circ\text{C}$) ve demir ($T_e = 1538 \text{ }^\circ\text{C}$) sırasıyla eklenmiş ve 20 dakikalık aralıklarla homojen alaşım oluşuncaya kadar grafit çubuk ile karıştırılmıştır. Böylece vakum altında elementler oksitlenmeden alaşım haline getirilmiştir. Vakumlu ergitme fırını için ayrıntılı bilgi kaynak [27]'de verilmiştir.

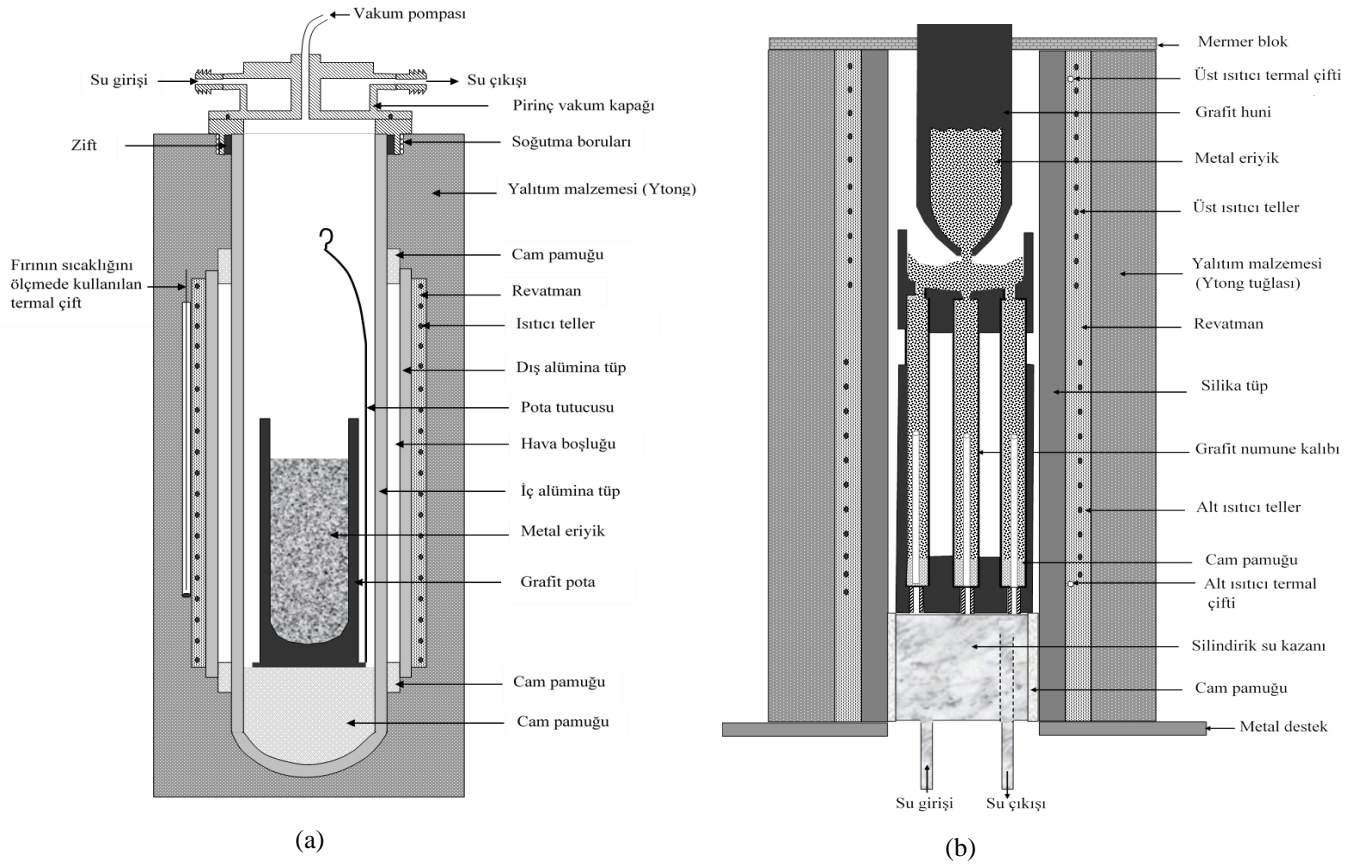
Numunelerin kalıp malzemesi, alaşımı hazırlamak için kullanılan potalar ve karıştırıcı olarak ise *Morgan* marka grafit tercih edilmiştir. Çünkü grafit, tornada işlenebilir dolayısıyla istenilen özelliklerde kalıp haline getirilebilir, metal malzemelerle tepkimeye girmez ve erime sıcaklığının oldukça yüksek olması nedeniyle alaşım hazırlanırken yüksek sıcaklık çalışma imkânı sağlar.

Vakumlu eritme fırını içerisinde alaşım oluşturulurken iç çapı 4 mm, dış çapı 6.35 mm ve 200 mm uzunluğunda 6 adet silindirik şeklindeki numune kalıplarına aynı anda oluşturulan alaşımı doldurabilmek için Şekil 1(b)'de şematik gösterimi verilen döküm fırını kullanılmıştır. Döküm fırınının üst ısıtıcısı oluşturulan alaşımın erime sıcaklığının 100–150 °C üzerindeki sıcaklığa ayarlanırken, alt ısıtıcısı alaşımın erime sıcaklığının 50 °C üzerindeki sıcaklığa ayarlanarak vakum fırını içerisinde alaşım oluşturuluncaya kadar numune kalıplarının da döküm fırını içerisinde ısınması sağlanmıştır.

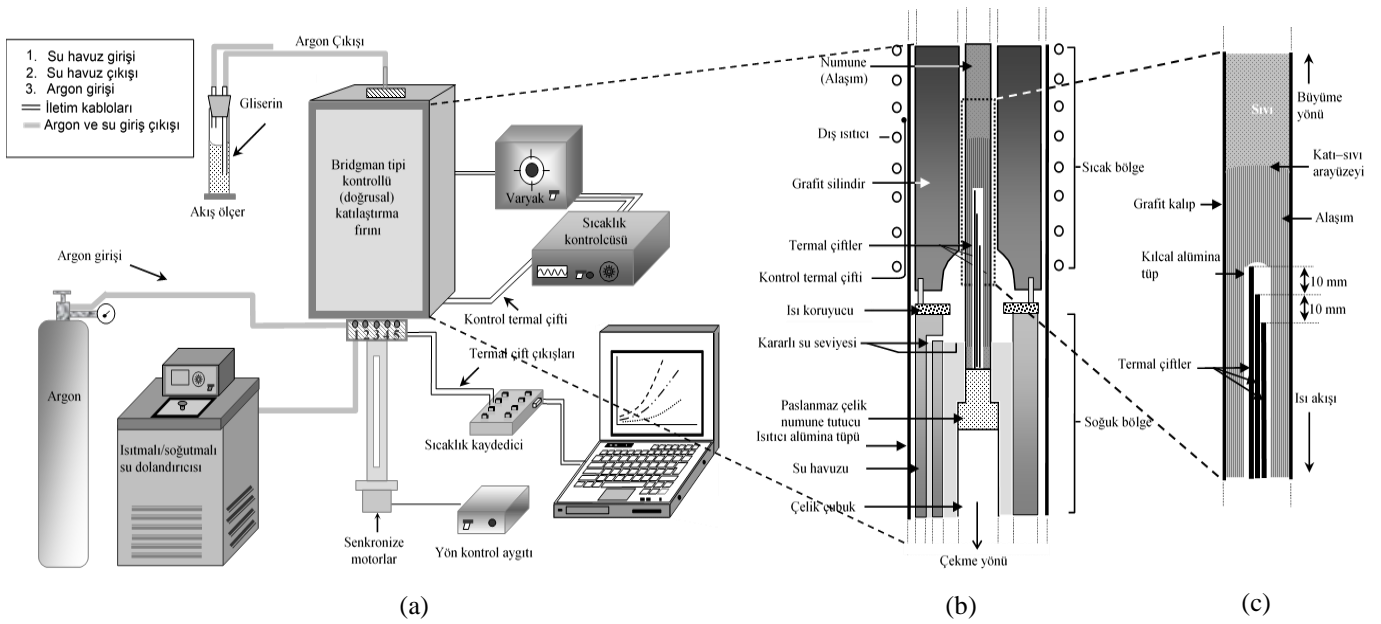
Vakum fırını yardımıyla hazırlanan sıvı homojen alaşım, ısıtılan numune kalıpları içerisine huni şeklindeki grafit pota (Şekil 1(b)) yardımıyla doldurulmuştur. Numune kalıpları içerisinde hava boşluğu oluşmasını önlemek ve kalıpların tam dolumunu yapabilmek için ise doldurulan kalıpların altındaki silindirik su kazanına sürekli su girişi çıkışı sağlanmasıyla kontrolsüz soğuma hızı ile alttan üste doğru katılaşması sağlanmıştır.

Hazırlanan her bir numune Şekil 2'de şematik gösterimi verilen Bridgman tipi fırın içine sabit katılaştırma hızında ($V = 16.57 \text{ } \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G = 3.23, 4.48, 6.05, 7.65, 8.52 \text{ K/mm}$) tek yönlü kontrollü katılaştırılmak üzere ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Numunelere uygulanan farklı sıcaklık gradyentleri; Bridgman fırını içerisine yerleştirilen her bir numuneye Şekil 2(b)'de tanımlı sıcak bölgede sıcaklık kontrolcüsü vasıtasıyla $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ hassasiyetle ergime sıcaklığının üzerinde sabit bir sıcaklık (750, 800, 850, 900 ve 950 °C) uygulanırken, Şekil 2(b)'de tanımlı soğuk bölge ise *Struers* marka sirkülatör vasıtasıyla $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit tutularak sağlanmıştır.

SICAKLIK GRADYENTİNİN MİKROYAPI VE MİKROSERTLİĞE ETKİSİ

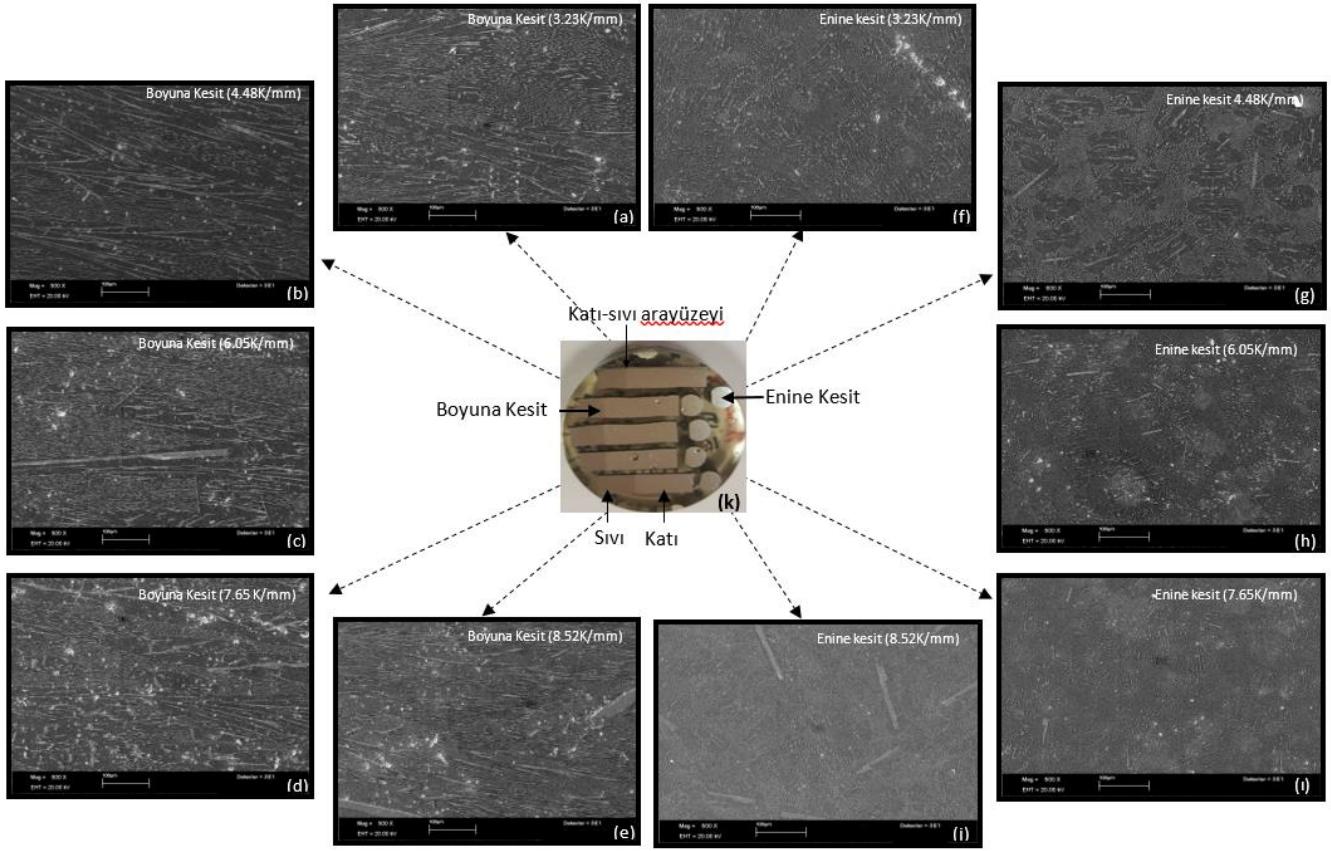


Şekil 1. (a) Vakumlu ergitme fırını şematik gösterimi ve (b) döküm fırını şematik gösterimi [28].



Şekil 2. (a) Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının şematik gösterimi, (b) fırının içyapısı, sıcak ve soğuk bölgeleri, (c) numune kalıbı.

S: Engin, U. Büyük, N. Maraşlı



Şekil 3. Al-Ni-Fe ötektik alaşım sisteminin sabit katılaştırma hızında ($V = 16.57 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G = 3.23, 4.48, 6.05, 7.65, 8.52 \text{ K/mm}$) tek yönlü kontrollü katılaştırılan numunelerinin (a)-(e) boyuna kesit mikroyapı SEM fotoğrafları, (f)-(j) enine kesit mikroyapı SEM fotoğrafları, (k) enine ve boyuna kesitlerin epoksi-reçine kalıplanmış hali.

Fırın içindeki numune üzerinde sıcaklık gradyentinin termalçiftler vasıtasıyla sabit kaldığı belirlendikten sonra numuneler Şekil 2(b)'de tanımlanan sıcak bölgeden soğuk bölgeye senkronize motorlar vasıtasıyla çekilerek kontrollü doğrusal katılaştırmaları yapılmıştır. Bridgman fırını içerisindeki numunelerin her birinin 100–120 mm kontrollü katılaştırmaları sağlandıktan sonra senkronize motorlardan bağımsız olarak çok hızlı bir şekilde sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilerek ani soğutma (quenching) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Farklı şartlarda kontrollü katılaştırmaları gerçekleşen numunelerin oluşan mikroyapılarını belirleyerek mikroskop altında düzgün fotoğraflarını çekebilmek ve mikrosertlik ölçümlerini gerçekleştirebilmek için grafit kalıplarından çıkararak katı-sıvı arayüzeyine en yakın 10–12 mm bölgelerinden enine ve boyuna kesit olacak şekilde epoksi-reçine ile kalıplanmıştır (Şekil 3(k)). *Struers TegraPol-15* marka zımparalama ve parlatma cihazı vasıtasıyla metalografik işlemleri gerçekleştirilen numuneler üzerindeki mikroyapıları tam olarak ortaya çıkarabilmek için ise 5 ml hidroklorik asit + 95 ml su ile hazırlanan çözeltiyle 10–15 saniye kadar dağlanmıştır.

