



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdersi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdersi
Cilt: 12, Sayı: 1, Ocak 2021 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Bilal GÜMÜŞ
Abdulnasır YILDIZ
Nizamettin HAMİDİ
Orhan KAVAK
Mehmet Emin Öncü
Fevzi ÖNEN

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır
Telefon : +90-412 248 82 17, Faks : +90-412-248 82 18
Elektronik posta : muhendislikdergisi@dicle.edu.tr
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309 - 8640
Online ISSN: 2146-4391

Hakem Listesi / *Reviewers List*

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.

- Lale T. Ergene (ITU)
Suat Toraman (Fırat Üniversitesi)
Zafer Güler (Fırat Üniversitesi)
İhsan Tuğal (Muş Alparslan Üniversitesi)
Murat Karabatak (Fırat Üniversitesi)
Vural Emir Kafadar (Gaziantep Üniversitesi)
Abdullah Ateş (İnönü Üniversitesi)
Nurettin Beşli (Harran Üniversitesi)
Tuğba Akyel (Amasya Üniversitesi)
Canan Oral (Amasya Üniversitesi)
Harun Özbay (Bandırma Üniversitesi)
Ahmet Fertelli (Cumhuriyet Üniversitesi)
Serhat Berat Efe (Bandırma Üniversitesi)
Dursun Öztürk (Bingöl Üniversitesi)
Murat Doğruyol (Siirt Üniversitesi)
Samed İnyurt (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi)
Okan Fıstıkoğlu (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Onur Onat (Munzur Üniversitesi)
Muhammed Karaton (Fırat Üniversitesi)
Mehmet Rıfat Kahyaoğlu (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)
Mesut Gör (Fırat Üniversitesi)
Haydar Ertaş (Munzur Üniversitesi)
Orhan Taner Can (Bursa Teknik Üniversitesi)
Sinan Uyanık (Bursa Teknik Üniversitesi)
Mehmet Emin Öncü (DU)
Senem Çetin Yılmaz (DU)
Abdulhalim Karaşin (DU)
S. Özgür Değertekin (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Fırçasız Doğru Akım Motorunun (BLDC) Kısa Devre Arıza Analizi (*Araştırma Makalesi*)
Short Circuit Fault Analysis of BLDC Motor by Finite Element Method (Research Article)
Mehmet Recep Minaz, Kadriye Yıldız **1**
- Siber Zorbalık Tespit Yöntemleri Potansiyel Uygulama Alanları ve Zorluklar (*Araştırma Makalesi*)
Enver Yazgılı, Muhammet Baykara **23**
- Hesapsal Zekâ Yöntemleri ile İnsansız Hava Araçları için Rota Planlaması (*Araştırma Makalesi*)
Route Planning for Unmanned Aerial Vehicles with Computational Intelligence Methods (Research Article)
İlhan Aydın, Gökhan Altun **37**
- Dose and fading time estimation of glass ceramic by using artificial neural network method (*Research Article*)
İbrahim Işık, Esme Işık, Hüseyin Toktamış **47**
- Characterization of the influence of Amyloid β (1-42) By Way of Modeling Synaptic Cleft with an RC Electronic Circuit (*Research Article*)
Mehmet Emin Tağluk, İbrahim Işık **53**
- Rogosinski Lemması ile ilgili Süren Nokta Empedans Fonksiyonları için Carathéodory Eşitsizliği (*Araştırma Makalesi*)
Carathéodory's Inequality for Driving Point Impedance Functions Concerned with Rogosinski's lemma (Research Article)
Bülent Nafi Örnek, Timur Düzenli **61**
- Çatı Üstü PV Elektrik Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Şanlıurfa Örneği (*Araştırma Makalesi*)
Determination of Rooftop PV Electricity Generation Potential: The case of Şanlıurfa (Research Article)
Erdal Yıldırım, Mehmet A. Aktacir **69**
- Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü için Tamsayı Derece Yaklaşımli Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu (*Araştırma Makalesi*)
Optimization of Fractional Order Controller with Integer Order Approximation for Load Frequency Control of a Microgrid (Research Article)
Burak Yıldırım **79**

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Siirt ilindeki bazı binaların riskli bina tespit yönetmeliğine göre değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi) <i>Calculating the performance score of some risky buildings in Siirt province</i> (Research Article) Ersin Ayhan, Gültekin Aktaş, Abdulhalim Karaşin	89
Bitki İndeksleri Kullanarak Buğday Bitkisinin Rekolte Tahmini (Araştırma Makalesi) <i>Wheat Yield Estimation Using Vegetation Indices</i> (Research Article) Yunus Kaya, Nizar Polat	99
Spatial variation model of seismic ground motion for Istanbul (Research Article) Ebru Harmandar, Eser Çaktı, Mustafa Erdik	111
Selection of Pile Foundation Systems:An Integrated Multi-Criteria Decision Making (Research Article) Ender Başarı, Özgür Eski, Özlem Uzun Araz, Mustafa Erkan Turan	133
Silika Aerogel Katkılı Hibrit Silis Dumanı Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal İletkenlik ve Mikro Yapı Özellikleri (Araştırma Makalesi) <i>Mechanical, Pore Structure, Thermal Conductivity and Microstructure Properties of Silica Aerogel-Incorporated Hybrid Silica Fume Mortars</i> (Research Article) Levent Bostancı	147
Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modelinin Yeraltı Suyu Kalitesinin Değerlendirilmesinde Kullanımı (Araştırma Makalesi) <i>The Use of Partial Least Squares Structural Equation Model in the Evaluation of Groundwater Quality</i> (Research Article) Zeki Doğan, Hamza Yalçın, İbrahim Yeniğün, A. Volkan Bilgili	165
Yığma duvarların mikro modellemesinde harcın çekme dayanımı ve kayma gerilmesi iletim katsayısının etkisi (Araştırma Makalesi) <i>Effect of tensile strength and shear transfer coefficient of the mortar in micro modeling of masonry walls</i> (Research Article) Muhammet Karaton, Kağan Çanakçı	175

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Fırçasız Doğru Akım Motorunun (BLDC) Kısa Devre Arıza Analizi

Mehmet Recep MİNAZ*

Siirt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt

mehmetrecepminaz@siirt.edu.tr ORCID: 0000-0001-8046-6465, Tel: (484) 212 11 11 (3034)

Kadriye YILDIZ

Siirt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt

47kadriyeyildiz@gmail.com 47kadriyeyildiz@gmail.com

Geliş: 30.07.2019, Revizyon: 21.06.2020, Kabul Tarihi: 30.08.2020

Öz

Üç fazlı sürekli mıknatıslı fırçasız makineler, güvenilirlik ve hata toleransının önemli olduğu birçok uygulamada kullanılır. Bu çalışmada, dış rotorlu sürekli mıknatıslı bir fırçasız doğru akım (BLDC) motorunun arızasının benzetimini yapmak için, stator faz devresine ek paralel bir empedans eklenerek sargıda oluşan yalıtım bozulması modellenmiştir. Arıza empedansı, manyetik bozulmaya neden olan dolaşım akımını hesaplamak için gereklidir. Motor akım imza analizi (MCSA) arızalı motorun akım işaretleri üzerindeki değişimi göz önünde bulundurularak farklı şiddette arıza tespiti için analizler yapılır. Kısa devre arıza modellenmesi sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilip kullanılan program ile stator çıkış işaretlerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak öznelik çıkarımı elde edilmiştir. Sınıflandırıcı olarak k en yakın komşu (k -NN), çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağları (MLP), karar ağaçları (RT) gibi farklı sınıflandırma metotları uygulanarak kısa devre arızaların oluşumunu ve şiddetini tahmin etmede kullanılmıştır. İki farklı öz nitelik çıkarımı ile arıza tespitinin doğruluğu karşılaştırıldıktan sonra uygun öz nitelik veri seti seçilip, sunulan kriterin kısa devre hatası tespit edilmiştir. Arıza tespitinde, MLP sınıflandırma metodu %80 başarı oranına sahip olmasına karşın k -NN ve RT metotlarında %100 başarı elde edilmiştir. Bu durumda arıza tespiti için uygulanan k -NN ve RT metotlarının oldukça başarılı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi; Arıza modelleme; Spektral analizi; Öznelik çıkarımı; Arıza tespiti

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Sürekli mıknatıslı motorlar besleme kaynaklarının türlerine göre, sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM) ve fırçasız doğru akım motoru (BDCM) olarak adlandırılmaktadırlar. Bu motorlardan içsel sürekli mıknatıslı (IPM) tipi motorlar, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik dâhil olmak üzere mükemmel performans özelliklerine sahiptir. Bu nedenle motorlu sistemleri de dâhil olmak üzere hibrit elektrikli araç ve elektrikli araç aralarında bulunduğu çok çeşitli endüstriyel ve transit uygulamalarda, her türlü elektrikli tahrik sisteminde aktif olarak kullanılmaktadır. BLDC sürücü sistemleri ile çalışan IPM motorlar, sağlamlıkları ve yüksek performansları nedeniyle birçok güvenlik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır [1], [2].

İzolasyon arızası nedeniyle meydana gelen stator arızaları, sarım-sarım, bobin-bobin, faz-faz ve faz-toprak hatası olarak sınıflandırılır. Erken ve doğru sarım-sarım hata teşhisi, yukarıda bahsedilen diğer hataların ortaya çıkmasını önler ve sürekli mıknatıslı senkron motorların (PMSM) yüksek güvenilirliğini sağlar [1]. Bobinler birbirlerinden ve makinenin gövdesinden yalıtkan kâğıt kullanılarak izole edildiğinden, sarımlar arası arıza en sık görülen elektrikselsel arızalardan olmak ile birlikte diğer stator arızalarına kıyasla daha muhtemeldir. Kısa devre arızası ilk aşamada tespit edilmezse, yüksek akım nedeniyle faz-toprak arızasına neden olabilir. Bu da yüksek ısı üretir [3]–[6]. Faz-toprak arıza akımının büyük olması nedeniyle stator sargı arızası nüveye zarar verebilir. Bu nedenle, stator sargılarında oluşan kısa devre arızası teşhisi oldukça gereklidir. Bu durum sistemin güvenilirliğini artırabilir ve ciddi hasarları önleyebilir. Geleneksel olarak, stator sarım arızaları empedans değerlerindeki değişimin izlenmesiyle tespit edilir [7], [8].

Toliyat ve Lipo, bu hataların makine empedansında deneysel olarak birçok deneme yaparak makinenin dengesiz faz akımları çizmesine neden olduğunu göstermiştir [9]. Bu

da hatta akan negatif bileşen akımlarının sonucudur. Bununla birlikte, negatif bileşen akımlarına, gerilim dengesizliği, makine nüvesinin doyuma ulaşması gibi birçok sorun neden olabilir [10]. Elektrikli makinelerde kısa devre arızasının bir veya birkaç nedeni vardır. Bunlar ısıl, elektrikselsel, mekanik ve çevresel stresleri içerir [4].

Bu çalışmada SEY kullanılarak sağlıklı makinenin analizi yapılmıştır. Daha sonra tasarımı yapılan makinede kısa devre arızası oluşturularak makinenin davranışları incelenmiştir.

Arıza Teşhis teknikleri

Gelişen teknolojileri ile birlikte her geçen gün kullanılmakta olan veri miktarı hızlı bir şekilde büyümekte ve hızla artan veri miktarı da bu verilerin analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Her 20 ayda bir dünyadaki veri miktarının ikiye katlandığı tahmin edilmektedir [11]. Uygun sinyal işleme aracını kullanarak bir sinyalden bilgi elde edilebilmektedir. Bu veriler veri madenciliği tekniği ile elektrik makinalarında oluşabilecek arızaların erken teşhisi için oldukça önemlidir [12]. Literatürde son dönemlerde arıza teşhisi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Özellikle rulman arızalarında kullanılan bu yöntemler oldukça başarı göstermektedir [13]–[16]. Sonlu elemanlar yöntemi bir asenkron motorun mekanik arıza teşhisinde başarı göstermiştir. K-NN, MLP, RT yöntemleri kullanılarak etkin bir sonuç alınmıştır. [17].

Weka ilk olarak 1997 yılında uygulanmış bir Waikato ürünüdür. Bu makine öğrenme paketi, halka açık ve gerçek dünyadaki veri madenciliği sorunlarını çözmek için bir algoritmalar koleksiyonu sunmaktadır. Yazılım tamamen Java ile yazılmış ve standart makine öğrenme tekniklerinin bir dizi standart bir ara yüz içerir. Weka'daki birincil öğrenme yöntemleri olan sınıflandırıcılar ve verileri modelleyen bir kural kümesi veya karar ağacı oluştururlar. Weka ayrıca kurallarını

ve kümelenme verilerini öğrenmek için algoritmalar içerir. Tüm uygulamalarda tek biçimli bir komut satırı ara yüzü vardır. Ortak bir değerlendirme modülü veri setine göre öğrenme algoritmasının göreceli performansını ölçer [18]. WEKA, ham verinin işlenmesi, öğrenme metotlarının veri üzerinde istatistiksel olarak değerlendirilmesi, ham verinin ve ham veriden öğrenilerek çıkarılan modelin görsel olarak izlenmesi gibi veri madenciliğinin tüm basamaklarını destekler. Geniş bir öğrenme algoritmaları yelpazesine sahip olduğu gibi pek çok veri ön işleme filtreleri içerir. Bu çalışmada Weka programı ile arızaların şiddetini test etmede yapay sinir ağları (MLP), k-en yakın komşu (k-NN) ve karar ağaçları (RT) sınıflandırma yöntemleri olarak seçilmiş ve doğruluk yüzdesi açısından uygun görülmüştür. Kullanılan tüm sınıflandırıcı algoritmalar doğruluk oranları ve işlem süreleri farklılık gösterse bile benzer mantıkla çalışmaktadır.

▪ ***K en yakın komşu Algoritması (k-NN)***

K-NN algoritması, T. M. Cover ve P. E. Hart tarafından önerilen, örnek veri noktasının bulunduğu sınıfın ve en yakın komşunun, k değerine göre belirlendiği bir sınıflandırma yöntemidir. Yeni karşılaşılan bir örnek, eğitim setinde yer alan örnekler ile arasındaki benzerliğe göre sınıflandırılmaktadır [19]. Algoritmanın sınıflandırma işlemindeki başarısını etkileyen faktörlerden biri k değerinin doğru seçilmesidir. Bu değerinin çok büyük veya çok küçük seçilmesi, aynı sınıfta bulunması gereken örüntülerin farklı sınıflara atanabilmesine neden olabilmektedir. Farklı k değerleri ile deneyerek en başarılı olan k değerinin belirlenmesi en yaygın yöntemdir, ancak bu işlem zaman açısından maliyetli bir işlemdir. Sınıflandırılacak örüntülerin boyutları, k-NN işlem hızını etkileyen diğer bir parametredir [20].

▪ ***Çok katmanlı Algılayıcı Yapay Sinir Ağları (MLP)***

Genel olarak yapay sinir ağları insan beyninin biyolojik sinir yapısını taklit ederek sinirsel

algılayıcılar yardımı ile önceden öğrenilmiş ya da sınıflandırılmış bilgileri kullanarak yeni bilgiler türetebilen ve oluşturabilen, karar verebilen bilgisayar programlarıdır. Örüntü tanıma, sistem tanılama, robotik, sinyal işleme, doğrusal olmayan denetim alanları gibi birçok uygulama alanında MLP yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. İleri beslemeli sinir ağlarında, nöronlar katman şeklinde düzenlenir. Katmandaki nöronlar önceki katmandan girdi alır ve çıktılarını diğerine aktarır. Bu tür ağlarda aynı veya önceki katmanlardaki nöronlara bağlantılara izin verilmez. Son nöron katmanına çıkış katmanı ve katmanları denir [22].

Yapay sinir ağları ile yapılan sınıflandırma en küçük arıza şiddetini teşhis etmede başarısız olmuştur. Motorun arızaya karşı duyarlı çalışma koşullarında yani en küçük arızanın bile istenmeyen sonuçlara neden olacağı durumlarda bu teşhis matrisi yetersizdir. Bundan dolayı ilerleyen bölümde yeni bir öz nitelik çıkarımı (ikinci bir yöntem) ile farklı eğitim sonuçları incelenecektir.

▪ ***Karar Ağaçları (RT)***

Karar Ağaçları, veri madenciliğinde ‘böl ve yönet’ stratejisini uygular. Bir karar ağacı algoritmasının prensipte görevi veriyi özyinelemeli olarak alt veri gruplarına dallanma yaparak bölmektir. Bu ayırım aşamasında oluşan her yeni dal bir kuralı ifade etmektedir. Temel olarak iki adımdan oluşur. Birinci adım ağacın oluşturulması, diğer adım ise veri tabanındaki her bir kaydın bu ağaca uygulanarak verilerin sınıflandırılmasıdır [23], [24].

Sınıflama aşamasında girilen test verisi, sınıflama kurallarının veya karar ağacının doğruluk yüzdesini bulmak üzere kullanılır. Eğer kabul edilebilir bir doğruluk yüzdesi varsa, bu sınıflandırma algoritması yapılan çalışmanın verileri sınıflandırılması amacıyla kullanılır [23], [25].

Test Motorunun Modellenmesi

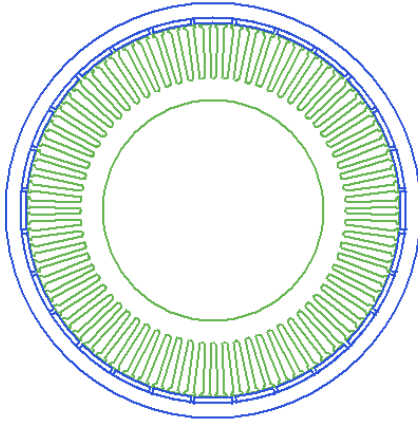
Bir BLDC motor, bir tür senkron motordur. Bu, stator tarafından oluşturulan manyetik alanın ve sürekli mıknatıslı rotorun manyetik alanının

senkron olarak döndüğü anlamına gelir. BLDC motorlarda normalde asenkron motorlarında görülen “kayma” oluşmaz. BLDC motorları farklı sayıda faz konfigürasyonuna sahiptir. Bunlardan, 3-fazlı motorlar birçok uygulamada en popüler olanlardır. Bu çalışmada; 3-fazlı, sürekli mıknatıslı, dış rotorlu BLDC arıza teşhis teknikleri uygulanmak üzere SEY ile tasarlanmıştır. Kullanılan program, maxwell denklemlerini sonlu bir uzayda bulunan bölgede problem çözerken, elektromanyetik problemleri çözmek için SEY kullanılmaktadır. Yüksek performanslı, düşük frekanslı bir elektromanyetik alan benzetimi kullanılmıştır. Bu benzetim tasarlanacak elektrik motoru, generatör ve transformatör gibi elektrik makine davranışlarının modellenmesini sağlamaktadır. Böylece çok sayıda prototip model oluşturulmasına gerek kalmadan değişik

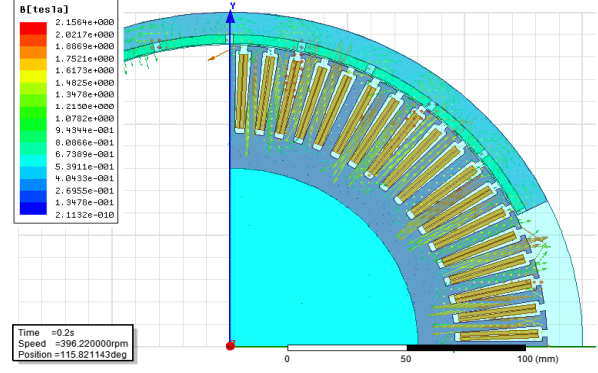
geometrilere ve özelliklere sahip makinelerin hızlı bir şekilde analiz edilmesine olanak vermektedir. Bu çalışmada SEY’den yararlanarak BLDC motorun tasarımı yapılmıştır. Bu gibi benzetim araçlarının kullanılması, araştırmacıların bir elektrik makinesindeki hataların neden olduğu etkileri vurgulamalarına ve hata tespit yöntemleri geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. SEY analizini kullanarak, herhangi bir hata nedeniyle makinenin elektrik, manyetik ve mekanik davranışlarındaki değişiklikler incelenebilir. Bu da makineyi açmaya gerek kalmadan veya laboratuvarlarda deney yapmadan kolayca gözlemlemeye olanak sağlar.

Tablo 1. BLDC Motoruna Ait Tasarım Parametreleri

Makine kutup sayısı	28	
Stator Dış Çapı	270	mm
Stator İç Çapı	160	mm
Rotor Dış Çapı	300	mm
Rotor İç Çapı	272	mm
Stator oluk Sayısı	72	
Anma Gerilimi	48	V
Giriş Gücü	1500	W
Anma Hızı	380	rpm
Anma momenti	36.16	Nm
Anma Akımı	31.62	A(rms)
Atalet Momenti	0.227	kgm ²



a

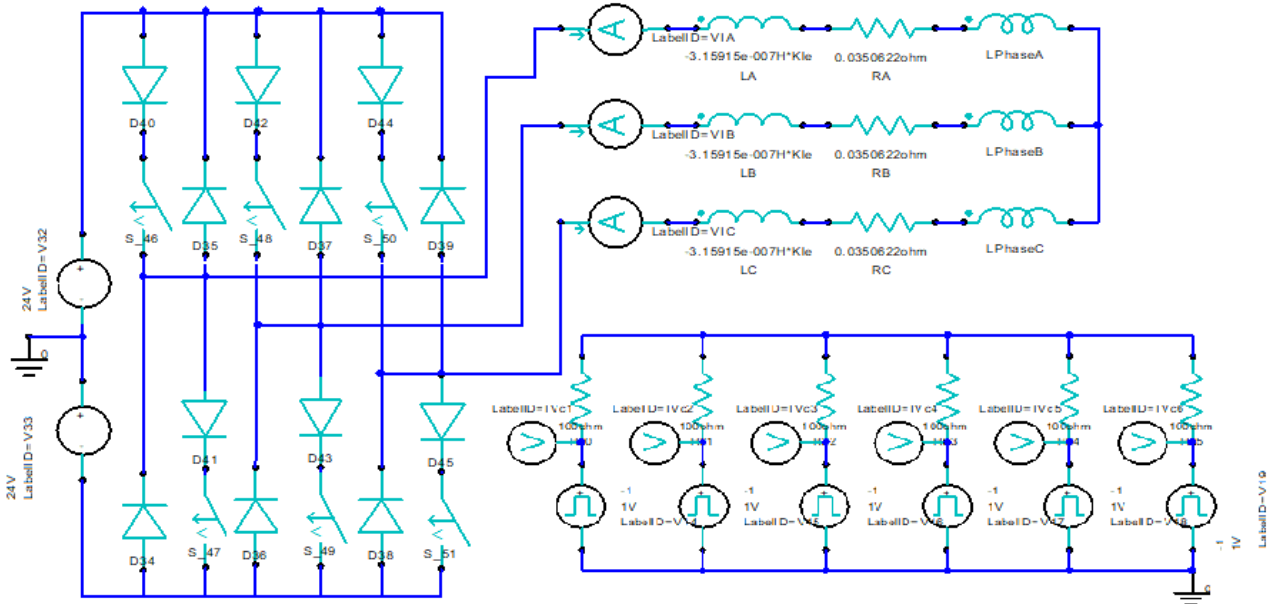


b

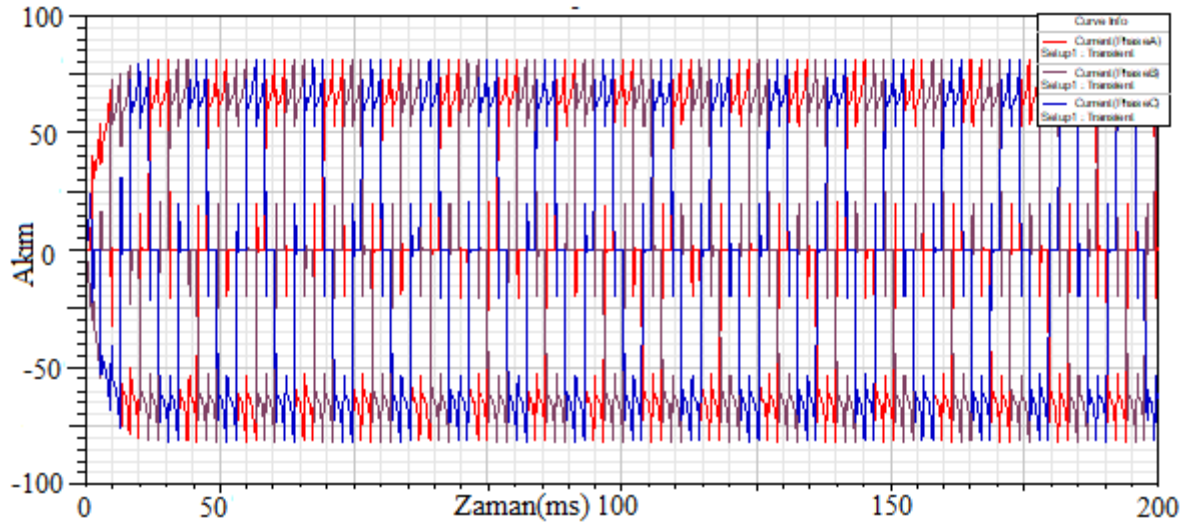
Şekil 1.a) RMXprt modeli, b) 2D görünümlü BLDC motorunun manyetik akı dağılımı

Sunulan geometrik bileşenin yanı sıra, benzetim modeli ayrıca fiziksel parametrelere sahiptir. Benzetim modelinin matematiksel çıkarımı devre modeli aracılığıyla daha anlamlı hale getirilebilir. Stator olukları bobin ile temsil edilirken iletkenin direnci, anahtarlama elemanları, besleme gerilimleri (güç kaynağı) ve çeşitli ölçüm cihazları devre modelinde görselleştirilmiştir.

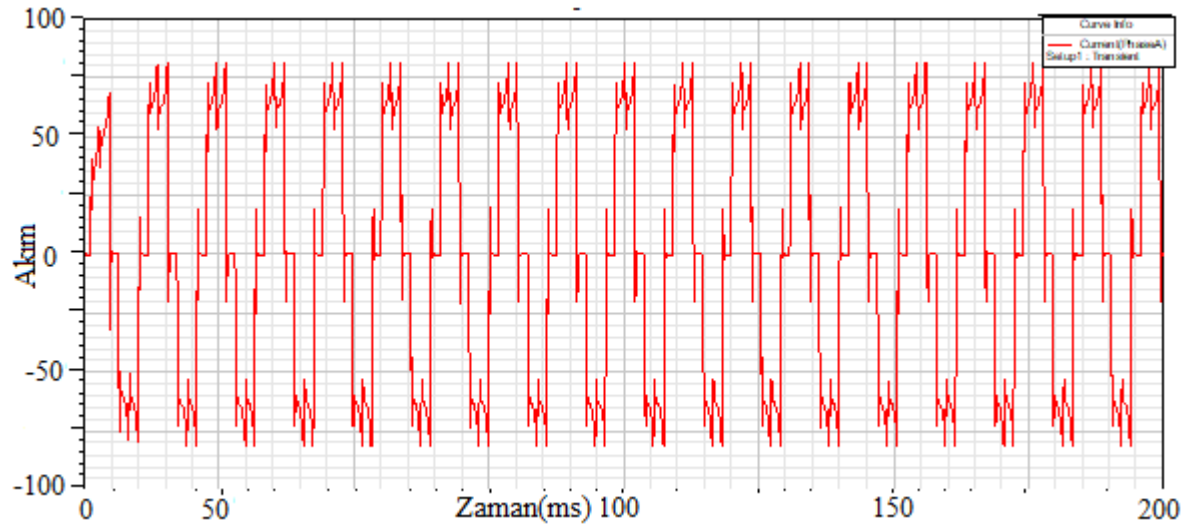
Elektriksel bileşenlerinin yanında manyetik bileşenlerde içerir ve dolayısıyla devre tam olarak bir elektrik devresi değildir. Devre editörü ile BLDC devre modeli Şekil 2'de gösterilmektedir. Üç fazlı stator akımlarının zamanla değişimi Şekil 3'te, A fazına ait stator akım-zaman işareti değişimi verilmiştir. Şekil 5'te ise moment işaretlerinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



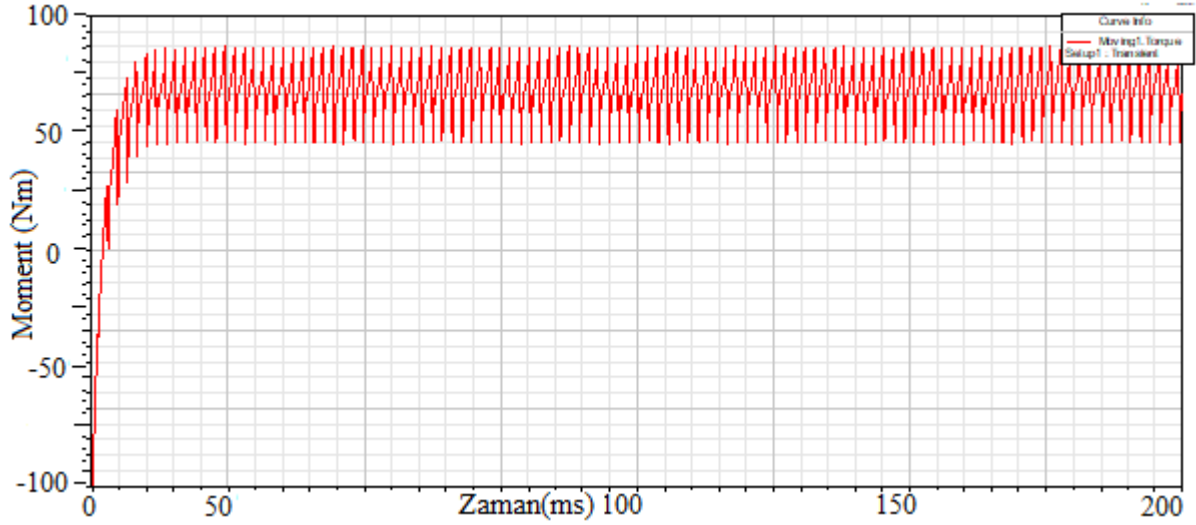
Şekil 2. BLDC eşdeğer devre modeli



Şekil 3.3 Fazlı Stator Akımlarının Zamanla Değişimi.



Şekil 4.A Fazlı stator Akım-Zaman işareti



Şekil 5. Moment işareti

Arıza Modelleme

SEY kullanılarak, gerçek bir sürekli mıknatıslı BLDC motorun özelliklerine dayanarak tasarlanan bu sağlam motor modeli yardımıyla dört tane arızalı motor modeli oluşturulmuştur. Tüm benzetimler 0.0001 sn adım aralıklarıyla 0.2 sn boyunca 2000 adımda gerçekleştirilmiştir. Bunun ardından zaman domeninde elde edilen akım işaretine FFT uygulanarak, yüz örnekleme frekansı elde edilip spektral analizi gerçekleştirilmiştir. FFT analizi motorun akım işaretine 114.5 sn ile 123.5 sn aralıklarında tam bir dalga boyu için uygulanmıştır. Bu frekans analiz yöntemi tek periyot ve çoklu frekans fikrine dayanmaktadır. Elde edilen çıkış işareti (bu motorun stator akım işareti trapezoidal bir sinyaldir) sinüs ve kosinüslerin toplamı olarak ifade edilir. Analiz sonucu temel frekans ve bunların katları olmak üzere dB cinsinden çıkış harmonikleri elde edilmiştir. Referans alınan aralık tüm arızalı motor modelleri için aynı alınmıştır. Bu işaretlerin arızalara ve arıza şiddetlerinin artışına karşı gösterilen değişimleri incelenerek sağlıklı motor ile arızalı motorların davranışları karşılaştırılmıştır.

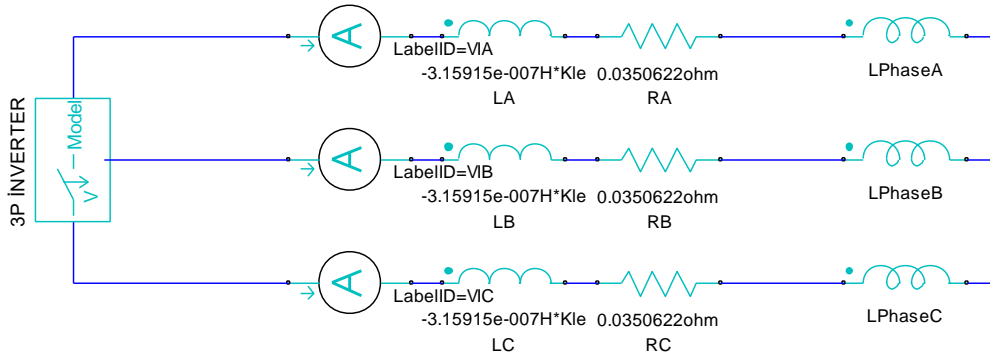
Stator Sargılarında Yalıtım Arıza Model Benzetimi

Elektrik makinedeki stator arızaları kısa devre veya stator sargısının açık devresi nedeniyle ortaya çıkabilir. Kısa devre arızaları, açık devre arızaları ile karşılaştırıldığında daha yaygındır. Kısa devre arızaları, sistemin stator izolasyonunun bozulmasından kaynaklanır [26], [27]. Genel olarak alternatif akım motorlarının kısa devre döngüsünün toplam empedansı iki parametreden oluşur, bunlar hata direnci R_f ve kısa devre olan sarımların kendi içlerinde oluşturdukları indüktans L_s değerleridir. Oluşturulacak olan kısa devre arızası için bu iki değer uygun bir şekilde benzetiminin yapılması gerekir. Gerçek bir uygulamada, kısa devre arızası meydana geldiğinde, iki iletken doğrudan temas eder. Bu nedenle, kısa devre döngüsündeki hata direnci genellikle çok düşük bir değere sahiptir [28]. Sıfır hataya karşı yüksek direnç, önerilen yöntemin performansını etkileyebilecek ana faktörlerden biridir. Sıfır hata direnci, sadece ideal bir kısa devre hatası için geçerlidir. Gerçekte, akım iletme geçtiğinde iletkenler arasındaki hata direnci, çok düşük bir düzeydedir. Arıza hata direnci büyüdükçe, önerilen yöntem kısa devre sarımların sayısını doğru olarak tahmin etmede güçlük çekecektir [28], [29]. Bunların yanında,

stator sargılarında oluşan kısa devre arızaları, aynı zamanda manyetik problemlere neden olabilen en yaygın makine kaynaklı hatalardan biri olarak kabul edilir. Kısa devre arızası aynı zamanda büyük bir arıza akımına yol açarken demagnetizasyon arızasını beraberinde getirir [6].