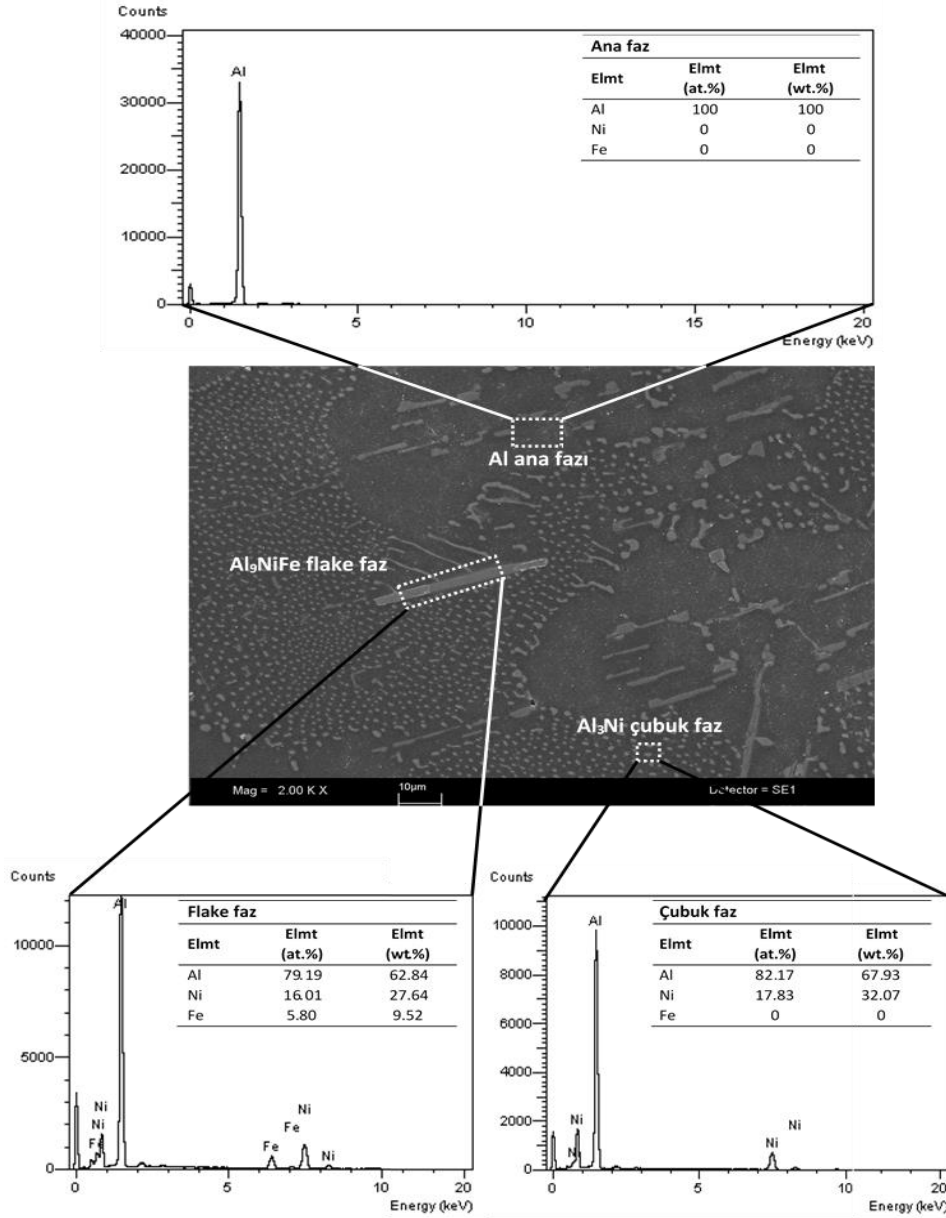
2.2. Katılaştırma Parametrelerinin Ölçümü ve Mikroyapının Gözlenmesi

Bridgman tipi fırın içerisindeki numunelerin katılaştırma süresince sıcaklık gradyentini ve katılaştırma hızını ölçebilmek için K-tipi 0.25 mm çapındaki üç termalçift Şekil 2(c)'de belirtildiği gibi 10 mm aralıklarla numune içerisine yerleştirilmiştir. Katı-sıvı arayüzeyinin katılma hızı ($V = \Delta X/\Delta t$) ve sıvı fazın sıcaklık gradyenti ($G = \Delta T/\Delta X$) her bir numune için ΔT , ΔX ve Δt değerlerinin belirlenmesiyle hesaplanmıştır. ΔT , ΔX ve Δt değerleri sırasıyla termalçiftlerin ölçtüğü sıcaklık, termalçiftler arası mesafe ve katı-sıvı arayüzeyinin iki termal çift aralığını tamamlama süresi olarak tanımlanmıştır. Katılaştırma parametrelerinin ölçümlerinin ayrıntılı bilgisi kaynak 26, 27 ve 28'de verilmiştir.

Bridgman fırınında tek yönlü kontrollü doğrusal katılaştırma yapılarak katılaştırma hızı sabit tutulmuş ve yalnızca alaşım üzerinde sıcaklık gradyentinin etkisi ortaya çıkarılmıştır. Deneysel süreçleri tamamlanan her bir numunenin hem enine hem de boyuna kesitleri *LEO* model SEM (Scanning Electron Microscope) cihazıyla fotoğraflanarak mikroyapıları gözlemlenmiştir.

SICAKLIK GRADYENTİNİN MİKROYAPI VE MİKROSERTLİĞE ETKİSİ

Mikroskop altında ötektik bir mikroyapıya sahip olduğu belirlenen numunelerde her bir fazı belirlemek için ise EDX (Energy Dispersive X-Ray) analizleri yapılmıştır. Şekil 4'te verilen EDX sonuçlarına göre Al ana fazı üzerinde Al_3Ni çubuk (rod) ve Al_9NiFe pul (flake) intermetalik fazları gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Al-Ni-Fe ötektik alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX), ana faz, pul ve çubuk intermetalik fazlar.

2.3. Mikrosertlik Değerinin Ölçülmesi

Bu çalışmanın amaçlarından biri de sıcaklık gradyentine bağlı olarak değişen mikroyapının mikrosertlik değerleri üzerine etkisini ortaya koymaktır. Bu nedenle kontrollü katılaştırılması ve metalografi işlemleri yapıldıktan ötektik bileşimdeki Al-Ni-Fe alaşımının *Future-Tech FM-700* model Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak numune üzerine 500 g'lık yükün 10 s uygulanmasıyla meydana gelen 40-60 μm 'lik iz yardımıyla her bir numunenin mikrosertlik değeri belirlenmiştir. Bu işlem en az 10 kez tekrarlanıp ortalama değer alınarak ölçümün güvenilirliği sağlanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Sıcaklık Gradyentinin Ötektik Mikroyapıya Etkisi

Tablo 1’de Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için sabit katılaştırma hızında, farklı sıcaklık gradyentlerinde üretilen numunelerden ölçülen ötektik mesafe değerleri verilmiştir. Şekil 3’ten de görüldüğü gibi ötektik mikroyapılar düşük sıcaklık gradyentinde Al₉NiFe pul intermetalik fazları arasında Al₃Ni çubuk fazlarından oluşan ötektik koloniler şeklinde gözlemlenmiştir. Sıcaklık gradyenti arttıkça Al₉NiFe pul intermetalik fazları küçülmüş ve Al₃Ni çubuk fazlarından oluşan koloniler daha baskın hale gelmiştir.

Tablo 1. Al-Ni-Fe ötektik alaşımı için sabit katılaştırma hızı, farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen ötektik mesafeler ve mikrosertlik değerleri.

Alaşım (% ağı.)	Katılaştırma Parametreleri		Ötektik Mesafeler		Mikrosertlik Değerleri
	V (µm/s)	G (K/mm)	$\lambda_{(Al_3Ni)}$ (µm)	$\lambda_{(Al_9NiFe)}$ (µm)	HV (kg/mm ²)
Al–6.5Ni–1.5Fe	16,57	3,23	2,62	12,01	51,92
		4,47	2,21	10,12	52,41
		6,05	1,95	8,65	54,11
		7,65	1,71	7,13	55,92
		8,52	1,59	6,87	57,14

$\lambda_{(Al_3Ni)}$: Numunelerin enine kesitindeki Al₃Ni intermetalik fazlar arası ölçülen ötektik mesafeler

$\lambda_{(Al_9NiFe)}$: Numunelerin enine kesitindeki Al₉NiFe intermetalik fazlar arası ölçülen ötektik mesafeler

Bu çalışmada kullanılan en yüksek sıcaklık gradyentinde (G = 8.52 K/mm) elde edilen mikroyapılar da ise ötektik koloniler tamamen ana faz içerisinde homojen hale gelirken Al₉NiFe pul intermetalik fazları çok daha büyük ve seyrek yapılar halinde gözlemlenmiştir. Bu durum Drevet ve ark. [29] tarafından yapılan çalışmada mikroyapısal bozukluk olarak tanımlanmış ve yüksek hız ve sıcaklık gradyentlerinde oluşan fazların bölünerek yeni bir faz oluşturmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu durum yeni oluşan fazların çekirdeklenme sürecinden kaynaklanmıştır. Katı sıvı arayüzeyindeki kimyasal dengenin sapsamasının dengede olmayan büyüme koşullarına yol açabileceği belirlenmiştir.

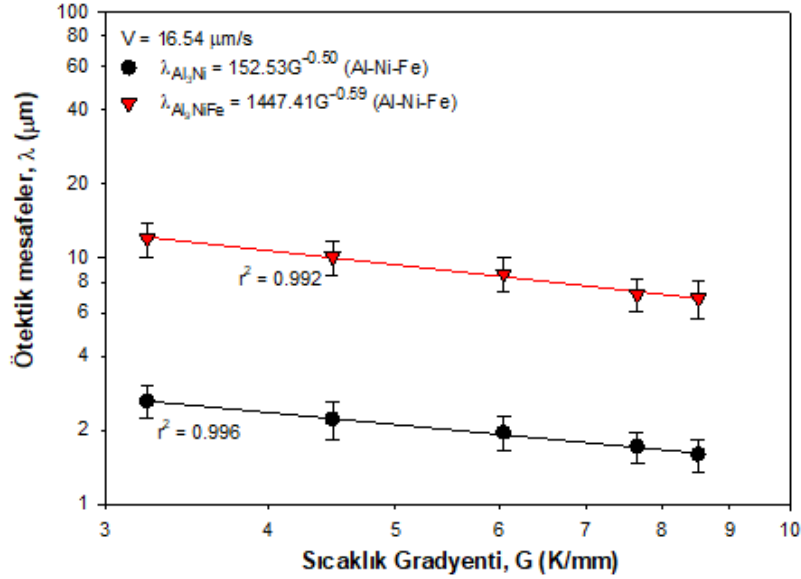
Yapılan kontrollü katılaştırma deneyleri neticesinde Tablo 1 ve Şekil 5’te görüldüğü gibi sıcaklık gradyenti arttıkça ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. En büyük ötektik mesafe değeri en düşük sıcaklık gradyentinde (G = 3.23 K/mm, V = 16.57 µm/s) ve en küçük ötektik mesafe değeri ise en yüksek sıcaklık gradyentinde (G = 8.52 K/mm, V = 16.57 µm/s) elde edilmiştir.

Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen sıcaklık gradyenti ve ötektik mesafeler arası bağıntı ise;

$$\lambda = k_1 G^{-n_1} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada k₁ denklem sabiti, n₁ ise sıcaklık gradyentinin üstel değeridir. Yapılan hesaplamalar incelendiğinde sabit katılaştırma hızında sıcaklık gradyenti arttıkça $\lambda_{Al_3Ni} = 152.53G^{-0.50}$ ve $\lambda_{Al_9NiFe} = 1447.41G^{-0.59}$ denklemlerinden de anlaşıldığı üzere ötektik mesafeler 0.50 ve 0.59 üstel değerleriyle azalmıştır. Denklem sabitleri (k) ise $152.53 K^{0.50} \cdot \mu m^{0.50}$ ve $1447.41 K^{0.59} \cdot \mu m^{0.41}$ olarak hesaplanmıştır. Bu üstel değerler (0.50 ve 0.59) Jackson–Hunt teorik modeline [30] göre ötektik ikili alaşımlar için 0.50 olması beklenmektedir. Tablo 2’de verilen ikili ve üçlü alaşım sistemleri için sıcaklık gradyenleri üstel değerleri (0.42 – 0.62) ile kıyaslandığında elde edilen sonuçların Jackson–Hunt teorik modeline göre uyumlu olduğu görülmektedir. Jackson–Hunt teorik modeli ötektik mesafelerin tespiti üzerine kurulmuş en kapsamlı model olarak tanımlanmaktadır. Bu model, ikili düzenli çubuk veya pul şeklinde büyüyen ötektik alaşımlar için oluşturulmuş olsa da birçok araştırmacı gerek üçlü bileşikler için gerekse ikili ötektik üstü ve altı bileşiklerde sonuçları kıyaslamak amacıyla kullanmışlardır (Tablo 1).

SICAKLIK GRADYENTİNİN MİKROYAPI VE MİKROSERTLİĞE ETKİSİ



Şekil 5. Doğrusal katılaştırılmış Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için ötektik mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve lineer regresyon bağıntısı.

Al₉NiFe pul intermetalik fazları için elde edilen üstel değer Jackson–Hunt teorik modelinin [30] belirlediği değer biraz üzerindedir. Çünkü Şekil 3’te de görüldüğü üzere Al₉NiFe pul fazları mikroyapısal olarak çok düzenli bir sırada oluşmamış olması ya da düzenli oluşumun bozulduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle değişen sıcaklık gradyenti ile Al₃Ni çubuk fazlarının düzenli oluşumları devam ederken Al₉NiFe pul intermetalik fazlarının düzeninin bozulduğu gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklık gradyentleri için numune içerisinde Al₉NiFe pul intermetalik fazları kolonilerin tane sınırları etrafında oluşurken yüksek sıcaklık gradyentlerinde tane sınırlarının yanı sıra Al₃Ni çubuk fazların üzerinde ve tane sınırında oluşan yapılardan daha büyük hallerde meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 3j). Bu durum Al₉NiFe pul intermetalik fazlarının üstel değerinde Jackson–Hunt teorik modelinin öngördüğü değerden sapmaya sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada elde edilen değerler, benzer şartlarda yapılan araştırmalarda [11, 13, 15], ötektik mesafenin sıcaklık gradyentine bağlı üstel bağıntıları ile yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. (Tablo 1).

Tablo 2. Al-Ni-Fe ötektik alaşımı için sabit katılaştırma hızında farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen bağıntılar ve literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilen bağıntılar.

Alaşım (ağ.)	Sıcaklık Gradyenti (K/mm)	Katılaştırma Hızı (μm/s)	Mikroyapı	Mikro sertlik	Kaynak
Al–Ni–Fe	3.23-8.52	16.57	$\lambda_{Al_3Ni} = 152.53G^{-0.50}$ $\lambda_{Al_9NiFe} = 1447.41G^{-0.59}$	$HV = 45.68G^{0.10}$ $HV = 245.87\lambda_{Al_3Ni}^{-0.19}$ $HV = 252.69\lambda_{Al_9NiFe}^{-0.17}$	Bu çalışma
Al-0.1Ti	3.8-9.1	8.3-166.0	$\lambda = 4.83G^{-0.51}$ $\lambda = 114.8V^{-0.27}$		[1]
Al-0.5Ti	5.1-10.3	8.3-165.0	$\lambda = 5.50G^{-0.54}$ $\lambda = 112.2V^{-0.25}$		[1]
Al-0.1Ti	2.20-5.82	8.30-498.60	$\lambda = 16.22G^{-0.47}$ $\lambda = 371.53V^{-0.26}$		[2]
Al-0.1Ti	3.8-9.1	8.3-166.0		$HV = 24.66G^{0.17}$ $HV = 46.45V^{0.06}$ $HV = 18.28\lambda^{-0.25}$ $HV = 28.32G^{0.21}$	[3]
Al-0.5Ti	5.1-10.3	8.3-165.0		$HV = 54.95V^{0.07}$ $HV = 18.03\lambda^{-0.30}$	[3]
Al-2Li	3.11-6.06	8.32-164.7		$HV = 23.39G^{0.14}$	[3]

S: Engin, U. Büyük, N. Maraşlı

				$HV = 37.49V^{0.05}$ $HV = 16.37\lambda^{-0.24}$	
Al-5.7Ni	0.83-4.02	8.32-483.25	$\lambda = 0.30G^{-0.45}$ $\lambda = 10.76V^{-0.50}$		[4]
Al-5.7Ni	0.83-4.02	8.32-483.25		$HV = 33.65G^{0.14}$ $HV = 66.13V^{0.10}$	[5]
Sn-3Cu	4.24-8.09	2.24-133.33	$\lambda = 0.17G^{-0.53}$ $\lambda = 8.87V^{-0.50}$	$HV = 7.78\lambda^{-0.13}$	[6]
Sn-3Cu	4.24-8.09	2.24-133.33		$HV = 12.70G^{0.11}$ $HV = 19.86V^{0.07}$	[7]
Sn-1.2Cu	2.69-8.88	2.78-136.36	$\lambda = 0.15G^{-0.52}$ $\lambda = 7.81V^{-0.50}$		[8]
Zn-0.7Cu	3.85-9.95	8.30-436		$HV = 46.03G^{0.14}$ $HV = 70.15V^{0.07}$ $HV = 35.81\lambda^{-0.23}$	[9]
Zn-1.5Cu	1.99-7.81	8.41-661.11		$HV = 56.62G^{0.09}$ $HV = 74.64V^{0.05}$	[10]
Zn-1.5Cu	1.99-7.81	8.41-661.11	$\lambda = 341.97G^{-0.57}$ $\lambda = 255.04V^{-0.26}$ $\lambda_{Si} = 5.57G^{-0.42}$		[11]
Al-11.1Si-4.2Ni	2.11-5.82	4.60-243.33	$\lambda_{Al_2Ni} = 4.31G^{-0.45}$ $\lambda_{Si} = 12.58V^{-0.50}$ $\lambda_{Al_2Ni} = 7.94V^{-0.47}$ $\lambda_{\alpha} = 11.14G^{-0.49}$ $\lambda_{\beta} = 4.43G^{-0.52}$		[12]
Al-17.57Cu-42.17Ag	3.99-8.79	1.83-498.25	$\lambda_{\gamma} = 6.02G^{-0.58}$ $\lambda_{\alpha} = 11.22V^{-0.49}$ $\lambda_{\beta} = 5.21V^{-0.50}$ $\lambda_{\gamma} = 5.12V^{-0.50}$		[13]
Al-17.6Cu-42.2Ag	3.99-8.79	1.83-498.25		$HV = 169.823G^{0.12}$ $HV = 181.97V^{0.10}$ $HV = 309.03\lambda_{\alpha}^{-0.25}$ $HV = 251.19\lambda_{\alpha}^{-0.24}$ $HV = 309.03\lambda_{\alpha}^{-0.21}$	[14]
Zn-7Al-4Cu	7.17-11.04	11.62-230.77	$\lambda_{Zn-Al} = 4.57G^{-0.46}$ $\lambda_{CuZn_4} = 32.35G^{-0.62}$ $\lambda_{Zn-Al} = 5.49V^{-0.42}$ $\lambda_{CuZn_4} = 35.48V^{-0.56}$	$HV = 70.79G^{0.08}$ $HV = 67.60V^{0.07}$	[15]
Sn-3.5Ag-0.9Cu	2.48	3.89-173.61	$\lambda_{plate} = 12.58V^{-0.51}$ $\lambda_{rod} = 10.47V^{-0.51}$	$HV = 26.91V^{0.09}$ $HV = 6.30\lambda_{plate}^{-0.18}$ $HV = 6.16\lambda_{rod}^{-0.18}$	[16]
Sn-3.5Ag-0.9Cu	2.48-6.34	7.20	$\lambda_{plate} = 0.35G^{-0.44}$ $\lambda_{rod} = 0.23G^{-0.46}$	$HV = 14.79G^{0.12}$ $HV = 3.89\lambda_{plate}^{-0.27}$ $HV = 4.16\lambda_{rod}^{-0.25}$	[17]
Sn-3.7Ag-0.9Zn	4.33-12.41	3.38-220.12	$\lambda = 0.27G^{-0.48}$ $\lambda = 10.42V^{-0.53}$		[18]
Sn-23Bi-5Zn	1.78-3.99	8.3-478.6		$HV = 186.97G^{0.16}$ $HV = 206.34V^{0.06}$	[19]
In-25.14Bi-19.37Sn	0.91-2.85	3.2	$\lambda = 8.43G^{-0.40}$	$HV = 6.81G^{0.11}$ $HV = 10.96\lambda^{-0.23}$	[20]
Bi-Cd	1.93-4.74	8.33-167.32	$\lambda = 0.09G^{-0.47}$ $\lambda = 5.03V^{-0.46}$		[21]

SICAKLIK GRADYENTİNİN MİKROYAPI VE MİKROSERTLİĞE ETKİSİ

3.2. Sıcaklık Gradyentinin Mikrosertliğe Etkisi

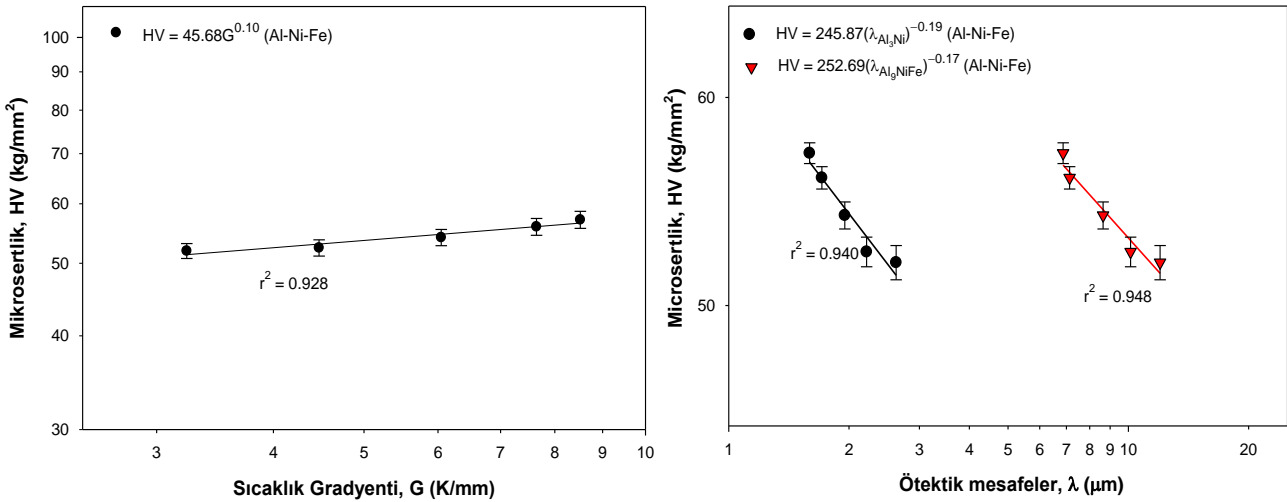
Tablo 1’de Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için sabit katılaştırma hızında, farklı sıcaklık gradyentlerinde üretilen numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri verilmiştir. Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen sıcaklık gradyenti ve mikrosertlik arası bağıntı ise;

$$HV = k_2 G^{n_2} \quad (2)$$

ve Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen ötektik mesafeler ve mikrosertlik arası bağıntı ise;

$$HV = k_3 \lambda^{-n_3} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada k_2 ve k_3 denklem sabitleri, n_2 ve n_3 ise sıcaklık gradyenti ve ötektik mesafelerin üstel değerleridir. Şekil 6’da görüldüğü gibi sıcaklık gradyenti arttıkça ötektik mesafe küçülmüş ve ötektik mesafe küçüldükçe mikrosertlik değeri artmıştır. Logaritmik değişim grafiği incelendiğinde, artan sıcaklık gradyentine bağlı olarak mikrosertlik değeri, $HV = 45.68G^{0.10}$ ifadesiyle değişirken azalan ötektik mesafe değerlerine bağlı olarak mikrosertlik $HV = 245.87\lambda_{Al_3Ni}^{-0.19}$ ve $HV = 252.69\lambda_{Al_9NiFe}^{-0.17}$ değerleri ile değişmiştir. Denklem sabitleri ise $45.68 \text{ kg.mm}^{-1.9} \text{ K}^{-0.10}$, $245.87 \text{ kg.mm}^{-1.81}$ ve $252.69 \text{ kg.mm}^{-1.83}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Doğrusal katılaştırılmış Al–Ni–Fe ötektik alaşım sistemi için ötektik mesafe ve sıcaklık gradyentinin mikrosertlik ile değişimleri ve lineer regresyon bağıntıları.

Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen mikrosertlik değerinin sıcaklık gradyentine bağlı bağıntısı için elde edilen 0.10 üstel değeri, Tablo 2’de verilen ikili ve üçlü alaşım sistemleri için elde edilen üstel değerlerle (0.08 – 0.21 [1-21]) kıyaslandığında literatürde verilen aralık kapsamında olup benzer çalışmalarla uyum göstermektedir. Benzer şekilde yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen mikrosertlik değerinin ötektik mesafeye bağlı bağıntısı için elde edilen 0.19 ve 0.17 üstel değeri, Tablo 2’de verilen ikili ve üçlü alaşım sistemleri için elde edilen üstel değerlerle kıyaslandığında (0.13– 0.25 [1-21]) literatürde verilen aralık kapsamında olup benzer çalışmalarla uyum göstermektedir.

Mikrosertlik konusunda baskın durum oluşan mikroyapılar ve mikroyapıların (çubuk, hücre, pul, dendirit gibi) durumları ve düzenleridir. Bu nedenle aynı alaşım sisteminde oluşan farklı yapılar ya da intermetalikler mikrosertlik değerini etkileyecektir. Alaşım sistemi içerisinde oluşan mikroyapılar incelendiğinde ya da tane boyutları küçüldükçe alaşım içerisindeki tane sayısı da artacaktır. Böylece dış kuvvetlerin oluşturacağı deformasyon daha çok taneye dağılacığından daha üniform bir plastik deformasyon oluşacaktır. Bunun yanı sıra tane boyutları küçüldükçe dayanım da artacaktır. Ayrıca oluşan Al_3Ni , Al_9NiFe intermetalik fazlar yüksek ergime noktasına ve yüksek mukavemet özelliklerine sahip intermetalik bileşikler olması nedeniyle alaşım içerisinde dayanımı artırıcı özellik sergilerler.

KAYNAKLAR

- [1] M. Gündüz, H. Kaya, E. Çadırılı, N. Maraşlı, K. Keslioglu, B. Saatci, "Effect of solidification Processing parameters on the cellular spacings in the Al-0.1 wt% Ti and Al-0.5 wt% Ti alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 439, no. 1-2, pp.114-127, 2007.
- [2] H. Kaya, E. Çadırılı, U. Büyük, N. Maraşlı, "Investigation of directional solidified Al-Ti alloy". *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol.355 no. 22-23, pp. 1231-1239, 2009.
- [3] H. Kaya, M. Gündüz, E. Çadırılı, N. Maraşlı, "Dependency of microindentation hardness on solidification Processing parameters and cellular spacing in the directionally solidified Al based alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 478 no. 1-2, pp. 281-286, 2009.
- [4] H. Kaya, U. Büyük, E. Çadırılı, N. Maraşlı, "Unidirectional solidification of aluminium-nickel eutectic alloy." *Kovove Materialy-Metallic Materials*, vol. 48-5, pp. 291-300, 2010.
- [5] H. Kaya, U. Büyük, E. Çadırılı, N. Maraşlı, "Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al-Ni eutectic alloy." *Materials & Design*, vol. 34, pp. 707-712, 2012.
- [6] E. Çadırılı, U. Büyük, S. Engin, H. Kaya, N. Maraşlı, K. Keslioglu, A. Ülgen, "Investigation of the effect of solidification Processing parameters on the rod spacings and variation of microhardness with the rod spacing in the Sn-Cu hypereutectic alloy." *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, vol. 21, no.6, pp. 608-618, 2010.
- [7] E. Çadırılı, U. Büyük, S. Engin, H. Kaya, N.Maraşlı, M. Arı, "Investigation of microhardness and thermo-electrical properties in the Sn-Cu hypereutectic alloy." *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, vol. 21, no. 5, pp. 468-474, 2010.
- [8] E. Çadırılı, U. Büyük, S. Engin, H. Kaya, N. Maraşlı, A. Ülgen, "Experimental investigation of the effect of solidification Processing parameters on the rod spacings in the Sn-1.2 wt.% Cu alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 486, no.1-2, pp. 199-206, 2009.
- [9] H. Kaya, U. Büyük, S. Engin, E. Çadırılı, N. Maraşlı, "Measurements of Microhardness and Thermal and Electrical Properties of the Binary Zn-0.7wt.%Cu Hypoperitectic Alloy." *Journal of Electronic Materials*, vol. 39, no.3, pp. 303-311, 2010.
- [10] U. Büyük, H. Kaya, E. Çadırılı, N. Maraşlı, A. Ülgen, "Investigation of the effect of solidification Processing parameters on microhardness and determination of thermo-physical properties in the Zn-Cu peritectic alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 491, no. 1-2, pp. 143-148, 2010.
- [11] U. Büyük, S. Engin, H. Kaya, E. Çadırılı, N. Maraşlı, K. Keslioglu, "A study of microstructure and solidification behaviour of Zn-Cu alloy." *Kovove Materialy-Metallic Materials*, vol. 48, no. 2, pp. 117-126, 2010.
- [12] U. Büyük, S. Engin, N. Maraşlı, "Microstructural Characterization of unidirectional solidified eutectic Al-Si-Ni alloy." *Materials Characterization*, vol. 62, no. 9, pp. 844-851, 2011.
- [13] U. Büyük, N. Maraşlı, H. Kaya, E. Çadırılı, K. Keslioglu, "Directional solidification of Al-Cu-Ag alloy." *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, vol. 95, no. 3, pp. 923-932, 2009.
- [14] U. Büyük, N. Maraşlı, E. Çadırılı, H. Kaya, K. Keslioglu, "Variations of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy." *Current Applied Physics*, vol. 12, no. 1, pp. 7-10, 2012.
- [15] U. Büyük, S. Engin, N. Maraşlı, "Directional Solidification Of Zn-Al-Cu Eutectic Alloy By The Vertical Bridgman Method." *Journal of Mining and Metallurgy Section B-Metallurgy*, vol. 51 no. 1, pp. 67-72, 2015.
- [16] U. Büyük, N. Maraşlı, "The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, 485 (1-2), 264-269, 2009.
- [17] U. Büyük, N. Maraşlı, "Dependency of eutectic spacings and microhardness on the temperature gradient for directionally solidified Sn-Ag-Cu lead-free solder." *Materials Chemistry And Physics*, vol. 119, no. 3, pp. 442-448, 2010.
- [18] U. Büyük, S. Engin, N. Maraşlı, H.Kaya, "Effect of solidification parameters on the microstructure of Sn-3.7Ag-0.9Zn solder." *Materials Characterization*, vol. 61, no. 11, pp. 1260-1267, 2010.
- [19] E. Çadırılı, U. Büyük, H. Kaya, N. Maraşlı, "Determination of mechanical, electrical and thermal properties of the Sn-Bi-Zn ternary alloy." *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 357, no. 15, pp. 2876-2881, 2010.
- [20] H. Kaya, U. Büyük, E. Çadırılı, Y. Ocak, S. Akbulut, K. Keslioglu, "Dependency of Microstructural Parameters and Microindentation Hardness on the Temperature Gradient in the In-Bi-Sn Ternary Alloy with a Low Melting Point." *Metals And Materials International*, vol. 14, no. 5, pp. 575-582, 2008.
- [21] H. Kaya, E. Çadırılı, M. Gündüz, "Eutectic growth of unidirectionally solidified bismuth-cadmium alloy." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 183, no. 2-3, pp. 310-320, 2007.
- [22] U. Hecht, L. Granasy, T. Pusztai, B. Bottger, M. Apel, V. Witusiewicz, L. Ratke, J. De Wilde, L. Froyen, D. Camel, B. Drevet, G. Faivre, S. G. Fries, B. Legendre, S. Rex, "Multiphase solidification in multicomponent alloys." *Materials Science and Engineering R*, vol. 46, pp. 1-49, 2004.

SICAKLIK GRADYENTİNİN MİKROYAPI VE MİKROSERTLİĞE ETKİSİ

- [23] M. L. Mondolfo, “Aluminium alloys: structure and properties.” Butterworths, London, 1979.
- [24] R. M. K. Young, T. W. Clyne, “An Al–Fe intermetallic phase formed during controlled solidification.” *Scr. Metall.* vol. 15, pp. 1211–1216, 1981.
- [25] P.R. Goulart, K. S. Cruz, J.E. Spinelli, I.L. Ferreira, N. Cheung, A. Garcia, “Cellular growth during transient directional solidification of hypoeutectic Al–Fe alloys” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 470, no. 1–2, pp. 589, 2009.
- [26] S. Engin, “Kontrollü Katılaştırılan Çok Bileşenli Ötektik Alaşımların, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Parametrelerine Bağlılığının İncelenmesi.” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği, Kayseri 2013.
- [27] E. Çadırlı, “İkili Metalik Alaşımların Doğrusal Katılaştırılması.” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Kayseri 1997.
- [28] U. Büyük, “Üçlü Metalik Alaşımların Kontrollü Doğrusal Katılaştırılması ve Mikrosertliğinin İncelenmesi.” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Kayseri 2009.
- [29] B. Drevet, D. Camel, M. Dupuy, J. J. Favier, “Microstructure of the Sn–Cu₆Sn₅ fibrous eutectic and its modification by segregation.” *Acta Mater.* vol. 44, pp. 4071–4084, 1996.
- [30] K. A. Jackson, J.D. Hunt, “Lamellar and Rod Eutectic Growth.” *Trans. Metall. Soc. A.I.M.E.* vol. 236, pp.1129, 1966.





PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

Mustafa AÇIKKAR^{1,*} 

¹Department of Aerospace Engineering, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Adana, Turkey

ABSTRACT

The gross calorific value (GCV) is an essential thermal property of coal which indicates the amount of heat energy that could be released by burning a specific quantity. The primary objective of the presented study is to develop new GCV prediction models using support vector machines (SVMs) combined with feature selection algorithm. For this purpose, the feature selector RReliefF is applied to the dataset consisting of proximate and ultimate analysis variables to determine the importance of each predictor of GCV. In this way, seven different hybrid input sets (data models) were constructed. The prediction performance of models was computed by using the square of multiple correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE). Considering all the results obtained from this study, the predictor variables moisture (M) and ash (A) obtained from the proximate analysis and carbon (C), hydrogen (H) and sulfur (S) obtained from the ultimate analysis were found to be the most relevant variables in predicting GCV of coal, while the predictor variables volatile matter (VM) from the proximate analysis and nitrogen (N) from the ultimate analysis did not have a positive effect on the prediction accuracy. The SVM-based model using the predictor variables M, A, C, H, and S yielded the highest R^2 and the lowest RMSE and MAPE with 0.998, 0.22 MJ/kg, and 0.66%, respectively. For comparison purposes, multilayer perceptron and radial basis function network were also used to predict GCV.