Sürekli mıknatıslı BLDC motorunda kısa devre arızası, bir hata direnci (R_f) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu hata direnci motorun herhangi bir fazına paralel olarak

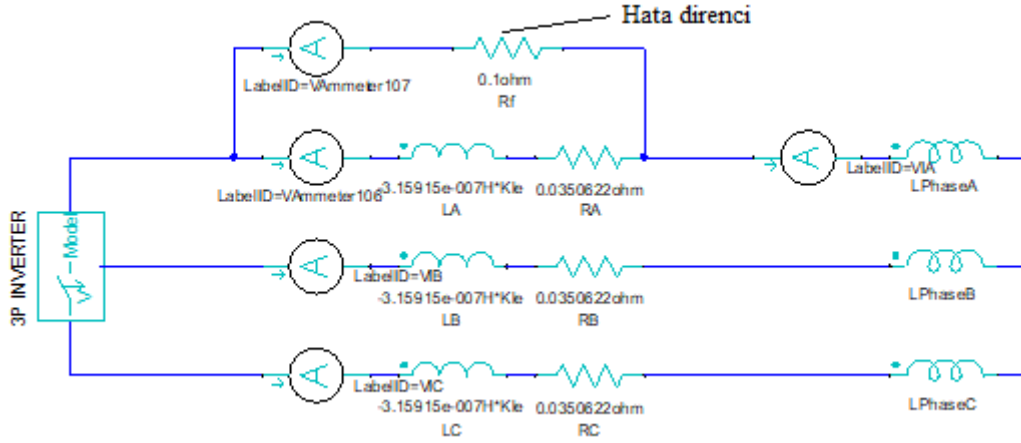
bağlanıldığında o faza ait olan empedans değerini değiştirecektir. Bu da motorda fazlar arasında bir dengesizliğe yol açacaktır. Bu oluşan fazlar arasındaki dengesizliğin kendini elektriksel işaretlerde göstermesi beklenir. Bu çalışmada motorun A fazına ait bobin parametreleri üzerinde çalışılarak kısa devre arızasının benzetimi yapılmıştır. Arıza analizi gerçekleştirilecek olan motorun eşdeğer devresi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6. BLDC motorunun statora indirgenmiş eşdeğer devresi

Sağlıklı makine devre modeline dayalı hata devresi benzetimi bir hata direnci (R_f) kullanılarak yapılmıştır. Bu direnç değerine göre arıza şiddeti belirtilmiştir. $R_f=0$ olduğunda sargının tamamı kısa devre durumuna geçecektir, $R_f=\infty$ olduğunda ise bağlı olduğu kol yüksek empedans durumuna geçip hata direnci üzerinden akım geçmeyecektir ki bu motorun sağlıklı durumunu ifade etmektedir. Bu iki durum dışında R_f in farklı değerleri için kısa devre arıza şiddetleri kolay bir toplam empedans hesaplama ile birlikte oran orantı işlemi ile tespit edilebilir. R_f direncinin değeri düştükçe arıza oluşturulan fazdaki empedans

değeri düşecektir. Bu durumda kısa devre edilmiş faz üzerinden daha yüksek akımlar çekecektir. Bu da daha düşük uç gerilimlerine sebep olur. Yani hata direnci düştükçe faz sargısı ısınır, güç kaybı ve bunun yanında gerilim düşümü de artacaktır. Bu durum makinanın verimini önemli ölçüde etkiler. Arıza şiddetleri olarak R_f direnci değerleri için; 0.01Ω , 0.05Ω , 0.1Ω , 1Ω olmak üzere farklı dört arıza şiddeti belirlenmiştir. İzolasyon arıza şiddetinin değişiminin motor üzerindeki etkisi incelenebilecektir. Stator sargısının A bobininde oluşturulan hata direncine ait sargı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 7. BLDC motorunun yalıtım direnci üzerinden kısa devre arızası gösterimi

Hata direnci üzerinden oluşturulan kısa devre arızasının şiddeti, sargı empedansı ile paralel bağlı R_f direncinin oluşturduğu net empedansın, sağlam durum empedansına oranı ile belirlenmiştir. Paralel bağlanan R_f direncinin değeri arttıkça net empedans sağlam motorun empedansına yaklaşacaktır. Bu durumda küçük şiddetteki arızalar da basit bir hesaplama ile R_f direnci belirlenerek oluşturulabilir. Aşağıda önerilen yaklaşımın matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$X_{LA} = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot LA \quad (\Omega) \quad (1)$$

$$Z_A = R_A + jX_{LA} \quad (\Omega) \quad (2)$$

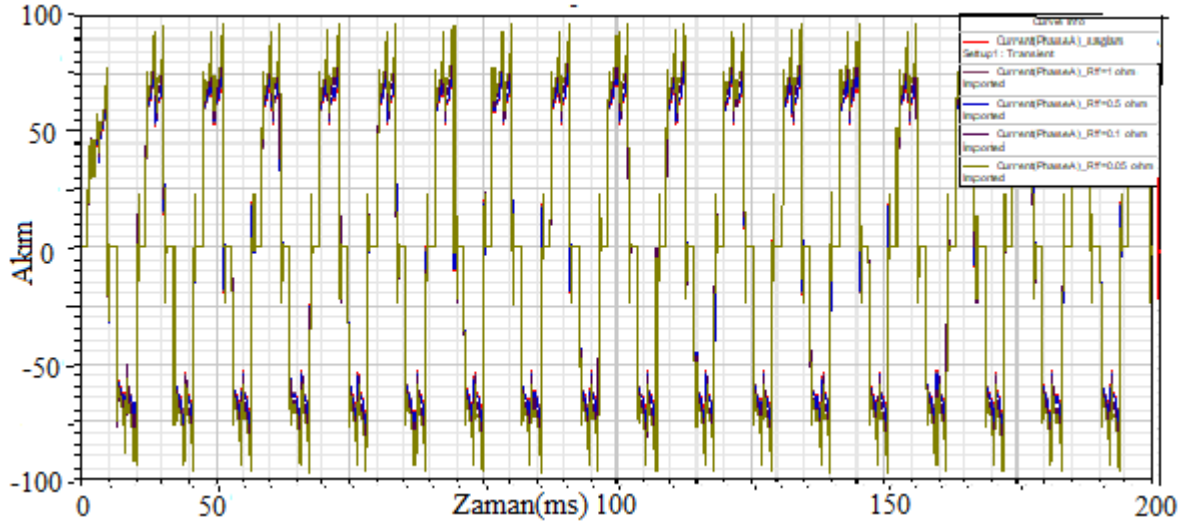
$$Z_T = \frac{R_f \times Z_A}{R_f + Z_A} \quad (\Omega) \quad (3)$$

Yukardaki denklemlerde Z_A A fazına ait empedans, Z_T arızalı motorun Afazına ait karakteristik empedansını göstermektedir. Sağlıklı durumun empedans değeri %0 kısa devre arızası olarak belirlendiğinde arızalı durumlarda küçük bir oranlama işlemi

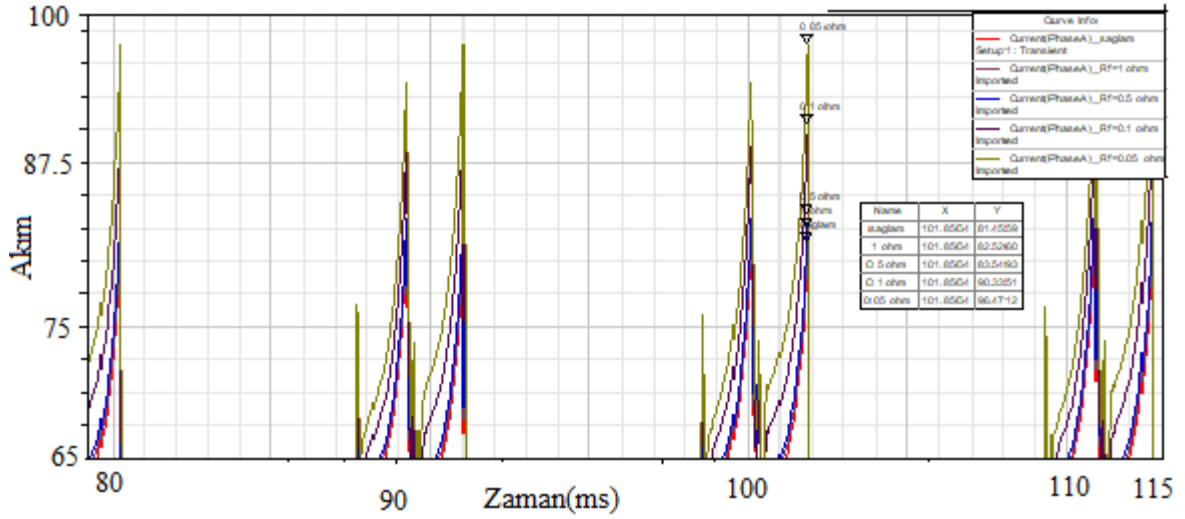
uygulanarak arıza şiddeti tespit edilebilir. Arıza şiddetinin belirlenmesinde oluşturulan formül aşağıda verilmiştir.

$$\%KD = \frac{Z_T \times 100}{Z_A} \quad (4)$$

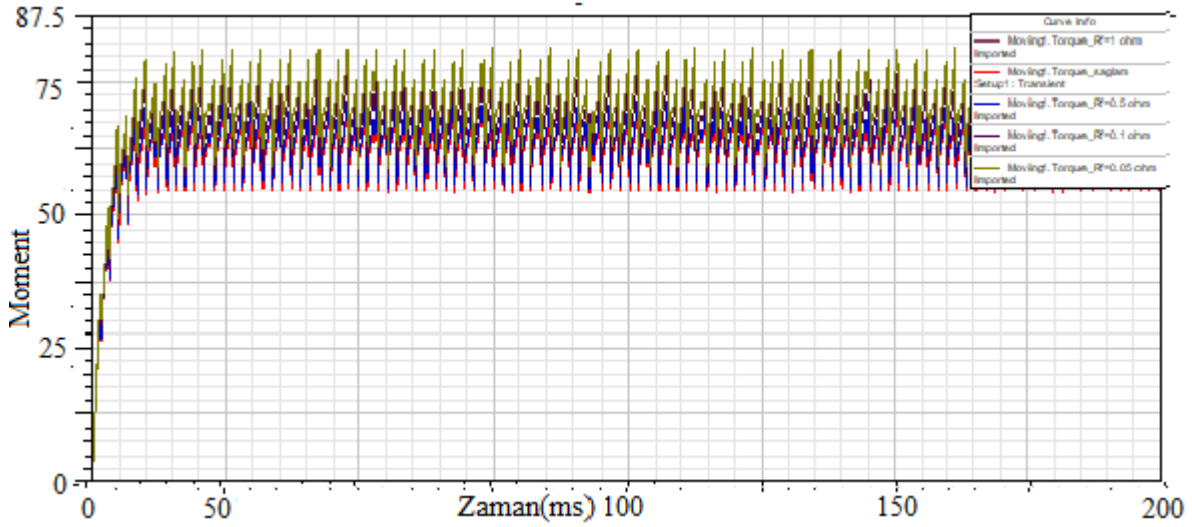
Bu durumda kısa devre (KD) oranı ; $R_f = 1$ için %3.5 KD, $R_f = 0.5$ için %6.5 KD, $R_f = 0.1$ için %26 ve $R_f = 0.05$ için %41.5 KD olmak üzere dört farklı arıza şiddeti oluşturulmuştur. R_f direncinin değişimine bağlı olarak A fazındaki toplam empedans değişimi üç sargı arasında dengesizliğe neden olur. Bu dengesiz yüklenme durumu elektriksel işaretlerde kendini gösterecektir. Bu şekilde arızalı durumlar MCSA arıza teşhisinde öznel olarak çıkarımı için kullanılabilir. R_f direnci değiştirildikten sonra devre programa aktarılarak sağlam motorun sargı parametreleri değiştirilmeye zorlanmıştır. Verilen sinyaller direnci ile belirtilirken, arıza teşhisi R_f yaparken sınıflandırmada bu hata direncine karşılık gelen kısa devre oranları kullanılacaktır.



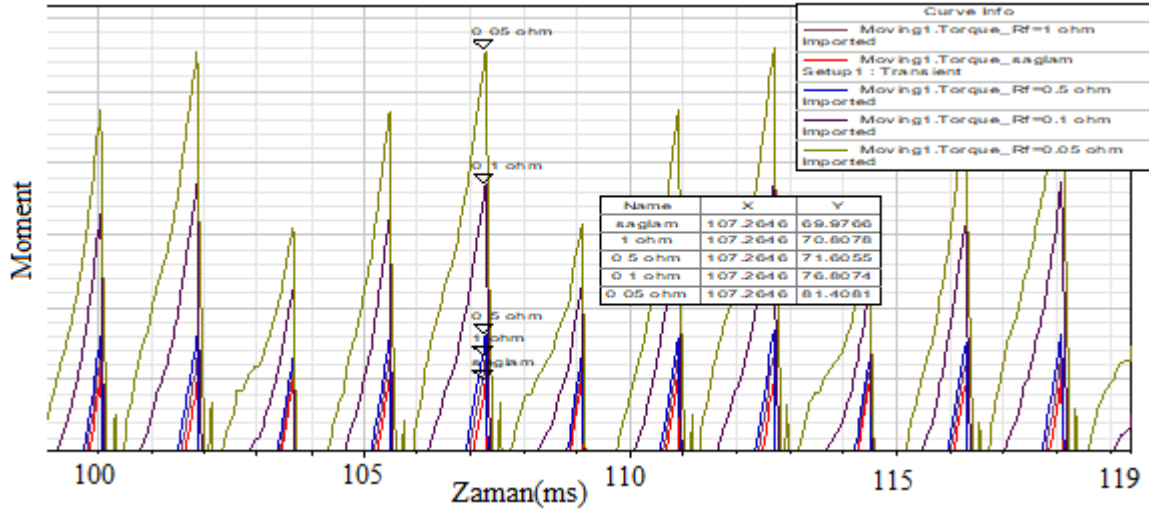
Şekil 8. BLDC motorda kısa devre(KD) arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş akım dalga formları



Şekil 9. BLDC motorun KD arıza şiddetleri için çözünürlüğü artırılmış akım dalga formları



Şekil 10. BLDC motorun Farklı kısa devre (KD) arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş moment dalga formları



Şekil 11. BLDC motorun Farklı KD arıza şiddetlerine ait çözünürlüğü artırılmış moment dalga formları

Tablo 2. Farklı şiddetteki devre arızalarının akım ve moment karşılaştırılması

	Max Faz Akımı	Max Moment
Sağlıklı	81.4559 A	69.9766 Nm
$R_f = 1$ ohm	82.5260 A	70.0878 Nm
$R_f = 0.5$ ohm	83.5493 A	71.6055 Nm
$R_f = 0.1$ ohm	90.3351 A	76.8074 Nm
$R_f = 0.05$ ohm	96.4712 A	81.4081 Nm

Oluşturulan arıza ait akım ve gerilim işaretlerinin hata direncinden doğrudan, indüktans değeri ve sarım direncinden ise dolaylı olarak etkilendiği

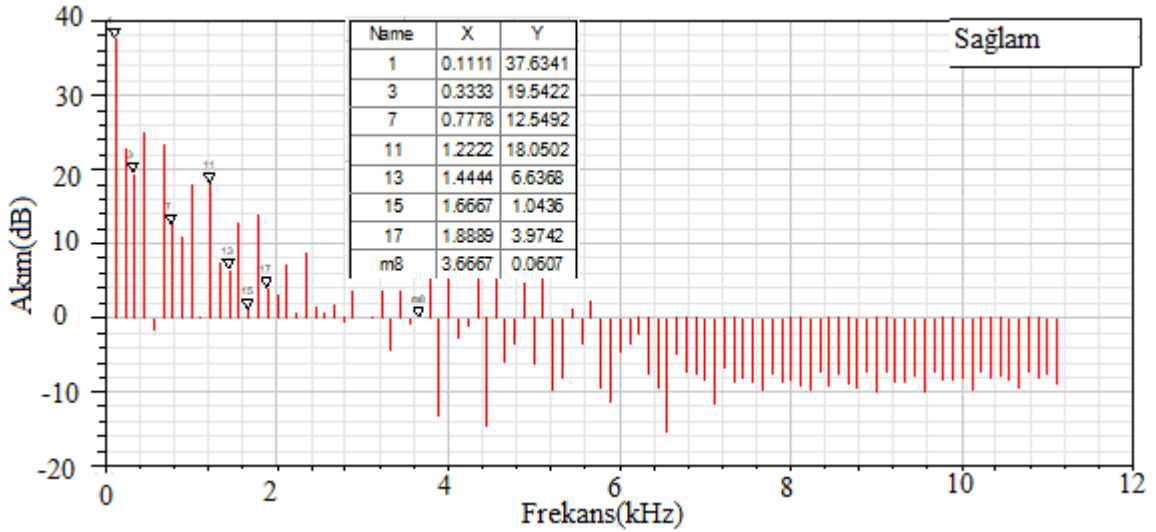
gözlemlenmiştir. Oluşan bu dalgalanmalar erken tespit yöntemi olarak kullanılmaktadır. Küçük indüktans ve direnç değişikliklerinde avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Yukardaki sonuçlar incelendiğinde, aynı akım da, kısa devre akımının genliği, yalıtım direncinin değeri azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir. Benzetimdeki kısa devre akımının genliği ile gerçekte oluşturulacak olan kısa devre arızası arasında bazı farklılıklar beklenmektedir. Bunun sebebi eğer arıza analiz ve teşhis modülü kablolu sistemler ile haberleşmeyi sağlayacaksa bu yan elemanların

dirençleri kısa devre döngüsünde arıza dirençlerine eklenir.

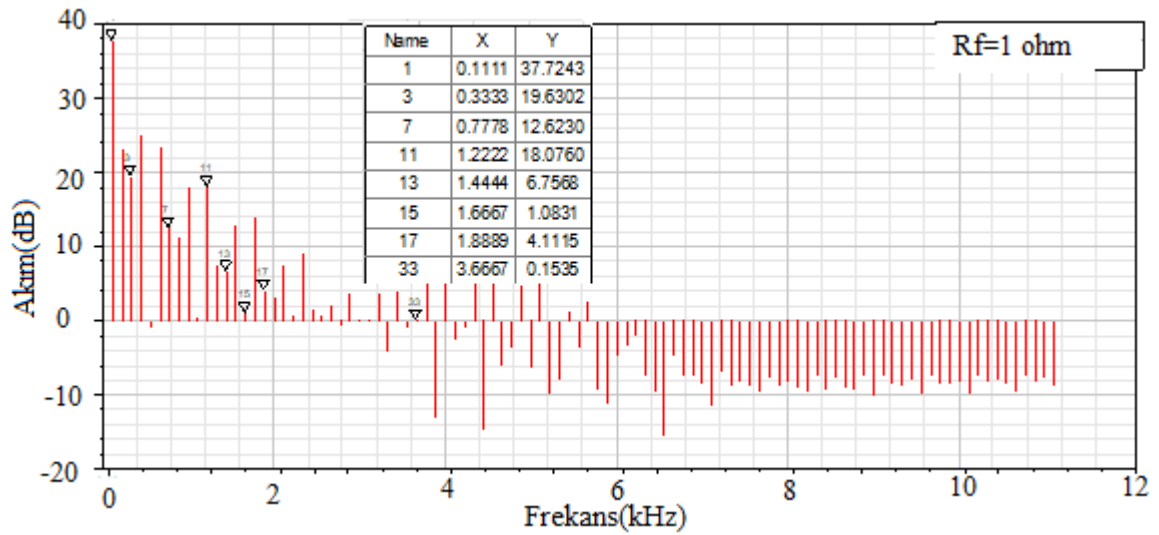
Arıza Tespit Yöntemi

Elektrik makinalarda MCSA arıza teşhisi, hızlı bir şekilde uygulanabilmesinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bir faz akımına sensor bağlanarak verileri çevrimiçi olarak anlık arıza tespiti yapılabilir. Yazılım tarafında, karakteristik hata harmonikleri arayışında akımın güç spektrumunu oluşturmak için FFT gereklidir [30]. Elektrik makinelerinde sabit olmayan koşullarda, makineden alınan işaretlerin kararlı değildir. Temel olarak, çoğu endüstriyel uygulamada sabit koşullar yoktur ve makine çalışma noktası (hız veya yük) zamana göre değişmektedir. Böyle bir durumda, makinenin doğru bir şekilde izlenmesi zordur. FFT dâhil olmak üzere geleneksel yöntemlerin

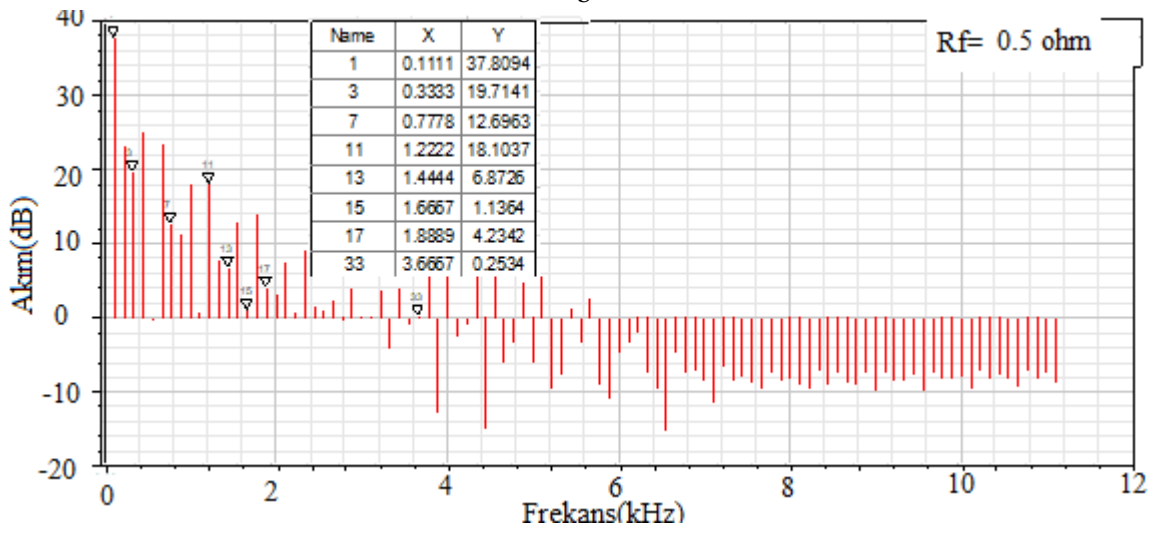
uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle, daha gelişmiş bir sinyal işleme tekniği uygulanmalıdır [31]–[33]. Ancak mevcut çalışmada farklı arıza şiddetlerine bağlı durağan sinyallerdeki (tam yüklenme ve sabit hızda) frekansları, FFT kullanarak stator akımını kendi frekans alanına dönüştürerek analiz edilmiştir. Akım ve gerilim işaretlerinde değişim kendini lineer bir şekilde belli etmesine rağmen özellik çıkarımı için daha elle tutulur sonuçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Stator akımının FFT analizini kullanarak kısa devre arıza analizinin yan bant frekans genlikleri belirlenmiş ve spektral analiz sonuçlarının daha belirgin ve somut veriler elde edilmiştir.



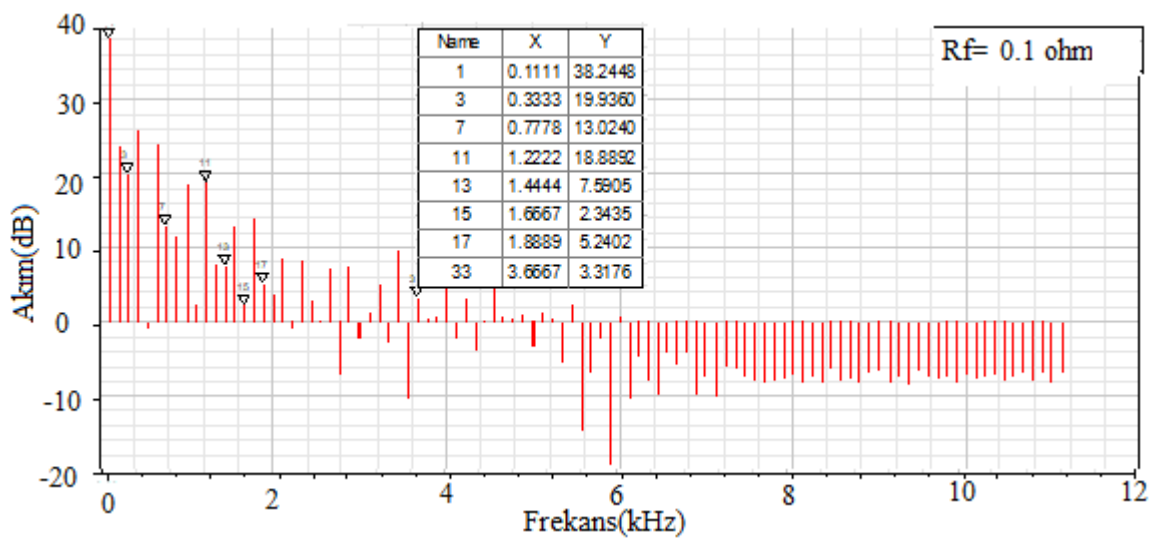
a



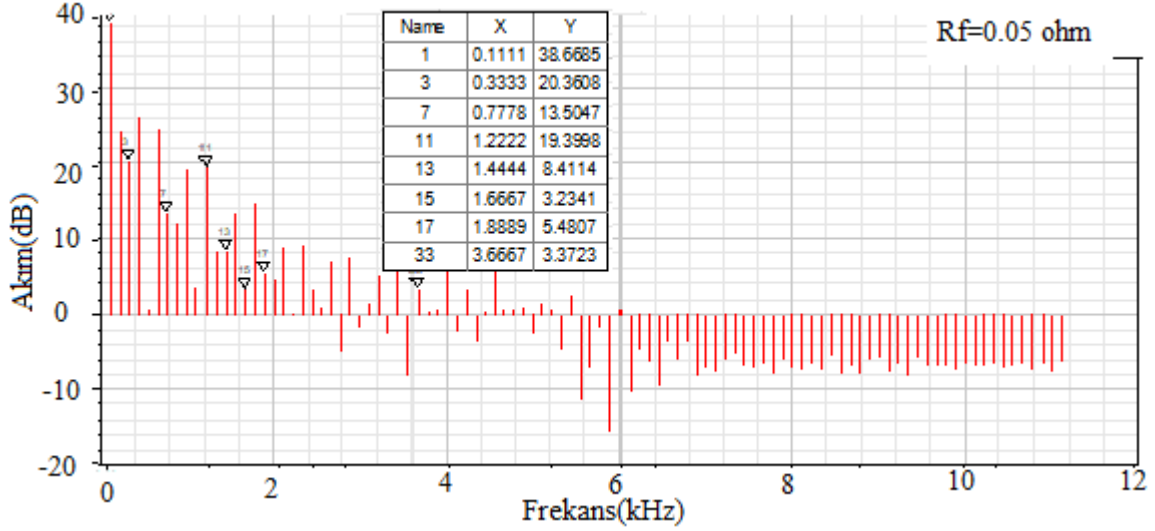
b



c

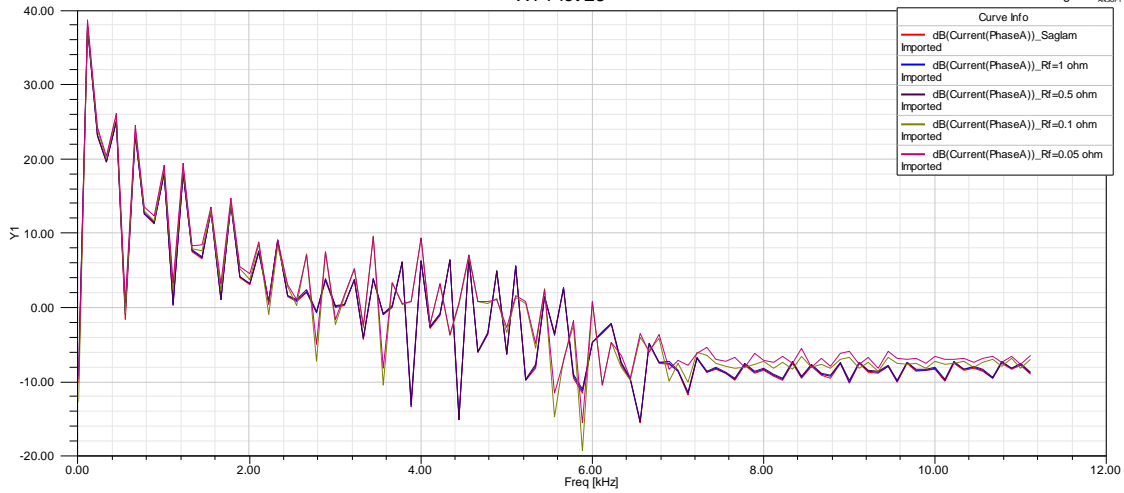


d



e

Şekil 12. Motorun kısa devre arızasına ait FFT spektrumu a) sağlam b) $R_f: 1$ KD c) $R_f: 0.5$ KD d) $R_f: 0.1$ KD e) $R_f: 0.05$ KD



Şekil 13. BLDC motorun kısa devre (KD) arızasının farklı şiddetlerine ait sürekli FFT işaretleri

Elektrik makinalarında arızalar, sağlıklı motor işaretleri ile arızalı motor işaretlerinin karakteristikleri karşılaştırılarak tespit edilmektedir. Elektriksel işaretlerdeki değişim arıza frekanslarında kendini gösterirken, karakteristik işaretler ile arıza nedeni ile oluşan işaretler, birbirinden karşılaştırma ile ayrılabilir. Karşılaştırma FFT spektrum ve dalga formu grafikleri kullanılarak yapılabilmektedir.

Tablo 3. BLDC motorunun KD arızasına ait tespit edilmiş bazı önemli öz nitelik çıkarımları

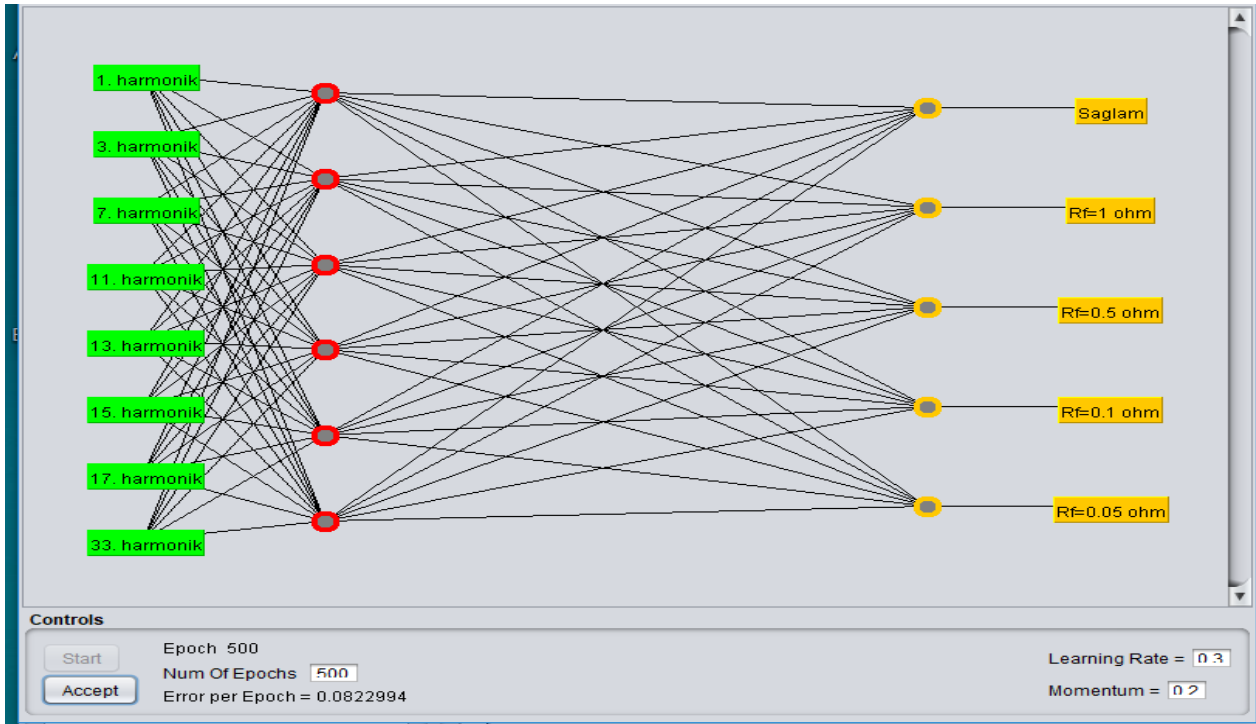
Harmonik	Sağlam	R _f =1 ohm	R _f =0.5 ohm	R _f =0.1 ohm	R _f =0.05 ohm
	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)
1	37.63409	37.72431	37.80944	38.24479	38.66849
3	19.54223	19.63025	19.71411	19.93599	20.36083
7	12.54919	12.62299	12.69626	13.02400	13.50470
11	18.05019	18.07601	18.10367	18.88924	19.39980
13	6.63680	6.75680	6.87262	7.59047	8.41145
15	1.04360	1.08310	1.13643	2.34347	3.23415
17	3.97421	4.11147	4.23423	5.24018	5.48070
33	0.06068	0.15347	0.25339	3.31756	3.37230

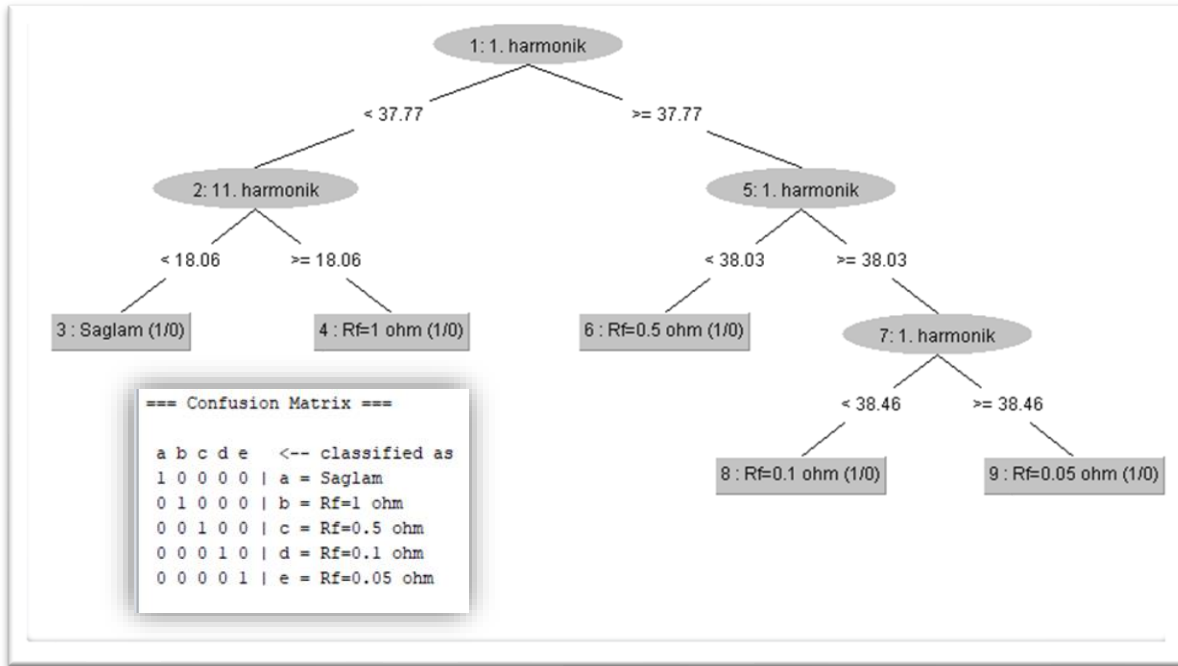
Makinanın çalışma durumuna bağlı olarak alınan giriş işaretlerine FFT uygulanarak arıza nedeni ile artış gösteren frekansların ayırtılması için **Arıza Teşhisinde Birinci Yöntem**

Bu bölümde elde edilen öz nitelik çıkarımları ile giriş verileri oluşturulmuştur. Tablo 3'te seçilen 7 harmonik verisi giriş değeri olarak arıza tespit etmede test verisi olarak kullanılmıştır. Sağlam

edilmesini sağlar. Bu frekanslardaki artışın gözlemlenmesi ve buna uygun sınıflandırma metodları kullanılmıştır.

motorla beraber 5 çıkış durumu vardır. Bu durumda 7 × 5 'lik bir matris oluşturulmuş ve bu test verisine sınıflandırma yöntemleri uygulanmıştır.

**Şekil 14.** Birinci yöntem sonucu kısa devre arızasının tek katmanlı yapay sinir ağı çıktısı



Şekil 15. Birinci yöntem sonucu kısa devre arızasının karar ağaçları ile sınıflandırma çıktısı

Tablo 4. KD arızasının birinci yöntemle göre sınıflandırma metodlarının karşılaştırılması

Kısa Devre Arıza Sınıflandırma Özeti	k-NN	MLP	RT
Doğruluk Yüzdesi (%)	100	80	100
Kappa İstatistiği	1	0.75	1
Ortalama Mutlak Hata	0.16	0.186	0
Kök Ort. Kare Hatası	0.2	0.281	0
Göreceli Mutlak Hata(%)	50	58.1	
Kök Bağ. Kare Hatası(%)	50	70.1	
Doğru Sınıflandırılmış Örnekler	5	4	5

Verilen sınıflandırma durumuna göre, kullanılan Fırçasız sürekli mıknatıslı DC motorun arıza teşhisinde hata etkisinin sınıflandırılmasında en iyi algoritmanın RT tekniği olduğu bulunmuştur.

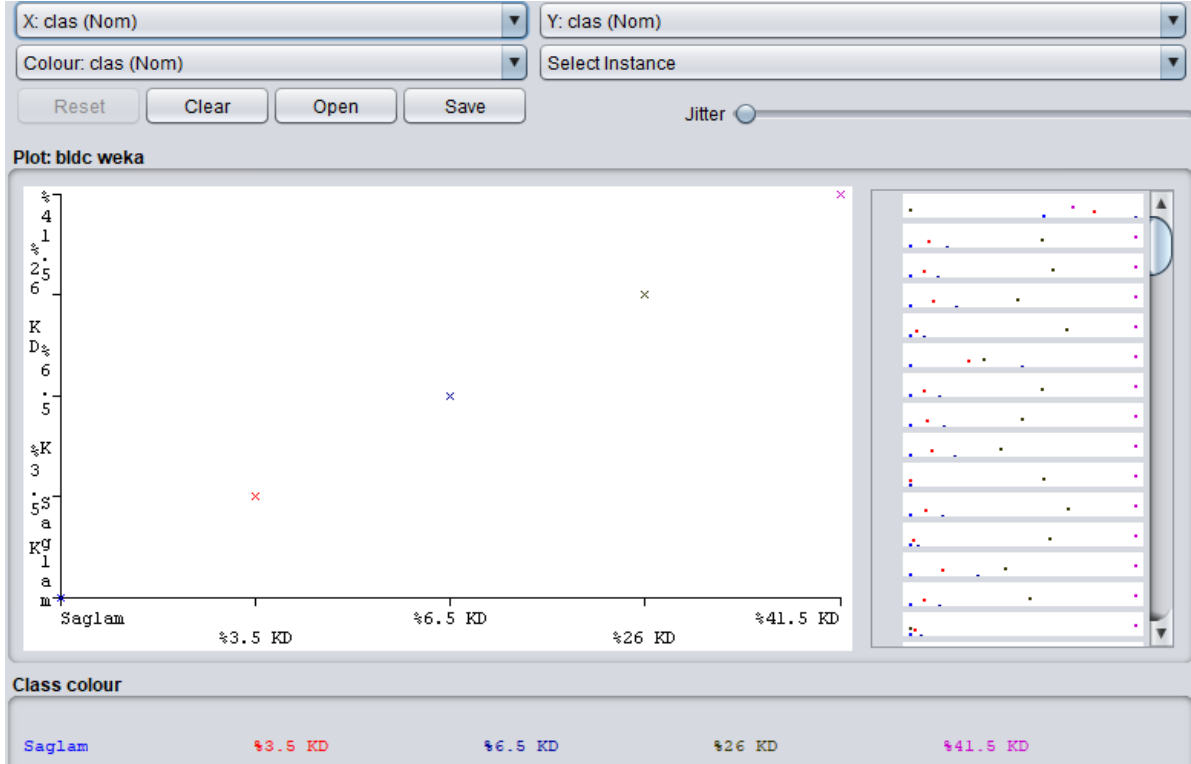
Arıza Teşhisinde İkinci Yöntem

Spektral analiz sonucu elde edilen verilerin tamamı öz nitelik olarak kabul edildiğinde FFT sonucu elde edilen 100 çıkış harmoniği giriş

değeri seçilirken buna karşılık motorun sağlam ve arızalı durumları olmak üzere 5 çıkış değeri vardır. Bu kısımda 100×5 'lik bir matris oluşturularak arıza şiddetlerinin tespiti incelenecektir. Bu yöntemdeki amaç veri setinin büyüklüğünün anlamlı veriler üzerinde etkisinin gösterilmesine yönelik olacaktır. Oluşturulan 100×5 'lik matrisinin test ve doğrulama verisi olarak kullanılarak eğitilen makine öğrenme algoritmalarının kısa devre arızası için doğruluk tahminleri Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5. KD arızasının ikinci yöntemle göre sınıflandırma metodlarının karşılaştırılması

Kısa Devre Arıza Sınıflandırma Özeti	k-NN	MLP	RT
Doğruluk Yüzdesi (%)	100	100	100
Kappa İstatistiği	1	1	1
Ortalama Mutlak Hata	0.16	0.03	0
Kök Ort. Kare Hatası	0.2	0.04	0
Göreceli Mutlak Hata(%)	50	8.18	0
Kök Bağ. Kare Hatası(%)	50	9.54	0
Doğru Sınıflandırılmış Örnekler	5	5	5



Şekil 16. BLDC motorunun ikinci yöntemle göre kısa devre arızası test verisinin çıktısı

Birinci yöntem ile ikinci yöntemin Doğruluk yüzdesinin karşılaştırılarak hata toleransında özellik çıkarımının etkisi tartışıldığında, ikinci yöntemin oldukça verimli olduğu gözlemlenebilir. İki tablo karşılaştırıldığında k-NN ve RT’de doğruluk sonuçları aynı iken MLP sonuçları farklılık göstermektedir. Birinci yöntemde MLP sınıflandırmasında doğru sınıflandırmış örnekler 4/5 iken ikinci yöntemde 5/5 ile bütün arıza şiddetleri tespit edilmiş %100 doğruluk yüzdesine sahiptir. Bu durumda ikinci

uygulanan metodun oldukça verimli olduğu da görülmektedir. İlk metotta $R_f=1$ ohm (%3.5 kısa devre) yani en küçük kısa devre durumu tespit edilememiştir. Bu durum küçük arıza şiddetindeki durumun sağlam durum öz nitelik çıkarımına aşırı duyarlı olduğunun sonucudur. Bunun yanında kullanılan veri setinin anlamlı olması da etkilidir. Bu yüzden arıza teşhisi için en iyi sonucun iyi işlenmiş veriler ve doğru tespit edilmiş öznitelikler olduğunu söyleyebiliriz

Sonuç ve Tartışma

Klasik bir zaman serisi analizi ya da anlamsız verileri filtrelemek üzere alınan hızlı bir veri işleme tekniği ile elde edilen veri setleri incelenerek istatistiksel yöntemler ya da yapay zekâ teknolojileriyle oluşturulan tahmin algoritmaları motor arıza teşhisine olanak tanır. Kestirimci bakım yöntemleri, farklı arıza şiddetlerine karşılık tepki verebilmek için büyük miktarda veri tabanına ihtiyaç duyar. Bu verilerin elde edilmesi, yorumlanması ve

işlenerek anlamsız verilerden kurtulması bilgi birikimi gerektiren bir süreçtir. BLDC motorun stator sargı izolasyon bozulmasını dolayısıyla kısa devre arıza durumu ele alınmıştır. SEY ile motor tasarımı, arıza modelleme ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda SEY ile tasarlanan elektrik makinalarında arızalar oluşturulabileceği ortaya konulmuştur. Elde edilen zaman domenindeki ham verilere FFT uygulanarak işlenmiş veri elde edilmiştir. Bu işlenmiş veriler makine teşhis yönteminde

öznitelik çıkarımı için kullanılmıştır. Teşhis yönteminde sınıflandırma olarak k-NN, MLP, RT yöntemleri kullanılmış ve arıza tespitinde doğruluk yüzdelerinin oldukça iyi olduğu sonucuna varılmıştır. BLDC makinada oluşturulan bu arızaların gerçek arızalarda olduğu gibi sınıflandırma yöntemleri kullanılarak büyük bir doğruluk oranıyla ayrıştırılabileceği de tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarları, verilen destekten dolayı Siirt Üniversitesi Özel Elektrik Makine Laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, "Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010.
- [2] K.-H. Kim, D.-U. Choi, B.-G. Gu, and I.-S. Jung, "Fault model and performance evaluation of an inverter-fed permanent magnet synchronous motor under winding shorted turn and inverter switch open," *IET Electr. Power Appl.*, 2010.
- [3] J. Faiz and S. A. H. Exiri, "Short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors- an overview," *Jt. Int. Conf. - ACEMP 2015 Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. OPTIM 2015 Optim. Electr. Electron. Equip. ELECTROMOTION 2015 Int. Symp. Adv. Electromechanical Moti*, pp. 18–27, 2016.
- [4] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005.
- [5] J. Lee, Y. J. Jeon, D. C. Choi, S. Kim, and S. W. Kim, "Demagnetization fault diagnosis method for PMSM of electric vehicle," *IECON Proc. (Industrial*

Bu doğrultuda arıza sonrası bakım (acil bakım) ve periyodik bakımın (planlı bakım) yanı sıra arıza tespitinde durumu izlenmesi ile motorda olabilecek arızanın önceden tespit edilmesi açısından kestirimci bakım son derece önemli olduğu düşünüldüğünde önerilen yöntemler oldukça faydalı olabilecektir.