Keywords: Gross calorific value of coal, Feature selection, Support vector machines, Artificial neural network

ÖZELLİK SEÇİMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİNİ KULLANARAK KÖMÜRÜN ÜST ISIL DEĞERİNİN KISA VE ELEMENTEL ANALİZ DEĞİŞKENLERİNDEN TAHMİNİ

ÖZET

Üst ısıl değer (GCV), kömürün belirli bir miktarı yakıldığında açığa çıkan ısı enerjisi miktarını gösteren temel bir termal özelliğidir. Sunulan çalışmanın ana amacı, özellik seçimi algoritması ile destek vektör makineleri (SVM'ler) kullanarak yeni GCV tahmin modelleri geliştirmektir. Bu amaçla, literatürde ilk kez, özellik seçici RRelief-F algoritması, GCV'nin her bir tahmin edici değişkeninin önemini belirlemek için kısa ve elementel analiz değişkenlerinden oluşan veri kümesine uygulanmıştır. Bu şekilde, yedi farklı karma giriş seti (veri modelleri) oluşturulmuştur. Sunulan modellerin tahmin performansı, çoklu korelasyon katsayısının karesi (R^2), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) ile hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, kısa analizden elde edilen nem (M) ve kül (A) ile elementel analizden elde edilen karbon (C), hidrojen (H) ve kükürt (S) değişkenleri kömürün GCV'sini tahmin etmede en uygun değişkenler olarak belirlenirken, kısa analizden elde edilen uçucu madde (VM) ile elementel analizden elde edilen nitrojenin (N) tahmin etme doğruluğu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. M, A, C, H ve S tahmin edici değişkenlerini kullanan SVM-tabanlı model, en yüksek R^2 ve en düşük RMSE ve MAPE değerlerini sırasıyla 0,998, 0,22 Mj/kg ve % 0,66 olarak vermiştir. Ayrıca, karşılaştırma amacıyla GCV'yi tahmin etmek için çok katmanlı algılayıcı ve radyal temelli fonksiyon ağı kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kömürün üst ısıl değeri, Özellik seçimi, Destek vektör makinesi, Yapay sinir ağları

1. INTRODUCTION

As a fossil fuel, coal is critical energy supplier material in many industries such as electricity generation, cement making, and coke generation for iron and steelmaking [1]. The reasons why coal is mostly used in energy generation to its abundance, and financial advantages and it is expected to remain the dominant energy source for the near future [2]–[4]. In particular, coal is projected to remain the mainstay of electricity generation in many major economies - especially where coal is the main indigenous and economically viable, source of energy [2]. Since coal is mostly used as an energy source, its heating capacity is important, and it is called as calorific value. The calorific value measured according to American Society for Testing and Materials (ASTM) standards is called gross calorific value (GCV) and sometimes higher heating value (HHV).

It can be said that the GCV is a function of coal compositions that can be obtained by proximate or ultimate analysis. Moisture (M), ash (A), volatile matter (VM), and fixed carbon (FC) are the variables of the proximate analysis. On the other hand, carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N), sulfur (S), and oxygen (O) are the coal compositions of the ultimate analysis [5]. The determination of GCV of coals with quick and accurate prediction models is one of the interesting studies in the literature. Engineers, designers, manufacturers, and researchers interested in the GCV of materials want to determine it in an easy and fast way within an acceptable tolerance. Therefore, a number of attempts have been made in the literature in order to develop a representative regression model [6]. Using several linear and nonlinear regression methods, researchers have developed models for GCV prediction based on proximate analysis results [1], [4], [7]–[11] and ultimate analysis results [5], [9], [10], [12], [13] as well as both analysis results [11], [14], [15].

The primary purpose of this study is to develop new GCV prediction models using proximate and ultimate analysis variables of coal. For this purpose, for the first time in the literature, the SVM and feature selection algorithm RRelief-F [16] have been used together to develop new GCV prediction models by identifying the relevant and irrelevant determinants of GCV. The main reason for using the feature selector is to determine and exclude unnecessary variables of the proximate and/or ultimate analysis from the dataset. Thus, the purpose is to increase the overall prediction accuracy when it is possible, to reduce the complexity of the developed prediction model as well as to decrease the cost of the calculation required to create the prediction model. The aforementioned feature selection algorithm was applied to the dataset to create several hybrid data models. In addition to these data models, two other data models that use only proximate and ultimate analysis variables were constructed separately for comparison purposes. To reveal the performance of the SVM on GCV prediction, two other artificial neural networks (ANNs) methods, namely, multilayer perceptron (MLP) and radial basis function network (RBFN) were also used to predict GCV on the dataset utilized. By calculating performance metrics square of multiple correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE) and mean absolute percentage error (MAPE) of each developed model, the overall performance of SVM on GCV prediction were compared to that of MLP and RBFN.

2. DATASET GENERATION

The dataset used in this study was produced from the COALQUAL Version 3.0 database presented under U.S. Geological Survey Energy Resources Program [17]. The database consists of the analysis results of 6690 coal samples in as-received basis and includes proximate and ultimate analysis results as well as GCV of the samples. All analyses applied to the samples were made in accredited testing laboratories in accordance with ASTM standards. In order to provide consistency of the presented results, 15 samples where the validation status of proximate analysis and/or ultimate analysis was “Incomplete Data” were removed from the database.

In the proximate analysis, the values of M, A, and VM variables are obtained by measuring in the laboratory environment. On the other hand, the values of M, A, and VM variables are used to calculate FC variable by Equation 1. Similarly, in the ultimate analysis, while the values of C, H, N, and S variables are measured in the laboratory environment, the value of O variable is calculated by Equation 2.

$$FC = 100 - (M + A + VM) \quad (1)$$

$$O = 100 - (C + H + N + S + M + A) \quad (2)$$

In general, the values of the predictor variables used to form the dataset are expected to be obtained by measuring, not by calculating. If the value of a predictor variable depends only on the other predictor variables, the inclusion of that variable to the model does not produce a positive effect on the prediction performance of the model [18]. On the contrary, it increases the complexity of the model and the cost of the calculation required to create the prediction model.

As it is given in Equations 1 and 2, the value of FC directly depends on the values of the other proximate analysis variables, and the value of O depends on the other ultimate analysis variables, as well as the proximate analysis values of M and A, respectively.

PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

Therefore, the proximate analysis variable FC and the ultimate analysis variable O are not included in the dataset. As a result, the dataset was generated using 6675 analysis results of the coal samples, and the proximate variables M, A and VM and the ultimate variables C, H, N, and S were determined as predictor variables to predict the target variable GCV.

The detailed information regarding the COALQUAL database can be found on the official website at <http://ncrdspublic.er.usgs.gov/coalqual/>.

The descriptive statistics of the generated dataset are given in Table 1. The scatter plots of target variable GCV according to the predictor variables are shown in Figure 1.

Table 1. Overview of the utilized dataset

Category	Type of Analysis	Variable Name	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Predictor variables	Proximate	M (%)	0.40	52.50	8.15	9.99
		A (%)	0.90	54.70	11.79	7.29
		VM (%)	3.00	55.70	32.00	6.55
	Ultimate	C (%)	22.52	88.20	65.06	12.46
		H (%)	0.21	9.12	4.32	0.79
		N (%)	0.20	5.60	1.27	0.34
		S (%)	0.06	20.90	1.95	1.80
Target variable	-	GCV (Mj/kg)	8.81	36.25	26.89	5.36

3. METHODOLOGY AND PREDICTION MODELS

3.1. Methodology

In this study, the dataset composed of 6675 entries and described in detail in Section 2 was considered for experimental purposes. By conducting the RRelief-F algorithm for regression [16], the importance of each predictor variable in the utilized dataset was calculated separately and sorted in descending order according to the score of each predictor variable. Table 2 shows the ranking scores of each predictor variable calculated by the RRelief-F algorithm for the dataset used. Seven hybrid data models (Model 1 to 7) were created to predict GCV of coals by removing the variable, which had the lowest score from the list of predictor variables one by one and in order. In order to determine and clarify the effect of hybrid data models generated by the RRelief-F algorithm on the prediction accuracy, two other data models (Model 8 and 9), which were composed of proximate and ultimate analysis variables were constructed separately. Table 3 gives the data models and the predictor variables that each data model has.

Table 2. RRelief-F scores of the predictor variables for the utilized dataset.

Predictor Variable	RRelief-F Score
C	0.0105140
A	0.0038385
H	0.0037461
M	0.0029118
S	0.0020134
VM	0.0015223
N	0.0007616

M. Açikkar

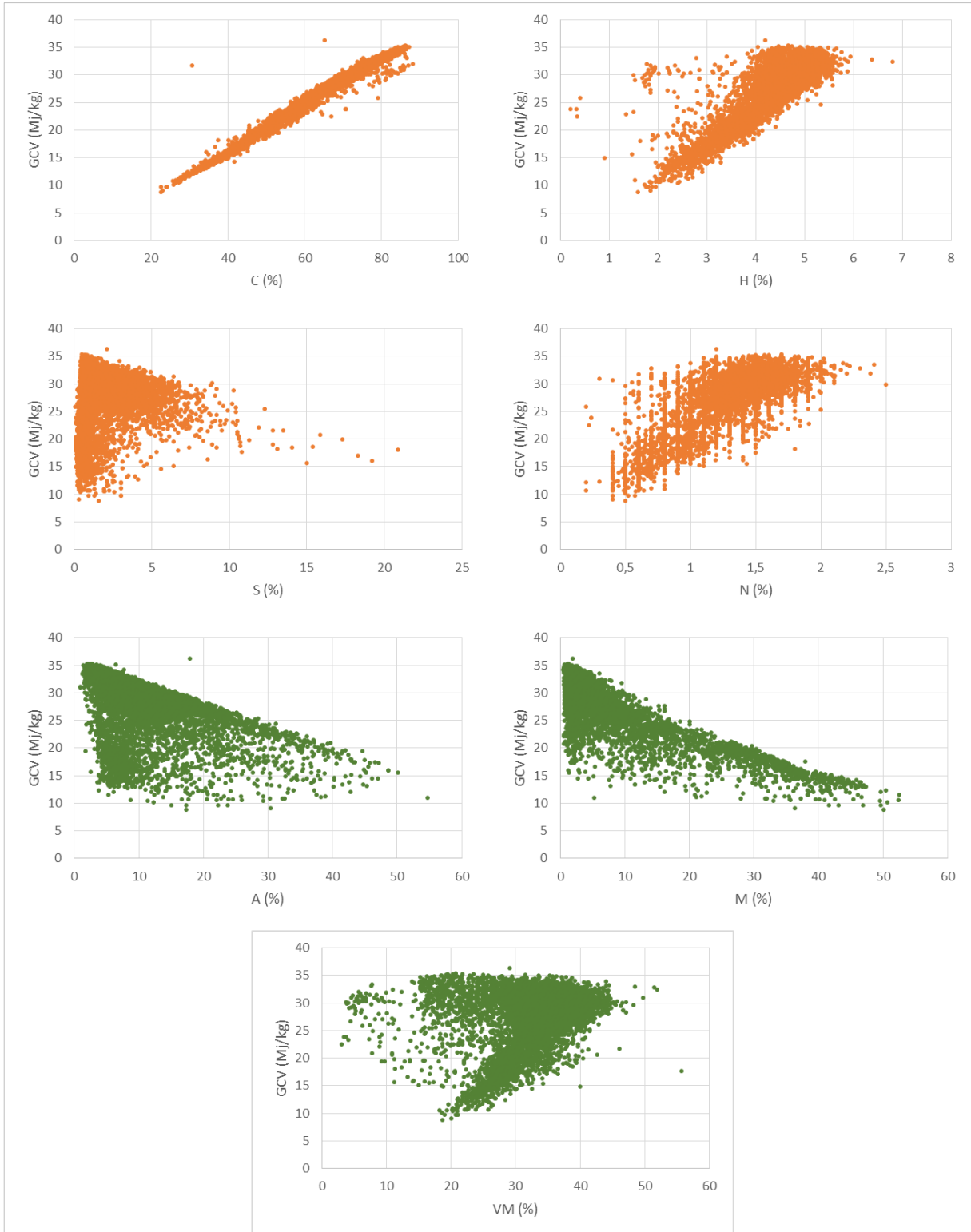


Figure 1. The scatter plots of GCV according to the predictor variables for the dataset.

PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

Table 3. Overview of data models developed for GCV prediction

Type of Analysis	Model Name	Predictor Variables
Hybrid (obtained with RRelief-F algorithm)	Model 1	C, A, H, M, S, VM, N
	Model 2	C, A, H, M, S, VM
	Model 3	C, A, H, M, S
	Model 4	C, A, H, M
	Model 5	C, A, H
	Model 6	C, A
	Model 7	C
Ultimate	Model 8	C, H, S, N
Proximate	Model 9	A, M, VM

In this study, primarily, SVM-based prediction models were developed to predict the GCV of coal by using data models given in Table 3. In order to evaluate the prediction performance of the SVM-based models, the accuracy of these prediction models was compared with those of ANN-based prediction models. The choice of these machine learning methods for predicting GCV of coal is based on several factors. In the past, many studies [19]–[21] that showed the superiority of SVM over other regression methods were presented. Moreover, there are several studies using SVM with different datasets and data models [1], [4], [22]–[24] to predict the GCV of coals. On the other hand, ANNs have been widely used to solve real-world problems in different areas [18], [25], [26]. In this study, for comparison purposes, two types of ANNs, namely MLP and RBFN, were used to predict the GCV of coal. MLP is a well-known and most commonly used ANN method. In addition, RBFN is one of the other popular ANN methods and has been used successfully in the GCV prediction of coals from the proximate analysis results [18].

The generalization ability of the prediction models has been satisfied using 10-fold cross-validation, and the prediction performance of presented models was calculated by using R^2 , RMSE, and MAPE. The formulas of these performance metrics are shown in Equations (3) - (5). It should be kept in mind that the lower RMSE and MAPE values and the higher R^2 value indicate that the prediction model is more accurate.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2} \tag{4}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - Y'_i|}{Y_i} \tag{5}$$

In Equations (3) – (5), the target value is represented with Y , the predicted value is represented by Y' , the mean of Y is represented by \bar{Y} and the number of entries in a testing subset is given by n .

As stated above, in this study, 10-fold cross-validation was applied to each prediction model separately to strengthen the stability and reliability of the presented results. In k -fold cross-validation, the original data set is randomly partitioned into k equal size subsets. Of the k subsets, a single subset is retained as the testing data to validate the model, and the remaining $k-1$ subsets are used as training data. This procedure is repeated k times (the folds), with each of the k subsets used exactly once as the testing data. The advantage of this method is that all instances are used for both training and testing, and each instance is used for testing exactly once. The reported value of the given performance metrics for each prediction model was computed by taking the average of the values of the performance metrics obtained from each fold.

All the experiments in this study, including manipulating, analyzing, and modeling the data presented were done using DTREG [27], a predictive modeling software that implements the most widely used types of machine learning methods.

3.2. SVM-based prediction models

The performance of the SVM model for a given regression problem is directly related to the values of the model parameters. The value of epsilon (ϵ), the value of capacity (C), the type of kernel function, and the parameter of the kernel function, if any,

should be determined carefully. Choosing the type of kernel function and determining the optimal parameter values of this function are very important for creating SVM-based models [28]. Kernel functions commonly used in SVM are generally divided into four categories as linear, polynomial, radial basis function (RBF) and sigmoid kernels. In the literature, the RBF kernel has mostly been used to present satisfactory generalization capabilities [21], [29], [30]. For this reason, in this study, RBF was used as the kernel function. In the RBF kernel function, the parameter γ must also be optimized. In order to develop SVM-based models with satisfactory prediction accuracy, the most appropriate triple of (C, ε, γ) needs to be revealed for the given regression problem.

The prediction accuracy of SVM is very sensitive to the selection of the parameters, and there is no rule or formula based on a mathematical model for obtaining the exact desired values of those parameters. For this purpose, a suitable parameter optimization algorithm should be used to find the optimal values of the parameters used for SVM-based models, so that good generalization performance could be achieved. Therefore, one needs an effective search algorithm to find the best values of these parameters. The grid search (GS) [31] is one of the most commonly used algorithms for optimizing the parameters of SVM. The value of each parameter is changed within a pre-defined range. The range of each parameter is divided by the number of steps on a logarithmic scale, and the GS tries each set of hyper-parameters severally. At the end of the search process, the parameters that provide the highest accuracy are selected as optimized parameters.

The range of the hyper-parameters, the number of steps and the scale type of the hyper-parameters utilized in each SVM-based model are shown in Table 4.

3.3. ANN-based prediction models

An artificial neural network (ANN) is a flexible mathematical structure, which is capable of identifying complex nonlinear relationships between input and output data [32]. ANNs have been widely applied to solve many difficult problems in different areas. There are many types of ANNs for modeling function approximation of the problems. Two types of neural networks, MLP and RBFN, were used to verify the utility of the proposed prediction models in this study.

3.3.1. MLP-based prediction models

MLP, which is composed of one input layer, one or more hidden layers, and one output layer, is a flexible, general-purpose, and most widely used network within ANN methods. Finding the optimal number of neurons in each hidden layer is one of the most important issue of MLP. If an insufficient number of neurons or more than necessary neurons are used, the created network will be unable to model data, and its performance will be poor. There is no theoretical approach to determine the optimal number of neurons in the hidden layer, which varies with the type and complexity of the problem.

For this study, one hidden layer was used to construct the MLP network. The logistic transfer function was set as the activation function in the hidden layer as well as the output layer. The training method of the MLP network is the scaled conjugate gradient algorithm. The optimal number of neurons in the hidden layer was found by comparing the prediction performance of the networks generated using each value in the range of neurons given in Table 4. This approach, which is computationally expensive due to having to build many models, is a highly effective method for finding the optimal number of neurons.

3.3.2. RBFN-based prediction models

RBFN is a special case of multilayer feed-forward neural network consisting of three layers including one input layer, one hidden layer, and one output layer; and is different in terms of node characteristics and learning algorithm [33]. The neurons in the hidden layer contain RBF transfer functions whose outputs are inversely proportional to the distance from the center of the neuron [27].

Four different parameters are determined in the training phase of the RBFN model. These parameters are the number of neurons in the hidden layer, the center points of each hidden-layer RBF function, the radius (spread) of each RBF function in each dimension, and the weights applied to the RBF function outputs as they are passed to the output layer [27].

For this study, the optimal number of neurons in the hidden layer was found by comparing the prediction performance of the networks generated using each value in the range of neurons given in Table 4. The algorithm developed by Sheng Chen et al. [34] was used as the training method in the RBFN model. This method determines the optimal center points and spreads for each neuron with an evolutionary approach. Ridge regression is utilized for the computation of the optimal weights between the neurons in the hidden layer and the output layer. The optimal regularization Lambda parameter that minimizes the generalized prediction error is computed by an iterative procedure developed by M. J. L. Orr [35] [27].

The flowchart of the regression-based prediction model using SVM, MLP, and RBFN is illustrated in Figure 2.

PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

Table 4. Values of the utilized parameters for the regression methods

Method	Parameter	Value
SVM	Capacity (C)	[0.1, 10000]
	Epsilon (ϵ)	[0.0001, 100]
	Gamma (γ)	[0.001, 50]
	Number of steps for GS	15
	Scale type of the hyper-parameters for GS	Logarithmic-scaled
MLP	Number of neurons in the hidden layer	[2, 15]
	Hidden layer/output layer transfer function	Logistic
	Training method	Scaled conjugate gradient
RBFN	Maximum number of neurons in the hidden layer	200
	The radius (spread) of each RBF function in each dimension	[0.01, 100]
	Regularization parameter (Lambda)	[0.001, 10]
	Training method	Orthogonal forward selection [34]

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Results

To determine the effectiveness of the presented GCV prediction models based on the hybrid, proximate and ultimate analysis variables, experiments were conducted on the data models (Model 1 to 9) using SVM, MLP, and RBFN methods. Tables 5 – 7 show the R², RMSE, and MAPE values obtained from GCV prediction models generated by each data model and regression method.

Table 5. Performance measures of SVM-based models for GCV prediction.

Data Model	Predictor Variables	Training Set			Testing Set		
		R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)	R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)
Model 1	C, A, H, M, S, VM, N	0.998	0.21	0.62	0.998	0.22	0.65
Model 2	C, A, H, M, S, VM	0.998	0.22	0.62	0.998	0.22	0.66
Model 3	C, A, H, M, S	0.998	0.22	0.63	0.998	0.22	0.66
Model 4	C, A, H, M	0.996	0.30	0.86	0.996	0.31	0.90
Model 5	C, A, H	0.996	0.35	1.00	0.995	0.36	1.03
Model 6	C, A	0.992	0.46	1.29	0.992	0.47	1.31
Model 7	C	0.986	0.62	1.68	0.989	0.56	1.68
Model 8	C, H, S, N	0.998	0.25	0.72	0.998	0.26	0.75
Model 9	A, M, VM	0.986	0.60	1.74	0.986	0.61	1.78

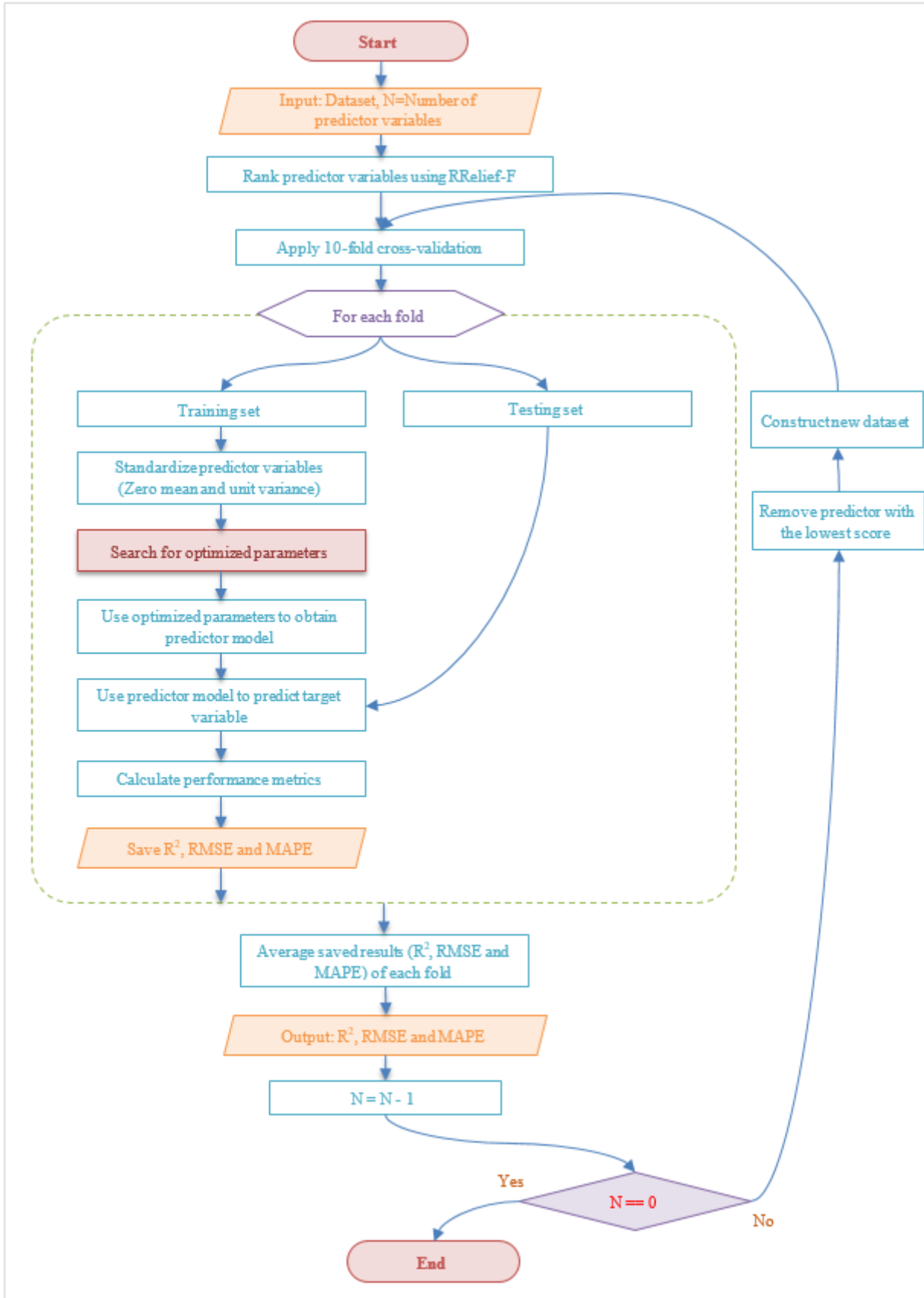


Figure 2. Flowchart of the models based on the hybrid data models generated by the RRelief-F algorithm

PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

Table 6. Performance measures of MLP-based models for GCV prediction.

Data Model	Predictor Variables	Training Set			Testing Set		
		R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)	R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)
Model 1	C, A, H, M, S, VM, N	0.997	0.26	0.76	0.997	0.26	0.75
Model 2	C, A, H, M, S, VM	0.997	0.25	0.75	0.997	0.26	0.77
Model 3	C, A, H, M, S	0.997	0.26	0.75	0.997	0.26	0.76
Model 4	C, A, H, M	0.995	0.34	1.03	0.995	0.35	1.08
Model 5	C, A, H	0.995	0.36	1.08	0.995	0.37	1.12
Model 6	C, A	0.990	0.52	1.46	0.990	0.53	1.46
Model 7	C	0.986	0.61	1.68	0.986	0.63	1.70
Model 8	C, H, S, N	0.997	0.26	0.78	0.997	0.27	0.81
Model 9	A, M, VM	0.986	0.64	1.87	0.985	0.65	1.92

Table 7. Performance measures of RBFN-based models for GCV prediction.

Data Model	Predictor Variables	Training Set			Testing Set		
		R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)	R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)
Model 1	C, A, H, M, S, VM, N	0.998	0.22	0.66	0.998	0.24	0.68
Model 2	C, A, H, M, S, VM	0.998	0.22	0.65	0.998	0.23	0.68
Model 3	C, A, H, M, S	0.998	0.23	0.66	0.998	0.23	0.68
Model 4	C, A, H, M	0.996	0.30	0.91	0.996	0.32	0.94
Model 5	C, A, H	0.995	0.34	1.02	0.995	0.36	1.04
Model 6	C, A	0.992	0.46	1.32	0.992	0.47	1.34
Model 7	C	0.986	0.61	1.68	0.986	0.62	1.69
Model 8	C, H, S, N	0.998	0.25	0.73	0.997	0.26	0.76
Model 9	A, M, VM	0.987	0.60	1.73	0.986	0.62	1.78

4.2. Discussion

The results concerning the training set shown in Tables 5 – 7 were given for information purposes, and all comparisons were made with respect to the results of the testing set. According to the results, the following comments can be asserted for the prediction of the GCV and the relevant and irrelevant predictors affecting the accuracy of prediction models:

- The results presented in this study reveal that SVM-based models outperform MLP- and RBFN-based models for GCV prediction. In more detail, the average RMSE’s of all SVM-based prediction models are 3.71% and 10.83% lower than the ones of RBFN-based and MLP-based models, respectively. In addition, in ANN-based prediction models, RBFN-based prediction models give lower RMSE’s than the MLP-based prediction models for GCV prediction. It should be noted that the performance of the SVM-based and RBFN-based models is almost similar to each other for all data models.
- The results obtained from the prediction models using data models generated by the RRelief-F algorithm (Model 1 to 7) show that the ultimate analysis variable C and N are the most relevant and irrelevant predictors of GCV, irrespective of the regression method used, respectively.
- When the effect of the predictor variables is examined on prediction performance, the inclusion of the predictor variables VM and N yields no effect or a negligible effect on prediction, regardless of the regression method utilized.
- Among the Model 1 to 7, Model 3, which contains the proximate analysis variables M and A; the ultimate analysis variables C, H, and S gives the lowest RMSE’s with 0.22 Mj/kg, 0.23 Mj/kg and 0.26 Mj/kg, whereas Model 7 including only the ultimate analysis variable C yields the highest RMSE’s with 0.56 Mj/kg, 0.62 Mj/kg and 0.63 Mj/kg for SVM, RBFN, and MLP, respectively.
- The RMSE’s of the prediction models using the best hybrid data model (Model 3) are 18.18%, 13.04%, and 3.84% lower than the RMSE’s of the prediction models using the ultimate analysis variables (Model 8) for SVM, RBFN, and MLP, respectively.

- The RMSE's of the prediction models using the best hybrid data model (Model 3) are 177.27%, 169.56%, and 150.00% lower than the RMSE's of the prediction models using the proximate analysis variables (Model 9) for SVM, RBFN, and MLP, respectively.

4.3. Comparing the results

As mentioned previously, the literature includes many studies using linear and nonlinear regression methods for predicting GCV of coals based on proximate and ultimate analysis results as well as both analysis results. When an evaluation is made considering the scope of these studies, each study differs from each other methodologically, and this difference can be grouped under two main headings. Firstly, the dataset utilized by each study may contain different number of samples, may include the results of the analysis of coal extracted from different regions and of different quality, and may have different predictor variables depending on the basis and/or the type of the analysis. Secondly, each study may use different regression methods, different hyper-parameter optimization algorithms concerning each regression method if operable, different hyper-parameters if any, different validation methods with various data splitting rules, and different metrics to determine prediction accuracy. Therefore, it is not applicable and reasonable to compare the results of the present study one-to-one, directly and in detail with the result of these studies in the literature, especially if the dataset used is different. However, without making a direct comparison with other studies, it can be inferred that the results of this study are relatively valuable by evaluating the results obtained from other studies.

The studies [9, 11] have shown that the predictive models using the ultimate analysis variables yield better results than the prediction models using the proximate analysis variables for the same dataset, regardless of which regression method is used. Similarly, in the present study, when the performance of the models using only the ultimate and proximate analysis variables was investigated, it was found that the models using the ultimate analysis variables (Model 8) were more accurate than the models using the proximate analysis variables (Model 9). At the same time, the present study also proved that the RMSE value of the SVM-based model using hybrid data obtained with the RRelief-F algorithm (Model 3) was 18.18% lower than that of the developed model using the ultimate analysis variables.

Hadavandi et al. [23] used a dataset with different coal analyses (proximate, ultimate, various sulfur forms, and petrography) of 924 coal samples, and developed a new SVM-based prediction model by applying Variable Importance Measurement (VIM). In VIM algorithm, the details of which is given in the study [23], the Relative Variable Importance (RVI) score of each input variable is calculated by creating SVM-based models. For comparison purposes, the proposed VIM algorithm by Hadavandi et al. [23] implemented to the utilized dataset in this study. Firstly, the RVI score of each predictor variable was calculated using SVM separately and ranked in descending order in compliance with their scores to find which ones are most important for the modeling. Secondly, seven VIM-based data models (VIM Model 1 to 7) were created by removing the variable, which had the lowest score one by one and in order. Finally, SVM-based prediction models were developed to predict the GCV of coal by using VIM data models. Table 8 gives the RVI scores of the predictor variables. Table 9 shows the VIM data models and the predictor variables that each model has as well as the R², RMSE, and MAPE values of SVM-based GCV prediction models.

Table 8. RVI scores of the predictor variables for the utilized dataset.

Predictor Variable	RVI Score
C	0,71906232
S	0,14892001
H	0,06820786
M	0,02700789
A	0,01961223
N	0,01193847
VM	0,00525122

Table 9. Performance measures of SVM-based models obtained by VIM for GCV prediction.

Data Model	Predictor Variables	Training Set			Testing Set		
		R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)	R ²	RMSE (Mj/kg)	MAPE (%)
VIM Model 1	C, S, H, M, A, N, VM	0.998	0.21	0.62	0.998	0.22	0.65
VIM Model 2	C, S, H, M, A, N	0.998	0.23	0.64	0.998	0.23	0.67
VIM Model 3	C, S, H, M, A	0.998	0.22	0.63	0.998	0.22	0.66
VIM Model 4	C, S, H, M	0.997	0.27	0.82	0.997	0.28	0.83

PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

VIM Model 5	C, S, H	0.996	0.28	0.83	0.996	0.29	0.85
VIM Model 6	C, S	0.992	0.48	1.20	0.993	0.49	1.20
VIM Model 7	C	0.986	0.62	1.68	0.989	0.56	1.68

The following comments and comparisons can be made for the results regarding SVM-based prediction models obtained by RRelief-F and VIM algorithms:

- In VIM algorithm, it is necessary to create total of $(m+1)$ SVM-based models in order to calculate the RVI scores of the predictor variables where m is the number of predictor variables. Therefore, the execution time of the VIM algorithm strongly depends on the number of predictor variables, and the size and complexity of the dataset. As a result, the VIM algorithm consumes extremely much more time since it has to develop $(m+1)$ SVM-based models, while the RRelief-F algorithm produces results in less than a second.
- RRelief-F algorithm and VIM algorithm ranked the variables in a different order as seen in Table 2 and Table 8, respectively. Although the variables forming Model 3 and VIM Model 3 are in a different order, they have the same predictor variables (C, A, H, M, S). In addition, both algorithms showed similarly that C is the most important variable.
- When the results of SVM based models given in Table 5 and Table 9 were examined, Model 3 and VIM Model 3, which yield the lowest RMSE (0.22 Mj/kg) with the least number of predictor variables, were the best models.
- Considering that Model 3 and VIM Model 3 are the best models, it was seen that N and VM predictive variables had no effect on the accuracy of the prediction models.
- Considering only N and VM, the results of Model 2 and VIM Model 2 (0.22 Mj/kg and 0.23 Mj/kg) showed that the ranking made by the RRelief-F algorithm was more accurate and acceptable than that of the VIM algorithm.

As a result, taking into account the results and findings above, it can be concluded that the new hybrid SVM-based model provides promising results in predicting GCV of coal. Additionally, when the predictor variables proposed in this study based on proximate and ultimate analysis are used, it is considered that the accuracy of the prediction model will increase relatively regardless of which dataset will be used.

5. CONCLUSIONS

The aim of this study was to develop new GCV prediction models and bring out the distinctive predictor variables of GCV using SVM together with the feature selection algorithm. The dataset was formed by combining the proximate and ultimate analyses results of the 6675 coal samples in as-received basis. By applying feature selection algorithm RRelief-F to the dataset, seven hybrid data models were created for GCV prediction. In addition to these data models, two data models utilizing proximate and ultimate analysis results were also created for comparison purposes. Besides, two different ANN methods named MLP and RBFN were applied to the data models in order to make comparison with SVM. 10-fold cross-validation was used to satisfy the generalization capability of the developed models. The performances of the SVM-, MLP-, and RBFN-based prediction models were obtained by calculating the values of R^2 , RMSE, and MAPE metrics.

Among the presented regression models, SVM-based prediction models performed better than the models developed by using MLP or RBFN irrespective of which data model was used. However, it should be taken into account that the prediction performance of the RBFN-based prediction models is almost as good as that of SVM-based prediction models. In addition, regardless of the regression method used, the same comments can be made for the effect of predictor variables for all the results related to the presented regression methods.