- Electron. Conf.*, no. 1, pp. 2709–2713, 2013.
- [6] H. Li, J. Hang, J. Fang, P. Zhang, S. Ding, and Q. Wang, "Inter-turn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine based on variational mode decomposition," *Proc. 13th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2018*, pp. 2422–2425, 2018.
- [7] J. K. Park, C. L. Jeong, S. T. Lee, and J. Hur, "Early detection technique for stator winding inter-turn fault in BLDC motor using input impedance," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 240–247, 2015.
- [8] Y. Da, X. Shi, and M. Krishnamurthy, "A new approach to fault diagnostics for permanent magnet synchronous machines using electromagnetic signature analysis," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 4104–4112, 2013.
- [9] H. A. Toliyat and T. A. Lip, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 241–247, 1995.
- [10] E. Corporate, "A New Approach to On-Line Turn Fault Detection in AIC Motors," 1996.
- [11] A. Witten, I. H., Frank, E., & Mark, *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. 2011.
- [12] P. S. Panigrahy, P. Konar, and P. Chattopadhyay, "Application of data

- mining in fault diagnosis of induction motor,” in *2016 IEEE 1st International Conference on Control, Measurement and Instrumentation, CMI 2016*, 2016.
- [13] M. Kuncan, K. Kaplan, M. R. Minaz, Y. Kaya, and H. M. Ertunç, “A novel feature extraction method for bearing fault classification with one dimensional ternary patterns,” no. xxxx, 2019.
- [14] M. Kuncan, K. Kaplan, M. R. Minaz, Y. Kaya, and H. M. Ertunç, “A novel feature extraction method for bearing fault classification with one dimensional ternary patterns,” *ISA Trans.*, 2019.
- [15] Y. Kaya, M. Kuncan, K. Kaplan, M. R. Minaz, and H. M. Ertunç, “Classification of bearing vibration speeds under 1D-LBP based on eight local directional filters,” *Soft Comput.*, vol. 2, 2020.
- [16] K. Kaplan, Y. Kaya, M. Kuncan, M. R. Minaz, and H. M. Ertunç, “An improved feature extraction method using texture analysis with LBP for bearing fault diagnosis,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 87, 2020.
- [17] M. Minaz and K. Yıldız, “Veri Madenciliği Kullanılarak İndüksiyon Motorun Mekanik Arıza Teşhisi,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 16, pp. 881–904, 2019.
- [18] F. Gürbüz and F. Turna, “Rule extraction for tram faults via data mining for safe transportation,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, 2018.
- [19] E. Taşçı and A. Onan, “K- En Yakın Komşu Algoritması Parametrelerinin Sınıflandırma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi,” *Xviii. Akademi Bilişim Konf.*, p. 8, 2016.
- [20] M. S. Özerdem and K. Karadağ, “Parmak hareketlerine ilişkin ECoG örüntülerin AR tabanlı öznitelikler ile sınıflandırılması,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 5, no. 2, pp. 89–97, 2014.
- [21] M. F. Keskenler and E. F. Keskenler, “Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi,” *Tak. Vekayi ISSN2148-0087*, vol. 5, no. 2, p. 18, 2017.
- [22] M. ATALAY and E. ÇELİK, “Büyük Veri Analizinde Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları - Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Big Data Analysis,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, pp. 155–172, 2017.
- [23] B. Demirel, “Veri Madenciliğinde Çaid Algoritmasının Sosyal Güvenlik Kurumu Veri Tabanına Uygulanması,” 2010.
- [24] D. Muslu, “Sigortacılık Sektöründe Risk Analizi: Veri Madenciliği Uygulaması,” 2009.
- [25] Ü. Sezer, “Karar Ağaçlarının Birliktelik Kuralları İle İyileştirilmesi,” 2008.
- [26] Z. Ullah and J. Hur, “A comprehensive review of winding short circuit fault and irreversible demagnetization fault detection in PM type machines,” *Energies*, vol. 11, no. 12, 2018.
- [27] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, “Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011.
- [28] M. Zafarani, E. Bostanci, Y. Qi, T. Goktas, and B. Akin, “Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended review and comprehensive analysis,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2018.
- [29] C. M. Gheorghită, M. Adam, M. Andrușcă, A. Munteanu, and A. Dragomir, “About contact resistance of the electrical equipment,” *Proc. - 2017 Int. Conf. Mod. Power Syst. MPS 2017*, no. Mps, pp. 3–6, 2017.

- [30] A. Sapena-Bañó, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, and D. Matic, "Fault Diagnosis of Rotating Electrical Machines in Transient Regime Using a Single Stator Current's FFT," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2015.
- [31] J. Pons-Ilinares, J. A. Antonino-daviu, M. Riera-guasp, M. Pineda-sanchez, and V. Climente-alarcon, "Current Analytic Wavelet Transform via Frequency B-Splines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1530–1544, 2011.
- [32] J. W. Bennett, G. J. Atkinson, B. C. Mecrow, and D. J. Atkinson, "Fault-tolerant design considerations and control strategies for aerospace drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2049–2058, 2012.
- [33] S. Rajagopalan, J. A. Restrepo, J. M. Aller, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Wigner-Ville distributions for detection of rotor faults in brushless DC (BLDC) motors operating under non-stationary conditions," *SDEMPED 2005 - Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives*, vol. 42, no. 6, pp. 1464–1477, 2005.

Short Circuit Fault Analysis of BLDC Motor by Finite Element Method

Extended abstract

Three-phase permanent magnet brushless machines are used in many applications where reliability and fault tolerance are important. In order to simulate the fault of the permanent magnet brushless direct current (BLDC) motor, insulation distortion in the winding is generated by adding an additional parallel impedance to the stator phase circuit.

In this study, BLDC design is made by using finite element method (FEM). Computer-aided numerical techniques were used to obtain flexibility and continuity in design. The use of such simulation tools helps researchers to emphasize the effects of faults in an electrical machine and develop efficient fault detection methods. Using FEM analysis, changes in the electrical, magnetic and mechanical behaviour of the machine due to any error can be easily observed without having to turn on the machine or conducting experiments in laboratories. Using FEM, this robust engine was designed based on the characteristics of a true BLDC motor and four defective motor models were created.

Fault diagnosis of rotating electrical machines by means of the motor current signature analysis (MCSA) is a widely used method with rapid implementation. On the hardware side, the sensor can be connected to a single phase current by taking the data online and diagnosing the fault. There are no fixed conditions in most industrial applications. The speed or load on the machine varies with time. In such a case, healthy monitoring of the machine faces difficulties. It is not possible to implement traditional methods including Fast Fourier Transform (FFT). The frequency amplitudes of short circuit fault analysis were determined by using FFT analysis of stator current and more specific and concrete data of spectral analysis results were obtained.

In this study, after comparing the feature extraction and the accuracy of the fault detection, the appropriate feature data set was selected and the short circuit fault of the presented criterion was determined. Although it has 80% success rate in MLP classification, it has 100% success in k-NN and RT. In this case, k-NN and RT method seems to be very successful.

Keywords: Finite element method, Fault modelling, Spectral analysis, Attribute extraction, Fault detection

Siber Zorbalık Tespit Yöntemleri Potansiyel Uygulama Alanları ve Zorluklar

Enver YAZĞILI ^{1*}, Muhammet BAYKARA ²¹ Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Tunceli
enveryazgili@munzur.edu.tr, 0000-0001-8459-3488² Fırat Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ
mbaykara@firat.edu.tr, 0000-0001-5223-1343

ARTICLE INFO

Makale geçmişi:

Geliş: 26 Şubat 2020
Düzeltilme: 29 Haziran 2020
Kabul: 30 Ağustos 2020

Anahtar Kelimeler:

Bilgi güvenliği, siber zorbalık, siber suç, siber güvenlik

ÖZET

Dünya genelinde sosyal medya kullanıcılarının karşılaştığı sorunların başında gelen siber zorbalık gün geçtikçe daha da artmaktadır. İnsanlar arasında yaygınlaşan İnternet kullanımı, siber zorbalığın uygulama alanlarının da artmasına neden olmuştur. Siber zorbalık, İnternet üzerinden yapacakları zorbalıkların tespit edilememesi veya tespit edilse dahi yasal bir yaptırım uygulanmayacağı düşüncesiyle geleneksel zorbalığa oranla daha fazla zorbalık yapmaktadırlar. Artan siber zorbalık suçları, kurbanlarına psikolojik baskılar yaşatarak toplumdaki dışlanmaları ve hatta intiharın eşiğine gelmelerine neden olmaktadır. Bu ve buna benzer sorunların önüne geçilmesi için siber zorbalığın anlık tespit edilmesi gerekir ancak bu oldukça güçtür. Bu problemin tespit edilmesi için literatürde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada öncelikle siber zorbalık ve türleri, tespit için kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri ve algoritmaları ile literatürde yapılan çalışmalar sunulmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 February 2020
Revised: 29 June 2020
Accepted: 30 August 2020

Keywords:

Information security, cyberbullying, cyber crime, cyber security

Abstract

Cyberbullying, which is one of the problems faced by social media users worldwide, is increasing day by day. It puts psychological pressure on its victims, causing them to be excluded from the society and even to the brink of suicide. In order to prevent these and similar problems, cyberbullying must be detected. Although cyberbullying detection is very difficult, many methods have been developed for its detection. The widespread use of the internet among people caused cyber bullying the application areas to increase. Cyber bullies; They bully more than traditional bullying with the thought that their bullying on the internet cannot be detected or even with the thought that there will be no legal sanction. Various studies have been carried out in the literature to identify this problem. In this study first of all cyberbullying definition, types, legal regulations in the international arena and in turkey, used in detection methods machine learning methods and algorithms, studies in the literature and generally presented implementation steps used in the detection method.

Doi: [10.24012/dumf.859651](https://doi.org/10.24012/dumf.859651)

* Enver YAZĞILI

✉ e-mail

enveryazgili@munzur.edu.tr

Giriş

Bilgi teknolojilerindeki gelişme ve iletişim araçlarının kullanıcı yaşamlarına çok hızlı yerleşmesi, sosyal medya platformlarının, paylaşım sitelerinin ve ağların gelişimine ve çeşitliliğine zemin hazırlamıştır. Dünya genelinde yapılan araştırmalarda 2018’de nüfusun %42’sinin sosyal medya araçlarını/platformlarını kullandığı, 2019’da ise bu sayının %3’lük dramatik bir artış göstererek %45’e ulaştığı belirtilmiştir [1].

Sosyal medya uygulamaları (Facebook, YouTube, WhatsApp, FB Messenger, Instagram, Twitter gibi), çok yönlü hizmetler sunması (iletişim, eğlence, ticaret, iş, eğitim gibi), bunun yanında kullanıcılar tarafından çeşitli kişisel verilerini paylaşabilecekleri zeminler oluşturması yönüyle kullanıcılarına sayısız avantajlar sunmaktadır. Ancak kişisel bilgilerin izinsiz başka kişilerin eline geçmesi ve bu kişilerin farklı amaçlarla bu bilgileri kullanmaları veya paylaşımları sonucunda çeşitli sorunlar ortaya çıkmıştır [2-5].

Bu çalışmada literatürde siber zorbalık tespitinde yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Daha sonra siber zorbalık ve türleri, siber zorbalık tespitinde kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri sunulmuştur. Son kısımda ise sonuç başlığı ile öneriler ve gelecek çalışmalarla ilgili fikirler sunulmuştur.

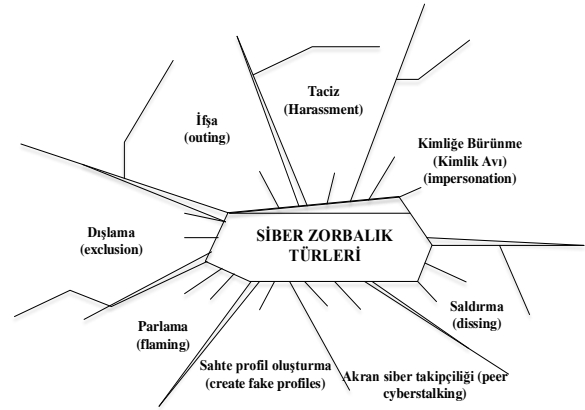
Siber Zorbalık

Sosyal medya kullanıcıları yaşamlarının en az bir anında siber zorbalık yapmış, siber zorbalığa maruz kalmış veya izleyicisi olmuştur. Kullanıcı davranışlarının, internet ortamında değişkenlikler göstermesine bağlı olarak siber zorbalıklar farklı şekillerde uygulanmakta ve tanımlanmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Suç Önleme Konseyi zorbalığı, “*İnterneti, cep telefonlarını veya diğer cihazları başka bir kişiye zarar vermek, utandırmak amacıyla metin, resim göndermek için kullanma süreci*” şeklinde tanımlamıştır. Ülkemizde ise Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, “*Siber zorbalık, elektronik ortamda bir birey veya grubun, diğerlerine yönelik kasıtlı biçimde gerçekleştirdiği aşağılama, iftira, dedikodu, taciz, tehdit, utandırma ve dışlama gibi rahatsızlık verici*

eylemleri ifade eder” şeklinde siber zorbalığı tanımlamıştır [6].

Siber Zorbalık Türleri

Siber zorbalığın uygulama alanının geniş olması ve uygulama şeklinin de kişilere bağlı olması nedeniyle literatürde birçok farklı siber zorbalık türü yer almaktadır. Ancak en çok kabul gören ve karşılaşılan türleri Şekil 1’de gösterilmiştir [5], [7-9].



Şekil 1. Sosyal ağlarda karşılaşılan siber zorbalık türleri

Taciz

Taciz (Harassment), hedef kişiye uygun olmayan, hakaret içerikli farklı formlardaki mesaj türlerinin kasıtlı bir şekilde gönderilmesi durumudur [10-12].

İfşa

İfşa (Outing), hedef kişiye ait özel bilgilerin, sırların, uygunsuz veya utanç verici bilgilerin ya da görsellerin telefon, e-posta, sosyal medya platformları üzerinden herkese açık şekilde yayınlanması, başkalarına gönderilmesidir [10-12].

Dışlama

Hedef kişinin online gruplardan veya forum sitelerinden kasıtlı bir şekilde çıkarılması veya kısıtlanması durumudur [11], [12].

Kimliğe Bürünme

Kimliğe bürünme veya kimlik avı (Impersonation), hedef kişi veya kişileri aşağılamak, kötü göstermek veya arkadaşlık ilişkilerine zarar vermek amacıyla hedefin kimliğine veya başka birinin kimliğine bürünerek paylaşımlarda bulunma veya mesajlar gönderilmesi eylemidir [6], [11], [12].

Saldırma

Saldırma (Dissing), hedef kişi hakkında doğru olmayan, yıpratıcı ve acımasız sözlerin veya bilgilerin üçüncü şahıslara gönderilmesi, dedikodu ve söylenti çıkarılması durumudur [10-12].

Parlama

Parlama (Flaming) diğer adıyla kışkırtma, sosyal medya kullanıcıları arasında aşağılayıcı ve düşmanca etki oluşturma durumudur [10-12].

Sahte profil oluşturma

Sahte profil oluşturma (Create fake profiles), sahte bir web sitesi, blog veya online grup oluşturularak bu platformlar üzerinden hedef kişileri aşağılamak, utandırmak ve güvenliklerine saldırmak amacıyla yalan ve kötü niyetli haberler, bilgilerin yayılması durumudur [11], [12].

Akran siber takipçiliği

Siber zorbalık türlerinden taciz ile benzerlik gösteren bu tür (Peer Cyberstalking), tacizin daha şiddetli formudur. Bu zorbalık türü, hedef kişinin iletişim teknolojileri kullanılarak takip edilmesiyle başlar ve hedef kişinin sadece taciz edilmesiyle kalmaz, kurban tehdit edilir, korkutulur ve her an zarar verilecekmiş gibi siber saldırılarda bulunulur [11], [12].

Siber zorbalık farklı türlerde karşımıza çıksa da genel olarak her yaş gurubu için ciddi tehditler

oluşturmaktadır. Kurbanlar hakaret içerikli, rahatsız ve taciz edici yorumlardan hayati tehlikelere yol açacak içerikteki mesajlara her geçen gün daha fazla maruz kalmaktadır. Bu içeriklerin çok hızlı bir şekilde geniş kitlelere yayılabilmesi, sosyal ağların kurbanlar için endişe verici alanlar haline gelmesine neden olmuştur [13].

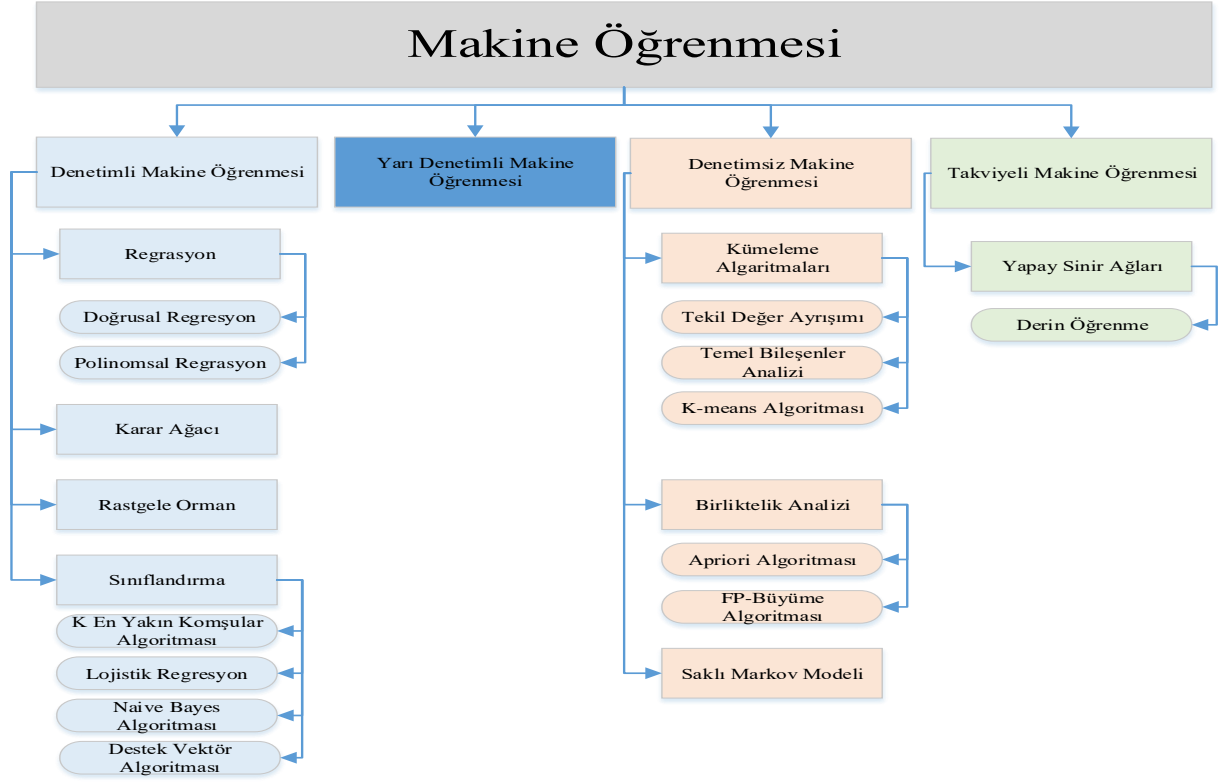
Siber Zorbalık Tespitinde Kullanılan Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Siber zorbalık tespitinde büyük veri kullanımının yaygın olması, bu veriler arasında birden fazla özelliğin bulunması ve özellikler arasında da doğru ilişkilerin kurulabilmesi nedeniyle hedef verilerin tespitinde iyi bir tahmin yürütülebilmesi gerekmektedir. Makine öğrenmesi (MÖ) yöntemleri bu yönüyle siber zorbalık tespitinde sıkça başvurulan yöntemlerin başında gelmektedir.

1959 yılında Amerikan bilgisayar bilimcisi Arthur Samuel tarafından makine öğrenmesi, “bilgisayarın açıkça programlanmadan öğrenme yeteneği” şeklinde ifade edilmiştir.

Temel olarak makine öğrenmesi, istenen veya kabul edilebilir bir aralıktaki çıkış verilerini tahmin edilebilmek için alınan giriş verilerini analiz eden çeşitli algoritmalar kullanır. Söz konusu algoritmalar, gelen her yeni veri ile daha iyi sonuç elde etmek ve zamanla “zeka geliştirmek” için yeni algoritma adımlarını öğrenir ve bu adımları günceller [14].

Bir başka deyişle makine öğrenmesi, problemin çözümüne yönelik o probleme ait giriş verilerini modelleyen algoritmalarla. Modellenen her algoritma en yüksek performansı elde etmek için oluşturulur. Bu yönüyle birçok makine öğrenmesi yöntemi geliştirilmiştir. Makine öğrenmesi türleri ve algoritmaları Şekil 2’de gösterilmiştir [15].



Şekil 2. Makine öğrenmesi türleri ve algoritmaları

Denetimli Makine Öğrenmesi

Denetimli makine öğrenmesinde, makineye örnekler verilerek öğrenme sağlanır. Yani algoritmaya bilinen girdi ve bu girdilere karşılık gelen çıktılar verilerek, algoritmanın girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi öğrenmesi daha sonra gelecek olan yeni girdiler için istenilen değerlere en yakın çıktıları elde etmesi hedeflenmektedir [15].

Regresyon

Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini inceleyen modelleme tekniği veya tahmin yöntemidir. Bu teknikte veri noktalarına, veri dağılımına bağlı olarak bir eğri veya doğru uygulanmaktadır. Buradaki amaç veri noktaları ile çizilecek eğri/doğru arasındaki farklarının minimum seviyede olmasıdır.

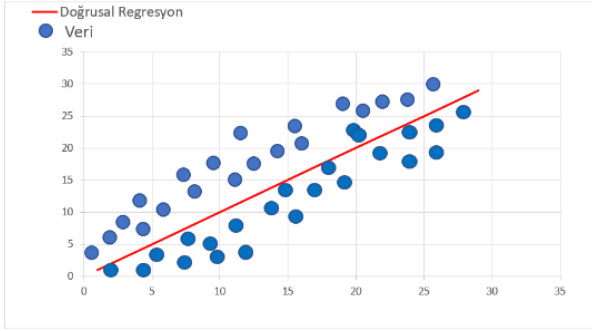
Regresyon analizinde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en sık kullanılanları;

- Lojistik Regresyon
- Doğrusal Regresyon
- Polinomsal Regresyon
- Ridge Regresyon
- Lasso Regresyon
- ElasticNet Regresyon

Siber zorbalık ile ilgili çalışmalarda genel olarak doğrusal ve polinomsal regresyon yöntemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu sebeple bu kısımda Doğrusal ve Polinomsal regresyon türleri açıklanmıştır [16].

Doğrusal Regresyon

Tahmin edilecek veriler ile değişkenlerin arasında doğrusal bir ilişki olduğunda doğrusal regresyon algoritması kullanılmaktadır.

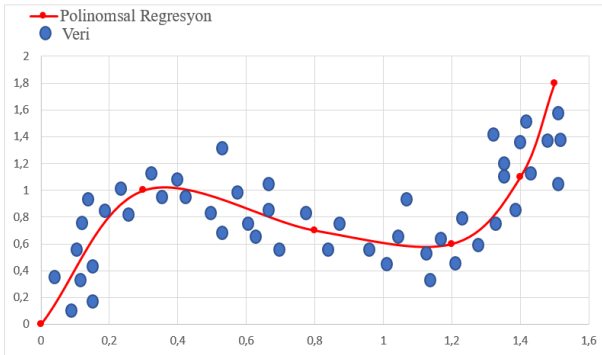


Şekil 3. Doğrusal regresyon veri ilişkileri

Burada önemli olan çizilecek doğrunun bütün değişkenler ve sonuçlar için hata payını en aza indireyecek şekilde çizilmesidir. Doğrusal Regresyon algoritması bu durumu başarılı şekilde yapmaktadır. Bu yöntem siber zorbalık tespitinde belirlenen farklı özelliklerin birbirleriyle ilişkilendirmelerinde kullanılmaktadır [17].

Polinomsal Regresyon

Veriler arasında doğrusal bir ilişkinin olmaması durumunda problemin çözümüne yönelik polinomsal bir algoritma kullanılması gerekir. Örnek olarak eldeki veriler Şekil 4'teki gibi polinomsal bir dağılım gösterdiği varsayalım. Bu durumda eldeki verilerin dağılımına uygun veriler arasına polinomsal bir eğrinin çizilmesi gerekir [18].



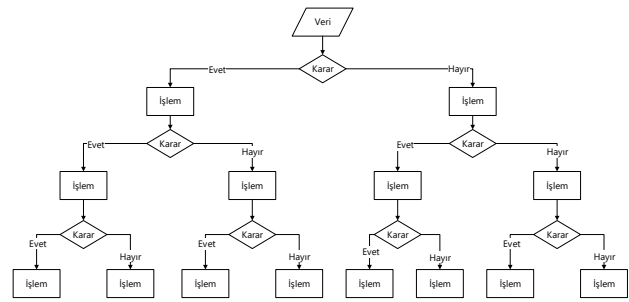
Şekil 4. Polinomsal regresyon veri ilişkileri

Karar Ağacı

Bu algoritma yapısal olarak bir ağaca benzemektedir. Ağacın yaprakları sınıf

etiketlerini, yapraklara giden dallar da özellik ile ilgili işlemleri ifade etmektedir. [18].

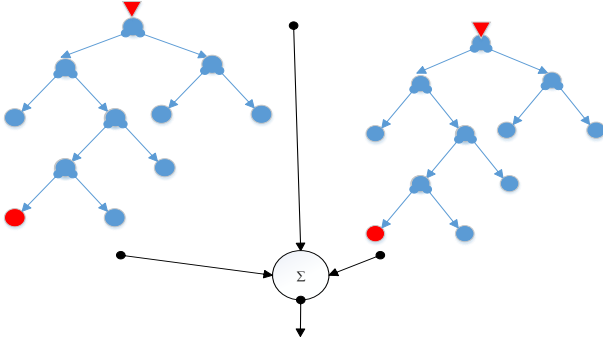
Karar ağaçları tepeden aşağıya inen bir yapıya sahiptirler. Bu yapının oluşturulmasındaki temel amaç, büyük veri kümelerini çeşitli karar kurallarına tabi tutarak daha küçük kümelere bölümlenektir. Karar ağacı modelleri, çok büyük veri kümelerine uygulanabilmesi, bir modelin güvenilirliğini birçok istatistiksel testlerle gerçekleştirebilmesi, kullanılacak verilerde çok fazla ön işleme gerek duymaması yönüyle siber zorbalık tespitinde tercih edilmektedir [19]. Şekil 5, bir karar ağacı yapısını göstermektedir.



Şekil 5. Karar ağacı yapısı

Rastgele Orman

Kısaca Rastgele Orman (RO), sınıflandırma yapılırken birçok karar ağacı üretmek için sınıflandırma oranını yükselten ve daha doğru tahminler elde etmek için onları birleştiren bir algoritmadır. Rastlantısal olarak seçilen karar ağaçları bir araya gelerek karar ormanını oluşturur. Rastgele Orman algoritması çok fazla sayıda değişken, kayıp veri, etiketlenmiş sınıflara sahip ve dengesiz bir dağılım gösteren veri setlerinde iyi sonuçlar vermesi yönüyle siber zorbalık tespitinde kullanılmaktadır. RO'nun en büyük avantajı, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılabilmesidir. Basit bir Rastgele Orman yapısı Şekil 6'de gösterilmiştir. [20].



Şekil 6. Rastgele orman yapısı

Sınıflandırma

Sınıflandırma, makine öğrenme algoritması ile gözlemlenen verilerden bir sonuç çıkararak bu verilerin kategorilere ayrılması ve daha sonra gelecek olan yeni verilerin hangi kategoriye ait olduğunun tespit edilmesi işlemidir. Kısaca kullanılan veriler etiketlenebilir, kategorilere ayrılabilir veya belli gruplara ayrılabilir ise bu teknik kullanılabilir. Sosyal medya platformlarında elde edilen cümlelerin gözlemlenerek “siber zorbalık içeren” veya “siber zorbalık içermeyen” cümleler olarak iki sınıfa ayrılması ve daha sonra anlık cümlelerin gözlemlenmesi ve bu iki sınıftan hangisine ait olduğunun tespit edilmesi sınıflandırmaya örnek olarak verilebilir [15].

K En Yakın Komşular Algoritması

Bu algoritma (K-Nearest Neighbors-KNN) sınıflandırılmak istenen yeni verinin daha önceki verilerden k tanesine olan yakınlığına bakan bir algoritmadır. Sınıflandırma esnasında test örnekleri ve eğitim örnekleri birbirleri ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırmalarda komşuluk mesafesi için genel olarak öklid bağıntısı kullanılmaktadır. Tahminler, komşu örneklerin oy çoğunluğuna dayanmaktadır. Yüksek k değerlerine aşırı uyma eğiliminde olmasından dolayı dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu yöntemin siber zorbalık tespitinde kullanılmasının temel nedeni, eğitim aşaması kısmının olmaması ve gürültü verilerine karşı dayanıklılık gösterebilmesidir [18].

Lojistik Regresyon

Lojistik Regresyon, eldeki verilere dayanarak meydana gelecek bir olayın olasılığının tahmin edilmesidir. Burada bağımlılığı birden fazla olan bir değişkenin sonuçları 0 ve 1'e indirgenerek gösterilmektedir. Genel olarak siber zorbalık kategorilerinin ayırımı veya ilişkilendirilmesi durumlarında kullanılmaktadır [17].

Naive Bayes Sınıflandırma Algoritması

Diğer algoritmalarla karşılaştırmak için temel seviye sınıflandırıcı olarak önerilen iyi bilinen bir istatistiksel öğrenme algoritmasıdır. Naive Bayes (NB), belirli bir sınıf için girdilerin birbirinden bağımsız olduğunu varsayarak sınıf koşulu olasılıklarını tarafsız tahmin eder. NB, sınıfları koşullu marjinal yoğunlukları bulmak için ayırıcı sınıflar problemini azaltır, bu da belirli bir örneğin olası hedef sınıflardan biri olma olasılığını temsil eder. NB, birbirleri ile ilişkili girdiler içermedikçe diğer algoritmalarla karşı iyi performans göstermektedir. Bu algoritma diğer sınıflandırma algoritmalarına göre daha sade olması ve daha iyi sonuçlar elde etmesi yönüyle siber zorbalık tespitlerinde sıkça kullanılmaktadır [18].

Destek Vektör Makinesi

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine: SVM) teorisi, iki sınıfa ait verilerin en uygun şekilde birbirlerinden doğrusal/doğrusal olmayan şekilde ayrılabilen sonsuz sayıda çizginin olduğunu varsayar. Bu algoritma, büyük veri kümelerinde çok hızlı sonuçlar elde etmesi, verilerin ayırımını doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde yapabilmesi ve sonsuz sayıdaki bu ayırımların içerisinde en iyisini seçme yeteneğine sahip olması nedeniyle siber zorbalık tespitinde en çok kullanılan algoritmaların başında gelir [18].

Yarı Denetimli Makine Öğrenmesi

Bu yapıda etiketli ve etiketsiz veriler birlikte kullanılmaktadır. Verilerdeki etiketler anlamlı bilgiler içerdiğinden algoritma, etiketli veriler ile etiketsiz veriler arasındaki farklılığı anlamlandırarak veri çözümlemesi gerçekleştirmektedir. Bu sayede algoritma,

etiketsiz verilere etiket eklemeyi öğrenebilmektedir. Kısaca etiketlenmiş veri sayısının az olduğu ve tahmin edilecek veri sayısının çok olduğu durumlarda bu yöntem kullanılmaktadır [15].

Denetimsiz Makine Öğrenmesi

Denetimli Makine Öğrenmesinden farklı olarak bilinen girdi ve buna karşılık gelen çıktılar yoktur. Algoritma sadece girdi verilerini analiz ederek veriler aralarında bir ilişki bulmaya çalışır. Daha sonra tespit edilen ilişkiler aracılığıyla girdiler yakınlık durumuna göre gruplara ayrılır. Bu sayede gelen yeni girdiler yakınlık durumuna göre belirlenen guruba alınır. Siber zorbalık tespitinde veri ön işleme, özellik sayısını düşürme, veri kümesini birden çok bileşene ayırma gibi özelliklerinden dolayı Denetimsiz Makine Öğrenmesi tercih edilmektedir [15].

Kümeleme Algoritmaları

Kümeleme algoritmaları, belirlenmiş özellikler dikkate alınarak benzer özellikteki verilerin aynı gruba alınması işlemini gerçekleştirir. Burada özelliklerin tespit edilmesi ve grup ayrımının yapılabilmesi için her bir veri kümesinin analizinin yapılması gerekir. Siber zorbalık tespitinde verilerin zorbalık unsuru taşıma durumlarına bağlı olarak uygun kümelere ayrılmasında kümeleme algoritmaları kullanılmaktadır [15].

Tekil Değer Ayrışımı

Tekil Değer Ayrışımı (TDA), bir matrisin çarpanlarına ayrılma türlerinden biridir. Matris çözümlerinde terim sayısının teorik olarak bilinmediği durumlarda kullanılır. Verilen bir matristeki problemleri belirleyip nümerik cevaplar bulmaya yarar. Burada öncelikle matris 3 parçaya ayrılır daha sonra bu parçalar kullanılarak aynı matrisin elde edilmesi sağlanır. Google arama motorunun kullandığı PageRank algoritması, yüz tanıma modelleri, bilgi getirme/çıkarımı, boyut azaltma, gen analizleri, veri sıkıştırma gibi birçok alanda temel adım olarak kullanılmaktadır [20].

Temel Bileşenler Analizi

Bu analiz yöntemi bir boyut azaltma işlemidir. Birbirleri ile ilişkili çok sayıda değişken içerisinde fazla olanların çıkarılarak veri kümelerinin küçültülmesine ihtiyaç duyulması durumunda kullanılmaktadır. Buradaki hedef büyük veri kümesinin basitleştirilmesiyle elde edilecek sadeleştirilmiş veri kümesinde daha doğru gözlem yapabilmeyi ve veriler arasındaki ilişkiyi daha iyi çözümleyebilmeyi sağlamaktır. Bu metod yüz tanıma, görüntü sıkıştırma, örüntü tanıma gibi birçok alanda yaygın olarak kullanıldığı gibi siber zorbalık tespitinde de veri kümelerini azaltmak için kullanılmaktadır [21].

K-Means Algoritması

Veri madenciliğinde en çok kullanılan algoritmalarından biri olan K-Means algoritması kümeleme algoritmalarının da en eskilerinden biridir. Bu algoritma istatistiksel olarak benzer özellikteki verileri aynı kümeye yerleştirir ve bu algoritmada bir veri sadece bir kümeye ait olabilir. Algoritmanın temel amacı, oluşturulan "K" adet kümenin her birinin mümkün olduğunca birbirinden farklı olmasını ve her kümede bulunan verilerin de birbirine en yakın olmasını sağlamaktır [22], [23].

Birliktelik Analizi

Veri madenciliğinde kullanılan ilk tekniklerden biri olan bu analiz yöntemi, farklı olayların birlikte gerçekleşme olasılıklarının çözümlenmesi işlemidir. Temel mantık, belirli bir veri kümesindeki geçmiş verilerin analiz edilmesi ve bu veriler içerisinde sık sık birlikte ortaya çıkan özellik-değer koşullarını gösteren ilişkilendirme kurallarının tespit edilmesidir. Siber zorbalık tespitinde, bir arada kullanılan kelime çiftlerinin belirlenmesinde ve yorumlanmasında bu analiz yöntemi kullanılmaktadır [24], [25].

Apriori Algoritması

Apriori algoritması temelde tekrarlayan bir özelliğe sahiptir. Hareket bilgilerini içeren veri tabanında sık rastlanan öğe kümelerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Bu algoritmaya göre k adet elemana sahip bir küme minimum destek

değerlerini sağlıyor ise, bu kümeyle ait alt kümelerin her biri de minimum destek değerlerini sağlar. Birliktelik analizinin ilk adımında kullanılan Apriori algoritması, sık geçen öğeler madenciliğinde kullanılan en yaygın ve eski algoritmadır [24], [25].

FP-Büyüme Algoritması

FP-Büyüme Algoritması, verileri FP-Tree (Frequent Pattern Tree) denilen ve sıkıştırılmış bir ağaç yapısına sahip veri tabanında tutmaktadır. Bu veri tabanı oluşturulurken iki tarama gerçekleşir. Bu taramaların ilkinde yapıdaki nesnelerin tümünün destek değerleri hesaplanır. Daha sonraki tarama işlemi ise ağacın veri yapısını oluşturur. Bu algoritmanın en önemli özellikleri, aday kümeler üretilmeden yaygın kümeleri test edebilmesi, yüksek boyutlu veri kümeleri üzerinde hızlı çalışabilmesi ve sisteme ait kaynakları verimli bir şekilde kullanabilmesidir. Algoritma, “böl ve yönet” yaklaşımına göre büyük veri kümelerini daha küçük kümelere ayırmaktadır. Bu yönüyle FP-Tree yapısı asıl veri kümesinden küçük olmalıdır. Siber zorbalık tespitinde FP-Growth algoritması kullanılarak benzer kelimelerin frekans değerleri hesaplanır ve bir desen oluşturulur. Oluşturulan bu desende kelimelerin birliktelik ilişkileri belirlenir [24], [26].

Saklı Markov Modeli

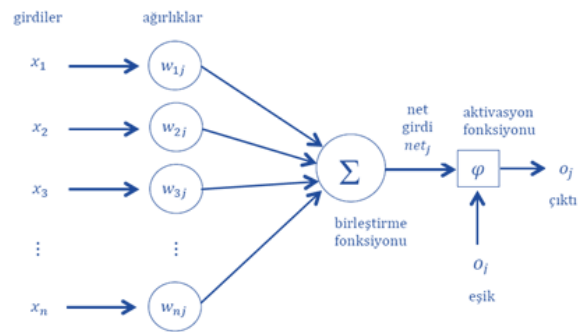
Saklı Markov Modelinde, durumlar dışarıdan doğrudan gözlemlenemez, yalnızca her durum için o duruma ait gözlem çıktıları izlenebilir. Her bir durum için ele alınan gözlem çıktıları toplanarak bir gözlem dizisi elde edilmektedir. Saklı Markov Modelinde sistemde oluşan gözlemlerin tümü zamandan bağımsızdır ve mevcut durumların olayların her birine ilişkin olasılıkları, dağılım değerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Saklı Markov Modelinde, sistemin herhangi bir anında hangi durumda olduğu bilinmemektedir, ancak söz konusu durumun etkilediği gözlemler tespit edilebilmektedir [27].

Takviyeli Makine Öğrenmesi

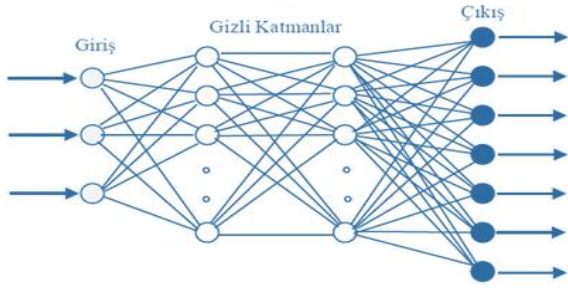
Takviyeli (pekiştirmeli) öğrenme, en yüksek ödüle erişmek için hangi seçimlerin yapılması gerektiğini geçmiş deneyimlere dayanarak tespit eden (öğrenen) bir yaklaşımdır. Bu algoritmanın klasik yöntemlerden farkı, ön bilgiye ihtiyaç duymamaları yani doğru girdi/çıkıtlı eşleşmelerinin verilmediği ve kesin yöntemlerin verimsiz kaldığı durumlar için kullanılmalardır [14], [15].

Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları insan sinir sistemini örnekleyen matematiksel bir modeldir. Bu modelde amaç insan sinir hücrelerinin veriyi depolama, kullanma ve işleme gibi özelliklerini taklit edecek, onun gibi karar verme ve muhakeme yeteneğine sahip olabilecek, birbirleri ile bağlantılı yapay sinir hücrelerinden (nöronlardan) meydana gelen bir yapı oluşturmaktır. Bu hücrelerin her birinin temel elemanları Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu yapay sinir hücrelerinin katmanlar halinde birleşmesi ile yapay sinir ağı oluşur. Bu katmanlar ise girdi, çıktı ve her ikisi arasında bulunan gizli katmanlardan oluşmaktadır (Şekil 8). Girdi/Çıkıtlı katmanlarındaki nöron sayıları, bağımlı/bağımsız değişken sayılarına bağlı olarak belirlenirken, gizli katmanda bulunacak katman sayıları ve nöron sayıları, kullanıcı tarafından en iyi sonucu elde edecek şekilde belirlenmektedir.



Şekil 7. Yapay sinir ağlarındaki hücre yapısı



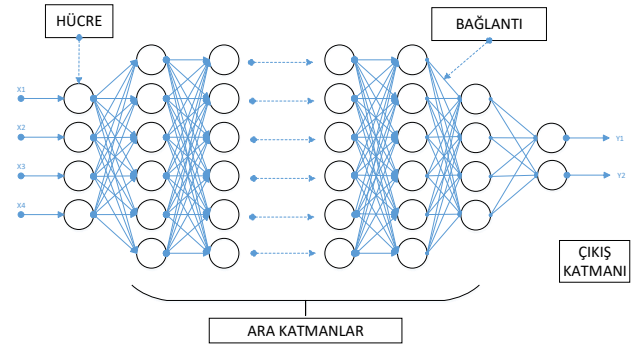
Şekil 8. Çok katmanlı yapay sinir ağının genel yapısı

Yapay sinir ağları, eldeki veri setinin yapısını öğrenerek, sonuca ulaşmak için genellemeler yaparlar. Genelleştirmeler, yapay sinir ağının ilgili olay örneklerle eğitilmesiyle ile gerçekleştirilir. Bu sayede benzer olaylara karşı gelebilecek çıkış verileri tespit edilir. Ağ üretmiş olduğu sonucu, ağa girdi olarak gelen bilgilerin kendi ağırlık değerleri ile çarpılıp toplanması sonucu oluşan yeni bilginin bir fonksiyon aracılığıyla işlenmesi ve bu işlenen bilginin de çıkış katmanından alınmasıyla elde etmektedir. Yapay sinir ağının her istenilen en iyi sonucu elde edebilmesi için bu ağırlıkları sürekli güncellemesi gerekir. Ancak bu ağırlık değerleri kullanıcı tarafından anlamlandırmaya ve yorumlamaya kapalı olduğu için yapay sinir ağları için bir dezavantaj olarak görülmektedir. Ağın en iyi sonucu nasıl elde ettiği tespit edilemediğinden, ağ kara kutu gibidir. Yapay sinir ağı içindeki bilgi, istenilen hedefe en yakın sonuç, kullanıcının belirlemiş olduğu katman ve nöronlarda gizlidir. Yapay sinir ağları deneyimleme ve örnekleme yaparak öğrenmeyi gerçekleştirir. Bu sayede girdiler arasındaki ilişkilerin tespitinin zor olduğu veya büyük veri kümelerinde doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları; görünün tanımlanması, doğal dil işleme, ses tanıma, büyük veri analizlerinde ve buna benzer birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yönüyle siber zorbalık tespitinde de etkin olarak kullanılmaktadır [15].

Derin Öğrenme

Makine öğrenmesi sınıflarından biri olan derin öğrenme, verilere ait özelliklerin çıkarılması ve bu özelliklerin dönüştürülmesi amacıyla doğrusal

olmayan birçok işlem katmanı kullanmaktadır. Birbirini takip eden her bir katmanın çıkış verisi bir sonraki katmana giriş verisi olarak aktarılır [28]. Derin öğrenme algoritmaları denetimli veya denimsiz olabilir. Derin öğrenme ile verilere ait birçok özelliğin veya verileri temsil eden bilgilerin öğrenilmesi amaçlanmaktadır. Derin öğrenmede alt düzeydeki özelliklerin türetilmesiyle üst düzey özellikleri elde etmeye yönelik bir hiyerarşik temsili yapı oluşturulur [29]. Derin öğrenmede eldeki verileri en iyi şekilde temsil edecek özellikler manuel yerine, algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilir. Derin öğrenmenin genel yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir [30].



Şekil 9. Derin öğrenme genel yapısı

Örnek Uygulamalar

Altay ve Alataş Siber zorbalık tespitine yönelik doğal dil işleme teknikleri ile makine öğrenmesi yöntemlerinden Bayesyen lojistik regresyon, rassal orman algoritması, çok katmanlı algılayıcı, J48 algoritması ve destek vektör makineleri kullanılmıştır. Veri seti olarak hazır formspring verileri kullanılmış yapılan farklı sınıflandırma deneylerinde BLR ve RO algoritmalarının en iyi performansı verdiği tespit edilmiştir [5].

Siber zorbalık konularında sosyal medya kullanıcılarını bilinçlendirmek veya kullanıcıların mevcut bilgilerini tespit etmek için çeşitli anket çalışmaları yapılmıştır [7-9], [31].

Hussain ve diğ. Facebook'tan, Prothom-Alo haberlerinden ve YouTube'dan veriler toplayarak veri seti oluşturmuşlardır. Bu veri setinde ön işleme işlemlerini gerçekleştirmek için bir algoritma tasarlamışlar ve %75,5 başarı elde etmişlerdir. Daha sonra sınıflandırma için RO,

SVM ve Multinomial Naive Bayes (MNB) algoritmalarını kullanmış ve bu algoritmalarından SVM algoritmasının en iyi performansı verdiğini tespit etmişlerdir [32].

Al-Mamun ve Akhter, sosyal medya ortamlarından veri çekebilecek bir program geliştirmişlerdir. Java dilinde geliştirdikleri program aracılığıyla Facebook ve Twitter üzerinden Bengalce veriler çekilmiştir. Bu veriler NB, J48, SVM ve k-NN MÖ sınıflandırma algoritmalarına tabi tutulmuş ve SVM algoritmasının en iyi sonucu verdiği görülmüştür [33].

El-Halces, Arapça ve İngilizce yazılan spam e-postaların filtrelenmesine yönelik Twitter ve Facebook yorumları toplayarak elde ettikleri veri setlerine SVM, NB, k-NN ve YSA algoritmalarını uygulamıştır. Bu karşılaştırma sonuçları ile SVM algoritmasının saf İngilizce, NB algoritmasının saf Arapça veri setlerinde en iyi sonucu elde ettiğini tespit etmişlerdir [34].

Duygu analizi tespiti için yapılan bir çalışmada Arapça yazılmış olan Facebook yorumları SVM, NB ve Karar ağaçları algoritmaları kullanılarak sınıflandırmaya tabi tutulmuş, %73,4 doğruluk oranıyla SVM'nin en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir [35]. Duygu analizine yönelik bir başka çalışmada ise Twitter'dan alınan Arapça Tweetler üzerinde yazım ve lehçeler de dikkate alınarak NB, SVM ve k-NN algoritmalarına tabi tutularak karşılaştırma yapılmış ve NB algoritmasının en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir [36].

Sintaha ve Mostakim [37], Shekhar ve Venkatesan [38] Twitter'dan elde ettikleri veri setlerine farklı sınıflandırma algoritmaları uygulayarak bu algoritmaları karşılaştırmışlardır. İki çalışma sonucunda SVM algoritmasının en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Zois ve diğ. AvOID algoritması tasarlayarak veri setindeki kelimeleri siber zorba/siber zorba

olmayan gruba ayırmışlardır. Yapılan beş kat çapraz doğrulama ve deneyler sonucunda tasarladıkları algoritmanın çıkarılacak özellik sayısını %64 oranında azalttığını tespit etmişlerdir [39].

Venckauskas ve diğ. Litvanca haber portalı olan DELHI'den topladıkları yorumlardan veri seti oluşturmuşlardır. Bu veri setine SVM algoritması uygulanmış, değerlendirme için ise Kazanan Her Şeye Sahip (WTA) metriği kullanarak adli tıp uzmanlarınca analizi yapılan şüpheli yazar listelerinin kısaltılmasını amaçlayan bir çalışma yapmışlardır [40].

Bu çalışmalar dışında sosyal medya platformlarının da siber zorbalık tespitine yönelik çalışmaları bulunmakta ve çözüme yönelik araştırmalarını devam ettirdikleri bilinmektedir [3], [38], [41-43], [44].

İbrahim ve diğ. Siber zorbalık tespitinde kullanılan veri setlerindeki veri dengesizliği probleminin çözümüne yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Veri seti olarak Wikipedia verileri kullanılmış, çözüm için ise farklı veri büyütme tekniklerinden evrişimli sinir ağı (CNN), çift yönlü uzun kısa süreli bellek (LSTM) ve çift yönlü kapılı tekrarlayan üniteler (GRU) kullanılmıştır. Yapılan sınıflandırma işlemlerinde ise giriş verilerinde siber zorbalığın ve türünün tespit edilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma işlemlerinde %87 başarı ile SVM algoritması en yüksek performansı verdiği tespit edilmiştir [45].

Tablo 1'de çalışmalarda kullanılan sınıflandırma algoritmaları, kullanılan dil, veri seti, veri setinin eğitim-test-doğrulama yönünden ayrıştırılmasına bağlı olarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Tablo 1. Siber zorbalık tespitine yönelik yapılan bazı çalışmalar

Yapılan Çalışmalar	Çalışma Yılı	Kullanılan Sınıflandırma Algoritmaları	Kullanılan Veri Setleri	Veri Dağılımı Eğitim/Test/Doğrulama	Sonuçlar	Çalışılan Dil
[5]	2018	BLR, RO, Çok katmanlı Algılayıcı J48, SVM	Formspring.me	%70 / %30	BLR, RO	İngilizce
[32]	2018	SVM, RO, MNB	Twitter	%83.4 / %16.6	%75.5 SVM	Bengalce
[33]	2018	NB, SVM, J48, k-NN	Facebook / Twitter	%90 / %10	%95.4 SVM	Bengalce
[34]	2009	SVM, NB, k-NN, YSA	Facebook / Twitter		%98,32 SVM %92,42 NB	İngilizce Arapça
[35]	2013	SVM, NB, Karar Ağaçları	Facebook		%73.4 SVM	Arapça
[36]	2014	NB, SVM, k-NN	Twitter	%93 / %7	%76,78 NB	Arapça
[37]	2018	NB, SVM	Twitter	%80 / %20	%82,06 SVM	İngilizce
[38]	2018	NB, SVM	Twitter	%60 / %20 / %20	%89.54 SVM	İngilizce
[39]	2018	AVOID	Twitter	%50 / %50	%64 AvOID	İngilizce
[40]	2017	SVM	http://www.deli.lt	%80 / %20	%95 SVM	Litvanca
[45]	2018	LSTM, GRU, NB, SVM	Wikipedia	%80 / %10 / %10	%87 SVM	İngilizce

Sonuçlar

Siber zorbalık üzerine yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda literatürde bu alanda birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar, kullanılan dil yapısı, veri seti, sınıflandırma algoritmaları veya veriler üzerinde gerçekleştirilen ön işlemler, eğitim test verilerinin dağılımına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmalarda yukarıda yazılan etkenlere bağlı olarak sınıflandırma algoritmalarının performans değerlerinde değişkenliklerin görülmesiyle birlikte birçok dil yapısında yapılan sınıflandırmalarda SVM algoritmasının en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir [5, 32-34, 38-40, 45]. Arapça dil yapısında ise NB algoritmasının doğruluk oranının yüksek olduğu görülmüştür [34-36].

Her ne kadar bu alandaki çalışma sayısının fazla oluşu sevindirici olsa da siber zorbalık tespitinde yeterli sonuçlara ulaşılmadığı açıktır. Bu çalışmaların etkin sonuçlar verebilmesine yönelik iki öneri sunulmaktadır. Bunlardan birincisi siber zorbalık tespitlerinin anlık olarak gerçekleştirilmesidir. 2020 yılı itibariyle Microsoft firmasının bu yönde her sosyal medya platformuna uygulanabilecek bir çalışma gerçekleştirdiği açıklanmıştır ancak henüz uygulamaya geçilmemiştir. Diğer bir yaklaşım ise siber zorbalık tespiti için kelime analizlerinin

yerine cümle bazında analizlerin yapılması yani kullanılan cümlelerin bir bütün olarak algılanarak siber zorbalık içerip içermemesine bakılmasıdır. Buna yönelik gelecekte siber zorbalık tespitinde daha sağlıklı ve verimli sonuçlar elde etmek amacıyla öncelikle kullanılacak veri kümelerinde duygu analizi yapılarak siber zorbalığın anlık tespit yöntemleri belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi düşünülmektedir.

Kaynaklar

1. Dijilopedi, URL: <https://dijilopedi.com/2019-internet-kullanimi-ve-sosyal-medya-istatistikleri/> (Erişim zamanı; Temmuz, 06, 2019).
2. Bertot, J. C. Jaeger, P. T. Hansen, D. "The Impact Of Polices On Government Social Media Usage: Issues, Challenges, and Recommendations", Government information quarterly, vol. 29, pp. 30-40, 2012.
3. Patel, P. Kannoopatti, K. Shanmugam, B. Azam, S. Yeo, K. C. "A Theoretical Review Of Social Media Usage By Cybercriminals", 2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2017), 5-7 January 2017, Coimbatore, India.
4. A. Aslan, B. O. Doğan, "Çevrimiçi Şiddet: Bir Siber Zorbalık Alanı Olarak "Potinss" Örneği", Marmara İletişim Dergisi, Marmara Journal of Communication, Yıl / Year: 2017, Sayı / Issue:

- 27, ss/pp: 95-119, ISSN: 1300-4050, DOI: 10.17829/midr.20172729524
5. Varol Altay, E. Alataş, B. “ Detection of Cyberbullying in Social Networks Using Machine Learning Methods International Congress on Big Data”, Deep Learning and Fighting Cyber Terrorism, Ankara, Turkey, 3-4 December 2018.
 6. Aksaray, S. “Siber Zorbalık”, Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt 20, Sayı 2, 2011, Sayfa 405-432
 7. Žufić, J. Žajgar, T. Prkić, S. “Children Online Safety”, 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 22-26 May 2017, Opatija, Croatia.
 8. Ravichandran, K. Arulchelvan, S. “The Model of Multilayer perceptron Analysed the Crime News Awareness in India”, 2017 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS-2017), 06-07 January 2017, Coimbatore, India.
 9. Weru, T. Sevilla, J. Oluku, J. Mutegi, L. Mberi, T. “Cyber-smart children, cyber-safe teenagers: Enhancing internet safety for children”, 2017 IST-Africa Week Conference (IST-Africa), Windhoek, 2017, pp. 1-8.
 10. Baştürk Akca, E. Sayımer, İ. “Cyberbullying, It’s Tyeps And Related Factors: An Evaluation Through The Existing Studies”, AJIT-e: Online Academic Journal of Information Technology 2017-Special Issue/Özel Sayı-Cilt/Vol: 8-Sayı/Num:30, <http://www.ajite.org/?menu=pages&p=detailsofarticle&id=285> ., Erişim Tarihi:06.01.2020.
 11. Küçük, S. “Siber Zorbalık Ölçeği Türkçe Uyarlaması”, İstanbul Üniversitesi,Adli Tıp Enstitüsü 2016 , Sosyal Bilimler Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
 12. Öztürk, E. “Cyberbullying Detection Using Text Classification For Turkish Language”, Çukurova University Institute Of Natural And Applied Sciences, Department Of Computer Engineering Adana-2019
 13. E. Baştürk Akca, İ. Sayımer, “Cyberbullying, It’s Tyeps And Related Factors: An Evaluation Through The Existing Studies”, AJIT-e: Online Academic Journal of Information Technology 2017-Special Issue/Özel Sayı-Cilt/Vol: 8-Sayı/Num:30,
 14. Idlebundle, URL: <http://www.idlebundle.com/regression-analysis/> (Erişim zamanı; Aralık, 25, 2019).
 15. Atalay, M. Çelik, E. “Büyük Veri Analizinde Yapay Zekâ Ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi Cilt.9 Sayı.22 2017 - Aralık (s.155-172)
 16. Çürük, E. “Sosyal Ağlardaki Siber Zorbalığın Yapay Zeka Algoritmaları İle Tespiti Ve Sınıflandırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, 2018
 17. Yavuz blog, URL: <https://yavuz.github.io/dogrusal-coklu-dogrusal-polinomsal-regresyonlar/> (Erişim zamanı: Ocak, 03, 2020).
 18. Aydın, C. “Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak İtfaiye İstasyonu İhtiyacının Sınıflandırılması”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 14, S.169-175, Aralık 2018
 19. Medium, URL: <https://medium.com/@k.ulgen90/makine-örenimi-bölüm-5-karar-ağaçları-c90bd7593010> (Erişim zamanı; Aralık, 03, 2019).
 20. Devhunter, URL: <https://devhunteryz.wordpress.com/2018/09/20/rastgele-ormanrandom-forest-algoritmasi/> (Erişim zamanı; Aralık, 03, 2019).
 21. Cömert, Z. “Temel Bileşenler Analizine Genel Bir Bakış”, www.zafercomert.com, Erişim Tarihi:07.01.2020.
 22. Şengöz, N.Özdemir, G. “Temel Bileşenler Analizi Ve K-Ortalama Kümeleme Yönteminin Birlikte Kullanımı: Bir Örnek Uygulama”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi Cilt.8 Sayı.15 2016 - Aralık (s.85-94)
 23. Mustafaakca, URL: <http://mustafaakca.com/k-means-kumeleme-algoritmasi/> (Erişim zamanı; Kasım, 15, 2019).
 24. Erpolat, S. “Otomobil Yetkili Servislerinde Birliktelik Kurallarının Belirlenmesinde Apriori ve FP-Growth Algoritmalarının Karşılaştırılması”, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, Cilt/Vol.:12 -Sayı/No: 1 (151-166)
 25. VBO, URL: <https://www.veribilimiokulu.com/associationrul esanalysis/> (Erişim zamanı; Kasım, 27, 2019).
 26. Sivri, E. Ş. “Veri Madenciliği/E-Ticaret İçin Ürün Tavsiye Sistemi Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı İstanbul - 2015
 27. Ayaz, O.Alp, S. “Saklı Markov Modeli Kullanılarak İstanbul’daki Üniversite Öğrencilerinin GSM Operatör Tercihlerini

- Etkileyen Faktörlerin Analizi”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(4), ss. 203-212, Aralık 2018
28. Haidar, B. Chamoun, M. Serhrouchni, A. “Multilingual Cyberbullying Detection System Detecting Cyberbullying in Arabic Content”, 2017 1st Cyber Security in Networking Conference (CSNet), 18-20 October 2017, Rio de Janeiro, Brazil.
 29. Alduailej, A. H. Khan, M. B. “The challenge of cyberbullying and its automatic detection in Arabic text”, 2017 International Conference on Computer and Applications (ICCA), 6-7 September 2017, Doha, United Arab Emirates.
 30. Şeker, A. Diri, B. Balık, H. H. “Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme”, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017, 3(3): 47-64
 31. Karabatak, S. Namlı, A. Karabatak, M. “Perceptions of High School Students Regarding Cyberbullying and Precautions on Coping with Cyberbullying”, 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS), 22-25 March 2018, Antalya, Turkey.
 32. Hussain, M. G. Al Mahmud, T. Akthar, W. “An Approach to Detect Abusive Bangla Text”, International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET), 27-29 December 2018.
 33. Al-Mamun, A. Akhter, S. “Social Media Bullying Detection Using Machine Learning On Bangla Text”, 10th International Conference on Electrical and Computer Engineering, 20-22 December 2018, Dhaka, Bangladesh.
 34. El-Halees, A. “Filtering Spam E-Mail from Mixed Arabic and English Messages: A Comparison of Machine Learning Techniques”, The International Arab Journal of Information Technology, vol. 6, no. 1, 2009.
 35. Hamouda, A. E.-D. A. El-zahraa El-taher, F. “Sentiment Analyzer for Arabic Comments System”, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 4, no. 3, 2013.
 36. Duwairi, R. M. Marji, R. Sha'ban, N. Rushaidat, S. “Sentiment Analysis in Arabic Tweets”, 5th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 2014.
 37. Sintaha, M. Mostakim, M. “An Empirical Study and Analysis of the Machine Learning Algorithms Used in Detecting Cyberbullying in Social Media”, 2018 21st International Conference of Computer and Information Technology (ICCIT), 21-23 December 2018.
 38. Shekhar, A. Mathangi, V. “A Bag-of-Phonetic-Codes Model for Cyber-Bullying Detection in Twitter.”, 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT) (2018): 1-7.
 39. Zois, D. S. Kapodistria, A. Yao, M. Chelms, C. “Optimal Online Cyberbullying Detection”, 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 15-20 April 2018, Calgary, AB, Canada.
 40. Venckauskas, A. Karpavicius, A. Damaševičius, R. Marcinkevičius, R. Kapočiūte-Dzikiėnė, J. Napoli, C. “Open Class Authorship Attribution of Lithuanian Internet Comments using One-Class Classifier”, 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 3-6 September 2017, Prague, Czech Republic.
 41. Egitimperia, URL: <https://www.egitimperia.com/instagramdan-siber-zorbaliga-karsi-yeni-onlemler/> (Erişim zamanı; Haziran, 23, 2019).
 42. Burnap, P. Williams, M. “Cyber Hate Speech on Twitter: An Application of Machine Classification and Statistical Modeling for Policy and Decision Making”, Policy & Internet, vol. 7, no. 2, pp. 223-242.
 43. Alduailej, A. H. Khan, M. B. “The challenge of cyberbullying and its automatic detection in Arabic text”, 2017 International Conference on Computer and Applications (ICCA), 6-7 September 2017, Doha, United Arab Emirates.
 44. Arlı, K. “Instagram Siber Zorbalık İçin Yeni Önlemler Aldı”, <https://shiftdelete.net/instagram-siber-zorbalik-icin-yeni-onlemler-aldi> (Erişim zamanı; Mayıs, 06, 2019).
 45. Ibrahim, M. Toriki, M. El-Makky, N. “Imbalanced Toxic Comments Classification Using Data Augmentation and Deep Learning”, 2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 17-20 Dec. 2018, Orlando, FL, USA

Hesapsal Zekâ Yöntemleri ile İnsansız Hava Araçları için Rota Planlaması

Route Planning for Unmanned Aerial Vehicles with Computational Intelligence Methods

İlhan AYDIN

Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ
iaydin@firat.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6880-4935

Gökhan ALTUN

Bitlis Eren Üniversitesi Bilgisayar Programcılığı, Bitlis
galtun@beu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8039-5764

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 13 Mart 2020
Düzeltilme: 3 Temmuz 2020
Kabul: 12 Temmuz 2020

Anahtar kelimeler:

IHA Rota Planlaması, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Diferansiyel Gelişim Algoritma

ÖZET

Bu çalışma insansız hava araçların rotalarının yazılımsal olarak belirlenmesini amaçlamaktadır. İnsansız hava araçları günümüzde keşif, arama kurtarma, hasar tespiti gibi alanların yanında insanlar için bulunulması tehlikeli ortamlarda yapılacak görevlerde kullanılabilir. Günümüzde farklı alanlarda yaygın olarak kullanılan İnsansız hava araçları için donanım ve yazılım alanında ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmaların büyük bir kısmı donanım üzerine yapılmaktadır. Ancak bu çalışma İnsansız Hava Araçları için yazılım geliştirme üzerine olacaktır. Çalışmanın amacı İnsansız Hava Araçları için rota planlaması ve simülasyon ortamının geliştirilmesidir. Rotanın hesaplanma maliyeti yüksek olduğundan dolayı literatürde rota planlama işlemi NP-Zor problemler sınıfına girmektedir. Yapılacak olan çalışmada rota planlaması için meta sezgisel algoritma yaklaşımları kullanılacaktır. Amaç işlem süresini düşürmek ve maliyet verimliliğini en üst seviyeye çıkarmaktır. Çalışmada birden fazla meta sezgisel algoritma yöntemi kullanılarak rota planlaması yapılırken, görev yapacağı saha yapısı, engeller ve tehlikeli bölgeler dikkate alınarak en uygun rota planlaması yapılacaktır. Rota planlaması yapılırken amaç güvenli ve en kısa mesafenin hesaplanması olacaktır.

Doi: 10.24012/dumf.860192

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 March 2020
Revised: 3 July 2020
Accepted: 12 July 2020

Keywords:

UAV Path Planning, Particle Swarm Optimization, Differential Evolution

ABSTRACT

This study purpose to calculating best route plan for Unmanned aerial vehicle. Today, unmanned aerial vehicles can be used in areas such as reconnaissance, search and rescue, damage detection, as well as in missions that are dangerous for people. Today, serious studies are carried out in the field of hardware and software for unmanned aerial vehicles, which are widely used in different fields. Most of the work is done on hardware. However, this study will be on software development for Unmanned Aerial Vehicles. The aim of the study is to develop route planning and simulation environment for Unmanned Aerial Vehicles. In the literature, route planning is included in the non-deterministic polynomial-time hardness problems class because the route has a high calculation cost. Meta heuristic algorithm approaches will be used for route planning. The aim is to reduce processing time and maximize cost efficiency. While planning a route using more than one meta-heuristic algorithm method, the most appropriate route planning will be made considering the field structure, obstacles and hazardous areas. The purpose of route planning is to calculate the safe and shortest distance.

* Sorumlu yazar / Correspondence
İlhan AYDIN
✉ iaydin@firat.edu.tr

Giriş

İçinde pilot ve yolcu bulundurmaksızın, uzaktan kumanda veya otomatik kontrol sistemleri kullanılarak kontrol edilmek sureti ile uçurulabilen hava araçları İnsansız Hava Aracı (İHA) olarak adlandırılır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte temelleri 17. yüzyıla dayanan İnsansız Hava Araçları (İHA) için donanım ve yazılım anlamında büyük mesafe kat edilmiştir. İnsan-lı Hava Araçlarına göre kullanımı ve maliyeti daha düşük olan İnsan-sız Hava araçları, pilot ihtiyacının olmaması, kullanım kolaylığı ve maliyeti düşük olması tercih sebebi olmuştur. İnsansız Hava Araçlarının son yıllarda askeri ve sivil alanlarda kullanımı oldukça artmıştır. Askeri alanlarda keşif, gözlem, istihbarat toplama ve sınır güvenliği gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Sivil alanlarda ise haritacılık, fotoğrafçılık, doğal afetler, arama-kurtarma ve meteoroloji gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır.

Kullanım alanının genişlemesiyle İnsansız Hava Araçlarına yönelik farklı ihtiyaçlar da ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaçlardan biri de İnsansız Hava Araçlarının otonom olarak kullanılmasıdır. Otonom kullanımın amacı, bir insana bağlı kalmadan tanımlanan görevi başarı ile yerine getirebilmektir. İnsan kaynaklı yaşanabilecek hataları minimuma indirmektir. İnsansız Hava Araçlarının otonom olarak kullanılabilmesi için birçok parametre bulunmaktadır. Sistemin otonom olarak görev yapmasını desteklemek amacı ile ilk adımlardan biri güzergâh/rota 'nün planlanmasıdır. Rota/Güzergâh planlama işlemi; başlangıç ve bitiş noktası belli olan, üzerinden geçilecek noktaların veya üzerinden geçilmeyecek nokta ve bölgelerin (yükselti, hava savunma sistemi, yoğun bulut kütlesi vs.) bulunduğu, zaman ve yakıt gibi maliyetlerinde en alt seviyede tutulmaya çalışıldığı bir hesaplama problemdir. Problemin çözümünde işlem sayısı verilerin/noktaların üssel kuvveti şeklinde bir denklem ile ifade edilmektedir. Üssel kuvvet ile ifade edilen problemler "Zor Problem" sınıfına girmektedir [1]. Rota/Güzergâh planlama

problemlerin çözümlenmesi için matematiksel modeller ve bilgisayar teknolojileri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımın temeli 19. Yüzyıla dayanmaktadır. Günümüze kadar birçok çalışmanın yapıldığı bu problem, literatürde Gezin Satıcı Problemi (GSP) ve Araç Rota Problemi (ARP) gibi başlıklar altında incelenmiştir. Her ne kadar yapılan çalışmalar ile Rota/Güzergâh planlama problemlerine çeşitli çözümler bulunmuş olsa da İnsansız Hava Araçları için rota/güzergâh planlama problemi GSP ve ARP gibi diğer problem çözümlerinin dahilinde bulunmayan, uçuş yüksekliği, geçilmemesi gereken bölgeler, çeşitli doğa koşulları, coğrafik oluşumlar ve teknolojik kapasiteler gibi ilave kısıtlar barındırmaktadır.

İHA için rota/güzergâh planlaması alanında ulusal ve uluslararası yapılan TSP, ARP ve bağımsız rota/güzergâh çalışmalarında kullanılan modeller, stratejiler ve algoritma konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Q. Geng ve Z. Zhao yapmış oldukları çalışmada İHA'lar için 3 boyutlu seyir rotasını 2 boyutlu yapıya dönüştürerek, Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması (Improved Particle Swarm Optimization Algorithm) kullanımı ile rota belirleme problemine çözüm üretmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmalarda küresel optimum çözüm ile yakınsama oranı arasında çelişki olduğunu öne sürmekte ve algoritmanın yakınsama hızında iyileştirme yapılması öne sürülmektedir. İlgili makalede genetik düşünceye dayanan kasılma faktörü ile geliştirilmiş bir hibrid parçacık sürüsü kullanılmıştır. Problemin modellenmesinde ve çözümünde grid haritalama metodu kullanılmıştır [2]. P. Behnck ve arkadaşları Çoklu Gezin Satıcı Problemini (mTPS) ele almışlar ve İHA lara uyarlamışlardır. Problem çözüm bulmak için Simüle Tavlama algoritmasını kullanarak bir çerçeve önermektedir. Bu çalışmanın amacı, iki farklı türde ve onlar ile ilişkili olan İHA'lar için durum incelemesi yapmaktadır. Çalışmada, beraber uçuş gerçekleştiren birden çok İHA için uygun

rotaların belirlenmesi ile uğrama noktalarının tamamının (Ulaşılması gereken noktalar) daha etkili taranması ve uğrak noktalar ile ilgili İHA'ların eşleştirilmesinin otonom olarak yapılması amaçlanmaktadır[3]. P. You ve arkadaşları çalışmalarında Dinamik Aslan Karınca algoritmasını kullanarak İHA'lar için 2 boyuta indirgenmiş ortamında rota planlama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Karınca aslan algoritması rota planlaması için bazı stratejik iyileştirmeler yapılarak Dinamik Karınca Aslan Optimizasyon Algoritma yöntemi elde edilmiştir. Yapılan çalışmada stratejik güncelleme Levy Flight yaklaşımının Aslan Karınca Algoritmasına uyarlanması ile sağlanmaktadır. Amaç yerel en iyileme problemini aşmaktır [4].

V. Çavuş ve A. Tuncer çalışmalarında 2 boyutlu ortamda Yapay Arı Kolonisi Algoritmasını kullanarak İHA'lar için rota/güzergâh planlaması çalışması yapmışlardır. Çalışmada İHA'ların yerden yüksekliklerin ve yükselme açıların ayarlanması ile engellerden kaçınması ve hedefe ulaştırılması amaçlanmıştır [5].

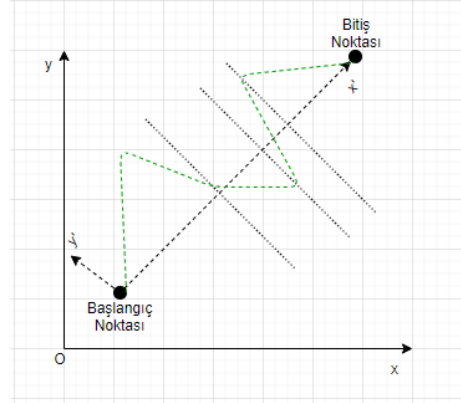
Bu çalışmada problemin çözümü için saha üzerinde arama modeli olarak Sanal Doğru Tabanlı arama modeli kullanılmıştır. Rotanın oluşturulması için Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Diferansiyel Gelişim Algoritması kullanılmıştır. Çalışma otonom İHA kullanımı ile hesaplama sürelerini kısaltarak ve en uygun rotayı belirleyerek kullanılan kaynaklardan daha etkili faydalanmayı, böylelikle İHA'ların havada kalma sürelerini artırmayı öngörmektedir.

Benzetim ve Yöntemler

Rota oluşturmak için saha üzerinde arama modeli

Rota/Güzergâh planlaması yapılırken kullanılacak olan hesapsal zekâ yöntemleri algoritmalarının seçimi, uyarlanacak arama stratejisi hesaplama süresi, algoritmanın doğru uygulanma kısıtları (Kodlama kısıtları), çıktı sonucunun performansı gibi birçok noktaya doğrudan etki etmektedir. Bu sebepten dolayı tercih edilecek olan arama stratejisi oldukça

önemlidir. Bu çalışmada Sanal Doğru Tabanlı Arama modeli kullanılacaktır. Sanal Doğru Tabanlı Arama modeli uygulanırken, belirlenmiş başlangıç noktasından belirlenmiş bitiş noktasını doğrusal bir çizgi çizilir. Çizilen bu doğru sanal bir koordinat sisteminin x eksenini olarak varsayılır. Şekil 1 de görüldüğü gibi yeni koordinat sisteminde eksenler x' ve y'



Şekil 1- Sanal doğru tabanlı arama modeli

olarak ifade edilir. Çalışma alanı, yeni koordinat sistemidir. Bu koordinat sisteminde hareket başlangıç noktası olarak belirlenen nokta artık koordinat sisteminin orijini olarak kabul edilir ve başlangıç noktasının koordinatı (0,0) olarak kabul edilir. Böylece sanal bir arama uzayı da oluşmuş olur. Arama algoritması işlemleri sanal arama uzayı üzerinden gerçekleştirir. Sanal koordinat sisteminde arama mantığı, x' üzerinden rastgele n adet nokta seçilir ve x' eksenini n+1 parçaya bölünür. Belirlenen n adet nokta hedefe ulaşmak için kullanılacak olan kırılma noktalarıdır. Belirlenen n adet nokta referans alınarak y' ekseninde arama algoritması yardımıyla noktalar belirlenmeye çalışılır. Belirlenen noktaların birleştirilmesi ile rota belirlenmiş olur.

Diferansiyel gelişim algoritması

Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) 1995 yılında Price ve Storn tarafından geliştirilmiştir. Veri kümesinin sürekli olduğu problemler için başarılı sonuç veren popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir [6]. Doğrusal olmayan ve sürekli fonksiyonları minimum etmek için kullanılan sezgisel algoritma yaklaşımıdır. Bu algoritma yaklaşımının temelleri Genetik

Algoritmaya (GA) dayanmaktadır. Genetik Algoritmada (GA) olduğu gibi popülasyon temelli olduğu için çözüm uzayının birçok noktasında aynı anda araştırma yapmaktadır. DGA da yeni bireylerin oluşturulması için kullanılan operatörler GA' daki çaprazlama, mutasyon ve seçim yöntemleridir. GA da operatörler ikili kodlamaya uygulanırken, DGA da gerçek değerlere uygulandığı için seçme, mutasyon ve çaprazlama yöntemlerinde farklılıklar mevcuttur. Ayrıca DGA da operatörler tüm bireylere uygulanmaktadır.

DGA çalışma yapısında seçilen birey ile birlikte rastgele üç birey daha seçilir ve operatörler bu bireylere uygulanır ve yeni bireyler elde edilmeye çalışılır. Mevcut birey ile yeni oluşan birey karşılaştırılarak uygunluğu daha iyi olan, yeni birey olarak bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır.

Temel kavramlar

Anlaşılması ve uygulanması oldukça basit olan Diferansiyel Gelişim Algoritması lineer ve non-lineer problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar vermektedir. Problemin DGA ya uyarlanmasında kullanılacak olan parametreler;

NP	Popülasyon büyüklüğü $NP \geq 4$ (1,2,3,4, ..., i)
D	Değişken Sayısı (1,2,3,4, ..., j)
CR	Çaprazlama Oranı [0.1, 1.0]
G	Jenerasyon (1,2,3, ..., Gmax)
F	Ölçeklendirme faktörü
$r_{1,2,3}$	Yeni kromozomun üretilmesinde kullanılacak rasgele seçilmiş kromozomlar $r_{1,2,3}$
$x_{j,i,G}$	G jenerasyonunun i. elemanının j. geni (parametresi)
$n_{j,i,G+1}$	Mutasyon ve çaprazlamaya tabi tutuluş ara kromozom
$u_{j,i,G+1}$	$x_{j,i,G}$ den sonraki jenerasyon(G) için üretilmiş olan kromozom (yani yeni kromozom)
$x_j(l), x_j(u)$	Değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri

şeklinde ifade edilmektedir. Optimizasyon problemleri genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [7].

$$\text{Minimize } f(x) \quad (1)$$

$$\text{Kısıtlar } \begin{cases} g_k(x) \leq 0 \\ x_j^{(l)} \leq x_j \leq x_j^{(u)} \quad j = 1,2,3, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

$f(x)$ amaç fonksiyonu, $g_k(x)$ kısıtlar seti ve x gerçek değerli değişken setidir.

DGA da başlangıç popülasyonu alt ve üst sınır değerleri kullanılarak rastgele sayılar üretilir.

Kullanılan formül;

$$\forall i \leq NP \wedge \forall j \leq D :$$

$$x_{j,i,G} = x_j^{(l)} + rand[0,1] \cdot (x_j^{(u)} - x_j^{(l)}) \quad (3)$$

şeklinde. İlk oluşturulacak olan popülasyon üyeleri alt ve üst sınır farkının sıfır ve bir arasında rastgele seçilen bir rasyonel sayı ile çarpılması sonucu çıkan değer alt sınır değeri ile toplanmasıyla elde edilir. Formülde de belirtildiği üzere i popülasyondaki elemanı yani kromozomu, j değeri de kromozomdaki geni yani değişkeni ifade eder.

Oluşturulan popülasyon üyeleri üzerinde GA olduğu gibi Mutasyon, Çaprazlama ve Seçim yöntemleri kullanılarak yeni popülasyon oluşturulacak ve bu işlem iterasyonun tamamlanmasına kadar veya bitirme kriterine ulaşılan kadar devam edecektir.

Mutasyon

Mutasyon işlemi, kromozom da ki rastgele seçilmiş olan gen veya genler üzerinde yapılan değişiklik işlemidir. Mutasyon işleminin amacı çözüm uzayında yerel minimum sendromuna yakalanmama veya kurtulmaktır.

DGA mutasyon işlemi GA dan farklı olarak işlemektedir. Burada işlemin yapılacağı kromozom ile birlikte üç tane rastgele kromozom (r_1, r_2, r_3) daha seçilir. Mutasyon işleminde kullanılacak olan formül;

$$\forall j \leq D: n_{j,i,G+1} = x_{j,r_3,G+1} + F \cdot (x_{j,r_1,G} - x_{j,r_2,G}) \quad (4)$$

şeklinde. Burada işlemin yapıldığı kromozomun tüm genlerine uygulanır.