Considering the performances of all the models presented in this study, the results reveal that, VM and N have no positive effect on the performance of GCV prediction. Besides, the SVM-based predictor model that includes the predictor variables M and A obtained from the proximate analysis and C, H, and S obtained from the ultimate analysis is the most appropriate model for predicting GCV of coal in as-received basis.

REFERENCES

- [1] Q. Feng, J. Zhang, X. Zhang, and S. Wen, "Proximate analysis based prediction of gross calorific value of coals: A comparison of support vector machine, alternating conditional expectation and artificial neural network," *Fuel Processing and Technology*, vol. 129, pp. 120–129, Jan. 2015.
- [2] A. Garg and P. R. Shukla, "Coal and energy security for India: Role of carbon dioxide (CO₂) capture and storage (CCS)," *Energy*, vol. 34, no. 8, pp. 1032–1041, 2009.
- [3] W. Chen and R. Xu, "Clean coal technology development in China," *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2123–2130,

- 2010.
- [4] P. Tan, C. Zhang, J. Xia, Q. Y. Fang, and G. Chen, "Estimation of higher heating value of coal based on proximate analysis using support vector regression," *Fuel Processing and Technology*, vol. 138, Oct., pp. 298–304, 2015.
 - [5] S. U. Patel *et al.*, "Estimation of gross calorific value of coals using artificial neural networks," *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 334–344, 2007.
 - [6] A. V. Akkaya, "Proximate analysis based multiple regression models for higher heating value estimation of low rank coals," *Fuel Processing and Technology*, vol. 90, no. 2, pp. 165–170, 2009.
 - [7] A. K. Majumder, R. Jain, P. Banerjee, and J. P. Barnwal, "Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal," *Fuel*, vol. 87, no. 13–14, pp. 3077–3081, 2008.
 - [8] S. Yerel and T. Ersen, "Prediction of the Calorific Value of Coal Deposit Using Linear Regression Analysis," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 35, no. 10, pp. 976–980, May 2013.
 - [9] S. S. Matin and S. C. Chelgani, "Estimation of coal gross calorific value based on various analyses by random forest method," *Fuel*, vol. 177, pp. 274–278, 2016.
 - [10] S. Mesroghli, E. Jorjani, and S. C. Chelgani, "Estimation of gross calorific value based on coal analysis using regression and artificial neural networks," *International Journal of Coal Geology*, vol. 79, no. 1–2, pp. 49–54, 2009.
 - [11] X. Wen, S. Jian, and J. Wang, "Prediction models of calorific value of coal based on wavelet neural networks," *Fuel*, vol. 199, pp. 512–522, 2017.
 - [12] I. Yilmaz, N. Y. Erik, and O. Kaynar, "Different types of learning algorithms of artificial neural network (ANN) models for prediction of gross calorific value (GCV) of coals," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no. 16, pp. 2242–2249, 2010.
 - [13] I. Boumanchar *et al.*, "Multiple regression and genetic programming for coal higher heating value estimation," *International Journal of Green Energy*, vol. 15, no. 14–15, pp. 958–964, 2018.
 - [14] A. K. Verma, T. N. Singh, and M. Monjezi, "Intelligent prediction of heating value of coal," *Iranian Journal of Earth Sciences*, vol. 2, pp. 32–38, 2010.
 - [15] S. C. Chelgani, S. Mesroghli, and J. C. Hower, "Simultaneous prediction of coal rank parameters based on ultimate analysis using regression and artificial neural network," *International Journal of Coal Geology*, vol. 83, no. 1, pp. 31–34, 2010.
 - [16] M. Robnik-Šikonja and I. Kononenko, "Theoretical and Empirical Analysis of ReliefF and RReliefF," *Machine Learning*, vol. 53, no. 1/2, pp. 23–69, 2003.
 - [17] C. Palmer, C. Oman, A. Park, and J. Luppens, "The U.S. Geological Survey Coal Quality (COALQUAL) Database Version 3.0 Data Series 975," p. 43, 2015.
 - [18] M. Acikkar and O. Sivrikaya, "Prediction of gross calorific value of coal based on proximate analysis using multiple linear regression and artificial neural networks," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 26, no. 5, pp. 2541–2552, 2018.
 - [19] V. H. Quej, J. Almorox, J. A. Arnaldo, and L. Saito, "ANFIS, SVM and ANN soft-computing techniques to estimate daily global solar radiation in a warm sub-humid environment," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 155, pp. 62–70, Mar. 2017.
 - [20] K. O. Akande, T. O. Owolabi, S. Twaha, and S. O. Olatunji, "Performance Comparison of SVM and ANN in Predicting Compressive Strength of Concrete," *IOSR Journal of Computer Engineering*, vol. 16, no. 5, pp. 88–94, 2014.
 - [21] F. Abut, M. F. Akay, and J. George, "Developing new VO₂max prediction models from maximal, submaximal and questionnaire variables using support vector machines combined with feature selection," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 79, no. October, pp. 182–192, 2016.
 - [22] J. Fu, "Application of SVM in the estimation of GCV of coal and a comparison study of the accuracy and robustness of SVM," in *2016 International Conference on Management Science and Engineering (ICMSE)*, 2016, pp. 553–560.
 - [23] E. Hadavandi, J. C. Hower, and S. C. Chelgani, "Modeling of gross calorific value based on coal properties by support vector regression method," *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 3, no. 1, p. 37, Apr. 2017.
 - [24] M. Qi, H. Luo, P. Wei, and Z. Fu, "Estimation of low calorific value of blended coals based on support vector regression and sensitivity analysis in coal-fired power plants," *Fuel*, vol. 236, pp. 1400–1407, 2019.
 - [25] X. Huang, X. Liu, and Y. Ren, "Enterprise credit risk evaluation based on neural network algorithm," *Cognitive Systems Research*, vol. 52, pp. 317–324, Dec. 2018.
 - [26] S. Ren and L. Gao, "Combining artificial neural networks with data fusion to analyze overlapping spectra of nitroaniline isomers," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 107, no. 2, pp. 276–282, Jul. 2011.
 - [27] P. H. Sherrod, "DTREG Predictive Modeling Software," 2003.
 - [28] Ö. Baydaroglu and K. Koçak, "SVR-based prediction of evaporation combined with chaotic approach," *Journal of Hydrology*, vol. 508, pp. 356–363, Jan. 2014.
 - [29] C. Campbell, "Kernel methods: a survey of current techniques", 2002.
 - [30] T. Kavzoglu and I. Colkesen, "A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification,"

PREDICTION OF GROSS CALORIFIC VALUE OF COAL FROM PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS VARIABLES USING SUPPORT VECTOR MACHINES WITH FEATURE SELECTION

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 11, no. 5, pp. 352–359, Oct. 2009.

- [31] C. W. Hsu, C. C. Chang, and C.J. Lin, “A Practical Guide to Support Vector Classification”, 2003.
- [32] G. Ozbayoglu, A. M. Ozbayoglu, and M. E. Ozbayoglu, “Estimation of Hardgrove grindability index of Turkish coals by neural networks,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 85, pp. 93-100, 2003.
- [33] J. Arliansyah and Y. Hartono, “Trip Attraction Model Using Radial Basis Function Neural Networks,” *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 445–451, Jan. 2015.
- [34] S. Chen, X. Hong, and C.J. Harris, “Orthogonal Forward Selection for Constructing the Radial Basis Function Network with Tunable Nodes,” In *International Conference on Intelligent Computing*, Springer, Berlin, Heidelberg, August 23-26, 2005, pp. 777–786.
- [35] M. J. L. Orr, “Introduction to Radial Basis Function Networks,” Centre for Cognitive Science, University of Edinburgh, Scotland, 1996.





FUNDUS FLORESEİN ANJIOGRAFI GÖRÜNTÜLERİNDE YENİ KANAMA BÖLGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM : HIZLI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI (Q-ABC)

Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA^{1,*} 

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 38039, KAYSERİ

ÖZET

Diyabetik retinopati (DR) gözün arka kısmında ışığa duyarlı retina tabakasındaki kan damarlarının zarar görmesi sonucu ortaya çıkan ilerleyici bir hastalıktır. Kan damarlarının zarar görmesi kan sızıntılarına neden olabilir. Zarar görmüş kan damarlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi hastalığın teşhisi ve tedavisi açısından son derece önemlidir. Zarar görmüş kan damarlarından dolayı göz üzerinde oluşan yeni kanamalı bölgelerin tespiti ve belirginleştirilmesi için Fundus Floresein Anjiyografi (FFA) görüntüleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, FFA görüntüler üzerinde DR hastalığı sonucu oluşan yeni kanamalı bölgelerin alanları bulunarak hastalığın seviyesini ve ciddiyetini tanımlamaya yardımcı olacak veriler elde edilmiştir. Göz görüntüleri üzerindeki yeni kanamalı bölgelerin tespitine yönelik hızlı yapay arı koloni algoritması (Q-ABC) kümeleme tabanlı olarak geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar kümeleme tabanlı temel yapay arı koloni (ABC) algoritması ile mukayese edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Diyabetik retinopati, Fundus floresein anjiyografi, Yapay arı koloni algoritması, Hızlı yapay arı koloni algoritması.

A NEW APPROACH FOR DETECTION OF HEMORRHAGIC REGIONS IN THE FUNDUS FLUORESCEIN ANGIOGRAPHY RETINAL IMAGES: QUICK ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM (Q-ABC)

ABSTRACT

Diabetic retinopathy (DR) is a progressive disease that occurs due to the vascular damage in the light sensitive retina at the back of the eye. Vascular pathology may cause bleeding. Correct detection of damages is critical for diagnosis and treatment of the disease. For the detection and the enhancement of these hemorrhagic regions, Fundus Fluorescein Angiography (FFA) imaging method is used. In this work, the total area of new hemorrhagic regions resulting from DR is calculated on the FFA images in order to obtain data that represents the level and seriousness of the illness. A clustering based quick artificial bee colony algorithm (Q-ABC) is improved in order to identify new hemorrhagic regions on the retinal images and its performance is compared to that of clustering based basic artificial bee colony (ABC) algorithm.

Keywords : Diabetic retinopathy, Fundus fluorescein angiography, Artificial bee colony algorithm, Quick artificial bee colony algorithm.

1. GİRİŞ

İnsülin hormonunun salgılanmasındaki düzensizliklerden dolayı kandaki şeker miktarının kontrol edilememesi sonucunda diyabet hastalığı ortaya çıkmaktadır. Diyabet hastalığı kontrol altına alınmazsa kan şekeri yükselerek yüksek tansiyon problemini ortaya çıkarır ve vücuttaki kan akış hızı artar. Diyabet hastalığı retina tabakasındaki kılcal damarların yapısını bozarak hücre kayıplarına yol açar ve mevcut damarların geçirgenliği bozulur. Göz damarlarındaki tıkanmanın sonucunda retina tabakasında ortaya çıkan hasarlı hücreler kendiliğinden kanayabilen yeni damarlar oluşturur. Diyabet hastalığından dolayı retina içinde yapısı bozulan kan damarları mikro düzeyde kas tabakasız damar genişlemelerine, kanamalara, sert eksuda ve pamuk noktalar gibi çeşitli istenmeyen etkilere neden olabilir [1,2]. Diyabetik retinopati sonucunda oluşan çeşitli seviyelerdeki görme bozuklukları tedavi edilmezse sürekli olarak ilerler ve ileri seviyede veya tamamen görme kaybı ile

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cetinkaya@erciyes.edu.tr

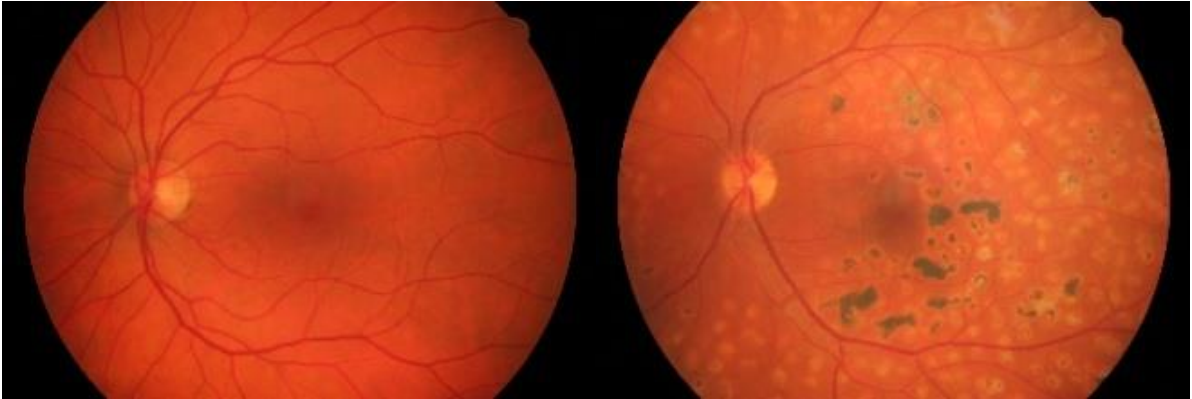
Geliş / Recieved: 01.01.2019 Kabul / Accepted: 01.03.2019 doi: 10.28948/ngumuh.777803

M. B. Çetinkaya

sonuçlanabilir [3]. Son yıllarda göz hastalıklarının teşhisine yönelik biyomedikal görüntü işleme alanında literatür incelendiğinde, sert ve yumuşak eksuda tespitine yönelik yaklaşımların analiz edildiği [4-8], retina görüntülerini otomatik algılayarak retina hastalıklarının tanımlanmasına yönelik yapay sinir ağlarının kullanıldığı [9], diyabetik retina hastalarında gözbebeğini genişletmeden tanı koyulmasına yönelik yöntemlerin kullanıldığı [10], retina hastalıklarının sınıflandırılmasına yönelik yaklaşımların kullanıldığı [11] ve yaşa bağlı makula dejenerasyonunun tespitine yönelik [12], çalışmaların yapıldığı görülmektedir.

Diyabet hastalığının neden olduğu ölümlerin düşük ve orta gelirli ülkelerdeki oranı %80'dir [13]. Diyabet hastalarının sayısı nüfus artışı, yaşlılık, kentleşme ve fiziksel hareketlerdeki azalmalara bağlı olarak günden güne artmaktadır. Diyabet hastalarının toplam sayısının 2030 yılında 36 milyona yükselmesi beklenmektedir [14]. Diyabet hastalarının yaklaşık %40'ında diyabetik retinopatiye yakalanma riski vardır ve bu risk altındaki hastaların %5'inin görme kaybıyla karşılaşabilmesi olasıdır [15].

Bu çalışmada, diyabetik retinopati hastalığı bulunan bir retinal görüntü üzerinde yeni kanamalı bölgelerin tespitine yönelik ABC ve Q-ABC algoritmaları kümeleme tabanlı olarak geliştirilmiştir. Benzetimlerde, retinal görüntü üzerindeki yeni kanamalı bölgelerin hekim tarafından görülebilmesini kolaylaştırmak amacıyla bu bölgelerin çevreleri çizdirilmiş ve daha belirgin hale getirilmiştir. Daha sonra, hekimlere yeni kanamalı bölgelere ait matematiksel ve doğruluğu net veriler sağlayabilmek amacıyla alansal hesaplar yapılmış ve elde edilen sonuçlar veri tabanına kaydedilmiştir. Elde edilen veritabanları sayesinde hekimler hastalık ve hastalığın seyri hakkında daha objektif ve matematiksel değerlendirmeler yapabilecektir. Ayrıca, yeni kanamalı bölgelerin göz üzerindeki toplam alanlarının matematiksel olarak hesaplanabilmesi ile belirli H skorları tanımlanabilecektir. Elde edilen H skorları ile kanama miktarının yayını, yeni kanamalı bölgelerdeki atağın takibi yapılabilecektir. Sonuç olarak, hekimlerin uygulanması gereken tedavi yöntemleri hakkında nitel gözlemler yaparak karar vermek yerine nicel gözlemler yaparak karar verebilmesine olanak sağlanmış olacaktır. Benzetimler, High-Resolution Fundus (HRF) Image Database [16] veri tabanından alınan Kırmızı-Yeşil-Mavi (Red-Green-Blue, RGB) formatında ve FFA yöntemi kullanılarak elde edilmiş diyabetik retinopati hastalığı görülen bir göz görüntüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Diyabetik retinopati hastalığı görülen ve görülmeyen retinalara ait FFA görüntüleri Şekil 1 ile gösterilmiştir.



a) Sağlıklı Retina

b) Hastalıklı Retina

Şekil 1. Sağlıklı retina ve diyabetik retinopati hastalığı bulunan retinalar

2. TEMEL ABC ALGORİTMASI

Yapay arı koloni algoritması, problemlerin çözümünde arı kolonilerinin ortak hareketlerinden esinlenerek geliştirilmiş sürü zekasına dayalı sezgisel bir algoritmadır. Karaboğa tarafından 2005 yılında önerilmiş olan ABC algoritması [17] özellikle çok boyutlu problemlerin optimizasyonunda etkin bir performansa sahiptir. ABC algoritmasında popülasyon 3 grup arıdan oluşmaktadır. Bunlar, görevli arılar, gözcü arılar ve kaşif arılardır. Başlangıç popülasyonu yarısı görevli arılardan diğer yarısı ise gözcü arılardan oluşacak şekilde oluşturulmaktadır. Bir yiyecek kaynağının pozisyon bilgisi olası bir çözümü temsil ederken, nektar miktarı ise o yiyecek kaynağının temsil ettiği çözümün kalite değerini belirlemektedir. Her bir görevli arı rasgele üretilmiş bir yiyecek kaynağına atanmaktadır, yani görevli arı sayısı yiyecek kaynağı sayısına eşit olmaktadır. Böylece, görevli arıların veya gözcü arıların sayısı popülasyondaki çözüm sayısına eşit olmaktadır. Diğer görevli ve gözcü arılar tarafından yiyecek kaynağı tüketilen görevli arılar ise kaşif arı haline dönüşmekte ve yeni yiyecek kaynakları bulmak için araştırma uzayında rasgele araştırma yapmaktadır.