Çaprazlama

Çaprazlama işlemi üzerinde çalışılan kromozom ve mutasyon işlemi sonrası oluşan yeni kromozomun genleri üzerinde seçim yapılarak uygulanmaktadır. Yapılacak olan seçim işlemi çaprazlama katsayı olarak belirlenmiş olan CR değeri ile [0,1] arasında rastgele üretilen sayı karşılaştırılır. Eğer CR değeri büyük veya eşit ise mutasyona uğramış olan kromozomun geni kullanılır. Çaprazlama işlemi için kullanılan formül;

$\forall j \leq D:$

$$x_{j,i,G+1} \begin{cases} x_{j,n,G+1} & \text{eğer } rand[0,1] \leq CR \vee j = j_{rand} \\ x_{j,i,G} & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (5)$$

şekindedir. Formülde çaprazlama katsayısı ile birlikte $j = j_{rand}$ şeklinde bir ifade kullanılmıştır. Bunun amacı en az bir genin değişimini garanti altına almak içindir.

Seçim

Mutasyon ve çaprazlama operatörlerinin uygulanmasından sonra oluşan yeni kromozom ile popülasyondaki mevcut kromozomun $f(x)$ fonksiyonunda (amaç fonksiyonu) ki değerler karşılaştırılarak sonuca yakın olan kromozom seçilir. Seçim yöntemi için kullanılan formül

$$\forall i \leq NP: x_{i,G+1} = \begin{cases} x_{u,G+1} & \text{eğer } f(x_{u,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (6)$$

şekindedir.

Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), 1995 yılında R.C. Eberhart ve J. Kennedy tarafından kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek oluşturulmuş, popülasyon temelli bir optimizasyon algoritmasıdır [8]. Bilindiği üzere sürü halinde hareket eden canlılar(kuş, balık gibi) yiyecek kaynağı bulmak veya avcılardan kaçmak gibi çeşitli durumlar için etkileşim halinde sürü davranışları sergilemektedir. Algoritma sürü halinde hareket eden hayvanların bu davranışlarından yola çıkılarak optimizasyon gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır.

Bu algoritma da bir sürü ve sürüyü oluşturan bireylerin hareketleri üzerinde çözüm arar. Bireyler parçacık olarak, sürüde popülasyon olarak adlandırılır. Her parçacığın kendine ait konum/değer ve hız vektörü vardır. Parçacık konum/değer bilgisi ve hız vektörü kullanılarak çözüm uzayında arama yapar. Uzay içindeki herhangi bir parçacığın(bireyin) çözüme olan yakınlığı, uygunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenir. Daha sonra belirlenen bu değerler en uygun çözümün bulunmasında kullanılır.

PSO metodu

Sistem başlangıçta rastgele çözümlerden oluşan bir popülasyon ile başlar. Verilen iterasyon veya kısıt boyunca popülasyondaki parçacıklar güncellenerek en iyi çözümü ararlar. Popülasyondaki parçacıkların çözüm aradığı süre boyunca yaklaştıkları en iyi çözüm yerel en iyi (pbest*) olarak belirlenir. Her popülasyonda elde edilen yerel en iyi değerler arasındaki en iyi değer küresel en iyi (gbest*) olarak belirlenir. Parçacıkların konumu/değeri, hız bilgileri ve belirlenmiş olan yerel en iyi (pbest*) ile küresel en iyi (gbest*) değerleri kullanılarak çözüme yaklaşımları sağlanır.

Parçacıkların konum/değer ve hız değişimleri;

x	Parçacığın konumu veya değeri,
v	Parçacığın hızı,
c1, c2	0 ve 2 arasında seçilen sabit değerler,
rand1,	0 – 1 aralığında rastgele üretilen
rand2	değerler,
pbest	Popülasyon içerisinde çözüme en yakın parçacık,
gbest	Süreç boyunca tüm popülasyonlardaki çözüme en yakın parçacığı temsil eder,
n	Popülasyondaki parçacık sayısı,
d	İterasyon sayısı,
i	Popülasyondaki parçacığı temsil eder.

Parçacığın hızı aşağıdaki formül ile güncellenir;

$$v_{i+1} = v_i + c1 * rand1 * (pbest - x_i) + c2 * rand2 * (gbest - x_i) \quad (7)$$

formülü kullanılmaktadır. Parçacığın konumu/değeri formül 8'deki hız vektörü kullanılarak güncellenir.

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1}$$

(8) sistemindeki karşılıkları (x'_{pi}, y'_{pi}) ile ifade edilirse kullanılacak olan formül;

Yöntemlerin Uyarlanması

Kullanılan arama stratejisi modelinde sanal koordinat sistemi kullanılmaktadır. Yani iç içe geçmiş iki farklı koordinat sistemi kullanılmaktadır. Gerçek koordinat sistemi ile oluşturulan sanal koordinat sistemine ait orijinlerin ve eğimlerin farklı olmasından dolayı elde edilen koordinat değerleri gerçek koordinat sistemindeki değerleri temsil etmemektedir. Bu sebeple sanal koordinat değerlerin, gerçek koordinat değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için analitik geometri formülleri kullanılarak dönüşümler formüle edilmiştir.

Simülasyon ortamı ilk oluşturulduğunda gerçek koordinat sisteminde başlangıç, bitiş noktaları ve kaçınılacak bölgeler kullanıcı tarafından programa tanımlanmaktadır. Tanımlama işlemi, başlangıç ve bitiş noktası bilgisayar faresi aracılığı ile grid üzerinden işaretlenmektedir. Kaçınılacak bölgeler ise dairesel olarak ifade edilmekte ve dairelerin çap bilgisi alınmaktadır.

Gerçek koordinat sisteminden sanal koordinat sistemine dönüşüm için öncelikle başlangıç ve bitiş noktasının birleşiminden oluşan x' ve y' koordinatının eğimi (9) ve (10) formüllerindeki gibidir.

$$m_x = \frac{(y_{target} - y_{start})}{(x_{target} - x_{start})} \quad (9)$$

$$m_y = (-1) \cdot \frac{x_{target} - x_{start}}{y_{target} - y_{start}} \quad (10)$$

Başlangıç noktası sanal koordinat sisteminde (0,0) olarak tanımlıdır. Bitiş noktası ise x' eksenindeki değeri, başlangıç ve bitiş noktası arasındaki mesafeye denk gelir. Bitiş noktasının sanal koordinatta konumu (0,d) şeklindedir. Bu değer için;

$$d = \frac{\sqrt{(x_{target} - x_{start})^2}}{(y_{target} - y_{start})} \quad (11)$$

formülü kullanılır. Koordinat sistemi üzerinde bulunan bir noktanın (x, y) sanal koordinat

$$x'_{pi} = \frac{|m_y \cdot x_i - y_i + (y_{start} - m_y \cdot x_{start})|}{\sqrt{m_y^2 + 1}} \quad (12)$$

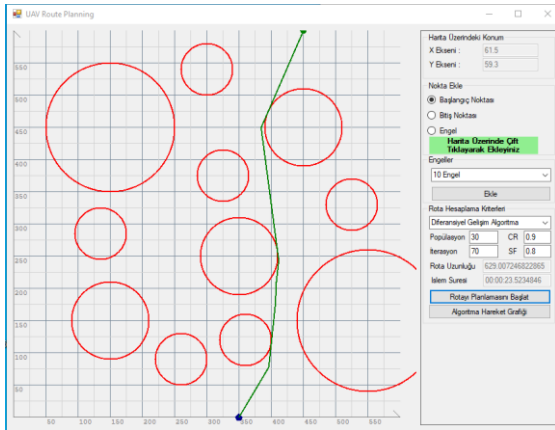
$$y'_{pi} = \frac{|m_x \cdot x_i - y_i + (y_{start} - m_x \cdot x_{start})|}{\sqrt{m_x^2 + 1}} \quad (13)$$

şeklindedir. Simülasyon ortamındaki tüm veriler sanal koordinat sistemine aktarıldıktan sonra hesapsal zekâ yöntemleri algoritmalarının uyarlanması oldukça basit olacaktır. Yeni oluşturulmuş olan çözüm uzayında arama yaparak küresel minimumu bulmaya çalışacaktır. Simülasyon ortamında tanımlanan nesnelere sanal koordinat sisteminde de karşılığı hesaplandıktan sonra bir sonraki adım hesapsal zekâ yöntemleri algoritmalarının probleme uyarlanması ve amaç fonksiyonunun belirlenmesidir. Uygulama dâhilinde, Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması(PSO) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması(DGA) olmak üzere iki farklı algoritma yaklaşımı kullanarak rota/güzergâh hesaplaması yapmaktadır. Arama modeline göre algoritmalar x' üzerinde seçilen n adet nokta için y' ekseninde arama işlemi yapılacaktır. Yani algoritmalar n nokta için y' ekseninde değerler arayarak amaç fonksiyonunda minimum değere ulaşmaya çalışacaktır.

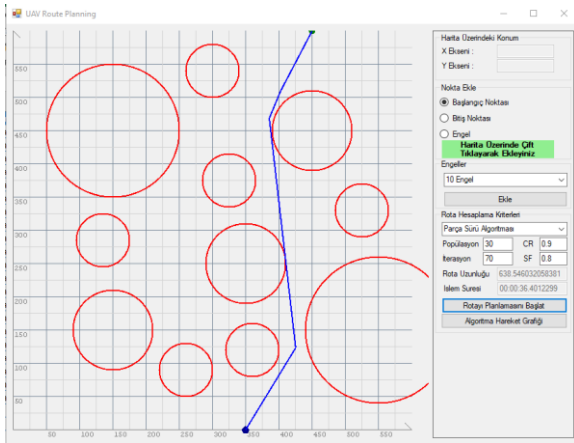
Uygulama

İHA'ların rota/güzergâh problemi çözümü için geliştirilen uygulama C# programlama dili kullanılarak .Net ortamında geliştirilmiştir. Editör olarak Visual Studio 2017 kullanılmıştır. Oluşturulan simülasyon sahasına ait koordinat sistemi 600*600 ölçülerindedir. Böylece 360000 br2 lik bir çalışma alanı sunmaktadır. Saha üzerinde engeller daire şekilleri ile temsil edilmektedir. Engellerin sayısı ve ölçüleri kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Ekranın sağ tarafındaki menü yardımı ile sahaya eklenecek olan parçacığın seçimi, rotanın hesaplanması için kullanılacak olan optimizasyon yöntemi ve ayarlamaları yapılabilmektedir Seçilen

algoritmanın popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısı kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Algoritma parametreleri olan çaprazlama oranı ve ölçeklendirme faktörü değerleri varsayımsal olarak 0.9 ve 0.8 olarak tanımlanmıştır. Kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Oluşturulan her saha için seçilecek olan algoritma ve parametrelerine göre arama işlemi gerçekleştirilmektedir. Uygulama üzerinde yapılan testlere ait DGA ve PSO için bir ekran çıktısı Şekil 2 ve Şekil 3 te verilmiştir.



Şekil 2- DGA ile Rota Tespiti



Şekil 3- PSO Rota Tespiti

Uygulamanın çalıştırılması birkaç adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar şöyledir; kullanıcı tarafından başlangıç ve bitiş noktaları belirlenmesi, rotanın belirleneceği saha üzerindeki yasaklı bölgeler belirlenmesi, arama işlemi için kullanılacak algoritmanın seçilmesi ve son olarak algoritma parametrelerinin tanımlanmasıdır. Uygulama öncelikli olarak

oluşturulacak olan rotada tek kırılma noktası olacak şekilde bir problem çözümü oluşturmayı hedefler. Uygun bir rota/güzergâh tespit edilemez ise kırılma noktasının sayısı arttırılır. Bu işlem, rota üzerindeki kırılma noktası sayısı engel sayısına eşit olana kadar devam eder. Uygulamanın sonlandırma kriterlerinden bir diğeri, uygulama tarafından oluşturulan çözüme ait amaç fonksiyon çıktı değeri ile başlangıç ve bitiş noktalarının kuş bakışı mesafesinin 1005/1000 değerine eşit veya küçük olma koşuludur. Eğer bu ölçüt sağlamaz ise kullanılan algoritma iterasyon sayısına ulaşınca en iyi sonucu sunar.

Uygulama Çıktısı

Geliştirilen uygulama üzerinde farklı boyut ve engel sayısının bulunduğu arazi yapısı üzerinde algoritmalar test edilmiştir. Testler aynı durum için çok kez çalıştırılmıştır. Uygulamamız i5-6400 işlemci ve 8.00 GB hafızalı bir bilgisayarda üzerinde çalıştırılmıştır.

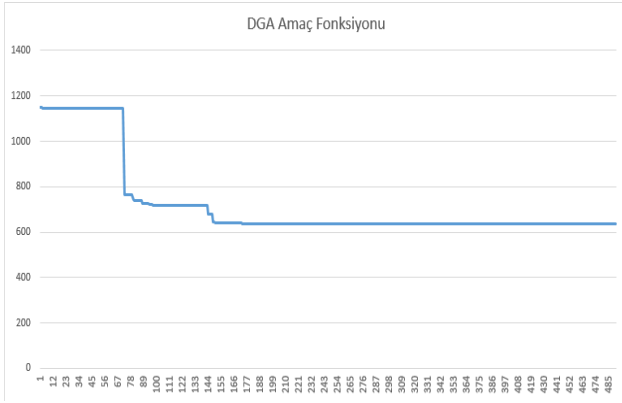
Farklı boyutta on bir engelin bulunduğu bir arazi yapısında oluşturulmuştur. Başlangıç ve bitiş noktasının kuş bakışı uzaklığı 608.276 br dir. Engelleri ihlal etmeden en iyi rotanın hesaplanması amacıyla PSO ve DGA algoritmaları defalarca çalıştırılmış ve elde edilen veriler Tablo 1 de sunulmuştur.

Arazi yapısının farklı boyuttaki yedi engelden oluşan durum için DGA'nın oluşturmuş olduğu yol Şekil 4 de gösterilmiştir. Başlangıç ve bitiş noktasının kuş bakışı uzaklığı 604.152 br dir. DGA ile oluşturulan en kısa mesafe 637.082 br olarak hesaplanmıştır. İşlem süresi 4.948sn sürmüştür. Hesaplama işlemi gerçekleştirilirken kırılma noktalarının sayısı engel sayısına ulaşana kadar devam eder ve bu süreç içerisinde en kısa mesafe tutulur. Şekil 5 te algoritmanın amaç fonksiyonundaki değişimler görünmektedir. En kısa uçuş mesafesi, uçuş rota üzerinde 3 kırılma noktasının bulunduğu arama durumunda belirlenmiştir.

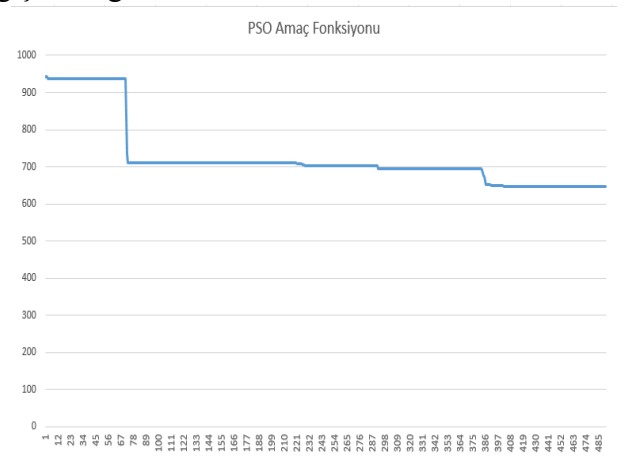
Algoritma	Ortalama Rota Uzunluğu	En Kısa Rota Mesafe	En Uzun Rota Mesafesi	Ortalama Hesaplama Süresi	En İyi Hesaplama Süresi	En Uzun Hesaplama Süresi
DGA	648.698 br	628.915 br	673.698 br	17.7 sn	14.4 sn	19.7 sn
PSO	657.360 br	635.775 br	679.758 br	40.8 sn	35.2 sn	49.4 sn

Tablo 1- Algoritma Performans Tablosu

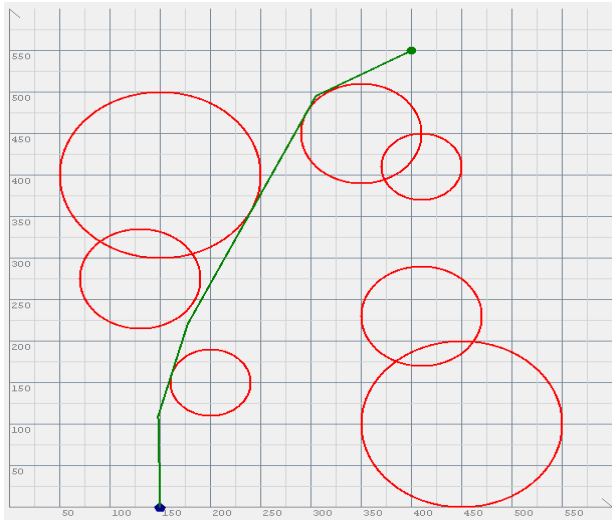
Şekil 6'da algoritmanın amaç fonksiyonundaki değişimler görünmektedir.



Şekil 4-DGA Yakınsama Grafiği



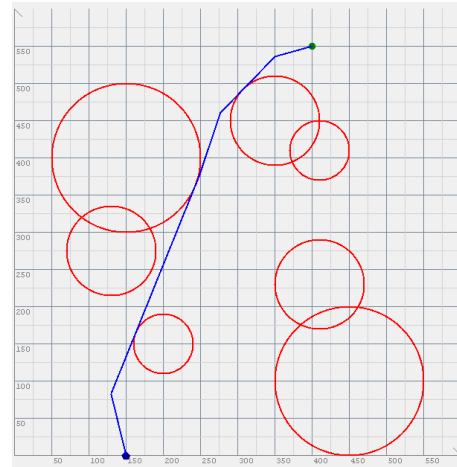
Şekil 6- DGA ile En Kısa Yol



Şekil 5-PSO ile En Kısa Yol

Benzer arazi yapısı ile PSO nun oluşturmuş olduğu yol Şekil 7 de gösterilmiştir. PSO ile oluşturulan en kısa mesafe 647.931 br olarak hesaplanmıştır. İşlem süresi 11.610 sn sürmüştür.

Kırılma noktasının sayısı arttıkça başlangıçtaki mesafe pik çekmekte ve iterasyon sürecince en küçük değere doğru gitmektedir. Farklı sayılarda kırılma noktası ile de iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da en kısa mesafe 3 kırılma noktasının olduğu arama sürecinde ulaşılmıştır.



Şekil 7-PSO Yakınsama Grafiği

İHA lar için rota hesaplama probleminde rota uzunluğu kadar rotanın hesaplanma süreside oldukça önemlidir. Otonom uçuşların desteklenmesi için karar verme yapılarının hızlı çalışması gerekmektedir. Farklı boyuttaki engelin bulunduğu saha yapısında PSO ve DGA algoritmalarını çıktısı sonuçları incelendiği zaman DGA'nın ortalama süresi, alt ve üst sınırlar da göz önünde bulundurulduğunda başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Sonuç

İnsansız Hava Araçları için rota planlama yakıt tüketimi açısından, gidilen mesafe açısından veya havada kalma süresi açısından doğrudan etkili olduğu için önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada otonom yapıyı destekleme amacı ile yoğun bir arazi yapısında hızlı karar verebilme ve verimlilikleri en üst seviyede tutmak açısından Hesapsal Zekâ yöntemleri ile rota planlama çalışması yapılmıştır. Saha taraması için sanal doğru tabanlı arama modeli kullanılmıştır. Bu sayede algoritma en iyi çözümü bulmak amacıyla kırılma noktalarını dinamik olarak belirlemektedir [9]. Algoritma yaklaşımı olarak PSO ve DGA algoritmaları kullanılmıştır. Deney sonuçlarında görülmüştür ki DGA hesaplama süresi açısından başarılı sonuçlar vermektedir. Aynı zamanda DGA'nın hesaplamış olduğu rota uzunluğu da başlangıç ve bitiş noktası arasındaki kuş bakışı mesafeye en yakın sonuçlardır. Gelecek çalışmalarda İHA'ların hareket halinde iken fark edilecek engel veya tehlikeli bölgeler göz önünde bulundurularak hızlı bir şekilde rotanın güncellenmesi ve simülasyon ortamının üç boyutlu ortama aktarılması üzerinde çalışılacaktır.

Kaynaklar

- [1] B.Pakan, M.Ermiş (2010). İnsansız Hava Araçlarının Genetik Algoritma Yöntemiyle Çoklu Hedeflere Planlaması. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 4(3), 77 -84
- [2] Geng Q., Zhao Z. (2013). A Kind of Route Planning Method for UAV Based on Improved PSO Algorithm, 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)

- [3] Behnck L.P., Doering D., Pereira C.E., Rettberg A. (2015). A Modified Simulated Annealing Algorithm for SUAVs Path Planning, IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier
- [4] Yao P., Wang H. (2016). Dynamic Adaptive Ant Lion Optimizer applied to route planning for unmanned aerial vehicle, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [5] V. Çavuş, A. Tuncer (2017). İnsansız Hava Araçları İçin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Rota Planlama, Karaelmas Fen ve Müh. Derg. 7(1):259-265
- [6] T. Keskintürk, (2006). Diferansiyel Gelişim Algoritması, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 5(9), 85 -99
- [7] Shiakolos P.S., Koladiye D., Kebrle J. (2005). On The Optimum Synthesis of Six-Bar Linkages Using Differential Evolution and The Geometric Centroid of Precision Positions Technique, Mechanism and Machine Theory, 40(3), 319 – 335.
- [8] R.C. Eberhart and J. Kennedy (1995). A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, Symposium on Micro Machine and Human Science, Japan: Nagoya, Piscataway, NJ
- [9] V. Çavuş, A. Tuncer (2017). İnsansız Hava Araçları İçin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Rota Planlama, Karaelmas Fen ve Müh. Derg. 7(1):259-265

Dose and fading time estimation of glass ceramic by using artificial neural network method

İbrahim Işık^{1*}, Esme Işık², Hüseyin Toktamış³

1 İnönü University, Engineering Faculty, Department of Electrical-Electronics Engineering, Malatya, Turkey, ORCID iD: 0000-0003-1355-9420

2 Malatya Turgut Özal University, Department of Optician, Malatya, Turkey, ORCID iD: 0000-0002-6179-5746

3 Gaziantep University, Engineering Faculty, Department of Engineering Physics, Gaziantep, Turkey, ORCID iD: 0000-0002-1799-2179

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13.03.2020
Received in revised form 8.10.2020
Accepted 8.10.2020
Available online 13.01.2021

Keywords:

Thermoluminescence,
Artificial Neural Network,
Glow curve,
Fading,

ABSTRACT

Ceramic materials commonly used for dental prosthetics and restorations shows luminescent properties. Dental ceramics are considered the most natural-looking restorative materials for aesthetic rehabilitation due to their transparency. They are commonly used for dose response and fading assessment by using thermoluminescence method in various fields of dosimetric applications. In present study, we use artificial neural networks (ANN) toolbox of Matlab to predict irradiation dose and fading time using glow curve data from dental glass ceramic which is thermoluminescent (TL) dosimetric material. Temperature, dose value and fading time are used for input and TL intensity used for output component of the proposed ANN model. 18 neurons are used for hidden layer to analyze the experimental results of the model. Experimental and simulation results are compared and similarity is found as about 99 % in this present study.

Doi: 10.24012/dumf.703171

Introduction

The ceramic is a sort of biomaterial utilized in dental restorations and prostheses. Ceramic is potently susceptible to radiation and the proportion of absorbed radiation dose is depends on the intensity of both TL and OSL signals [1]–[5]. Ceramic materials commonly used employed in dental prosthetics and repairs shows luminescent properties. Due to their use in the human body, these materials are particularly interesting when the retrospective dosimeter is required for individual usage, but monitoring of dose is not planned [6]. Typically, the properties of quartz and feldspar minerals often vary significantly from the thermal history;

consequently, domestic and building ceramics do not have to have the same dose response properties [7], [8]. Dental ceramics are considered the most natural-looking restorative materials for aesthetic rehabilitation due to their transparency. Dental ceramic materials can be produced in colours indistinguishable from natural teeth. In addition, ceramics with an outer surface of metal oxides do not allow dental plaque to be absorbed by products, therefore, unlike composite resin, it eliminates the problem of surface colour changes. For these reasons, dental ceramics have become an aesthetic

* Corresponding author
İbrahim, Işık
✉ ibrahim.isik@inonu.edu.tr

restorative material that is increasingly used in dentistry [9]–[13]. Fading is a significant parameter for dosimetric materials and the loss of TL signal between read out and irradiation is known as fading.

Artificial neural networks (ANN) are developed by using nerve cell which is known as neuron of the living. ANN is known since many years and has been applied in a different fields of scientific. An ANN consists of input, hidden and output layers with a variable number of nodes connecting the input and output layers as shown in Figure 1. A fairly simple and small-sized of an ANN has some powerful features in information processing, even compared to the human brain. The first ANN model is a perceptron introduced in the 1960's [14] to model information processing of the brain. A neural network consists of layers of neuron where every neuron is connected with other neurons in both the previous and following layer. During training, the weights are changed iteratively with a back propagation technique that is most commonly used for the training of neural networks [15]. We also used the back propagation and mean squared error technique as loss function in this study. ANN is used by researchers for engineering applications increasingly because of the easy ability to learn directly from target outputs. Moreover ANN can adapt and solve the problem according to new data [16]. Therefore, for engineering applications, ANN can be used an effective tool [14], [17] such as prediction of dose value and fading time [18]. ANN is a very promising tool which is applied in different ways of physics such as dose estimation [2].

Materials and Methods

Dental ceramics available on the Swedish dental market (IPS e.max Ceram, Ivoclar Vivadent SW) and previously examined (Ekendahl et al., 2013). Its composition is: SiO₂ (60-65%), Al₂O₃ (8-12%), Na₂O(6-9%), K₂O(6-8%), ZnO (2-3%), CaO, P₂O₅, F(2-6%), other oxides (2-8%) and pigments (1%). For dose and fading time estimation studies, a total of 30 and 18 newly glass ceramics are used, respectively. All measurement are done at room temperature, the ceramics are each irradiated once with ⁹⁰Sr – ⁹⁰Y β-source (delivering 0.04 Gy/s)

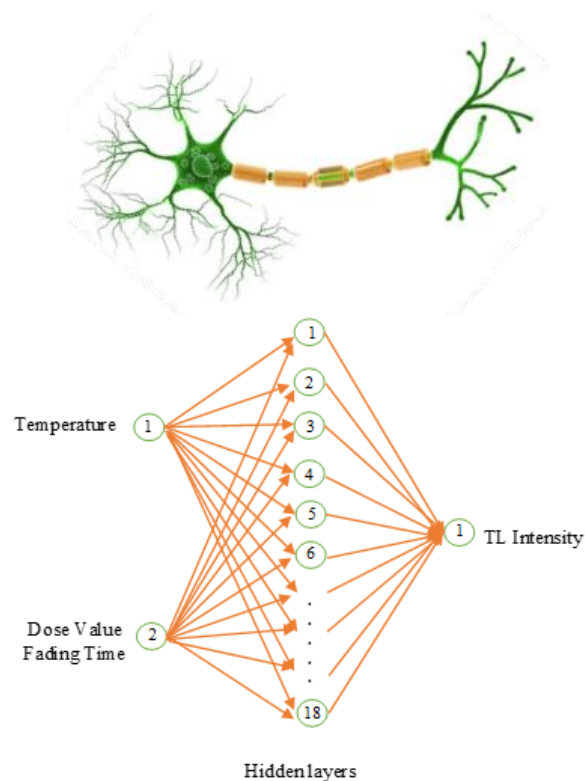


Figure 1. A neuron and its software model

up to 12, 24, 36, 72, 144, 288, 576, 2304, 3456 and 6912 Gy for dose estimation study and irradiated at fix dose value (36 Gy) and waited in a dark ambient from 1 hour to six weeks for fading time estimation study. In this study, Levenberg-Marquardt training algorithm of ANN model is used to estimate dose value and fading time of glass ceramics. Temperature, dose value and fading time are used for input and TL intensity used for output component. 18 neurons are used for hidden layer to analyze the proposed ANN model.

Results and Discussion

The glow curve which is TL intensity versus temperature variation of glass ceramic is shown in Figure 2 and when the dose increased the signal intensity also raised that is seen clearly. The TL glow curves for dental glass ceramic were characterized four dominant peaks extending from room temperature (RT) up to 400 °C. The visible peaks of the glow curves are characterized peak 1 (~175°C), peak 2

(~225°C), peak 3 (~275°C) and peak 4 (~350°C) for the indicated temperature interval for the dental glass ceramic sample. The simulated and experimental glow curves of six different dose values which are 12, 24, 72, 144, 2304 and 6912 Gy are shown in Figure 3. The simulation glow curve of model shows similar characteristics with the experimental glow curve of glass ceramic. Experimental and simulated glow curve are given in the same graph to compare the similarity. The similarity is obtained as 99 % between experimental and simulation results of glass ceramic. Mean square

error (MSE) and coefficient of determination (R^2) values which are obtained from the proposed model are given in Table 1.

Table 1. MSE and R^2 values of the proposed ANN model for dose value

	MSE	R^2
Training	1.26212	0.99838
Testing	4.53604	0.97231

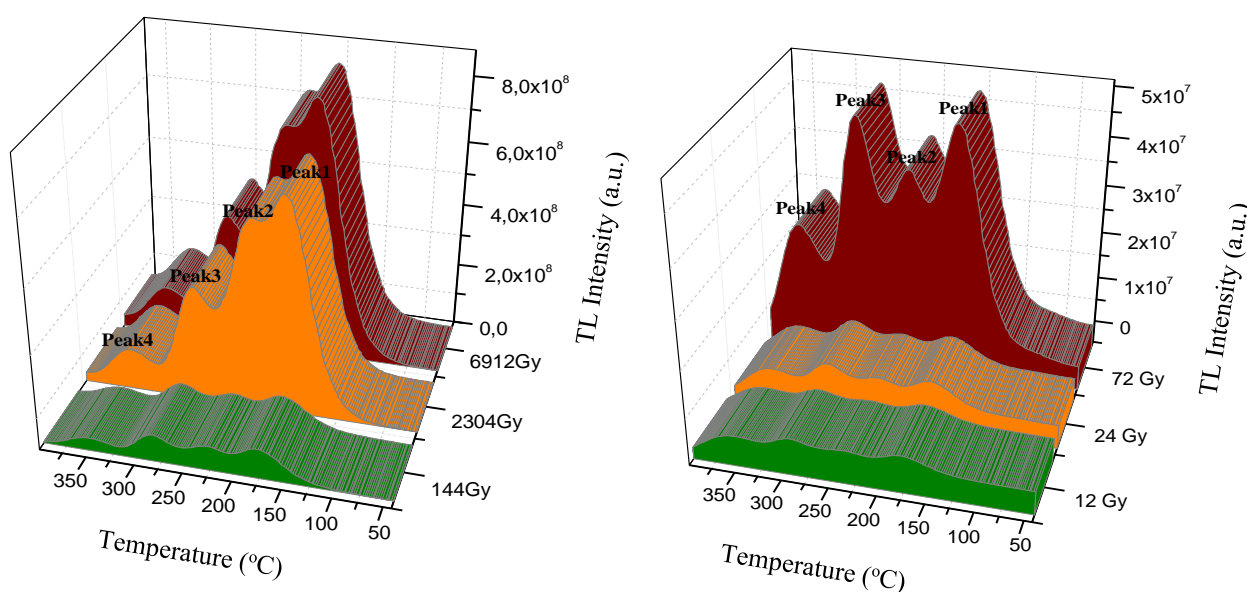


Figure 2. The TL glow curve of glass ceramic as a function of dose response irradiated with β -source for 12, 24, 72, 144, 2304 and 6912 Gy at room temperature

Fading is identified to decrease luminescence signal as a result of irradiated ceramics waiting under different environments. The trapped carriers within the sample can be stimulate by heat, light or by any other means. The period of 6 weeks was assessed for fading of dental glass ceramics in this study. The samples readout by using the TLD reader at different storage times (1, 4, 24, 168 and 1008 hours). The glow curve of glass ceramics as a function of fading is shown in Figure 4. After 1 hour storage, all the TL peaks have a major decreasing about 60% in luminescence intensity this observation demonstrates that all TL peaks were unstable. The TL glow peak labeled at 175°C faded

completely for the dental glass ceramic after 1 week storage. The simulated and experimental glow curves of six different fading time which are 0, 1, 4, 24, 168 and 1008 hours are shown in Figure 5. The simulation glow curve of model shows similar characteristics with the experimental glow curve of glass ceramic as a function of fading time. Experimental and simulated glow curve are given in the same graph to compare the similarity. The similarity is obtained as 99 % between experimental and simulation results of glass ceramic. Mean square error (MSE) and coefficient of determination (R^2) values which are obtained from the proposed model are given in Table 2.

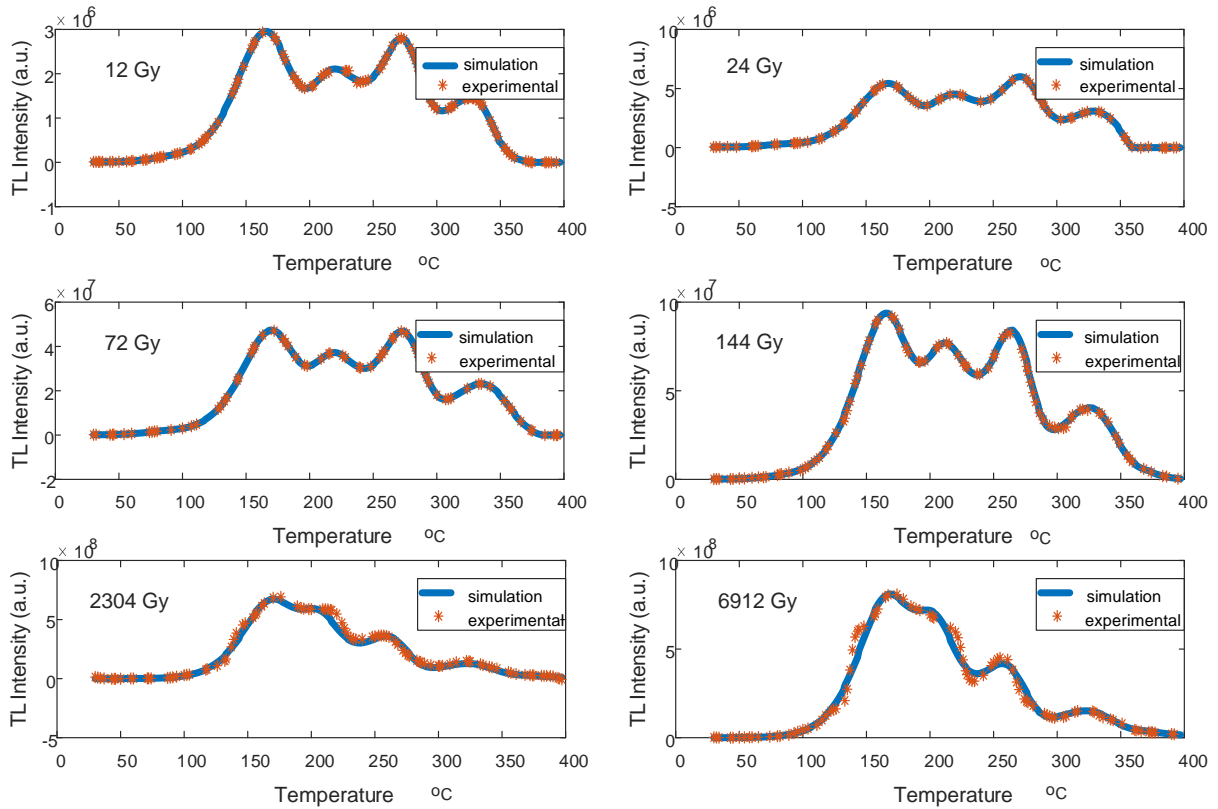


Figure 3. The TL glow curve of simulation and experimental results of glass ceramic as a function of dose response irradiated with β -source for 12, 24, 72, 144, 2304 and 6912 Gy at room temperature

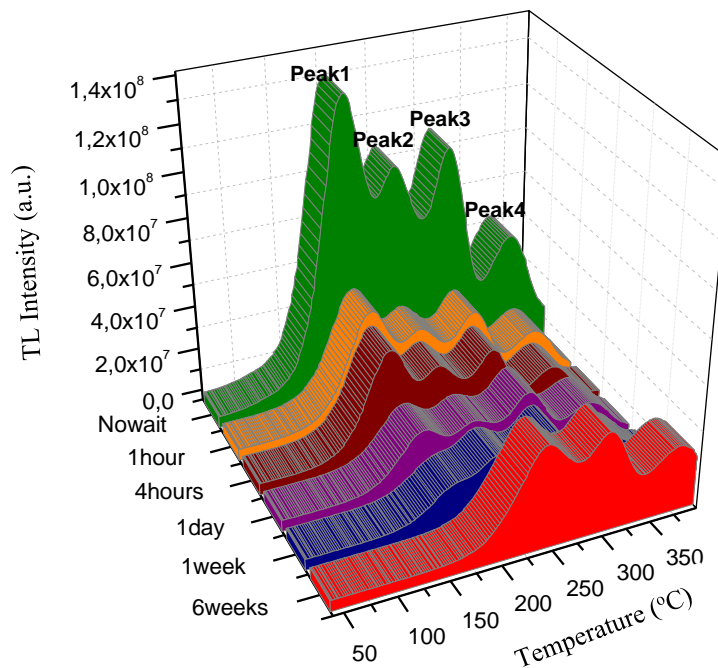


Figure 4. The TL glow curve for dental glass ceramic with respect to the fading.

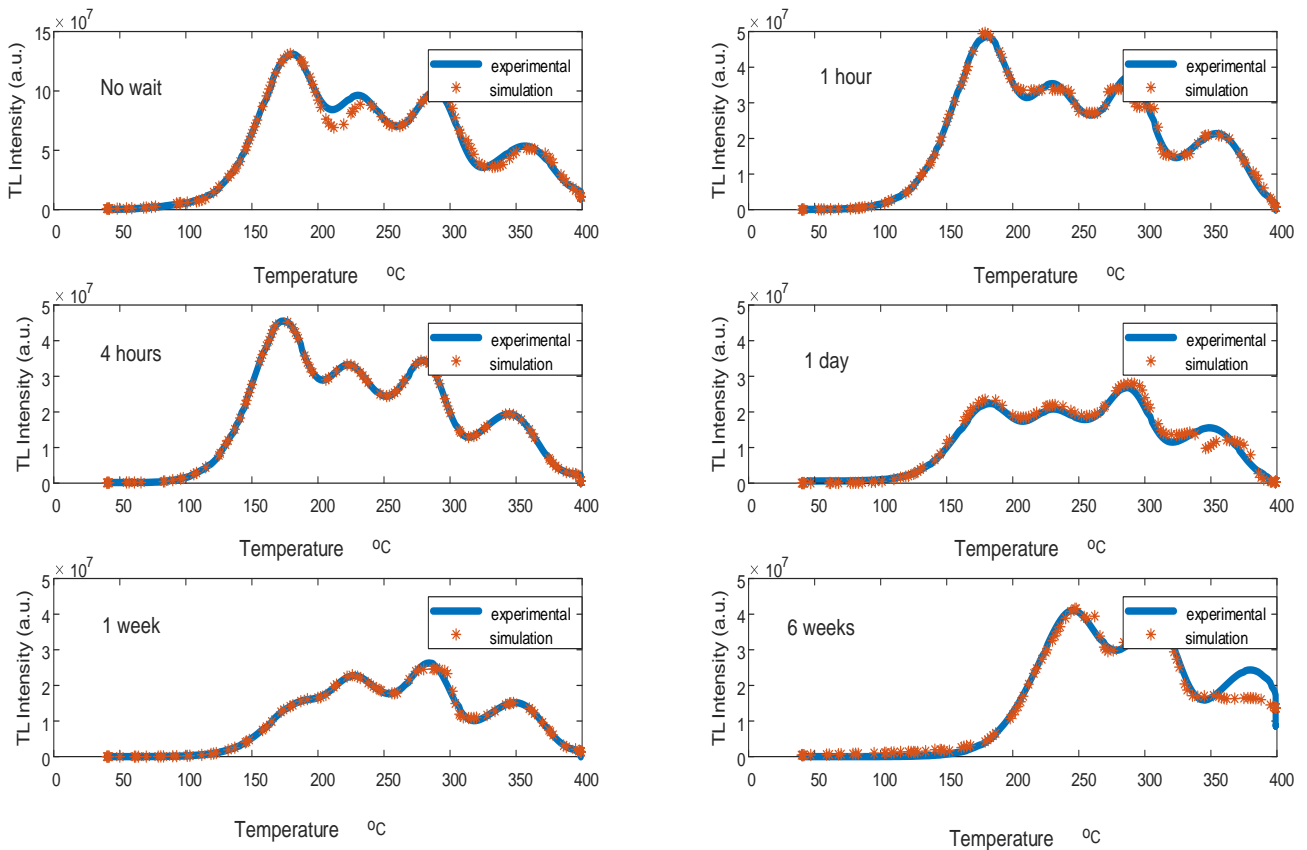


Figure 5. The variation of TL intensity versus temperature of simulation and experimental results of glass ceramic as a function of fading.

Table 2. MSE and R² values of the proposed ANN model

	MSE	R ²
Training	1.25895	0.99125
Testing	4.43568	0.98952

Conclusions

When the applied dose increased, the intensity of TL peak increased for both the experimental and simulated glow curves. Similarity of these glow curves is obtained about 99 % for all dose value and fading time of glass ceramic. By using this ANN model, dose and fading time estimation are successfully done and also the other parameters such as kinetic parameters can be predicted in the future.

References

- [1] E. Isik and H. Toktamis, "TLD characteristic of glass, feldspathic and lithium disilicate ceramics," *Luminescence*, vol. 34, no. 2, pp. 272–279, 2019.
- [2] E. Isik and H. Toktamis, and I. Isik, "Analysis of thermoluminescence characteristics of a lithium disilicate glass ceramic using a nonlinear autoregressive with exogenous input model," *Luminescence*, vol. 35, no. 6, pp. 827–834, 2020.
- [3] D. Banerjee, L. Bütter-jensen, and A. S. Murray, "Retrospective dosimetry: estimation of the dose to quartz using the single-aliquot regenerative-dose protocol," *Appl Radiat Isot.*, vol. 52, pp. 831–844, 2000.
- [4] H. Oks et al., "Assessment of thermoluminescence peaks in porcelain

- for use in retrospective dosimetry,” *Radiat. Meas.*, vol. 46, no. 12, pp. 1873–1877, 2011.
- [5] I. Veronese, A. Galli, M. C. Cantone, M. Martini, F. Vernizzi, and G. Guzzi, “Study of TSL and OSL properties of dental ceramics for accidental dosimetry applications,” *Radiat. Meas.*, vol. 45, no. 1, pp. 35–41, 2010.
- [6] I. K. Bailiff and S. Road, “The use of luminescence techniques with ceramic materials for retrospective dosimetry,” *The International Nuclear Information System*, pp. 985–994.
- [7] W. Höland, V. Rheinberger, M. Schweiger, K. F. Kelton, and B. R. Haywood, “Control of nucleation in glass ceramics,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 361, no. 1804, pp. 575–589, 2003.
- [8] N. Kristianpoller, D. Weiss, and R. Chen, “Optical and dosimetric properties of zircon,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 119, no. 1–4, pp. 267–270, 2006.
- [9] D. Ekendahl, L. Judas, and L. Sukupova, “OSL and TL retrospective dosimetry with a fluorapatite glass-ceramic used for dental restorations,” *Radiat. Meas.*, vol. 58, pp. 138–144, 2013.
- [10] K. Bailiff et al., “Luminescence characteristics of dental ceramics for retrospective dosimetry: a preliminary study,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 101, pp. 519–524, 2002.
- [11] A. Pascu, A. Timar-Gabor, and V. Simon, “Retrospective accident dosimetry using dental ceramics,” *Rom. Reports Phys.*, vol. 68, pp. 658–666, 2015.
- [12] I. Veronese, G. Guzzi, A. Giussani, M. C. Cantone, and D. Ripamonti, “Determination of dose rates from natural radionuclides in dental materials,” *J. Environ. Radioact.*, vol. 91, no. 1–2, pp. 15–26, 2006.
- [13] R. K. Tamrakar, D. P. Bisen, K. Upadhyay, and I. P. Sahu, “Comparative study of thermoluminescence behaviour of Gd₂O₃phosphor synthesized by solid state reaction and combustion method with different exposure,” *Radiat. Meas.*, vol. 84, pp. 41–54, 2016.
- [14] F. Rosenblatt, “Perceptrons and the Theory of Brain Mechanics,” *Cornell Aeronaut. Lab inc buffalo NY.*, VG-1196-G, p. 621, 1961.
- [15] B. N. Network, R. Hecht-nielsen, S. Diego, and L. Jolla, “The Backpropagation Neural Network,” *Processing*, pp. 593–605.
- [16] M. Y. Rafiq, G. Bugmann, and D. J. Easterbrook, “Neural network design for engineering applications,” *Comput. Struct.*, vol. 79, no. 17, pp. 1541–1552, 2001.
- [17] I. B. Topçu and M. Saridemir, “Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 305–311, 2008.
- [18] N. Kucuk and I. Kucuk, “Computational modeling of thermoluminescence glow curves of zinc borate crystals,” *J. Inequalities Appl.*, pp. 1–7, 2013.

Characterization of the influence of Amyloid β (1-42) By Way of Modeling Synaptic Cleft with an RC Electronic Circuit

Mehmet Emin Tagluk ¹, Ibrahim Isik ^{2,*}

¹ İnönü University, Electrical Electronics Engineering Department, Malatya, Turkey, ORCID iD: 0000-0001-7789-6376

² İnönü University, Electrical Electronics Engineering Department, Malatya, Turkey, ORCID iD: 0000-0003-1355-9420

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13.03.2020

Received in revised form

14.10.2020

Accepted 14.10.2020

Available online 13.01.2020

Keywords:

Alzheimer disease, Amyloid beta,
Synaptic cleft

Doi: 10.24012/dumf.703270

ABSTRACT

The research toward understanding the role of oligomeric amyloids in Alzheimer's disease (AD) has gained considerable attention in recent years. The information obtained in this direction showed that Amyloid Derived Diffusible Ligands (ADDLs) cause ambiguous ions movements across lipid bilayers in the plasma membrane and consequently alter its dielectric properties such as permeability. Nevertheless, how this amyloid protein selectively alters the permeability of the cell membrane has not been noted down because none of the specific receptors have been identified for ADDLs binding. As a result of the increase of cellular calcium level, local micromechanical properties of cells can change and thus induce reorganization of cytoskeletal structures that can cause neurodegenerative disorders such as AD. Therefore, in this study we have tried to specify the effect of alteration of permittivity and permeability of synaptic channel as modeling synaptic cleft by an RC circuit. By linking the electronic neuronal models that we have previously designed with the RC cleft model, when the information transferred from one neuron to another, the rate of error measured on the later neuron circuit with reference to the former one was determined with respect to the rate of change of R and C values individually. It was observed that C and R, and hence permeability of the synaptic channel do affect the communication error. It is concluded that a healthy synaptic channel conserves optimum resistivity and capacity levels at which the inter-neuronal signaling is achieved at a minimum error. These results could be linked to hypothesize that amyloids have a common feature in structuring channel-like concentrations which are supported by their electrical activity as well as the rate of permeability of Calcium like cautions.

Introduction

Investigation of the role of oligomeric amyloids in Alzheimer's disease (AD) has attained substantial concentration in recent times. From the results obtained through the studies conducted in this trend, now it is believed that large amyloid oligomers in the form of diffusible ligands could be responsible for amyloid-induced cell toxicity [1]. Based on the data obtained through biophysical studies it has been deliberated that Amyloid Derived Diffusible Ligands (ADDLs) allow non-specified travel of ions across lipid bilayers (a membrane or zone of a membrane

composed of lipid molecules; usually phospholipids) [2]. This could probably happen via the thinning of plasma membrane and altering its dielectric properties such as permeability. However, it has not been spelled out how these amyloid proteins would specifically alter cell membrane permeability, and yet, there are none of the specific receptors that have been identified for ADDLs binding. Large scale oligomers have been mentioned to possibly alter the permeability of membrane not only through pathways of ion channels but also by way of shrinking the height of the dielectric barrier provided by the bilayer structure [2].

* Corresponding author

Ibrahim, Isik

✉ e-mail: ibrahim.isik@inonu.edu.tr

In some studies, globular shaped amyloids have been shown to induce toxic effect, by either non specific membrane leakage [3-4], or to develop ion channel like structures [5-8]. Interestingly, when the concentration of Amyloid beta, A β (1-42) is low (typically around 0.22 μ m) some calcium waves have been observed, and these waves were increased with the increase of Amyloid beta concentration. These observations may be explained as that Amyloid beta forms calcium ion permeable channels in the plasma membrane. Through the intracellular calcium imaging studies, such as Lal et al., it has been shown that A β (1-42) causes rapid cellular damage which does not seem to be triggered by an oxidative mechanism but undoubtedly initiated by means of calcium uptake by A β [9]. As a consequence of the increase of cellular calcium level, the local micromechanical properties of cells can change [10] and thus induce reorganization of cytoskeletal structures that can cause neurodegenerative disorders/diseases such as AD [11].

From the evidence acquired through imaging of cellular structures by atomic force microscopy, it has been mentioned that A β does not form fibres relevant to physiological concentrations, but does adapt to small oligomeric complexes by way of interaction with lipid bilayers found in the cellular porous medium [9]. In the study, it has been clearly shown that amyloids form oligomeric structures with a central pore that bear a resemblance to ion channels. This information is in parallel to the results obtained through electrophysiological studies made toward the formation of lipid bilayer channels that show a typical channel-like activity that exhibiting single channel conductance characteristics. This information is also supported by theoretical models [12-14] derived for amyloid channel-like structures.

In parallel to biophysical and imaging studies, through electrophysiological studies typical lipid bilayers on formation channels with signatures of channel conductance have been confirmed. Theoretical systematic models introduced for amyloid channel-like structures and Alphasynuclein based highly conductive ion channels [15] also do support these ion channel-like structures. It has been shown that Sialylation (Sialic acid) can cause a large depolarising shift in the activation mechanism [16] of voltage-gated

sodium channels and so altering the spiking threshold of the neuron without any variation in the patch-clamp recorded membrane voltage V_m in hippocampal pyramidal neurons [17].

Now, the issue is that could these small peptides, which can only partly infuse membrane, have the potential of formation of ionic amyloid channel models. The hypothesis made toward channel formation is convincing that amyloids have a common feature in structuring such channel-like concentrations that are supported by their electrical activity and the rate of permeability of Calcium like cations. Herein, in this study, we have tried to specify the effect of alteration of permittivity and/or permeability of synaptic channel by modeling synaptic channel/cleft with an RC circuit. By linking two electronic neuronal models that we have previously designed with the RC cleft model, when the information transferred from one neuron to another, the rate of error measured on the later neuron circuit with reference to the former one was determined with respect to the rate of change of R and C values individually. It was observed that C and R, and hence permeability of the synaptic channel do affect the communication error. It is concluded that a healthy synaptic channel conserves optimum resistivity and capacity levels at which the inter-neuronal signaling is achieved at a minimum error.

Materials and Methods

From the literature, it is understood that Amyloid beta, A β (1-42) eventually causes some sort of errors in the electro-chemical based communication of neuronal network, and this error is claimed to be the main reason behind AD [11, 18, 19].

In previous studies we have established an electronic circuit (model) that simulates the functional behaviour of a neuron (see Figure 1) [20-21-22]. In order to understand the role of the electrical properties of synaptic channel on the nano-scale communication managed between neurons we have simply characterized synaptic cleft with a parallel RC circuit. The RC channel model was aimed to relatively represent the permittivity and permeability of the channel. By way of altering the value of these circuit elements we try to understand how does the structure of synaptic cleft effect the electro-chemical

communication managed between synapses and/or neuronal cells. With the use of this model, it is aimed to understand how $A\beta$ (1-42) peptide does change the electrical properties (mainly the permittivity and permeability of the medium which affects the impedance) of the circuit, and what sort of problems/errors do arise as a result of this change in the neuronal system.

For this, a series of experiments were conducted on the system where two neuronal electronic models were coupled via the RC synaptic channel model. With these experiments the impact of variation of complex impedance (resistance and capacitance) of the synaptic channel model on the communication error has been examined.

When the former neuron model is excited by a sinusoid wave like source, the membrane potential (spike train generated in response to the excitation) on both former and later neuron models were measured. The error that does arise in the impulse train measured on the membrane of the second neuron (the output of the later circuit) is calculated as given in Equation (1). This error is a spectral error that ultimately shows the rate of missing impulses and uneven delays that are considered to cause misinformation translation between neuronal cells.

$$error = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M \left(\frac{f_{im} - f_{om}}{f_{im}} \right)^2 \right), \quad (1)$$

where, f_{im} is the instantaneous frequency of the spikes measured at the output of the former circuit calculated as $f_{im} = 1/T_{im}$, f_{om} is the frequency of the spikes measured at the output of the later circuit calculated as $f_{om} = 1/T_{om}$.

T is the time course measured between two successive impulsive peaks. M is the number of samples within each bin or window and N is the number of windows (bins) set over the signal.

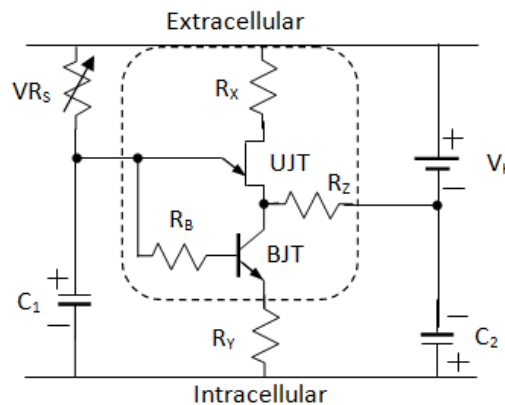


Figure 1. Electronic model of a segment of the membrane of a neuron, where all the information related to the circuit is explained [20, 21]

Results

The results of experiments conducted on the neuronal electronic models coupled via the RC synaptic channel model showed that the impedance of the synaptic channel has an effect on the cellular communication error. It is shown that with the rate of change of $A\beta$ (1-42) in the channel and cellular medium the ionic permittivity and permeability change and hence the impedance of synaptic channel (RC model) changes.

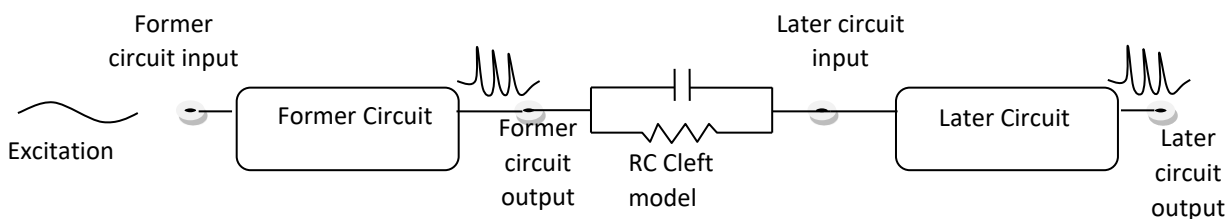


Figure 2. The schematic representation of the synaptic link between two neuronal cells (Electronic models)

The results also showed that, with the alteration of the RC values of channel model some errors arise in the cellular communication channel. As shown in Figure 3, while the output of former neuron (output1) comes up with a spike train characteristics fine-tuned with the input excitation, the later one, however, comes up with some deviations (output2) both in spike characteristics and temporal delays and/or missing spikes that cause fluctuations in the instantaneous frequency of the signal, as a kind of error. Therefore, in this sense, the error rate was measured in terms of instantaneous frequencies of the pulse trains occurred on both the former and the later neuronal electronic models, with respect to rate of change of the channel components, as given in Equation 1. Figure 4 and 5, respectively, show that as the values of R and/or C used in modelling synaptic channel increases the level of error first decreases up to a certain level, and then increases. The values of the R and C that give rise to a minimum rate of error can be said as the optimum channel parameters. As a common rule, it is known that increasing the permittivity of the dielectric between two current carrying conductor plates increases the capacitance per unit area and also decreases the impedance per unit area which in turn decreases the velocity of propagation of electrical current. On the contrary, increasing the permeability of the dielectric between the conductor plates increases the inductance per unit area, increases the impedance and so decreases the velocity of propagation. Since $A\beta$ (1-42) is considered to alter the permittivity and permeability of the cellular medium, this should lead to a change of impedance, capacitance and inductance of the cellular medium as well as of the synaptic channel. As mentioned, the rate of change in impedance cause a chance in the velocity of propagation and consequently this comes up with cellular communication error.

Discussion

In this particular work we have investigated the possible role of $A\beta$ (1-42) on the synaptic communication channel in terms of error measured at the later circuit model, when two electronic neuron models are connected in serial. This work is not aimed to cope with the cell

toxicity mentioned as caused by diffusible Amyloid oligomers [1], but aimed to somehow

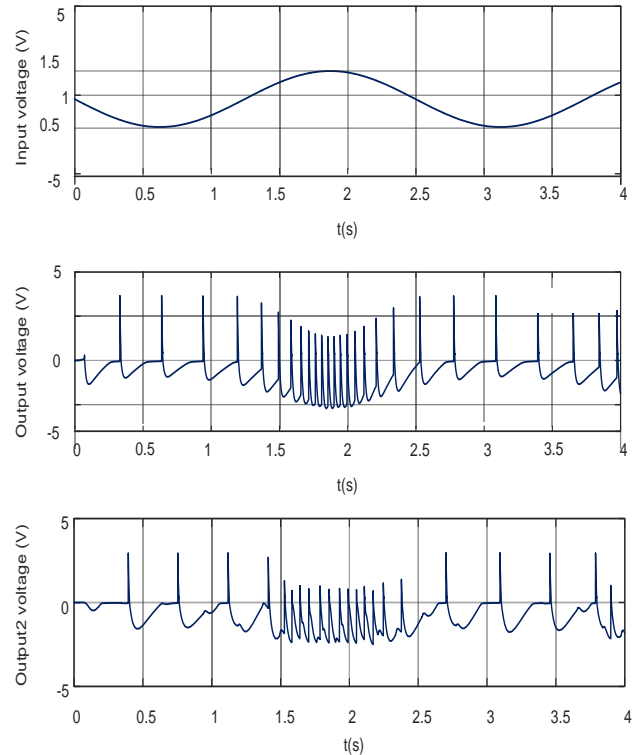


Figure 3. The waveforms (spike trains) measured at the output of the former (output1) and later (output2) circuits as the model of the synaptic cleft

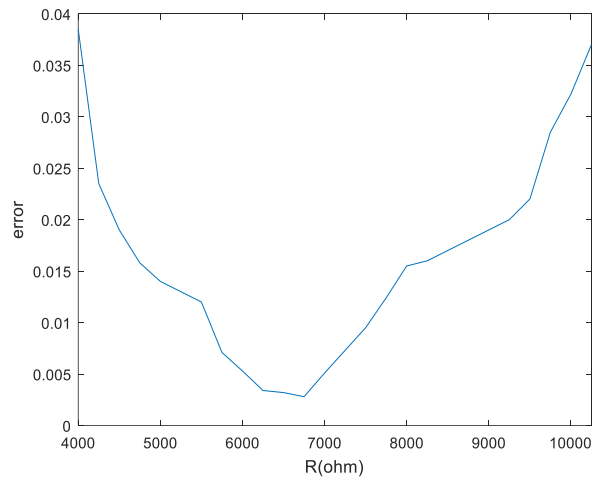


Figure 4. The rate of change of error with respect to the rate of change of Resistance of cleft medium at the Later circuit's output when the cleft's medium Capacitor is kept at $C=1\mu F$

reveal the role of alteration of the permeability of plasma membrane with the damage of cellular

assembly mainly caused by ADDLs [9] in the format of membrane narrowing and/or reducing

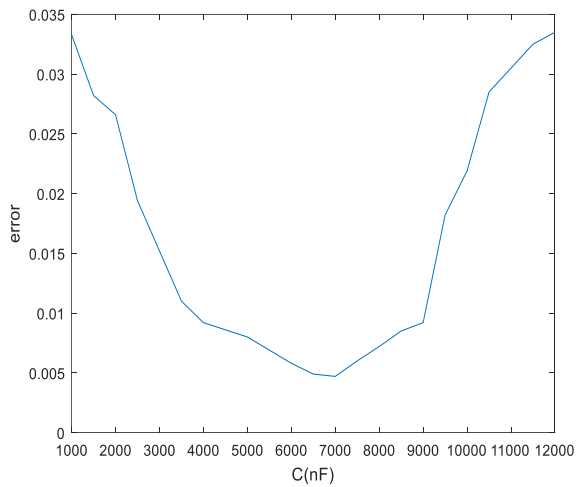


Figure 5. The rate of change of error with respect to the rate of change of Capacitance of cleft medium at the Later circuit's output when cleft's medium Resistance is kept at $R=5\text{ K}\Omega$

the height of the dielectric barrier provided by the bilayer structure [2]. The work may also explore the role of development of Ca^{2+} -permeable ion channel like structures mentioned in [5-8] that cause an increase in cellular calcium level which might alter the local micromechanical properties of the cell [10] that consequently cause neurodegenerative disorders such as AD [11].

From the results we obtained it is proven that the information configured with an electrical signal that is propagating throughout the cellular network deforms in accordance with the variation of both resistance and capacitance of the medium derived from characteristic permittivity and permeability of the medium. In this work we showed the error resulted in the second neuron on the neuronal chain. We also analyzed the error rate at the output of third and fourth neurons subsequently connected to the second one as a kind of neuronal chain. When electrical information transmitted from one neuron to another, we observed that the highest error caused by the channel between first and second neuron. This can be explained as that, while the first neuron was excited with a pure sinusoidal waveform the second one was consequently excited by a pulse train. That is why the error at the output of the second neuron was so high. However, the subsequent neurons were excited

with pulse trains almost synchronized with the one at the output of second neuron. Since all of the neurons set in the chain were having the same characteristics and excited with similar pulse trains (one excites the other) the error arisen in the channel between them were not found so much high.

In Figure 4 it is seen that the signaling error first reduces to a minimum level and then increases with the increase of synaptic channel resistivity. In Figure 5 it is seen that the signaling error, as in the case of resistivity, also reduces to a minimum level and then increases with the increase of synaptic channel capacity. This means that a healthy synaptic channel conserves optimum resistivity and capacity levels at which the inter-neuronal signaling is achieved at a minimum error. This results prove that the permeability of the ionic channel has an effect on the signalling (information exchange) error which could be interrelated to the hypothesizes that amyloids have a common feature in structuring channel-like concentrations that are supported by their electrical activity and permeability of Calcium like cautions [12-14].

As can be seen from Figure 3 some of the spikes measured at the output of the later circuit are delayed or shifted compared to the ones measured at the output of the former circuit. This shift can also be linked to the assumption that Sialylation (Sialic acid) could cause a large depolarising shift in the activation curve [15] of voltage-gated sodium channels which consequently alter the spiking threshold of the neuron without any alteration in the patch-clamp recorded membrane voltage V_m in hippocampal pyramidal neurons [16].

Conclusions

In this study the effect of alteration of electric properties of synaptic cleft such as permittivity and permeability on the cellular communication was investigated based on modelling synaptic cleft with an RC circuit. It was observed that when the electrical information transferred from one neuron to another the rate of error measured on the later neuron circuit first decreases and then increases with respect to the change of RC values. Thus it can be concluded that inter-neuronal signalling can be achieved at a minimum error at a certain R and C values of the synaptic channel

which may be termed as the healthy synaptic impedance. This result in turn proves the effect of permeability of ionic channel on the data translation error that might be arisen from A β (1-42) that structure channel-like concentrations.

Acknowledgments: This study is supported by the İnönü University Scientifics Researchers Project Department (BAP) under project ID: FDK-2019-1359.

References

- Gong YS, Chang L, Viola KL, Lacor PN, Lambert MP, Finch CE, Krafft GA, Klein WL., "Alzheimer's disease-affected brain: Presence of oligomeric A beta ligands (ADDLs) suggests a molecular basis for reversible memory loss." *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100:10417–10422. [PubMed: 12925731]].
- Sokolov Y, Ashot Kozak J, Kayed R, Chanturia A, Glabe CG, Hall JE., "Soluble amyloid oligomers increase bilayer conductance by altering dielectric structure." *J Gen Physiol* 2006;128:637–647. [PubMed: 17101816]].
- Green JD, Kreplak L, Goldsbury C, Blatter XL, Stolz M, Cooper GS, Seelig A, Kist-Ler J, Aebi U., "Atomic force microscopy reveals defects within mica supported lipid bilayers induced by the amyloidogenic human amylin peptide.", *J Mol Biol* 2004;342:877–887. [PubMed: 15342243].
- Kayed R, Sokolov Y, Edmonds B, MacIntire TM, Milton SC, Hall JE, Glabe CG., "Permeabilization of lipid bilayers is a common conformation-dependent activity of soluble amyloid oligomers in protein Misfolding diseases", *J Biol Chem.* 2004, 279(45):46363-6.
- Lin H, Bhatia R, Lal R. "Amyloid beta protein forms ion channels: implications for Alzheimer's disease pathophysiology". *Faseb J* 2001;15:2433–2444. [PubMed: 11689468].
- Lin H, Zhu YWJ, Lal R. "Amyloid beta protein (1–40) forms calcium-permeable, Zn²⁺-sensitive channel in reconstituted lipid vesicles". *Biochemistry* 1999;38:11189–11196. [PubMed: 10460176].
- Quist A, Doudevski I, Lin H, Azimova R, Ng D, Frangione B, Kagan B, Ghiso J, Lal R. "Amyloid ion channels: A common structural link for protein-misfolding disease". *Proc Natl Acad Sci U S A* 2005;102:10427–10432. [PubMed: 16020533].
- Arispe N. "Architecture of the Alzheimer's A beta P ion channel pore". *J Membr Biol* 2004;197:33–48. [PubMed: 15014916].
- Ratnesh Lal, Hai Lin, and Arjan P. Quist, "Amyloid beta ion channel: 3D structure and relevance to amyloid channel paradigm." *Biochim Biophys Acta.* 2007, 1768(8): 1966–1975. doi:10.1016/j.bbamem.2007.04.021.
- Thomas T, Thomas G, McLendon C, Sutton T, Mullan M. "Beta amyloid mediated vasoactivity and vascular endothelial damage." *Nature* 1996;380:168–171. [PubMed: 8600393].
- Mattson MP. "Cellular actions of beta-amyloid precursor protein and its soluble and fibrillogenic derivatives." *Physiol Rev* 1997;77:1081–1132. [PubMed: 9354812].
- Mobley DL, Cox DL, Singh RRP, Maddox MW, Longo ML. "Modeling amyloid beta-peptide insertion into lipid bilayers". *Biophys J* 2004;86:3585–3597. [PubMed: 15189856].
- Durell SR, Guy HR, Arispe N, Rojas E, Pollard HB. "Theoretical-Models of the Ion-Channel Structure of Amyloid Beta-Protein". *Biophys J* 1994;67:2137–2145. [PubMed: 7535109].
- Tsigelny IF, Bar-On P, Sharikov Y, Crews L, Hashimoto M, Miller MA, Keller SH, Platoshyn O, Yuan JXJ, Masliah E. "Dynamics of alpha synuclein aggregation and inhibition of pore-like oligomer development by beta synuclein". *FEBS J* 2007;274:1862–1877. [PubMed: 17381514].
- Zakharov SD, Hulleman JD, Dutseva EA, Antonenko YN, Rochet JC, Cramer WA, "Helical alpha-synuclein forms highly conductive ion channels" *Biochemistry.* 2007 Dec 18;46(50):14369-79. Epub 2007 Nov 22.
- Savtchenko, L. P., Korogod, S. M. & Rusakov, D. A. "Electrodifusion of synaptic

- receptors: a mechanism to modify synaptic efficacy?" *Synapse* 35, 26-38 (2000).
17. Isaev, D. et al. "Role of extracellular sialic acid in regulation of neuronal and network excitability in the rat hippocampus". *J Neurosci* 27, 11587-11594 (2007).
 18. https://www.alz.org/national/documents/topicsheet_betaamyloid.pdf "Beta-amyloid and the amyloid hypothesis", Alzheimer association, 888-372-3900, Alz.org, TS-0039 Updated August 2019.
 19. Sara H. Mokhtar, Maha M. Bakhuraysah, David S. Cram, and Steven Petratos, "The Beta-Amyloid Protein of Alzheimer's Disease: Communication Breakdown by Modifying the Neuronal Cytoskeleton", Hindawi Publishing Corporation International Journal of Alzheimer's Disease 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/910502>.
 20. M. E. Tagluk, "A New Dynamic Electronic Model of Neuron's Membrane", *Anatolian Journal of Computer Sciences*, Volume 3, Issue 1, 2018, Page 1-6.
 21. M Emin Tagluk, Ibrahim Isik, "Communication in nano devices: Electronic based biophysical model of a neuron" *Nano Communication Networks*, Vol 19, pp 134-147, 2019.
 22. E. Isik, I. Isik, M. E Tagluk, "Effect of A β on the Probability of Molecule Reception in MCvD", *ICONDATA'20* June 25 - 28, 2020 in Istanbul, Turkey.

Rogosinski Lemması ile ilgili Süren Nokta Empedans Fonksiyonları için Carathéodory Eşitsizliği

Carathéodory's Inequality for Driving Point Impedance Functions Concerned with Rogosinski's lemma

Bülent Nafi Örnek^{1*}, Timur Düzenli²

¹ Amasya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Amasya, nafiornek@gmail.com

² Amasya Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Amasya, timur.duzenli@amasya.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 1 Haziran 2020
Düzeltilme: 4 Ağustos 2020
Kabul: 27 Ağustos 2020

Anahtar kelimeler:

Carathéodory eşitsizliği, Rogosinski lemması, süren nokta empedans fonksiyonu, pozitif reel fonksiyon

ÖZET

Bu makalede, Carathéodory eşitsizliğinin bir sınır versiyonu, pozitif reel fonksiyonlar açısından incelenmiştir. Buna göre, $Z(s)$ süren nokta empedans fonksiyonu; s düzleminin sağ yarı düzleminde tanımlanmış, $Z(s) = \frac{A}{2} + c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots$ olarak verilen analitik bir fonksiyondur. $Z(s)$ fonksiyonunun sanal eksen üzerinde $s = 0$ sınır noktasında da analitik olduğu varsayılarak, Rogosinski lemması yardımıyla, $Z(s)$ 'nin türevinin modülü için yeni eşitsizlikler elde edilmiştir. Ayrıca, sunulan eşitsizliklerin kesinliği kanıtlanmış ve elde edilen ekstremal fonksiyonların spektral özellikleri araştırılmıştır. Bu doğrultuda, çalışmada önerilen analizler kullanılarak çeşitli filtre yapılarının elde edilmesinin mümkün olduğu gözlenmiştir.

Doi: 10.24012/dumf.860229

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 June 2020
Revised: 4 August 2020
Accepted: 27 August 2020

Keywords:

Carathéodory's inequality, Rogosinski's lemma, driving point impedance function, positive real function

ABSTRACT

In this paper, a boundary version of the Carathéodory's inequality has been investigated for positive real functions. Accordingly, the driving point impedance function $Z(s)$ where $Z(s) = \frac{A}{2} + c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots$ is an analytic function defined in the right half of the s -plane. With the help of Rogosinski's lemma, novel inequalities have been derived for the modulus of derivative of $Z(s)$ by assuming that the $Z(s)$ function is also analytic at the boundary point $s = 0$ on the imaginary axis. In addition, the sharpness of presented inequalities has been proved and the spectral characteristics of resulting extremal functions have been investigated. Accordingly, it has been observed that it is possible to obtain various filter structures using proposed analysis in the study.

* Sorumlu yazar / Correspondence author
Bülent Nafi ÖRNEK
✉ nafiornek@gmail.com

Giriş

Pozitif reel fonksiyonlar (PRF), elektrik mühendisliğinde devre teorisinde [1], ağ sentezinde [2], kontrol sistemlerinde [3], sinyal işlemede [4] ve mikrodalga mühendisliğinde [5] sıklıkla kullanılmaktadır. Bir fonksiyonun pozitif reel olabilmesi için, aşağıdaki koşulları sağlaması gerekmektedir [6]:

s, karmaşık frekans değişkeni olmak üzere,

1-) $Z(s)$ analitik and $\Re s \geq 0$ 'da sanal eksen üzerindeki kutuplar hariç olmak üzere tek değerlidir,

$$2-) Z(\bar{s}) = \overline{Z(s)}$$

3-) $\Re s \geq 0$ 'da $\Re Z(s) \geq 0$ olmalıdır.

Bu çalışmada, süren nokta empedans fonksiyonlarının (SNEF) türevi için bir sınır analizi yapılması amaçlanmıştır. SNEF'lerin türevi jiroskop tasarımı [7], doğrusal karşılıklı sistemlerin yorumlanması [8] gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir.

Burada, $Z(s)$ süren nokta empedans fonksiyonunun türevinin modülünün sıfır noktasındaki değeri, yani $|Z'(0)|$ göz önüne alınarak üç teorem içerisinde $Z'(s)$ için üç alt sınır sunulmaktadır. [9] ve [10] ile benzer şekilde, bu çalışmanın amacı $Z(s)$ fonksiyonunun türevinin sınırdaki davranışını anlamaktır. Burada sunulan çalışmanın öncekilerden temel farkı, yeni sınırları elde etmek için Rogosinski Lemması ile beraber Carathéodory Eşitsizliği kullanılmasıdır. Ayrıca, $Z(s)$ fonksiyonunun türevinin analizi, çalışmada ele alınan problemin doğal bir sonucudur. Sunulan analizlerle, Carathéodory Eşitsizliği ile SNEF'lerin arasındaki ilişkinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu ilişkiyi somutlaştırmak adına, devre teorisinde sıkça kullanılan ekstremal fonksiyonlar olan SNEF'lerden faydalanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, Rogosinski Lemması ile beraber Carathéodory Eşitsizliği'nin SNEF'lere uygulanmasıyla çok çentikli süzgeçler de dahil olmak üzere çeşitli süzgeç yapıları oluşturulmuş söylemek mümkündür.

Ön Değerlendirmeler

$f(z)$, birim disk içerisinde ($U = \{z: |z| < 1\}$) analitik bir fonksiyon olsun. Maksimum Prensibi'nin bir sonucu olan Schwarz Önermesi'ne göre, $f: U \rightarrow U$ fonksiyonu $f(0) = 0$ ile analitik olduğu durumda, her $z \in U$ için $|f(z)| \leq |z|$ ve $|f'(0)| \leq 1$ 'dir. Ayrıca, $z \neq 0$ için $|f(z)| = |z|$ geçerli olduğu takdirde veya $|f'(0)| = 1$ ise f bir rotasyondur. Başka bir ifadeyle, θ reel olmak üzere $f(z) = ze^{i\theta}$ 'dir [11].

Bunun kesin bir versiyonu Rogosinski Lemması'dır [12,13]. Rogosinski Lemması'na göre, bütün $z \in U$ değerleri için $a_1 = \frac{zf'(0)(1-|z|^2)}{1-|z|^2|f'(0)|^2}$ ve $r_1 = \frac{|z|^2(1-|f'(0)|^2)}{1-|z|^2|f'(0)|^2}$ olmak üzere $|f(z) - a_1| \leq r_1$ 'dir.

Carathéodory'nin Eşitsizliği, literatürdeki çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Carathéodory Eşitsizliği'nin tam fonksiyonlar ve analitik fonksiyonlar teorisindeki rolü kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır [14]. Ayrıca, Carathéodory Eşitsizliği'nin birim diskteki eşitsizliğinin bir sınır versiyonu da [15] ve [16] çalışmalarında dikkate alınmakta ve yeni sonuçlar elde edilmektedir. Mercer [12], Schwarz Lemması'nın, iki noktanın görüntülerinin bulunduğu bir versiyonunu kanıtlamıştır. Ayrıca; Mercer, sınırdaki bazı Schwarz ve Carathéodory eşitsizliklerini, Rogosinski'ye bağlı bir lemmanın sonucu olarak görmektedir [13]. Buna ek olarak, birim diski kendisine eşleyen analitik fonksiyonlar için yeni bir sınır Schwarz Lemması elde etmiştir [17].

İlk olarak, Carathéodory'nin pozitif reel fonksiyonlar için sağ yarım düzlemdeki eşitsizliği sunulacaktır.

$Z(s) = \frac{A}{2} + c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots$ pozitif reel bir fonksiyon ve $\Re s \geq 0$ 'da $0 < \Re Z(s) \leq A$ olsun. $f(z)$, U içerisinde analitik bir fonksiyon, $f(0) = 0$ ve $|z| < 1$ için $|f(z)| < 1$ olmak üzere

$$f(z) = \frac{e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z\left(\frac{1+z}{1-z}\right) - 1 \right]_{-1}}}{e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z\left(\frac{1+z}{1-z}\right) - 1 \right]_{+1}}}, z = \frac{s-1}{s+1} \quad (1)$$

fonksiyonunu göz önüne alalım.

(1) denklemden

$$f'(z) = \frac{4i\pi}{A(1-z)^2} Z' \left(\frac{1+z}{1-z} \right) e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z \left(\frac{1+z}{1-z} \right) - 1 \right]} \left(e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z \left(\frac{1+z}{1-z} \right) - 1 \right]} + 1 \right)^2$$

sonucu bulunur. Dolayısıyla, Schwarz Lemması'nı $f'(z)$ için uygulayarak

$$|f'(0)| = \left| \frac{4i\pi}{A} Z'(1) e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z(1) - 1 \right]} \left(e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z(1) - 1 \right]} + 1 \right)^2 \right| \leq 1$$

ve

$$|Z'(1)| \leq \frac{A}{\pi}$$

eşitsizliği elde edilir.

Şimdi bu eşitsizliğin eşitlik halini gösterelim.

$$Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln s \right)$$

olsun. Bu durumda,

$$\frac{A}{2} + c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots$$

$$= \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln s \right),$$

$$c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots = \frac{A}{i\pi} \ln s$$

ve

$$c_1 + c_2(s-1) + \dots = \frac{A \ln s}{i\pi s-1}$$

Son ifadede $s \rightarrow 1$ için limite geçerse

$$|c_1| = \frac{A}{\pi}$$

elde ederiz. Bu da

$$|Z'(1)| = \frac{A}{\pi}$$

olduğunu gösterir.

Dolayısıyla, aşağıdaki lemma elde edilir:

Lemma 1. $Z(s) = \frac{A}{2} + c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots$ fonksiyonu $\Re s \geq 0$ 'da $0 < \Re Z(s) \leq A$ için pozitif reel bir fonksiyon olsun. Bu durumda aşağıdaki eşitsizlik elde edilir:

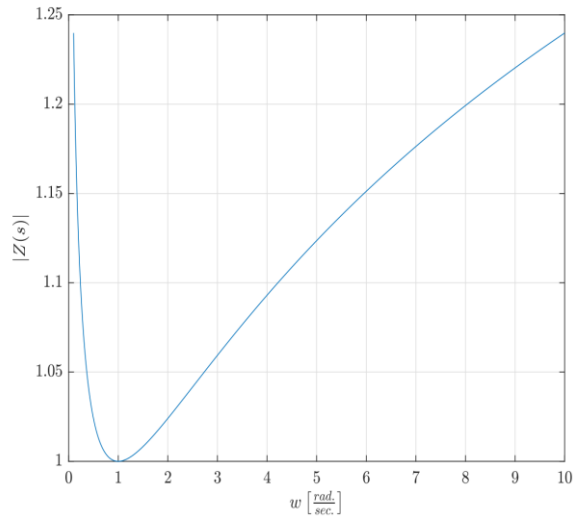
$$|Z'(1)| \leq \frac{A}{\pi} \quad (2)$$

Eşitsizlik (2) kesindir ve ekstremal fonksiyon aşağıdaki gibi verilir:

$$Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln s \right).$$

Bu sonuç, sağ yarı düzlemdeki pozitif reel fonksiyon için Carathéodory Eşitsizliği'ni doğurmaktadır.

Şekil 1'de, Lemma 1'de elde edilen SNEF'nin büyüklüğü frekansa bağlı olarak ve $A = 1$ olduğu varsayılarak gösterilmiştir. Şekilde görülebileceği gibi A parametresi, SNEF'nin alabileceği en düşük empedans değerini belirleyen parametredir. Şekil 1'dekine benzer bir frekans karakteristiğini seri olarak bağlanmış bir LC devre yapısı elde etmek mümkündür.