FUNDUS FLORESEİN ANJİOGRAFİ GÖRÜNTÜLERİNDE YENİ KANAMA BÖLGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM : HIZLI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI (Q-ABC)

Araştırmanın ilk aşaması başlangıç popülasyonundaki rasgele üretilmiş olası çözümler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bir çözüm belirli sayıda denemeye rağmen geliştirilememiş ise tükenmiş bir çözüm olarak kabul edilerek popülasyondan atılır ve yerine kaşif arılar tarafından bulunan yeni bir çözüm popülasyona dahil edilir. Bir çözümün tükenmiş çözüm olarak kabul edilebilmesi için "limit" parametresi sayısınca denemeye rağmen geliştirilememiş olması gerekir.

ABC algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir:

Algoritma 1. ABC algoritması
1. <i>Başlangıç aşaması</i>
2. REPEAT
3. <i>Görevli arı aşaması</i>
4. <i>Gözcü arı aşaması</i>
5. <i>Kaşif arı aşaması</i>
6. <i>En iyi çözümün hafızaya kaydedilme aşaması</i>
7. UNTIL (<i>sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar</i>)

Başlangıç aşamasında Eşitlik (1) kullanılarak rasgele bir başlangıç popülasyonu üretilir, ,

$$x_{m,i} = l_i + rand(0,1) \cdot (u_i - l_i) \quad (1)$$

burada, $x_{m,i}$ ifadesi, m . çözümün i . boyutunu göstermektedir. u_i ve l_i , sırasıyla, $x_{m,i}$ çözümünün alt ve üst sınırlarıdır. Rasgele üretilmiş SN adet çözüm içeren bir başlangıç popülasyonu $P(c) = \{x_{m,i} \mid m=1,2, \dots, SN\}$ şeklinde gösterilebilir.

Daha sonra, başlangıç popülasyonundaki her bir çözümün kalite değeri bir minimizasyon problemi olarak Eşitlik 2 ile en düşük hata değeri elde edilecek şekilde hesaplanarak hafızaya kaydedilir.

$$fit(x_m) = \frac{1}{1 + |f(x_m)|} \quad (2)$$

Görevli arı aşamasında öncelikle başlangıç aşamasında hafızaya kaydedilmiş olan en yüksek kalite değerli çözümlerin komşuluğunda yeni çözümler Eşitlik 3 kullanılarak üretilir.

$$v_{m,i} = x_{m,i} + \phi_{m,i} (x_{m,i} - x_{k,i}) \quad (3)$$

burada, x_k rasgele seçilmiş bir çözümü ve i ise bu çözümün yeni çözüm üretmek amacıyla değişiklik yapılacak boyutunu temsil etmektedir. $\phi_{m,i}$ katsayısı ölçekleme faktörüdür ve $[-1,+1]$ aralığında değerler alabilmektedir. Komşu çözüm v_m üretildikten sonra x_m ve v_m arasında açgözlü seçme (greedy selection) prosedürü uygulanarak kalite değeri daha yüksek olan çözüm bir sonraki jenerasyona aktarılır. Eğer üretilen yeni çözüm sınır değerleri dışında ise ilgili çözümün değeri en yakın sınır değerine eşitlenir.

Gözcü arı aşamasında öncelikle görevli arı aşamasında üretilmiş olan çözümlerin bir kısmı kalite değerlerine bağlı olarak seçilirler. Bu olasılıksal seçme prosedürü aşağıda Eşitlik 4 ile verilmiştir,

$$p_m = \frac{fit(x_m)}{\sum_{m=1}^{SN} fit(x_m)} \quad (4)$$

Bu aşamadan sonra, görevli arı aşamasındaki benzer şekilde Eşitlik 3 kullanılarak komşu çözümler üretilir ve x_m çözümü ile komşu çözümü olan v_m arasında açgözlü seçme prosedürü uygulanarak yüksek kalite değerli olan çözüm bir sonraki jenerasyona aktarılır.

Kaşif arı aşaması ise *limit* parametre değeri kadar denemeye rağmen geliştirilemeyen çözümlerin yerine Eşitlik 1 kullanılarak rasgele üretilmiş yeni çözümlerin popülasyona dahil edildiği bir aşamadır. Kaşif arı aşaması sayesinde bir sonraki jenerasyona tükenmiş çözümler değil, onların yerine üretilen yeni çözümler aktarılmaktadır.

3. HIZLI ABC ALGORİTMASI

Temel ABC algoritmasında, bir gözcü arı doğrudan ve sadece görevli arı tarafından kendisine aktarılan konum bilgisindeki ilgili çözümü değerlendirmektedir. Bu araştırma yönteminde tek bir çözüm üzerinde odaklanıldığı için o çözümün etrafındaki olası daha iyi çözümler göz ardı edilmekte, bu ise algoritmanın yakınsama hızını düşürmektedir. Temel ABC algoritmasının bu dezavantajının üstesinden gelmek için, Karaboğa ve Görkemli tarafından Q-ABC algoritması önerilmiştir [18,19]. Önerilen yaklaşımda, gözcü arı aşamasında, sadece görevli arıların konum bilgisini verdiği kaynak değil aynı zamanda bu kaynağın belirli bir yarıçapındaki bölge de araştırılmakta ve bu bölge dahilinde en yüksek kalite değerli çözüm seçilerek bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Önerilen algoritmada, gözcü arıların davranışı aşağıda Eşitlik 5 ile modellenmektedir,

$$v_{N_m, i}^{best} = x_{N_m, i}^{best} + \phi_{m, i} (x_{N_m, i}^{best} - x_{k, i}) \quad (5)$$

burada $x_{N_m}^{best}$ ifadesi, x_m çözümünün kendisi (N_m) ile komşuluğundaki tüm çözümler arasındaki en yüksek kalite değerine sahip çözümü temsil etmektedir. Yani, gözcü arı, görevli arı tarafından konum bilgisi aktarılmış olan x_m çözümünü hafızasına kaydettikten sonra bu çözümün merkezinde olduğu bir bölgede yeni komşu çözümleri araştırmaktadır. Araştırma bölgesi içerisinde en yüksek kalite değerine sahip $x_{N_m}^{best}$ çözümü bir sonraki jenerasyona aktarılır. Yani, S adet çözümden oluşan bir çözüm uzayındaki en yüksek kalite değerine sahip $x_{N_m}^{best}$ çözümü aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır,

$$fit(x_{N_m}^{best}) = \max [fit(x_{N_m}^1) \quad fit(x_{N_m}^2) \quad \dots \quad fit(x_{N_m}^S)] \quad (6)$$

ABC algoritmasına ilave olarak, Q-ABC algoritması, *komşuluk yarıçapı* (r) olarak adlandırılan ve x_m çözümünün merkezde olduğu araştırma bölgesinin yarıçapını tanımlayan bir kontrol parametresine daha sahiptir. r parametresinin değeri $r=0$ olarak seçildiğinde Q-ABC algoritması ABC algoritmasına dönüşeceği için bu parametrenin değeri $r \geq 0$ olarak seçilmelidir [19].

Q-ABC algoritmasının akış kodu aşağıdaki gibidir,

Algoritma 2. Q-ABC algoritması

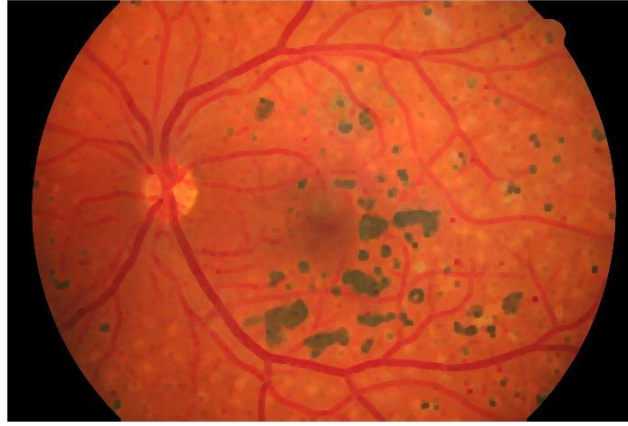
1. **Başlangıç Aşaması**
2. Kontrol parametre değerlerini tanımla
3. x_m çözümlerinden oluşan rasgele başlangıç popülasyonu oluştur
4. Her bir çözümü değerlendir ve en iyi çözümü hafızaya al
5. Çevrim = 0
6. **REPEAT**
7. **Görevli Arı Aşaması**
8. x_m çözümünün komşuluğunda bir v_m çözümü üret ve bu çözümü değerlendir
9. x_m ve v_m arasında aç gözlü seçme prosedürü uygula
10. Popülasyondaki her bir çözüm için kalite ve olasılık değerlerini hesapla
11. **Gözcü Arı Aşaması**
12. p_m olasılığına bağlı olarak bir x_m çözümü seç
13. En yüksek kalite değerine sahip $x_{N_m}^{best}$ komşu çözümünü bul ($x_{N_m}^{best} = x_m$ olabilir)
14. $x_{N_m}^{best}$ çözümünün komşuluğunda bir $v_{N_m}^{best}$ çözümü üret ve bu çözümü değerlendir
15. $x_{N_m}^{best}$ ve $v_{N_m}^{best}$ arasında aç gözlü seçme prosedürü uygula
16. Şu ana kadar bulunan en iyi çözümü hafızaya al
17. **Kaşif Arı Aşaması**
18. Tükenmiş çözümleri tespit et ve onların yerine bir sonraki jenerasyon için yeni çözümler üret
19. Çevrim = Çevrim + 1;
20. **UNTIL** (sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar)

FUNDUS FLORESEİN ANJİOGRAFİ GÖRÜNTÜLERİNDE YENİ KANAMA BÖLGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM : HIZLI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI (Q-ABC)

4. METOT VE BENZETİM SONUÇLARI

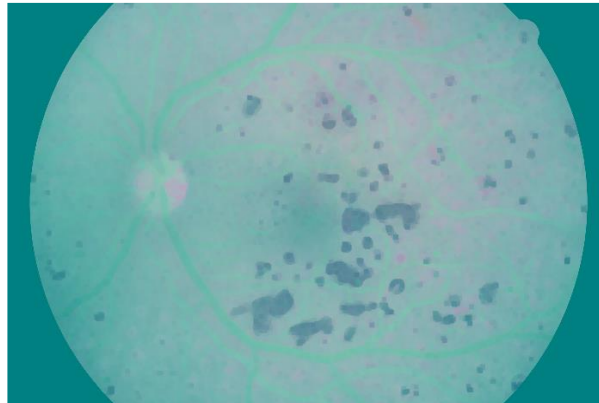
Görüntü işleme metodolojisinde bazı ön işlemler uygulanarak görüntü zenginleştirilmekte ve daha sonra kümeleme tabanlı görüntü analizi gerçekleştirilmektedir. Görüntü zenginleştirme için kullanılan en temel yaklaşımlar süzgeçleme ve morfolojik işlemlerdir. Süzgeçleme görüntüyü netleştirmekte ve hastalıklı bölgeleri daha belirgin hale getirmektedir. Ancak, çok küçük yarıçaplı hastalıklı bölgeler ile sağlıklı bölgelerin piksel değerleri genellikle birbirine çok yakındır ve süzgeçleme işlemi bu bölgelerin belirginleştirilmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, çok küçük yarıçaplı hastalıklı bölgeler öncelikle morfolojik işlemler ile genişletilmekte ve daha sonra süzgeçleme işlemi uygulanmaktadır.

Süzgeçleme ve morfolojik işlemlerden sonra elde edilen RGB retinal görüntü Şekil 2 ile gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, hastalıklı bölgeler ile sağlıklı bölgelerin piksel değerleri arasındaki fark artarak hastalıklı bölgeler daha belirgin hale gelmiştir.



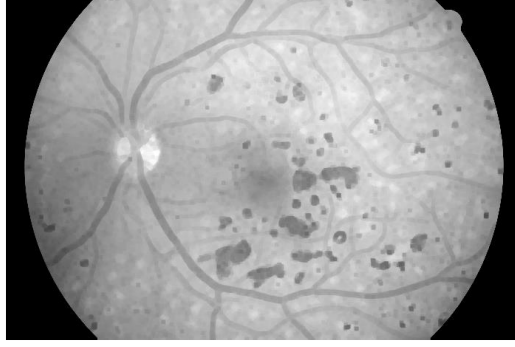
Şekil 2. Süzgeçleme ve morfolojik işlemler sonrasında elde edilen retinal görüntü

Biyomedikal görüntüleme cihazlarından elde edilen retinal görüntüler genellikle RGB formatındadır fakat bu görüntüler farklı renk uzayları kullanılarak ta analiz edilebilirler. Literatürde sık kullanılan bir diğer renk uzayı *parlaklık (L)*, *kırmızı-yeşil (a)* ve *sarı-mavi (b)* katmanlarından oluşan Commission Internationale de l'Eclairage Lab (CIE Lab) renk uzayıdır [20]. Bu çalışmada, retinal görüntüler üzerinde yapılan benzetimlerde CIE Lab uzayında daha yüksek kümeleme performansının elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle analizler CIE Lab renk uzayı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2 ile verilen RGB renk uzayındaki retinal görüntünün CIE Lab renk uzayına dönüştürülmüş formu ve her bir katmana ait görüntüler, sırasıyla, Şekil 3 ve Şekil 4 ile gösterilmiştir.

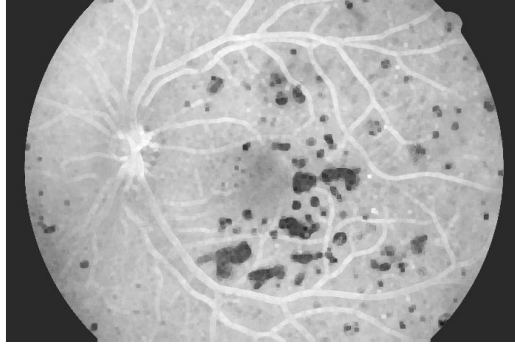


Şekil 3. CIE Lab renk uzayında elde edilen retinal görüntü

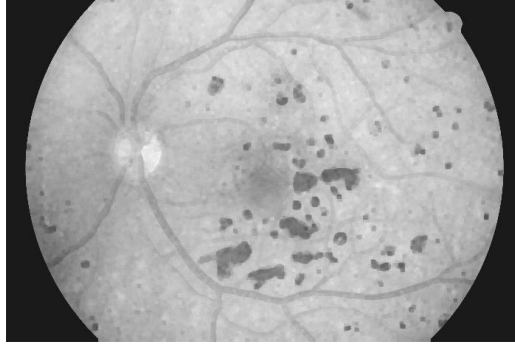
M. B. Çetinkaya



a.) *L* katmanı



b.) *a* katmanı



c.) *b* katmanı

Şekil 4. CIE Lab renk uzayındaki retinal görüntünün katmanları

Yapılan benzetimlerde en iyi kümeleme performansının *a* katmanı üzerinde elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle kümeleme tabanlı retinal görüntü analizi *a* katmanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kümeleme analizi, *n* adet birimi *p* adet değişkene göre mümkün olduğu kadar kendi içinde benzer ve kendi aralarında farklı alt gruplara ayırmak için kullanılır. Bu çalışmada, retinal görüntüde sağlıklı bölgeleri temsil eden piksel değerleri için bir küme merkezi ve hastalıklı bölgeleri temsil eden piksel değerleri için farklı bir küme merkezi olmak üzere toplam iki küme merkezi etrafında kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kümeleme işleminde uygulanan temel adımlar aşağıda verilmiştir.

Rasgele küme merkezleri belirle

REPEAT

FUNDUS FLORESEİN ANJİOGRAFİ GÖRÜNTÜLERİNDE YENİ KANAMA BÖLGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM : HIZLI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI (Q-ABC)

Mesafelere göre örnekleri kümele

Kümeleme sonrasında rasgele yeni küme merkezleri belirle

UNTIL (Tüm örneklerin ait olduğu küme değişmeyinceye kadar)

Kümeleme sürecince küme merkezleri ABC ve Q-ABC algoritmaları tarafından [0,255] piksel değerleri aralığında rasgele belirlenmekte ve bütün piksel değerleri algoritmalar tarafından kendisine en yakın küme merkezine gruplanmaktadır. Böylece hastalıklı bölgeler ile sağlıklı bölgeler arasındaki piksel değerleri arasındaki fark artmaktadır. Piksel değerlerinin en yakın küme merkezlerine gruplandırılması, aşağıda Eşitlik 7 ile verilmiş olan Ortalama Karesel Hata (MSE) kriterine göre gerçekleştirilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2 \quad (7)$$

burada, retinal görüntüdeki toplam piksel sayısı N ve i . piksele en yakın küme merkezi f_i olarak tanımlanmaktadır. y_i ise i . pikselin değerini temsil etmektedir. Görüldüğü gibi MSE değeri sıfıra ne kadar yakın olursa, kümeleme işlemi de o denli başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olacaktır.