Şekil 1. Lemma 1'de elde edilen $Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln s \right)$ fonksiyonu için frekans yanıtı.

Schwarz Lemması'nın önemli bir sonucu, Osserman tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [18]:

f, U daresinde analitik, $f(0) = 0$ ve $|z| < 1$ için $|f(z)| < 1$ olsun. Ayrıca varsayalım ki, f fonksiyonu bir $z_0 \in \partial U = \{z: |z| = 1\}$ noktasına sürekli devam ediliyor, $|f(z_0)| = 1$, ve $f'(z_0)$ mevcuttur. O zaman

$$|f'(z_0)| \geq \frac{2}{1+|f'(0)|} \geq 1 \quad (3)$$

eşitsizliği sağlanır.

(3) eşitsizliğinde, eşitlik hali ($z_0 = 1$ olduğunda) $f(z) = z \frac{z+m}{1+mz}$, $0 \leq m \leq 1$ fonksiyonu için gerçekleşir. (1.3) eşitsizliğinin ikinci kısmının eşitlik hali $f(z) = ze^{i\alpha}$, α reel olduğunda

mümkündür. (3) eşitsizliği ve genellemeleri geometrik fonksiyonlar teorisinde önemli uygulamalara sahiptir. [18, 19, 20, 21, 22].

Ana Sonuçlar

Bu kısımda, pozitif reel fonksiyonların sınır analizi sonuçları sunulmaktadır. Pozitif reel fonksiyonların tanımından, $Z(s)$ fonksiyonu analitik ve s -düzleminin sağ yarısında tekil değerli olarak ifade edilebilir. Aşağıdaki teoremden, $Z(0) = A$ olmakla birlikte, pozitif reel fonksiyonlar için $Z(0)$ 'ın türevinin üzerinde aşağı sınırlar oluşturulmaktadır.

Teorem 1. $Z(s) = \frac{A}{2} + c_1(s - 1) + c_2(s - 1)^2 + \dots$ fonksiyonu, $\Re s \geq 0$ için $0 < \Re Z(s) \leq A$ olan ve $Z(0) = A$ ile sanal eksenin $s = 0$ noktasında da analitik olan pozitif reel bir fonksiyon olsun. Bu durumda,

$$|Z'(0)| \geq \frac{2A}{\pi} \quad (4)$$

(4) sonucu aşağıdaki fonksiyon için kesindir.

$$Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{(1-i)s + 1 + i}{(1+i)s + 1 - i} \right) \right).$$

İspat. Aşağıdaki $f(z)$ fonksiyonunu göz önüne alalım.

$$f(z) = \frac{e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z \left(\frac{1+z}{1-z} \right) - 1 \right]} - 1}{e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z \left(\frac{1+z}{1-z} \right) - 1 \right]} + 1}$$

$f(z)$ fonksiyonu U içerisinde analitik bir fonksiyondur, $f(0) = 0$ 'dır ve $|z| < 1$ için $|f(z)| < 1$ 'dir. Ayrıca, $s = 0$ için (sanal eksenin $s = 0$ noktası)

$$f(-1) = \frac{e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z(0) - 1 \right]} - 1}{e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z(0) - 1 \right]} + 1} = \frac{e^{\frac{i\pi}{2}} - 1}{e^{\frac{i\pi}{2}} + 1} = \frac{i - 1}{i + 1}, Z(0) = A$$

ve

$$|f(-1)| = 1.$$

sonuçlarına ulaşılır.

$f(z)$ 'in tanımından, basit hesaplamalarla

$$f'(z) = \frac{\frac{4i\pi}{A(1-z)^2} Z' \left(\frac{1+z}{1-z} \right) e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z \left(\frac{1+z}{1-z} \right) - 1 \right]}}{\left(e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z \left(\frac{1+z}{1-z} \right) - 1 \right]} + 1 \right)^2}$$

sonucunu elde ederiz. Dolayısıyla, $z_0 = -1 \in \partial U$ için $|f'(z_0)| \geq 1$ olduğundan

$$1 \leq |f'(-1)| = \left| \frac{\frac{4i\pi}{A^2} Z'(0) e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z(0) - 1 \right]}}{\left(e^{\frac{i\pi}{2} \left[\frac{2}{A} Z(0) - 1 \right]} + 1 \right)^2} \right|$$

$$= \left| \frac{\frac{i\pi}{A} Z'(0) e^{\frac{i\pi}{2}}}{\left(e^{\frac{i\pi}{2}} + 1 \right)^2} \right| = \frac{\pi |Z'(0)|}{A \left| e^{\frac{i\pi}{2}} + 1 \right|^2}$$

$$\left| e^{\frac{i\pi}{2}} + 1 \right|^2 = |i + 1|^2 = 2 \text{ olduğundan}$$

$$|Z'(0)| \geq \frac{2A}{\pi}$$

elde edilir.

Şimdi, (4) eşitsizliğinin kesin olduğu gösterilecektir.

$Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{(1-i)s + 1 + i}{(1+i)s + 1 - i} \right) \right)$ olsun. Bu durumda,

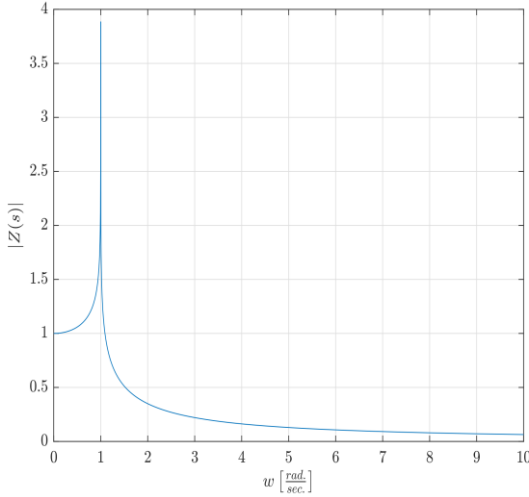
$$\begin{aligned} Z'(s) &= \frac{A}{i\pi} \frac{(1-i)((1+i)s + 1 - i)}{((1+i)s + 1 - i)((1-i)s + 1 + i)} \\ &- \frac{A}{i\pi} \frac{(1+i)((1-i)s + 1 + i)}{((1+i)s + 1 - i)((1-i)s + 1 + i)} \end{aligned}$$

ve

$$|Z'(0)| = \frac{2A}{\pi}$$

olur.

Teorem 1'de elde edilen SNEF'in büyüklüğünün frekansa göre çizimi $A = 1$ varsayımı yapılarak Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 1'den farklı olarak, Şekil 2'de en yüksek empedans değerini belirleyen parametre A parametresidir. Şekil 2'deki grafiği, paralel bağlanmış bir LC devresi ile yaklaşık olarak elde etmek mümkündür.



Şekil 2. Teorem 1’de elde edilen $Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{(1-i)s+1+i}{(1+i)s+1-i} \right) \right)$ fonksiyonu için frekans yanıtı.

(4) eşitsizliği, $Z(s)$ fonksiyonunun Taylor açılımındaki ilk katsayı olan $|Z'(1)|$ ’i dikkate alarak aşağıdan kuvvetlendirilebilir.

Teorem 2. Teorem 1 ile aynı varsayımlar altında

$$|Z'(0)| \geq \frac{4A^2}{\pi(A + \pi|Z'(1)|)} \quad (5)$$

olur. Buna ek olarak, (2.2) eşitsizliği aşağıda verilen fonksiyon için kesindir:

$$Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{1 - a \frac{s-1}{s+1} + i \left(\frac{s-1}{s+1} \right)^2 - ia \frac{s-1}{s+1}}{1 - a \frac{s-1}{s+1} - i \left(\frac{s-1}{s+1} \right)^2 + ia \frac{s-1}{s+1}} \right) \right)$$

Burada, a katsayısı $a = \frac{\pi}{A} |Z'(1)|$ olarak verilen $(0,1]$ aralığında değer alan keyfi bir sayıdır ((2) eşitsizliğine bakınız).

İspat. $f(z)$ fonksiyonu Teorem 1’in ispatındakiyle aynı fonksiyon olsun. Rogosinski Lemması’ndan $a_1 = \frac{zf'(0)(1-|z|^2)}{1-|z|^2|f'(0)|^2}$ ve $r_1 = \frac{|z|^2(1-|f'(0)|^2)}{1-|z|^2|f'(0)|^2}$ olmak üzere $|f(z) - a_1| \leq r_1$ ’dir.

Dolayısıyla,

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(z) - 1}{z - 1} \right| &\geq \frac{1 - |a_1| - r_1}{1 - |z|} \\ &= \frac{1 - \frac{|z||f'(0)|(1-|z|^2)}{1-|z|^2|f'(0)|^2} - \frac{|z|^2(1-|f'(0)|^2)}{1-|z|^2|f'(0)|^2}}{1 - |z|} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1 - |z|^2|f'(0)|^2 - |z||f'(0)|(1-|z|^2) - |z|^2(1-|f'(0)|^2)}{(1-|z|)(1-|z|^2|f'(0)|^2)} \\ &= \frac{1 + |z|}{1 + |z||f'(0)|} \end{aligned}$$

olur.

Son eşitsizlikte limite geçerse

$$|f'(-1)| \geq \frac{2}{1 + |f'(0)|}$$

sonucunu elde ederiz. $|f'(-1)| = \frac{\pi |Z'(0)|}{A}$ ve $|f'(0)| = \frac{\pi |Z'(1)|}{A}$ olduğundan

$$\frac{\pi |Z'(0)|}{A} \geq \frac{2}{1 + \frac{\pi |Z'(1)|}{A}}$$

ve

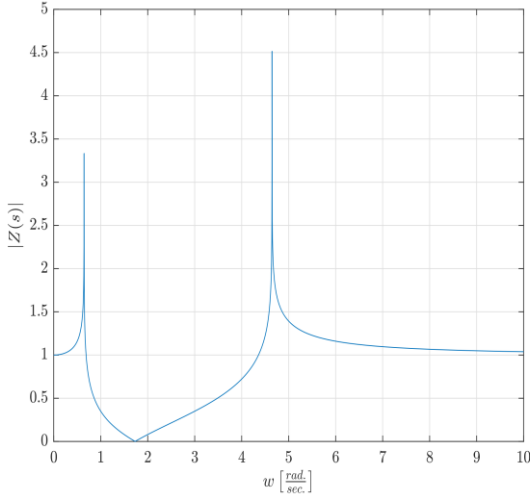
$$|Z'(0)| \geq \frac{4A^2}{\pi(A + \pi|Z'(1)|)}$$

eşitsizliklerine ulaşılır.

Şimdi, (5) eşitsizliğinin kesin olduğu gösterilecektir.

$Z\left(\frac{1+z}{1-z}\right) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{1-az+iz^2-iaz}{1-az-iz^2+iaz} \right) \right)$ olsun. Bu denklemden, $|Z'(0)| = \frac{4A}{\pi(1+a)}$ olduğu görülür. $a = \frac{\pi}{A} |Z'(1)|$ olduğundan, (5) eşitsizliği eşitlikle sağlanır.

Teorem 2’de elde edilen SNEF’in frekans karakteristiği Şekil 3’de gösterilmektedir. Şekil 3’e göre, SNEF $0 \leq w \leq 8$ rad/sn. aralığında iki kutup ve bir sıfıra sahiptir. Diğer yanda; SNEF, $w > 8$ rad/sn için, A değerinde bir direnç gibi davranmaktadır (şekilde $A = 1$ olduğu varsayılmıştır).



Şekil 3. Teorem 2’de elde edilen $Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{(1-i)s+1+i}{(1+i)s+1-i} \right) \right)$ fonksiyonu için frekans yanıtı.

Aşağıdaki teoremda, $Z(s)$ fonksiyonunun c_1 ve c_2 ardışık katsayıları eklenerek (5) eşitsizliği kuvvetlendirilmiştir.

Teorem 3.3. $Z(s) = \frac{A}{2} + c_1(s-1) + c_2(s-1)^2 + \dots$ fonksiyonu, $\Re s \geq 0$ için $0 < \Re Z(s) \leq A$ olan ve $Z(0) = A$ ile sanal eksenin $s = 0$ noktasında da analitik olan pozitif reel bir fonksiyon olsun. Bu durumda,

$$|Z'(0)| \geq \frac{2A}{\pi} \left(1 + \frac{2(A-\pi|c_1|)^2}{A^2 - \pi^2|c_1|^2 + A\pi|c_1| + 2c_2} \right) \quad (6)$$

olur.

(6) eşitsizliği aşağıda verilen ekstremal fonksiyon için kesindir:

$$Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln \left(\frac{(s+1)^2 + i(s-1)^2}{(s+1)^2 - i(s-1)^2} \right) \right)$$

İspat. $f(z)$ Teorem 1’deki ile aynı fonksiyon olduğunu varsayalım. $r(z) = \frac{f(z)}{z}$ ve $v(z) = \frac{r(z)-r(0)}{1-r(0)r(z)}$ fonksiyonlarını göz önüne alalım. Burada; $v(z)$, U içerisinde analitik, $v(0) = 0$ ve $|v(z)| < 1$ for $z \in U$ olmak üzere,

$$v'(0) = \frac{r'(0)}{1-|r(0)|^2} = \frac{f''(0)}{2(1-|f'(0)|^2)}.$$

Rogosinski Lemması ve [12], [13]’den

$$|f(z) - a_2| \leq r_2$$

sonucuna ulaşılır. Burada, $a_2 = \frac{z|f'(0)|(1-\kappa^2)}{1-\kappa^2|f'(0)|^2}$, $r_2 = \frac{\kappa|z|(1-|f'(0)|^2)}{1-\kappa^2|f'(0)|^2}$ ve $\kappa = |z| \frac{|z|+|v'(0)|}{1+|z||v'(0)|}$ olarak verilmektedir. Dolayısıyla,

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(z) - 1}{z - 1} \right| &\geq \frac{1 - |a_2| - r_2}{1 - |z|} \\ &= \frac{1 - \frac{|z||f'(0)|(1-\kappa^2)}{1-\kappa^2|f'(0)|^2} - \frac{\kappa|z|(1-|f'(0)|^2)}{1-\kappa^2|f'(0)|^2}}{1 - |z|} \\ &= \frac{1 - \kappa^2|f'(0)|^2 - |z||f'(0)|(1-\kappa^2) - \kappa|z|(1-|f'(0)|^2)}{(1-|z|)(1-\kappa^2|f'(0)|^2)} \\ &= \frac{1 + \kappa|f'(0)| - |z||f'(0)| - \kappa|z|}{(1-|z|)(1 + \kappa|f'(0)|)} \end{aligned}$$

sonucu elde edilir.

$\kappa = |z| \frac{|z|+|v'(0)|}{1+|z||v'(0)|}$ olduğundan,

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(z)-1}{z-1} \right| &\geq \frac{1 + |z| \frac{|z|+|v'(0)|}{1+|z||v'(0)|} |f'(0)| - |z||f'(0)| - |z| \frac{|z|+|v'(0)|}{1+|z||v'(0)|} |z|}{(1-|z|) \left(1 + |z| \frac{|z|+|v'(0)|}{1+|z||v'(0)|} |f'(0)| \right)} \\ &= \frac{1 + |z| + |z|^2 + |z||v'(0)|(1-|z|)}{1 + |z||v'(0)| + |z|^2|f'(0)| + |z||f'(0)||v'(0)|} \\ &= \frac{|z||f'(0)|(1-|z|) + |z||v'(0)|(1-|z|)}{1 + |z||v'(0)| + |z|^2|f'(0)| + |z||f'(0)||v'(0)|} \end{aligned}$$

sonucuna ulaşırız. Son eşitsizlikte limite geçilirse

$$\begin{aligned} |f'(-1)| &\geq \frac{3 + |v'(0)| - |f'(0)| + |f'(0)||v'(0)|}{1 + |v'(0)| + |f'(0)| + |f'(0)||v'(0)|} \\ &= \frac{3 + |v'(0)| - |f'(0)| + |f'(0)||v'(0)|}{(1 + |v'(0)|)(1 + |f'(0)|)} \end{aligned}$$

olur. Bazı küçük değişiklikler yapılarak

$$\begin{aligned} |f'(-1)| &\geq 1 + \frac{2(1-|f'(0)|)^2}{(1+|v'(0)|)(1-|f'(0)|)^2} \\ &= 1 + \frac{2(1-|f'(0)|)^2}{2(1-|f'(0)|)^2 + |f''(0)|} \end{aligned}$$

elde edilir. $|f'(-1)| = \frac{\pi|Z'(0)|}{A}$, $|f'(0)| = \frac{\pi|c_1|}{A}$ ve $|f''(0)| = \frac{2\pi}{A}|c_1 + 2c_2|$ olduğundan

$$\frac{\pi|Z'(0)|}{A} \geq 1 + \frac{4 \left(1 - \frac{\pi|c_1|}{A} \right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{\pi|c_1|}{A} \right)^2 \right) + \frac{2\pi}{A}|c_1 + 2c_2|}$$

ve

$$|Z'(0)| \geq \frac{2A}{\pi} \left(1 + \frac{2(A - \pi|c_1|)^2}{A^2 - \pi^2|c_1|^2 + A\pi|c_1| + 2c_2} \right)$$

olur. Şimdi, (6) eşitsizliğinin kesin olduğu gösterilecektir. Aşağıdaki fonksiyona bakalım:

$$Z\left(\frac{1+z}{1-z}\right) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln\left(\frac{1+iz^2}{1-iz^2}\right)\right).$$

Dolayısıyla, $|Z'(0)| = \frac{4A}{\pi}$ dir.

Diğer yandan,

$$\begin{aligned} \frac{A}{2} + c_1 \frac{2z}{1-z} + c_2 \left(\frac{2z}{1-z}\right)^2 + \dots \\ = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln\left(\frac{1+iz^2}{1-iz^2}\right)\right), \end{aligned}$$

$$c_1 \frac{2z}{1-z} + c_2 \left(\frac{2z}{1-z}\right)^2 + \dots = \frac{A}{i\pi} \ln\left(\frac{1+iz^2}{1-iz^2}\right)$$

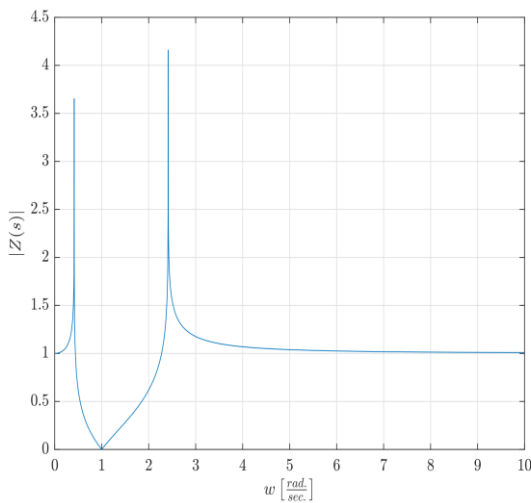
sonuçlarına ulaşılır. Limit durumuna geçildiğinde son denklem, $c_1 = 0$ olduğunu ifade etmektedir.

Benzer şekilde, basit hesaplamalarla $c_2 = \frac{A}{2\pi}$ olduğu görülebilir. Bu yüzden,

$$\begin{aligned} \frac{2A}{\pi} \left(1 + \frac{2(A - \pi|c_1|)^2}{A^2 - \pi^2|c_1|^2 + A\pi|c_1 + 2c_2|}\right) \\ = \frac{2A}{\pi} \left(1 + \frac{2A^2}{A^2 + A^2}\right) = \frac{4A}{\pi} \end{aligned}$$

sonucuna ulaşılır.

Şekil 3'tekine benzer bir frekans yanıtı burada da elde edilmektedir. Bu yanıt, Şekil 4'te gösterilmektedir. Teorem 2'deki gibi, burada da frekans yanıtı 5 rad/sn'den büyük frekans değerleri için dirençsel (rezistif) bir yapı göstermektedir. Daha önce sunulan teoremlerde olduğu gibi, direncin değeri A parametresine bağlıdır.



Şekil 4. Teorem 3'te elde edilen $Z(s) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{i\pi} \ln\left(\frac{(s+1)^2 + i(s-1)^2}{(s+1)^2 - i(s-1)^2}\right)\right)$ fonksiyonu için frekans yanıtı.

Tartışma

Bu çalışmada, süren nokta empedans fonksiyonlarının sınır analizi yapılmıştır. Buna göre, Rogosinski Lemması ile beraber Carathéodory Eşitsizliği'ni kullanarak $|Z(s)|$ için alt sınırlar belirleyen üç teorem sunulmuştur. Teorem 1'de verilen eşitsizlik, $|Z'(1)|$ teriminin eklenmesiyle Teorem 2'de güçlendirilmiştir. Benzer şekilde, ardışık c_1 ve c_2 katsayılarını hesaba katarak Teorem 2 kuvvetlendirilmiş ve Teorem 3'te ortaya yeni bir sınır konmuştur. Elde edilen bütün eşitsizlikler, kesinlik analizine tabi tutulmuş ve bu sayede her teorem için ekstremal fonksiyonlar elde edilmiştir. Elde edilen bu ekstremal fonksiyonların, frekans karakteristiği grafiklerine göre, bu çalışmada önerilen teoremlerle farklı özellikte süzgeç (filtre) yapıları tasarlamak mümkündür.

Kaynaklar

- [1] Örnek, B. N., Düzenli, T., (2019). Pozitif Reel Fonksiyonlar için Devre Uygulamaları. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, **10**, 2, 457-465.
- [2] Sharma, A., Soni, T., (2017). A review on passive network synthesis using Cauer form. *World Journal of Wireless Devices and Engineering*, **1**, 1, 39-46.
- [3] Ishida, M., Fukui, Y., & Ebisutani, K., (1984). Novel active-R synthesis of a driving-point impedance. *International Journal of Electronics*, **56**, 1, 151-158.
- [4] Ochoa, A., (2016). Driving point impedance and signal flow graph basics: a systematic approach to circuit analysis. In *Feedback in analog circuits* (pp. 13-34). Springer, Cham.
- [5] Wunsch, A. D., Hu, S. P., (1996). A closed-form expression for the driving-point impedance of the small inverted L antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **44**, 2, 236-242.
- [6] Richards, P. I., (1947). A special class of functions with positive real part in a half-plane. *Duke Mathematical Journal*, **14**, 3, 777-786.
- [7] Hazony, D., (1963). *Elements of network synthesis*. Reinhold, NY, USA.
- [8] Reza, F. M., (1961). Schwarz's lemma and linear passive systems. *Proc. IRE*, **49**, 2, 17-23.
- [9] Örnek, B. N., Düzenli, T., (2019). On boundary

- analysis for derivative of driving point impedance functions and its circuit applications. *IET Circuits, Devices & Systems*, **13**, 2, 145-152.
- [10] Örnek, B. N., Düzenli, T., (2018). Boundary Analysis for the Derivative of Driving Point Impedance Functions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, **65**, 9, 1149-1153.
- [11] Dineen, S., (1989). The Schwarz Lemma. Clarendon Press, USA.
- [12] Mercer, P. R., (1997). Sharpened versions of the Schwarz lemma. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **205**, 2, 508-511.
- [13] Mercer, P. R. (2018). Boundary Schwarz inequalities arising from Rogosinski's lemma. *Journal of Classical Analysis*, **12**, 93-97.
- [14] Maz'ya, V., Kresin, G., (2007). Sharp Real-Part Theorems: A Unified Approach. Springer.
- [15] Örnek, B. N., (2015). Carathéodory's inequality on the boundary. *The Pure and Applied Mathematics*, **2**, 2, 169-178.
- [16] Örnek, B. N., (2016). The Carathéodory inequality on the boundary for holomorphic functions in the unit disc. *Journal of Mathematical Physics, Analysis, Geometry*, **12**, 4, 287-301.
- [17] Mercer, P. R., (2018). An improved Schwarz Lemma at the boundary. *Open Mathematics*, **16**, 1, 1140-1144.
- [18] Osserman, R., (2000). A sharp Schwarz inequality on the boundary. *Proceedings of the American Mathematical Society*, **128**, 12, 3513-3517.
- [19] Azeroğlu, T. A., Örnek, B. N., (2013). A refined Schwarz inequality on the boundary. *Complex Variables and Elliptic Equations*, **58**, 4, 571-577.
- [20] Boas, H. P., (2010). Julius and Julia: Mastering the art of the Schwarz lemma. *The American Mathematical Monthly*, **117**, 9, 770-785.
- [21] Dubinin, V. N., (2004). The Schwarz inequality on the boundary for functions regular in the disk. *Journal of Mathematical Sciences*, **122**, 6, 3623-3629.
- [22] Mateljevic, M. (2018) Rigidity of holomorphic mappings & Schwarz and Jack lemma, *Researchgate*.

Çatı Üstü PV Elektrik Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Şanlıurfa Örneği

Determination of Rooftop PV Electricity Generation Potential: The case of Şanlıurfa

Erdal Yıldırım^{1*}, Mehmet A. Aktacir²

¹ Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Şanlıurfa, erdaly@harran.edu.tr

² Harran Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, aktacir@harran.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 17 Haziran 2020
Düzeltilme: 23 Eylül 2020
Kabul: 25 Eylül 2020

Anahtar kelimeler:

Fotovoltaik panel teknolojileri,
çatıya entegre fotovoltaik panel,
elektrik potansiyeli, Şanlıurfa

ÖZET

Şanlıurfa'nın yıl boyunca günlük ortalama güneş ışınım değeri yaklaşık 5.0 kWh/m² 'dir. Bu potansiyeli değerlendirmek amacıyla çatı üstü fotovoltaik panellerin yıllık enerji üretim değerleri hesaplanmıştır. Bu analiz için Harran Üniversitesine bağlı Şanlıurfa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu binaları seçilmiştir. Hesaplamalarda en yaygın kullanılan üç farklı Fotovoltaik (PV) panel teknolojisi seçilmiştir. Bunlar mono-Si, p-Si ve CdTe 'dür. Ayrıca bu çalışmada, aylık ortalama PV verimleri ve panel yüzey sıcaklıkları hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda; incelenen PV paneller arasında yıllık bazda maksimum elektrik enerjisi üretiminin mono-Si panellerden elde edilebileceği görülmüştür. Mono-Si panelin ortalama birim alanda üretilebileceği maksimum elektrik enerjisi yaklaşık 345 kWh'tir. p-Si ve CdTe PV paneller ile yıllık elektrik enerji üretimi sırasıyla yaklaşık 311 kWh/m² ve 234 kWh/m² olarak bulunmuştur.

Doi: 10.24012/dumf.860242

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 June 2020
Revised: 23 September 2020
Accepted: 25 September 2020

Keywords:

Photovoltaic panel technologies,
roof integrated photovoltaic
panel, electrical energy potential,
Şanlıurfa

ABSTRACT

The average daily solar radiation value of Şanlıurfa throughout the year is about 5.0 kWh/m². In order to evaluate this potential, the annual energy generation values of rooftop photovoltaic panels were calculated. For this analysis, Harran University Şanlıurfa Technical Sciences Vocational School buildings were selected. Three different PV panel Technologies are used for the calculations. These are mono-Si, p-Si and CdTe. In addition, monthly average PV efficiencies and panel surface temperatures were calculated. As a result of the study, it was observed that the maximum electrical energy generation can be obtained by mono-Si panels among the examined PV panels. The maximum electrical energy that mono-Si panel generates, is approximately 345 kWh per unit area. Annual electrical energy generation with p-Si and CdTe PV panels was found to be approximately 311 kW/m² and 234 kWh/m², respectively.

* Sorumlu yazar / Correspondence
Erdal YILDIRIM
✉ erdaly@harran.edu.tr

Giriş

Günümüzde, binaların elektrik enerji ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla Fotovoltaik panellerin bina cephelerinde kullanılması giderek artmaktadır. Bu amaç için binaların dış duvar yüzeyleri ve çatıları kullanılmaktadır. Türkiye'nin de yer aldığı kuzey yarımkürede, güneş paneli yerleştirmenin en genel kuralı, panellerin güney yönüne bakacak şekilde yerleştirilmesidir. Çünkü güneş panelleri gün boyunca doğrudan ışık alabilir. Ancak yeterli yüzey olmadığı takdirde doğu ve batı cepheleri de kullanılabilir. Bina cephelerine yerleştirilen PV panellerin maksimum oranda elektrik enerjisi üretimi için gelen güneş enerjisini dik doğrultuda alacak şekilde panellerin optimum eğimle yerleştirilmeleri gerekir.

PV panellerin performansı üzerinde etkili olan parametrelerin başında tercih edilen PV teknolojileri gelmektedir. Günümüzde ticari olarak pazarda en fazla bulunan ve satışı yapılan paneller kristalin teknolojiyle üretilen panellerdir. Bunun dışında ince film teknolojisiyle üretilen PV paneller de ticari olarak pazarda bulunmaktadır. Mono ve poli kristalin paneller %20 panel verimine ulaşmaktadır[1]. İnce film teknolojisine sahip PV panellerin verimi daha düşük kalmaktadır. Bunun dışında PV panel performansı üzerinde etkili olan diğer önemli parametre, bölgenin meteorolojik özellikleridir. Bir bölgenin güneş enerji potansiyeli bölgenin güneşlenme süresi ve güneş radyasyon değerine bağlıdır. Türkiye'nin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2482 saat olup [2] yıllık ortalama güneş radyasyon değeri 1583,5 kWh/m²'dir [3]. Bu değer güneye doğru gidildikçe dikkate değer oranda artmaktadır. Bunun dışında dış ortam hava sıcaklığı ve rüzgar hızı panel performansını etkileyen yerel iklim özellikleridir. PV paneller üzerine gelen güneş enerjisinin çok az bir kısmını (max.%20'si kadar) elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Geri kalan kısmı ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bundan kaynaklı olarak PV panellerde elektrik enerjisi üretimi esnasında panel yüzey sıcaklığı sürekli olarak artmaktadır. Bu da panel performansını olumsuz olarak etkileyen önemli bir etkendir.

Literatürde, farklı iklim bölgelerinde bina yüzeyine/çatısına monte edilmiş (veya monte edilmesi planlanan) PV panellerin performanslarını tespit etmeyi amaçlayan çalışmalar mevcuttur.

[4]'de İspanya, Endülüs için gerçekleştirilen çalışmada uydu fotoğrafları ve istatistiksel veriler kullanılarak öncelikle bina özellikleri tanımlanmış ve ardından PV panellerin kurulabileceği kullanışlı çatı yüzey alanları hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, uygun olan konut çatılarının tamamına PV paneller kurulması durumunda, binanın tüm enerji ihtiyacının %78.89'unun karşılanabileceği bulunmuştur.

[5]'de bir yurt binasının çatısına kurulacak PV sisteminin uygunluğu ve sistem performansı bir simülasyon yazılımı ile değerlendirilmiştir. Çatıya monte edilmesi hedeflenen sistem için ayrıca kristalin silikon (c-Si), amorf silikon (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indium diselenid (CIS) olmak üzere dört farklı PV teknolojisinin performans oranları karşılaştırılmıştır. En yüksek performans oranı (PR)(Enerji çıktısının standart test koşullarında elde edilen miktara oranı) (a-Si) için %79.50 bulunurken CdTe için bu oran %77 bulunmuştur. c-Si ve CIS için ise performans oranları %75'in altında çıkmıştır. [6]'de ise Singapur'un ilk sıfır enerjili binasının çatısına kurulmuş 142.50 kWp kapasiteli entegre PV panel (BIPV) sisteminin 18 aylık ilk performans değerlendirmesi sunulmuştur. Test şartları altında modül verimi %13.70 verilen polikristalin PV sisteminin verimi %11.20 bulunmuştur.

[7]'de batı Avustralya iklim koşullarında kristalin silikon (c-Si), polikristalin silikon (p-Si), amorf silikon (a-Si) ve bakır indiyum diselenid (CIS) gibi PV modüllerin performansları bir yıldan uzun bir süre için ölçülmüştür. Aynı çalışma koşulları altında enerji üretimleri karşılaştırılmıştır. Diğer kristalin teknolojilerine göre ince film modüllerinin performans oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.

[8]'de sıcak ve nemli Malezya ikliminde polikristalin, monokristal ve amorf silikon PV panellerin verimlerinin ölçülmesi hedeflenmiştir.

Paneller performanslarını artırmak amacıyla tek eksenli zaman/tarih güneş izleyicisine monte edilmiştir. Polikristalin panellerin performans oranının ve ortalama modül veriminin diğer test edilen PV panellere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Farklı PV teknolojilerinin Hindistan iklim koşullarına uygunluğunun araştırıldığı çalışma [9]'da ise polikristalin (p-Si), heteroeklem (HIT) ve amorf silikon (a-Si) PV teknolojileri, hem simülasyon yazılımı kullanılarak hem de performans ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. HIT ve a-Si teknolojilerinin p-Si teknolojisine göre bu bölge için daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. a-Si modülleri p-Si modüllerine göre yaz aylarında %14 daha verimli kış aylarında ise %6 daha az verimli bulunmuştur. HIT modüllerinin ise p-Si modüllerine göre %4-12 daha fazla enerji ürettiği bulunmuştur. Hindistan iklim koşullarında PV teknolojilerinin uygunluğunu araştıran diğer bir çalışma [10]'de ise polikristalin ve CdTe modül teknolojilerinin MPPT (Maximum Power Point Tracker) ve PWM (Pulse Width Modulation) regülatör teknikleri kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Ayrıca polikristalin silikon tipi PV modülleri değişik eğim açılarında incelenmiştir. MPPT şarj regülatörü kullanıldığında CdTe modülü daha iyi bir performans sağlarken PWM şarj regülatörü kullanıldığında ise polikristalin modülü daha iyi sonuç vermiştir. Eğim açısı ve yönlendirme PV modüllerde performansı etkileyen önemli faktörlerdendir. PV modüllerinin optimum eğimi yerel enlem açısına eşittir ve optimum yönü ise güneydir. Çalışma [11]'de de kuzey Şili'nin çöl iklimine sahip Antofagasta bölgesi için on altı ay boyunca PV sistemlerinin performans oranları, güneş ışınım ve hava sıcaklığı dikkate alınarak incelenmiştir. Araştırmada kullanılan modül teknolojileri amorf/mikrokristal silikon ince film (a-si/ μ c-Si) ve monokristal silikon (mono-Si)'dur. PV panellerin yüzeylerinin temiz olması koşuluyla performans oranlarındaki mevsimsel düşüş, ince film ve mono-Si teknolojileri için sırasıyla %80-78 ve %82-73 olarak gözlemlenmiştir. İklimsel etkilerin incelendiği bir diğer çalışma [12]'da Nijerya'da ticari olarak mevcut polikristalin silikon (p-Si), amorf silikon (a-Si), mono kristalin silikon (mono-Si) ve bakır indium diselenid (CIS) PV modüllerinin

performansı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Araştırma üç gün boyunca dış hava koşullarında yapılmıştır. Modül verimleri ve performans oranları matematiksel bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Güneş ışınım ve modül sıcaklıklarının bu parametrelere etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, sabit yöndeki panel için sıcak günlerde c-Si ve p-Si modülleri daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu panellerin ortalama modül verimleri sırasıyla %11.83 ve %9.16 olarak bulunmuştur. Bulutlu günlerde ise CIS ve a-Si modülleri daha iyi performans göstermişlerdir ve ortalama modül verimleri sırasıyla %7.12 ve %3.61 olarak bulunmuştur.

[13]'te Bursa'da yer alan, mono-kristal, poli-kristal ve ince film üç fotovoltaik teknoloji ile oluşturulan 1 MW şebekeye bağlı fotovoltaik santralin aylık ve yıllık performans analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, mono-kristal, poli-kristal ve ince film (CIS) sistemlerinin, sırasıyla yılda 1416 MWh, 1202 MWh ve 1150 MWh elektrik üreteceği, yıllık ortalama performans oranlarının %85, %72.1 ve %70 olacağı ön görülmüştür. [14]'teki çalışmada ise Süleyman Demirel Üniversitesi fotovoltaik enerjiden yararlanma şansı uygun görülen fakülte bina çatılarına fotovoltaik çatı sistemleri modeli göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Yapılan analiz ve araştırmalarda proje yatırımın öz sermaye ile gerçekleşmesi durumunda yatırımdan yıllık %96 kazanç elde edileceği görülmüştür.

Genel olarak binaya entegre edilen PV sistem uygulamalarında sistem performansını üzerinde etkili olan tüm parametrelerin incelenmesi gerekir. Sunulan bu çalışmada, Şanlıurfa ilinde bulunan üniversite kampüs alanında bulunan eğitim binaları seçilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, seçilen binaların toplam çatı alanı ve azimut açıları belirlenmiştir. Sonraki bölümde, çatı yüzeyine düşen güneş ışınım değerleri hesaplanarak mono-Si, p-Si ve CdTe PV teknolojileri ile elektrik üretilmesi durumunda mevcut toplam elektrik enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. Son bölümde, hava sıcaklığı, rüzgar ve ışınımın gibi çevresel etkilerin PV teknolojilerinin verimine etkisi incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, 37.70 K ve 38.49 D konumunda bulunan Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO'nun eğitim binaları dikkate alınmıştır. Şekil 1'de

Çalışmanın ilk bölümünde uydu fotoğrafı üzerinde çatı yüzeyleri ölçeklendirilerek toplam yüzey alanları ve bu yüzeylerin azimut açıları tespit edilmiştir. PV panellerin eğim açıları

Tablo 1. PV panel özellikleri

Table 1. PV panel features

Teknoloji tipi	Model	Sıcaklık Katsayısı (%/°C)	Panel Boyutları (mm)	Panel Verimi (%)
İnce film CdTe panel	FS Series 3 Black PV Module	-0.25	1200 / 600	12.20
Multikristalin silikon p-Si	YGE 72 Hücre Serisi 2	-0.42	1960 / 990	16.70
Monokristalin silikon Mono-Si	Panda 60 Hücre Serisi 2	-0.38	1640 / 990	18.50

incelenen binalarının yer aldığı uydu fotoğrafı gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi MYO'nun toplam 7 adet bağımsız binası bulunmaktadır. Binaların çatı eğimleri ve güneye yönelmelerinde farklılıklar görülmektedir.



Şekil 1. Teknik Bilimler MYO'nun PV sistem ile elektrik üretimi için kullanılabilir çatı yüzeyleri

Figure 1. Roof surfaces that can be used for electricity generation with PV system of Technical Sciences Vocational School

çatının eğim açısına eşit olarak kabul edilmiştir. Kuzeybatı, kuzeydoğu ve kuzey cepheli çatılar PV montajına uygun olmadığı kabul edilmiştir. Çatı yüzeylerinde kenarlardan en az 30 cm servis için boşluk bırakılmıştır. Bu çalışmada, ticari olarak en fazla kullanılan mono-kristalin silikon, multi-kristalin silikon ve ince film CdTe panel olmak üzere 3 farklı fotovoltaik (PV) panel teknolojisi dikkate alınmıştır. Seçilen bu PV panellerin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde Şanlıurfa meteorolojik koşullarında çatıya entegre edilen PV sisteminin performans değerleri tespit edilmiştir. PV panellerin performanslarının elektrik güç çıktısı olarak elde edilmesine yönelik olarak aşağıdaki formül kullanılmıştır [15],

$$P = \eta_{T_{ref}} A I_T [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma_I \log_{10} I_T] \quad (1)$$

Modül verimi aşağıdaki gibi ifade edilir [16]

$$\eta = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma_I \log_{10} I_T] \quad (2)$$

$\eta_{T_{ref}}$ ise 1000 W/m^2 güneş ışınımında ve T_{ref} (25°C) referans sıcaklığındaki modülün elektrik verimidir. β_{ref} sıcaklık katsayısıdır ($^\circ\text{C}^{-1}$) ve γ_I ise güneş ışınım katsayısıdır. I_T ifadesi modül yüzeyine düşen güneş ışınımıdır (W/m^2). Parantez içindeki son değerler genellikle sıfır

olarak kabul edilir [17] ve modül verimi eşitlik 3'e dönüşür,

$$\eta = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})] \quad (3)$$

T_c modül çalışma sıcaklığıdır. T_c %3'den daha az bir hata oranıyla eşitlik 4 ile hesaplanır [18],

$$T_c = 0.943 T_a + 0.195 I_T - 1.528 U + 0.352 \quad (4)$$

Bu eşitlikte, T_a çevre sıcaklığını, I_T güneş ışınımını ve U rüzgar hızını göstermektedir.