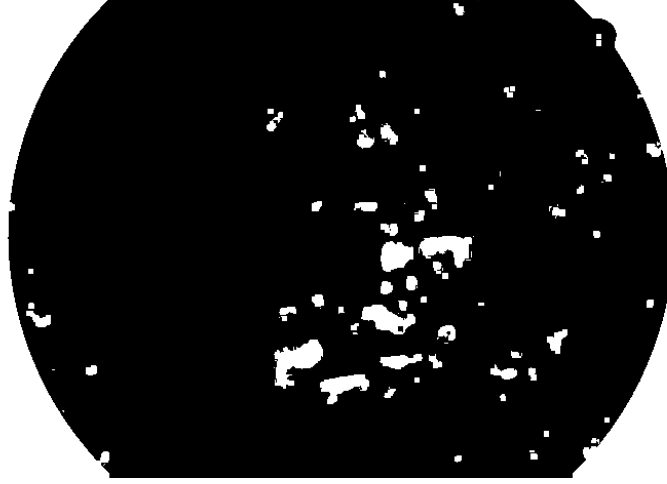
Bu çalışmada, retinal görüntülerde yeni kanamalı bölgelerin tespitine yönelik geliştirilmiş olan kümeleme tabanlı ABC ve Q-ABC algoritmaları için kontrol parametre değerleri aşağıda Tablo 1 ile verilmiştir.

Tablo 1. ABC ve Q-ABC algoritmaları için benzetimlerde kullanılan kontrol parametre değerleri

ABC	Q- ABC
Popülasyon boyutu = 20	Popülasyon boyutu = 20
	Komşuluk yarıçapı (r), $r= 0.5$
<i>limit</i> parametre değeri, popülasyon boyutuna ($nPop$) ve değişken sayısına ($nVar$) bağlı olarak aşağıdaki gibi adaptif şekilde alınmaktadır.	<i>limit</i> parametre değeri, popülasyon boyutuna ($nPop$) ve değişken sayısına ($nVar$) bağlı olarak aşağıdaki gibi adaptif şekilde alınmaktadır.
$limit = 0.6*nVar*nPop$	$limit = 0.6*nVar*nPop$
X_{max} ve X_{min} , sırasıyla, retinal görüntüdeki <i>max</i> ve <i>min</i> piksel değerleridir.	X_{max} ve X_{min} , sırasıyla, retinal görüntüdeki <i>max</i> ve <i>min</i> piksel değerleridir.

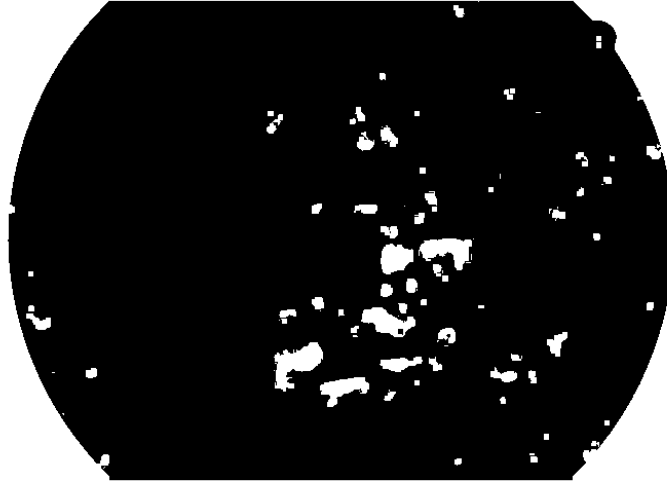
Kümeleme tabanlı ABC ve Q-ABC algoritmaları ile kümeleme sonucunda elde edilen retinal görüntüler aşağıda Şekil 5 ile verilmiştir. Görüldüğü gibi algoritmalar kümeleme açısından benzer performanslar göstermektedir. Retinal görüntü içerisindeki makula bölgesi ile sağlıklı ve kanamalı bölgelerin birbirine çok yakın renk yoğunluklarına sahip olduğu dikkate alındığında, ABC ve Q-ABC algoritmalarının başarılı bir kümeleme performansı gösterdikleri görülmektedir.

ABC algoritması ile kümeleme sonucunda elde edilen retinal görüntü



a.) ABC algoritması

Q-ABC algoritması ile kümeleme sonucunda elde edilen retinal görüntü



b.) Q-ABC algoritması

Şekil 5. ABC ve Q-ABC algoritmaları ile kümeleme sonrasında elde edilen retinal görüntüler

Yeni kanamalı bölgelerin tespit edilmesi hastalığın varlığı, seyri ve ciddiyeti hakkında hekimlere önemli bilgiler vermektedir. Bu çalışmada, yeni kanamalı bölgelerin tespit edilmesine ek olarak aşağıda verilen adımlar uygulanarak ABC ve Q-ABC algoritmaları ile çevreleri çizdirilmiş ve daha anlaşılır görüntüler elde edilmiştir.

Algoritma 3. Yeni kanamalı bölgelerin tespit edilmesi
--

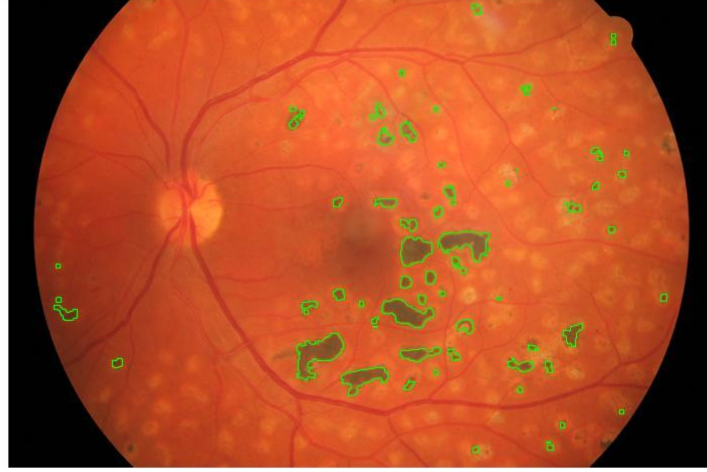
- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Kanamalı bölgeler tespit edilir 2. Tespit edilen bölgelerin sınır bilgileri kaydedilir 3. REPEAT 4. Belirlenen sınır noktaları çizilir 5. UNTIL (tüm sınırlar tamamlanana kadar) |
|---|

ABC ve Q-ABC algoritmaları için benzetimler sonucunda elde edilen göz görüntüleri aşağıda Şekil 6 ile verilmiştir.

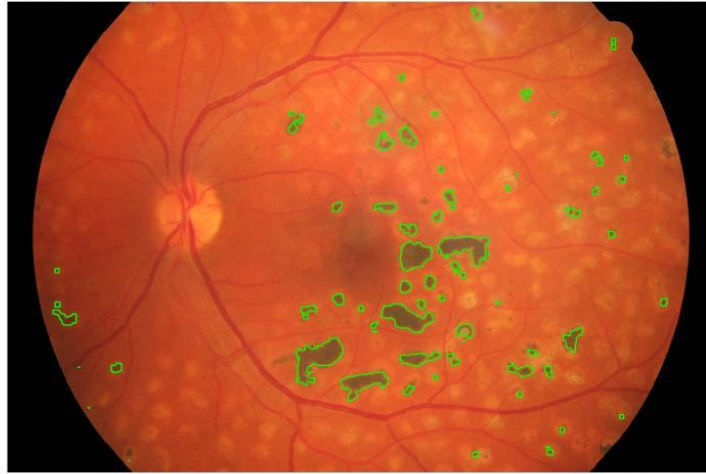
Yeni kanamalı bölgelerin çevrelerinin çizdirilmesi ile elde edilen görüntüler incelendiğinde, her iki algoritmanın da benzer sonuçlar ürettiği fakat Q-ABC algoritmasının başarımının nispeten daha iyi olduğu görülmektedir. Çok sayıda göz görüntüsü üzerinde yapılan benzetimler sonucunda; yeni kanamalı bölgeler ile diğer bölgelerin renk yoğunlukları arasındaki

FUNDUS FLORESEİN ANJİOGRAFİ GÖRÜNTÜLERİNDE YENİ KANAMA BÖLGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM : HIZLI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI (Q-ABC)

benzerliklere, resim işlenirken üzerinde oluşan renk tonlarındaki karartılara ve makula bölgesinin renk değerleri ile yeni kanamalı bölgelerin renk değerleri arasındaki benzerliğe rağmen, ABC ve Q-ABC algoritmalarının retinal görüntülerdeki kümeleme performansının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



a.) ABC algoritması



b.) Q-ABC algoritması

Şekil 6. Yeni kanamalı bölgelerin ABC ve Q-ABC algoritmaları kullanılarak tespiti

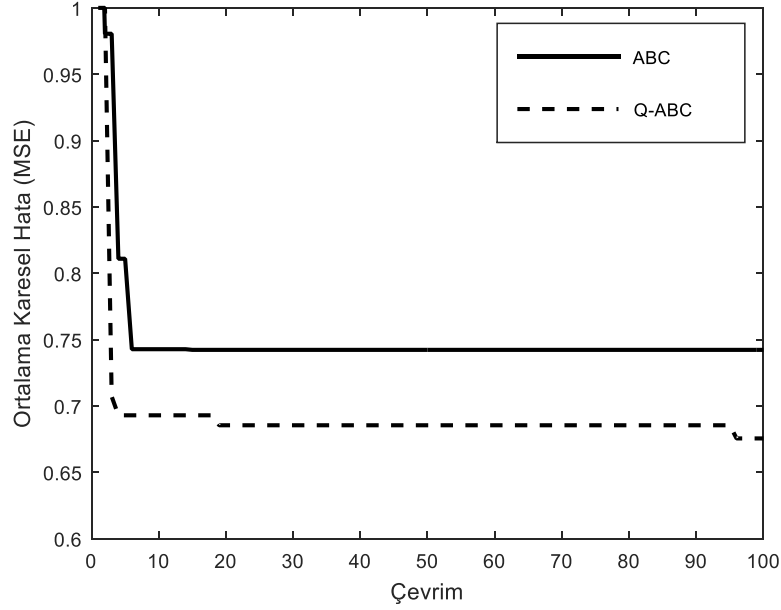
Görüntü üzerindeki yeni kanamalı bölgelerin toplam alanının (θ_i), retinal görüntünün toplam alanına (β_i) oranı da hastalığın durumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bu nedenle bu çalışmada alanların piksel tabanlı hesaplanması üzerine de uygulamalar yapılmıştır. ABC algoritması ile elde edilen sonuçlarda piksel tabanlı alan oranı $\frac{\sum \theta_i}{\beta_i} = 0.034887$

olarak elde edilirken, Q-ABC algoritması ile elde edilen sonuçlarda piksel tabanlı alan oranı $\frac{\sum \theta_i}{\beta_i} = 0.034978$ olarak elde edilmiştir. Piksel tabanlı alan oranlarının yakın değerlerde çıkması her iki algoritmanın da çok benzer kümeleme performansına sahip olduğunun bir diğer göstergesidir. Bu uygulama hasta üzerinde periyodik olarak yapıldığında hastalığın

M. B. Çetinkaya

seyri ve olası riskler hakkında da bir veri tabanı oluşturarak tedavi süreci hakkında daha etkili kararların alınabilmesine olanak sağlayacaktır.

Sezgisel algoritmalar için en önemli performans ölçütlerinden birisi de en iyi çözümlere ulaşma hızını tanımlayan yakınsama hızıdır. ABC ve Q-ABC algoritmalarının retinal görüntü analizindeki yakınsama hızları 20 koşmanın ortalaması için Şekil 7’de mukayese edilmiştir. Görüldüğü gibi, Q-ABC algoritması daha düşük hata değerlerine daha hızlı yakınsamaktadır. Gözcü arı aşamasında önerilmiş olan yaklaşım hem hata performansını hem de yakınsama hızını artırmaktadır.



Şekil 7. ABC ve Q-ABC algoritmaları için yakınsama hızlarının mukayesesi

5. SONUÇ

Bu çalışmada, diyabetik retinopati hastalıklı FFA’lı retinal görüntüler üzerinde yeni kanamalı bölgelerin tespit edilmesine, belirginleştirilmesine ve piksel tabanlı alan hesaplamalarının yapılmasına yönelik kümeleme tabanlı ABC ve Q-ABC algoritmaları geliştirilmiştir. Benzetimler sonucunda, yeni kanamalı bölgelerin ABC ve Q-ABC algoritmaları ile yüksek doğrulukta ve netlikte tespit edilebildiği görülmüştür. Retinal görüntü üzerinde yeni kanamalı bölgelerin daha net görülebilmesi ve matematiksel olarak tanımlanabilmesi amacıyla, ABC ve Q-ABC algoritmaları, yeni kanamalı bölgelerin çevrelerini çizdirerek piksel tabanlı alan hesaplamalarını yapacak şekilde geliştirilmiş ve böylece hastalığın seyri hakkında daha objektif ve matematiksel değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlayacak veriler elde edilmiştir. Elde edilen yakınsama grafikleri incelendiğinde, benzer kümeleme performansı göstermelerine karşın Q-ABC algoritmasının daha düşük MSE değerlerine daha hızlı yakınsadığı da görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] R. N. Frank, “Diabetic retinopathy”, *Progress in Retinal and Eye Research*, vol.14, no. 1995, pp. 361–392. 1995.
- [2] H. Özçetin, *Pratik Göz Hastalıkları (2nci Baskı)*, F. Özsan Matbaacılık, 2000.
- [3] J. A. Olson, F. M. Strachana, J. H. Hipwell, K. A. Goatman, K. C. Mchardy, J. V. Forrester, and P. F. Sharp, “A comparative evaluation of digital imaging, retinal photography and optometrist examination in screening for diabetic retinopathy”, *Diabetic Medicine*, vol. 20, pp. 528–534, 2003.
- [4] T. Walter, J. C. Klein, P. Massin, and A. Erginay, “A contribution of image processing to the diagnosis of diabetic retinopathy-detection of exudates in color fundus images of the human retina”, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 21, no. 10, pp. 1236–1243, 2002.

FUNDUS FLORESEİN ANJİOGRAFİ GÖRÜNTÜLERİNDE YENİ KANAMA BÖLGELERİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM : HIZLI YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI (Q-ABC)

- [5] C. Jayakumari, and T. Santhanam, “An intelligent approach to detect hard and soft exudates using echo state neural network”, *Information Technology Journal*, vol. 7, no. 2, pp., 386–395, 2008.
- [6] A. G. Karegowda, S. Bhattacharyya, M. A. Jayaram, and A. S. Manjunath, , “Exudates detection in retinal images using KNNFP and WKNNFP classifiers”, *Artificial Intelligent Systems and Machine Learning*, vol. 3, no. 7, pp. 419–425, 2011.
- [7] A. Somasundaram, and J. Prabhu, “Detection of exudates for the diagnosis of diabetic retinopathy”, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 116–120, 2013.
- [8] A. Kaur, and, P. Kaur, “A comparative study of various exudate segmentation techniques for diagnosis of diabetic retinopathy”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 46, no. 1, pp. 142–146, 2016.
- [9] F. D. Yağmur, “Yapay sinir ağları ile retinada hastalık teşhisi,” M. S. thesis, University of Haliç, İstanbul, 2008.
- [10] A. Sopharak, and B. Uyyanonvara, “Automatic exudates detection from diabetic retinopathy retinal image using fuzzy c-means and morphological methods”, In Poc. The Third Conference on IASTED International Conference: Advances in Computer Science and Technology, 2007, pp. 359-364.
- [11] A. Osareh, M. Mirmehdi, B. Thomas, and R. Markham, “Automatic recognition of exudative maculopathy using fuzzy c-means clustering and neural networks”, In Poc. Conference Proceedings of Medical Image Understanding and Analysis, 2001, pp. 49–52.
- [12] E. Çalık, “Retina görüntülerinde yaşa bağlı makula dejenerasyonunun bilgisayar destekli tespiti,” M. S. thesis, University of Marmara, İstanbul, 2013.
- [13] Available : http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/en/ . [Accessed October 21, 2016].
- [14] S. Wild, , G. Roglic, A. Green, R. Sicree, and H. King, “Global prevalence of diabetes estimates for the year 2000 and projections for 2030”, *Diabetes Care*, vol. 27, no. 2004, pp. 1047-1053, 2004.
- [15] B. Antal, and A. Hajdu, “An ensemble-based system for automatic screening of diabetic retinopathy”, *Knowledge-Based Systems*, vol. 60, no. 2014, pp. 20-27, 2014.
- [16] High-Resolution Fundus (HRF) Image Database. [Online]. Available : <http://www5.cs.fau.de> [Accessed April 28, 2016].
- [17] D. Karaboga, “An idea based on honey bee swarm for numerical optimization,” University of Erciyes, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Tech. Report-TR06, 2005.
- [18] D. Karaboga, and B. Gorkemli, “A quick artificialbee colony - qabc – algorithm for optimization problems”, In Poc. International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications’12, 2012.
- [19] D. Karaboga, and B. Gorkemli, “A quick artificial bee colony (q-ABC) algorithm and its performance on optimization problems”, *Applied Soft Computing*, vol. 23, pp. 227-238, 2014.
- [20] A. K. Jain, *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall International Editions, 1989.