Bu çalışmada, Şanlıurfa'ya ait çevre sıcaklığı (T_a), rüzgar hızı (U) ve yatay yüzeye

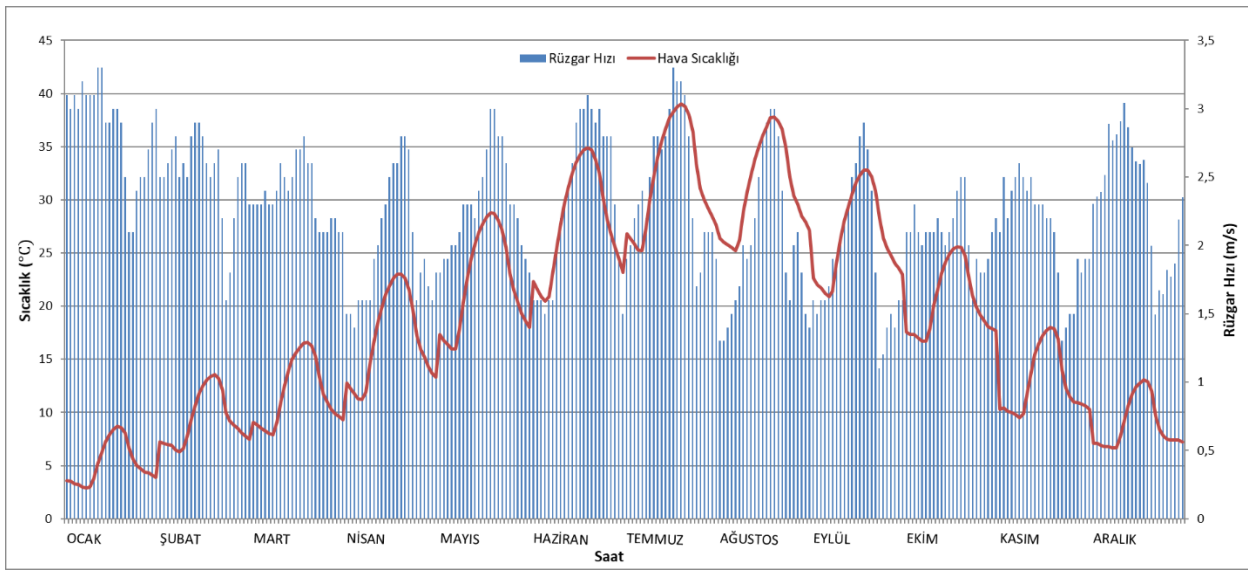
faktör ve toprağın yansımaya katsayısını, β ise yüzeyin eğim açısını göstermektedir.

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

PV sistemde üretilen elektriği enerjisi (E) eşitlik 6 ile belirlenmiştir.

$$E = A \eta I_T Pr \quad (6)$$

Burada, A fotovoltaik panellerin toplam yüzey alanını, Pr ise kayıpları ifade eden performans oranını göstermektedir. Bu çalışmada 0.85 olarak kabul edilmiştir [20].



Şekil 2. Hava sıcaklığı ve rüzgar hızının aylık ortalama günlük değişimi

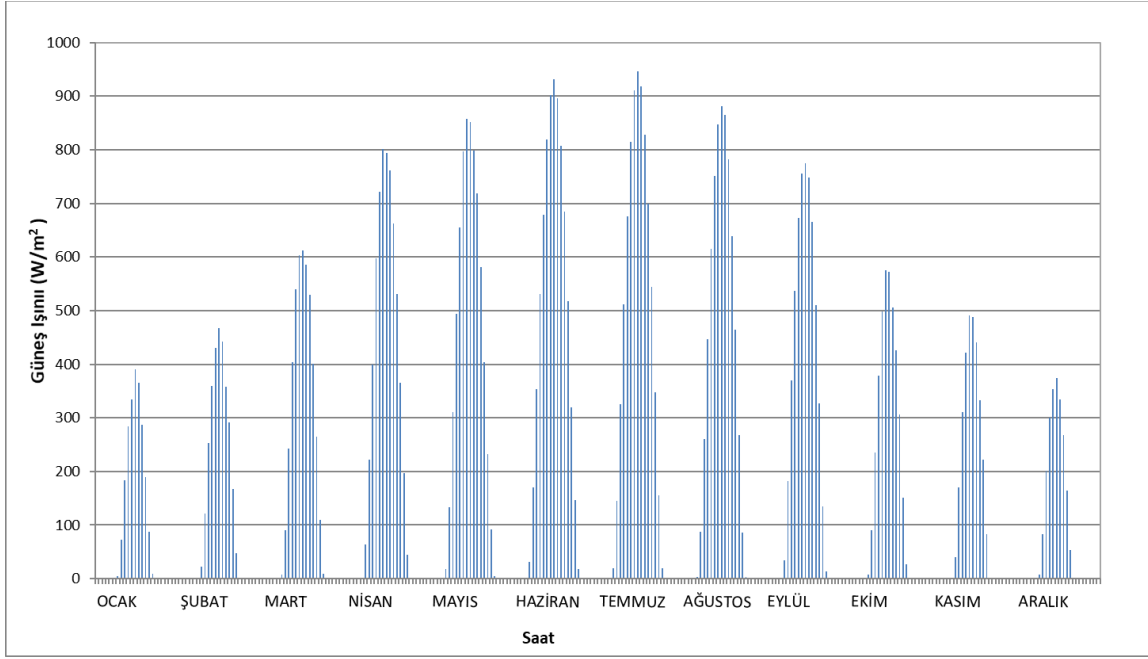
Figure 2. Monthly average daily change of air temperature and wind speed

düşen ışınım (I) değerleri 2014-2016 arası yılları kapsayan meteorolojik veriler kullanılmıştır. Onar dakikalık aralarla ölçülmüş verilerin ait olduğu saatteki ortalaması alınmış ve saat boyunca sabit değerde olduğu kabul edilmiştir.

Bu çalışmada fotovoltaik paneller çatı eğimine eşit olarak yüzeyine yerleştirildiği kabul edilmiştir. Fotovoltaik panel yüzeyine düşen toplam güneş ışınımı hesaplanmasında [19]'da verilen izotropik difüz model kullanılmıştır. Bu modele göre eğik yüzeye düşen saatlik toplam güneş ışınımı eşitlik 5 ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte I_b ve I_d yatay yüzeye düşen ışınımın direkt ve difüz elemanını göstermektedir. Eşitlikte verilen R_b ve ρ_g sırasıyla geometrik

Tartışma ve Değerlendirme

2014-2016 arası yılları kapsayan Şanlıurfa'ya ait meteorolojik veriler kullanılarak Şekil 2 ve Şekil 3'deki grafikler elde edilmiştir. Şekil 2'de her bir ay için çevre sıcaklığının ve rüzgar hızının ortalama günlerde [21] saatlik değişimi verilmiştir. Şekil 2'den görüleceği gibi, rüzgar hızı aylara göre yaklaşık olarak 1.5-3 m/s arasında değişirken, dış hava sıcaklığı aylara



Şekil 3. Yatay yüzeye düşen güneş ışınımının aylık ortalama günlük değişimi

Figure 3. Monthly average daily change of solar radiation on horizontal surface

göre yaklaşık olarak 3-39 °C arasında değerlerinin her bir ayın ortalama gününde yerel değişmektedir. Şekil 3’de ise kullanılan ışınım saate göre değişimi gösterilmiştir.

Tablo 2. Farklı PV teknolojilerinin aylık ortalama modül verimleri ve aylık ortalama panel sıcaklıkları

Table 2. Monthly average module efficiencies and monthly average panel temperatures of different PV Technologies

	Çatı yüzeyine düşen Işınım (kW/m ²)	Rüzgar Hızı (m/s)	Hava Sıcaklığı (°C)	Panel Sıcaklığı (°C)	$\eta_{\text{mono-Si}}$	$\eta_{\text{p-Si}}$	η_{CdTe}
Ocak	74,0	2,9	5,2	6,6	19,8	18,0	13,1
Şubat	91,2	2,5	9,4	11,3	19,5	17,7	12,9
Mart	142,7	2,4	11,8	16,5	19,1	17,3	12,8
Nisan	189,0	2,0	16,9	23,1	18,6	16,8	12,6
Mayıs	214,4	2,3	22,3	31,0	18,1	16,3	12,3
Haziran	232,0	2,3	28,0	35,3	17,8	16,0	12,2
Temmuz	243,1	2,5	32,2	39,2	17,5	15,7	12,1
Ağustos	219,6	2,0	31,2	37,6	17,6	15,8	12,1
Eylül	182,1	1,9	26,5	33,6	17,9	16,1	12,2
Ekim	124,9	2,1	20,5	24,4	18,5	16,7	12,5
Kasım	98,7	2,1	12,8	18,5	19,0	17,2	12,7
Aralık	73,4	2,4	8,9	10,8	19,5	17,7	12,9

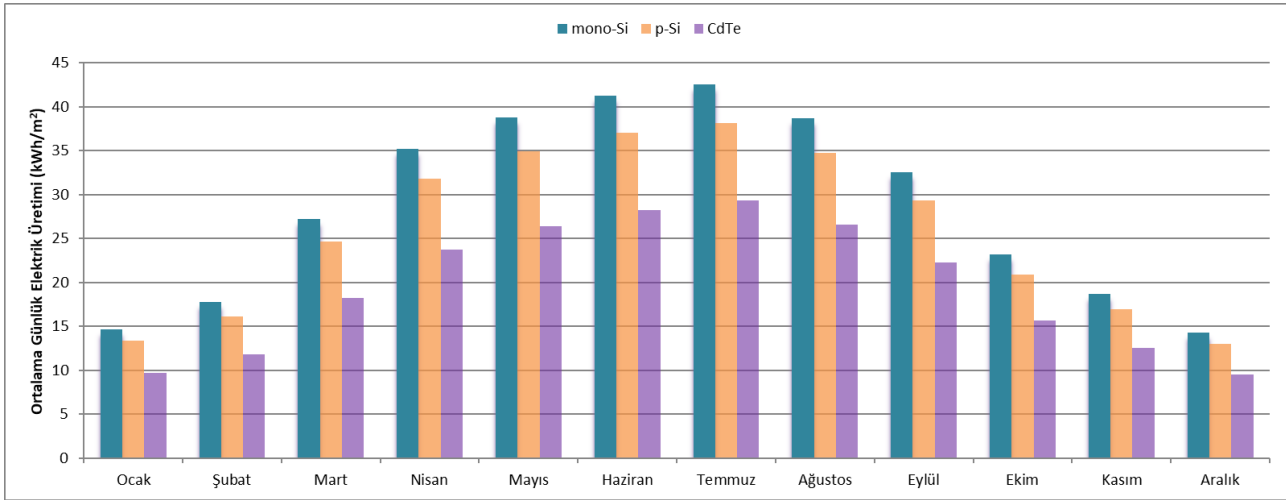
İncelenen binaların uydu görüntülerinden yapılan hesaplama ile toplam çatı alanı 4564 m² olarak bulunmuştur. Bu binaların ortalama çatı eğimi yaklaşık olarak 10°'dir. Mevcut çatıların kullanılabilir çatı yüzeylerinin belirlenmesi için çatıların azimut açıları tespit edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda, azimut açıları $\gamma = 52^\circ$ (güneybatı) ile $\gamma = -52^\circ$ (güneydoğu) arasında kalan çatıların yüzeyleri tespit edilmiştir. Buna göre, PV panellerin montajı için kullanılabilir çatı alanı 2020 m² olarak bulunmuştur. Bu sonuç toplam çatı alanının % 44.3'ünü oluşturmaktadır.

Uygun çatı alanlarına PV panel yerleştirilmesi durumunda, 3 farklı PV panel teknolojisi için PV panellerinden elde edilecek elektrik enerjisi miktarı ve panel verimleri eşitlik 1-5 ile hesaplanmıştır. Modül verimleri ve panel sıcaklıkları sırasıyla eşitlik 2 ve 4 yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 2'de hesaplanan ortalama modül verimlerinin ve verime etkisi yüksek bir parametre olan panel sıcaklığının aylık ortalamaları verilmiştir. En verimli modül mono-Si olarak bulunmuştur ve aylık ortalama verimi %18.60 olmakla birlikte en yüksek değeri

39.20 °C'dir. Standart test şartlarındaki 25°C lik çalışma sıcaklığından yaklaşık 14.0 °C daha yüksektir. Tablo 1'de gösterilen üretici firmanın mono-Si PV için verdiği sıcaklık katsayısı -0.38 %/°C'dir. Eşitlik 3 'den hesaplanabileceği gibi 14°C'lik sıcaklık farkı %5.40'lık modül veriminde düşüşe sebep olmuştur. p-Si ve CdTe PV panellerinin aylık maksimum modül verimleri Ocak ayında gözlemlenmekle birlikte sırasıyla %18.0 ve %13.10 'dir. Minimum modül verimleri p-Si için %15.70 ve CdTe için %12.10 olarak Temmuz ayında gerçekleşmiştir.

Paneller Nisan-Eylül ayları arasında ortalama 26.19°C hava sıcaklığında günlük 6.99 kWh/m² güneş ışınımı ve Ekim-Mart ayları arasında ise ortalama 11.42°C hava sıcaklığında günlük 3.30 kWh/m² güneş ışınımı almıştır.

Kış ile yaz mevsimi ortalama panel verimlerinde (%12.98-%12.14) CdTe PV teknolojisi için %6.92'lik bir değişim görülmüştür. mono-Si ve p-Si panellerdeki mevsimsel maksimum değişim ise sırasıyla %10.69 (%19.59-%17.7) ve %11.87 (%17.78-%15.90)'dir.



Şekil 4. Farklı PV teknolojilerine göre aylara göre ortalama günlük elektrik enerjisi üretim değerleri

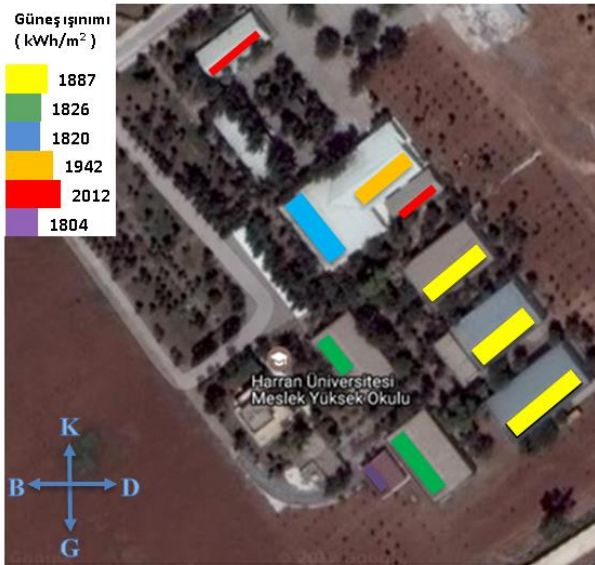
Figure 4. Average daily electricity generation values by months according to different PV technologies.

%19.80 Ocak ayındadır ve modül çalışma sıcaklığı ortalama 6.60 °C'dir. Mono-Si PV panel için en düşük modül verimi %17.50 ile Temmuz ayındadır ve bu ay için ortalama panel sıcaklığı

Şekil 4'de 3 farklı PV teknolojisi için birim alanda elde edilebilecek elektrik enerjisinin aylık miktarları gösterilmiştir. Yıl boyunca birim alanda aylık olarak elde edilebilecek en yüksek elektrik enerjisi Temmuz ayında 42.5 kWh

olarak mono-Si PV panel için bulunmuştur. Temmuz ayı için birim alanda elde edilen elektrik enerjisi p-Si ve CdTe PV paneller için sırasıyla 38.20 kWh ve 29.30 kWh'tir. Yıl boyunca en düşük elektrik üretimi Aralık ayında gerçekleştirilmiştir. Mono-Si PV panelde birim alanda üretim 14.30 kWh'tir. Aralık ayı için p-Si ve CdTe PV panellerdeki üretim ise sırasıyla 13kWh ve 9.50 kWh'tir.

Birim alanda aylık ortalama elektrik enerjisi üretimi ise mono-Si panel için 28.70 kWh, p-Si panel için 25.90 kWh ve CdTe için 19.50 kWh' olarak hesaplanmıştır. Altı aylık ortalamalara göre sıcak aylarda (Nisan-Eylül arası) mono-Si PV panelin birim alanında üretilen elektrik enerjisi (38.20 kWh) soğuk aylarda (Ekim-Mart arası) üretilen elektrik enerjisinden (19.30 kWh) % 98.0 daha fazladır. Mono-Si PV panel teknolojisiyle birim alanda yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi yaklaşık 345 kWh'tir. p-Si ve CdTe PV paneller için ise yıllık üretim sırasıyla yaklaşık 311 kWh ve 234 kWh'tir.



Şekil 5. İncelen binaların birim çatı yüzeyi başına yıllık toplam güneş ışınım değerleri

Figure 5. Annual solar irradiance values per unit roof area of the studied buildings.

İncelenen binaların kullanılabilir çatı yüzeylerinin birim alan başına yıllık güneş ışınım değerleri eşitlik 5 ile hesaplanarak Şekil 5'de

sunulmuştur. Şekilde görüleceği gibi aynı yön ve eğime sahip binalarda eşit olmakla beraber birim alan başına yıllık güneş ışınım değerleri 1804 ile 2012 kWh/m² arasında bulunmuştur.

Buna bağlı olarak tüm çatıya entegre PV sistemden elde edilecek toplam elektrik miktarı eşitlik 6 ile hesaplanmıştır. Buna göre, MYO binalarında kullanılabilir çatı alanları dikkate alındığında yıl boyunca maksimum üretilecek elektrik enerjisi mono-Si panellerle mümkün olmuştur ve yaklaşık 0.70 GWh'tir. p-Si ve CdTe panellerle yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı sırasıyla yaklaşık 0.64 GWh ve 0.48 GWh olarak bulunmuştur.

Sonuçlar

Şanlıurfa meteorolojik koşullarında kamu binaları çatılarının güneş enerji potansiyelinin belirlenmesi için sıklıkla kullanılan 3 farklı (mono-Si, p-Si ve CdTe) PV teknolojilerinin verimleri hava sıcaklığı, güneş ışınımı ve rüzgar hızı gibi iklim parametrelerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Karşılaştırılan PV teknolojileri için ortalama birim alanda yıl boyunca üretilebilecek maksimum elektrik enerjisi mono-Si teknolojisiyle mümkündür ve yaklaşık 345 kWh'tir. p-Si ve CdTe PV paneller ile yıllık üretim sırasıyla yaklaşık 311 kWh/m² ve 234 kWh/m²'dir.
- 2016 yılı için Teknik Bilimler MYO'nun yıllık enerji tüketimi yaklaşık 0.120 GWh'tır. Teknik Bilimler MYO'nun 2020 m²'lik kullanılabilir çatı yüzeyine mono-Si panellerden oluşan bir PV sistemi (Pr=0.85) monte edilmiş olması durumunda yıllık elektrik enerji üretim kapasitesi 0.595 GWh'tır. Bu sonuç okulun yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık 5 katını PV sistemle elde edilecek enerjiden karşılanabileceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- Green, M. A. et al. (2019). Solar cell efficiency tables (Version 53). *Prog Photovolt Res Appl.*, 27: 3–12.
- <https://www.mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/Turkiye-Gunluk->

- Guneslenme-Suresi.pdf
- [3] <https://www.mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/Turkiye-Yillik-G%C3%BCnes-Radyasyonu.pdf>
- [4] Ordóñez J., Jadraque E., Alegre J., ve Martínez G., (2010). Analysis of the Photovoltaic Solar Energy Capacity of Residential Rooftops in Andalusia (Spain), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp.2122–30
- [5] Shukla A. K., Sudhakar K., Baredar P., (2016). Simulation and performance analysis of 110 kWp grid-connected photovoltaic system for residential building in India: A comparative analysis of various PV technology, *Energy Reports*, vol.2, pp.82–88
- [6] Wittkopf S., Valliappan S., Liu L., Ang K. S., Cheng S. C. J., (2012). Analytical performance monitoring of a 142.5 kWp grid connected rooftop BIPV system in Singapore, *Renew. Energy*, vol.47, pp.9–20.
- [7] Carr A., Pryor T., (2004). A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates, *J Solar Energy*, 285: 76.
- [8] Ghazali M. A. and Abdul Rahman A.M., (2012). The Performance of Three Different Solar Panels for Solar Electricity Applying Solar Tracking Device under the Malaysian Climate Condition, *Energy and Environment Research*, 2:1
- [9] Sharma V., Kumar A., Sastry O.S., Chandel S.S., (2013). Performance assessment of different solar photovoltaic technologies under similar outdoor conditions, *Energy*, vol. 58, pp.511-518
- [10] Baharwani V., Meena N., Sharma A., Stephen R. B., Mohanty P., (2015). Comparative Performance Assessment of different Solar PV Module Technologies, *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, vol. 5 Issue 1
- [11] Ferrada P., Araya F., Marzo A., Fuentealba E., (2015). Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of Chile, *Solar Energy*, vol. 114, pp. 356–363
- [12] Chukwu G. U., Chigbo N. I., Onyenonachi F. C., Udoinyang I. E., (2016) Comparative Study of Photovoltaic Modules and Their Performance in the Tropics: A Case Study in Nigeria, *International Journal of Innovative Environmental Studies Research*, 4(4):21-28,
- [13] Özcan, Ö , İzgi, E . (2020). Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Çatı Sisteminin Karşılaştırmalı Performans Analizi . *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 23 (3) , 127-140 .
- [14] Üçgül, İ., Tüysüzoğlu, E., Yakut, M. Z. (2014) PV Çatı Uygulaması için Enerji Hesaplaması ve Ekonomik Analizi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 1-6
- [15] Cristofari C., Poggi P., Notton G., Muselli M. Thermal modeling of a photovoltaic module. In: Proceedings of Sixth IASTED International Conference on “Modeling, Simulation, and Optimization”, 2006. “September 11–13, Gaborone, Botswana, pp. 273–278.
- [16] Skoplaki E. and Palyvos J. A., (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/ power correlations, *Solar Energy*, vol. 83, pp. 614-624
- [17] Evans D.L., 1981. “Simplified method for predicting photovoltaic array output”, *Solar Energy*, vol. 27, pp.555–560.
- [18] Muzathik A. M., (2014). Photovoltaic modules operating temperature estimation using a simple correlation, *International Journal of Energy Engineering*, vol. 4, Iss.4, pp. 151-158
- [19] Duffie J.A., Beckman W.A., (1991). *Solar Engineering Thermal Process*. Wiley-Interscience, New York.
- [20] Vasisht M. S., Srinivasan J., Ramasesha S.K., (2016). Performance of solar photovoltaic installations: Effect of seasonal variations, *Solar Energy* 131: 39-46
- [21] Klein, S. A., (1977). Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces, *Solar Energy*, 19, 325

Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü için Tamsayı Derece Yaklaşımli Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu

Optimization of Fractional Order Controller with Integer Order Approximation for Load Frequency Control of a Microgrid

Burak Yıldırım^{1*}

¹ Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Bingöl, byildirim@bingol.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 1 Temmuz 2020
Düzeltilme: 1 Eylül 2020
Kabul: 1 Eylül 2020

Anahtar kelimeler:

Mikro şebeke, Tamsayı derece yaklaşımli kesir dereceli PID kontrolör, Çok amaçlı maliyet fonksiyonu.

ÖZET

Modern güç sistemlerinde yük değişiklikleri ve arzalar sonrası üretim-yük dengesini koruma yeteneğini sağlamak önemli bir problemdir. Bir yük frekans kontrol (LFC) mekanizması bu gereksinime bir çözüm sağlar. Mikro şebekelerde üretilen güç miktarı sürekli olarak değişir ve aynı zamanda birçok belirsizliğe sahiptir, bunun nedeni mikro şebekelerin genellikle elektrik enerjisi üretmek için yenilenebilir enerji kaynakları (RES) kullanmasıdır. Mikro şebeke sistemlerindeki bu değişiklikler ve belirsizlikler nedeniyle, geleneksel kontrolörler uzun vadede iyi bir performans sağlamada yetersiz kalmıştır. Bu çalışmada, mikro şebekede, LFC karşılaşılan zorluklarla başa çıkmak için tamsayı derece yaklaşımli kesir dereceli PID kontrolör (IOA FOPID) önerilmiştir. En uygun kontrolör parametrelerinin belirlenmesi için lig şampiyonası algoritması (LCA), karınca koloni optimizasyonu (ACO) ve optikten esinlenen optimizasyon (OIO) algoritmaları kullanılmıştır. Aynı zamanda, IOA FOPID kontrolörünün kazançlarının en uygun değerlerinin elde edilmesi için çok amaçlı bir maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Üç farklı optimizasyon algoritması ile elde edilen en uygun kontrolör parametre değerleri için mikro şebeke sistemin zaman domeni analizleri yapılmış ve algoritmaların başarıları karşılaştırılmıştır.

Doi: 10.24012/dumf.860298

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 July 2020
Revised: 1 September 2020
Accepted: 1 September 2020

Keywords:

Microgrid, Integer order approximation fractional order PID controller, Multi objective cost function

ABSTRACT

In modern power systems, ensuring the ability to maintain production-load balance after load changes and failures is an important problem. A load frequency control (LFC) mechanism provides a solution to this requirement. The amount of power produced in microgrids is constantly changing and also has many uncertainties, because microgrids often use renewable energy sources (RES) to generate electrical energy. Due to these changes and uncertainties in microgrid systems, traditional controllers have become inadequate to provide good performance in the long run. In this study, in order to deal with the difficulties encountered in LFC in microgrid, integer order approximation fractional order PID controller (IOA FOPID) is proposed. League championship algorithm (LCA), ant colony optimization (ACO) and optics-inspired optimization (OIO) algorithms have used to determine the most appropriate controller parameters. At the same time, a multi-purpose cost function has used to obtain the most appropriate values of the gains of the IOA FOPID controller. For the most appropriate controller parameter values obtained with three different optimization algorithms, the time domain analyzes of the microgrid system have made and the success of the algorithms has compared.

* Sorumlu yazar / Correspondence
Burak YILDIRIM
✉ byildirim@bingol.edu.tr

Giriş

Elektrik için artan talep ve belirsizliklere sahip karmaşık elektrik güç sistemleri geleneksel olmayan güç kaynaklarının güç sistemlerine dahil edilmesine yol açmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları (RES) modern güç sistemlerinde bir alternatif üretim birimi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. RES'lerin artan penetrasyon oranları güç sistemlerine birçok avantajlar sunar. Bununla birlikte, bu kaynakların geleneksel üretim birimleriyle çalışıp çalışmadığı veya tek başlarına veya diğer sistemlerle kullanıldıklarında kararlı çalışıp çalışmadığı gibi birçok yeni sorunlarda ortaya çıkmıştır. RES'lerin hem şebekede hem de şebekenin dışında çalışması için uygun kontrol tasarımı, RES'lerin güç sisteminin gerilim ve frekansının düzenlenmesine katkısı ve RES'lerin korunması, vb., gibi sorunlar RES'lerin neden olduğu teknik sorunlardan bazılarıdır [1]. Bu kaynakların kullanılması birçok standardı da beraberinde getirmiştir. Yukarıda bahsedilen avantaj ve sorunların bir sonucu olarak 1998 yılında ilk kez CERTS tarafından mikro şebeke fikri ortaya çıkmıştır. CERTS tarafından sunulan mikro şebeke, hem güç hem de ısı sağlayan bir tek sistem olarak çalışan yük ve mikro kaynakların bir birleşiminden oluşmaktadır. Mikro şebeke sistemler mikro kaynakların fazla sayısından dolayı ve tüm bu kaynakların birleşiminden oluşan tek bir sistem sağlamak için elektronik tabanlı olmalıdır [2]–[4].

Mikro şebekelerin ortaya çıkması geleneksel güç sistemlerinin karşılaştığı ekonomik ve çevresel sorunların artmasına dayanır. RES'leri kullanan mikro şebekeler küresel ısınma ve çevresel problemleri azaltma yetenekleri sayesinde güç endüstrisinde hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır [4], [5].

Elektrik şebekelerinde elektrik arzı ve talebi dengelenmelidir. Bu ikili durum arasındaki boşluktaki artış, elektrik güç sisteminde gerilim ve frekans sapmalarına neden olur. Frekans ve gerilimdeki bu sapmalar, bu tür sistemlerin kararlılığını ciddi şekilde tehdit eder ve bu bile büyük elektrik kesintilerine neden olabilir [6]. Mikro şebeke için ana problemlerden biri frekans kontrolüdür. Mikro şebeke sisteminin istikrarlı

bir şekilde çalışabilmesi ve sistemin frekansını nominal değerde tutabilmesi için üretim ve talep arasında gerçek zamanlı bir eşleşme sağlanması şarttır. Bir yük frekansı kontrol (LFC) mekanizması bu gereksinime bir çözüm sağlar [7]. Mikro şebekeler adalı [8] veya şebekeye bağlı [9] mod olarak çalıştırılır. Adalı modda çalışan mikro şebeke ana şebekeden destek almadığından, LFC bu moddaki en önemli çalışma görevlerinden biri olacaktır [10]. Ref. [11]'de, fotovoltaiik (PV), akü enerji depolama sistemi (BESS) ve katı oksit yakıt hücresine dayalı mikro şebekenin frekans / gerilim kontrolü için bulanık mantık kontrolörü önerilmiştir. Ref. [10]'da, adalanmış bir mikro şebekenin LFC'sinin sekonder ve üçüncül kontrolü arasındaki koordinasyonu gerçekleştirmek için optimal aktif güç kontrolü önerilmektedir. Ref. [12]'de, mikro şebekelerin LFC'si için hedefe göre ayarlanmış model öngörülü kontrol önerilmiştir.

Son zamanlarda, kesirli dereceli sistemler büyük ilgi görmüştür. Bunun nedeni kesirli diferansiyel denklemlerin gerçek dünya sistemlerini tamsayı diferansiyel denklemlerden daha iyi tanımlamalarıdır. Kesirli dereceden hesaplama fizik ve kimya sistematığının yanı sıra elektrik devresi, kontrol ve kaos teorileri ve sistem tasarımında da önemli bir rol oynamaktadır [13]. Ancak, kesirli dereceli bir transfer fonksiyonunun analitik ters laplace dönüşümü olmadığından, onun kesin bir zaman cevabını tahmin etmek mümkün değildir. Bu nedenle aynı davranışı sergileyecek olan tamsayı dereceli transfer fonksiyonu, belirli bir bant aralığı boyunca kesirli dereceli transfer fonksiyonu yerine kullanılabilir. Bu amaçla Oustaloup yöntemi, Sürekli Kesirli Genişleme (CFE) yöntemi, Matsuda yöntemi, Chareff yöntemi, Carlson yöntemi, en küçük kare yöntemleri gibi tamsayı derece yaklaşım yöntemleri kullanılır [14]–[21].

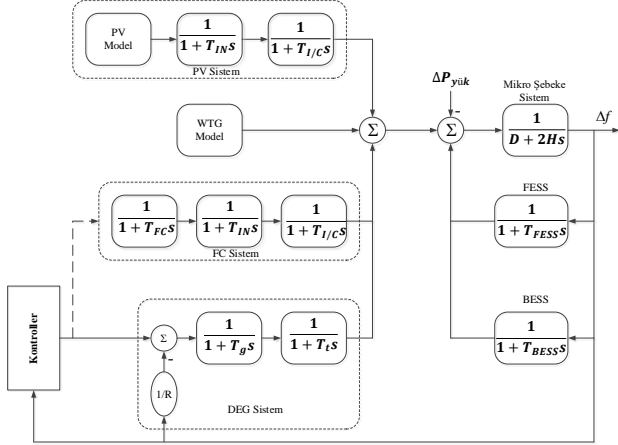
Bu çalışmada, bir IOA FOPID kontroller mikro şebekenin LFC için kullanılmıştır. Bu yönüyle çalışma literatürde bir ilk özelliği taşımaktadır. Kontrolör parametrelerinin en uygun değerlerinin belirlenmesi için LCA, ACO ve OIO algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan

algoritmaların sonuçlarının karşılaştırılması için çok amaçlı bir maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de çalışmanın gerçekleştirildiği mikro şebeke yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’de parametre ayarlaması için kullanılan optimizasyon yöntemleri açıklanmıştır. Bölüm 4’de kontrolörlerin performans analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Son olarak bölüm 5’de çalışmada elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Mikro Şebeke Modeli

Şebeke bağlantısız mikro şebeke için kontrol planlaması birçok durumda şebeke bağlantılı moda göre daha önemlidir. Bu çalışmada analiz işlemlerinin gerçekleştirildiği şebeke bağlantısız mikro şebeke sistemi şekil 1’de gösterilmiştir. Bu mikro şebeke sistem bir geleneksel dizel jeneratör (DEG), bir yakıt hücresi (FC), bir rüzgar türbin generatörü (WTG), bir batarya enerji depolama sistemi (BESS) ve bir volan enerji depolama sisteminden (FESS) oluşur. Bu sistemde mikro şebekedeki birimler sisteme güç elektroniği elemanları ile bağlanır.



Şekil 1. Mikro şebeke için frekans yanıt modeli

Figure 1. Frequency response model for the microgrid

Pratik DEG, FC, PV, WTG, FESS ve BESS sistemlerin dinamik davranışını tam olarak simüle etmek için yüksek dereceli doğrusal olmayan matematiksel modeller kullanılmalıdır. Ancak, güç sistemi simülasyonları için genellikle transfer fonksiyonları veya basitleştirilmiş modeller kullanılır. Bu nedenle bu çalışmada mikro şebeke sistemi oluşturan birimler transfer

fonksiyonları ile gösterilir. Örnek olarak FC sistemi 3 birimden oluşur. Birincisi yakıt hücresi, ikincisi inverter ve üçüncüsü bağlantı cihazıdır. FC sistemi oluşturan birimler geçici yanıt karakteristiklerine göre birinci derece transfer fonksiyonları ile gösterilebilirler. Bu nedenle, mikro şebeke frekans çalışmaları için yüksek dereceli karakteristiğe sahip FC sistemi üçüncü derece model kullanılarak gösterilebilir [22].

Şekilde 1’de gösterilen mikro şebeke sistemin birimlerine ait transfer fonksiyonları aşağıda verilir. Bu fonksiyonlara ait değerler Tablo 1’de verilmiştir.

$$G_{WTGk}(s) = \frac{K_{WTG}}{1+sT_{WTG}} = \frac{\Delta P_{WTGk}}{\Delta P_W} \quad (1)$$

$$G_{PV}(s) = \frac{K_{PV}}{1+sT_{PV}} = \frac{\Delta P_{PV}}{\Delta \phi} \quad (2)$$

$$G_{FCk}(s) = \frac{K_{FC}}{1+sT_{FC}} = \frac{\Delta P_{FCk}}{\Delta P_{AE}} \quad (3)$$

$$G_{DEG}(s) = \frac{K_{DEG}}{1+sT_{DEG}} = \frac{\Delta P_{DEG}}{\Delta f} \quad (4)$$

$$G_{FESS}(s) = \frac{K_{FESS}}{1+sT_{FESS}} = \frac{\Delta P_{FESS}}{\Delta f} \quad (5)$$

$$G_{BESS}(s) = \frac{K_{BESS}}{1+sT_{BESS}} = \frac{\Delta P_{BESS}}{\Delta f} \quad (6)$$

Güç sisteminin kararlı çalışmasını sağlamak için toplam güç etkin bir şekilde kontrol edilmeli ve bağlı yüklerin toplam güç gereksinimleri karşılanmalıdır. Bu güç talebi referans değeri P_s^* ile toplam güç üretim değeri P_s arasındaki fark tarafından ifade edilir.

$$\Delta P_e = P_s^* - P_s \quad (7)$$

Mikro şebeke frekansı güç değişikliğine bağlı olarak değiştiği için, sistem frekansındaki Δf değişimi denklem 8’de verilir.

$$\Delta f = \frac{\Delta P_e}{K_{sys}} \quad (8)$$

K_{sys} sistem frekansı karakteristik sabitini gösterir. Sistem frekansındaki ve güç sapmasındaki değişiklikler arasında doğal bir zaman gecikmesi olduğundan, sistem frekansı değişimi için güç sapmasının transfer fonksiyonu, p.u. olarak denklem 9’da verilir.

$$G_{sys}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P_e} = \frac{1}{K_{sys}(1+sT_{sys})} = \frac{1}{D+2Hs} \quad (9)$$

Burada H ve D değerleri mikro şebeke sisteminin eşdeğer atalet sabitini ve sönümlenme sabitini ifade eder K_{WTG} , K_{PV} , K_{FC} , K_{DEG} , K_{FESS} ve K_{BESS}

değerleri analiz çalışmalarında 1 olarak alınır [4], [23].

Tablo 1. Mikro şebeke sistemin parametreleri

Table 1. The parameters of the microgrid system

Sembol	Parametre	Değer.
D (pu/Hz)	Mikro şebekenin sönümleme sabiti	0.015
2H (pu.s)	Mikro şebekenin eşdeğer atalet sabiti	0.1667
T_{BESS} (s)	BESS sistemi zaman sabiti	0.1
T_{FESS} (s)	FESS sistemi zaman sabiti	0.1
T_g (s)	DEG birimi governör zaman sabiti	0.08
T_t (s)	DEG birimi generatör zaman sabiti	0.4
T_{FC} (s)	FC birimi FC zaman sabiti	0.26
T_I (s) \bar{c}	FC ve PV birimi bağlantı cihazı zaman sabiti	0.004
T_{IN} (s)	FC ve PV birimi inverter zaman sabiti	0.04
T_{PV} (s)	PV birimi PV zaman sabiti	1.8
T_{WTG} (s)	WTG sistemi zaman sabiti	1.5
R (Hz/pu)	Mikro şebekenin frekans düşüş faktörü	3

Tamsayı Derece Yaklaşımı ile Kesir Dereceli Kontrolör

Kesir dereceli sistemlerin rasyonel yaklaşımını yapmak amacıyla literatürde çok sayıda metot vardır. Bu metotlara Oustaloup, Carlson, Matsuda, Grünwald-Letnikov, Maclaurin serilerine dayalı metotlar v.b. örnek gösterilebilir. CFE bu işlem için önemli metotlardan biridir ve bu çalışmada s^α ($0 < \alpha < 1$) realizasyonunda kullanılır. CFE metodu şu şekilde gösterilebilir [24][13].

$$(1+x)^\alpha = \frac{1}{1-1+} \frac{\alpha x}{2+} \frac{(1+\alpha)x}{3+} \frac{(1-\alpha)x}{4+} \frac{(2+\alpha)x}{5+} \frac{(2-\alpha)x}{-----} \quad (10)$$

Bu formülde s^α hesabında $x = s - 1$ kullanılır. Bütün yaklaşım hesaplamaları Tablo 2’de verilir. [13].

Denklem 10 yardımı ile α ’ya göre 1., 2., 3. ve 4. derece tamsayı yaklaşımı aşağıdaki gibidir.

$$\frac{(1+\alpha)s+(1-\alpha)}{(1-\alpha)s+(1+\alpha)} \quad (11)$$

$$\frac{(\alpha^2+3\alpha+2)s^2+(-2\alpha^2+8)s+(\alpha^2-3\alpha+2)}{(\alpha^2-3\alpha+2)s^2+(-2\alpha^2+8)s+(\alpha^2+3\alpha+2)} \quad (12)$$

$$\frac{(\alpha^3+6\alpha^2+11\alpha+6)s^3+(-3\alpha^2-6\alpha^2+27\alpha+54)s^2+(3\alpha^2-6\alpha^2-27\alpha+54)s+(-\alpha^3+6\alpha^2-11\alpha+6)}{(-\alpha^3+6\alpha^2-11\alpha+6)s^3+(3\alpha^2-6\alpha^2-27\alpha+54)s^2+(-3\alpha^2-6\alpha^2+27\alpha+54)s+(\alpha^3+6\alpha^2+11\alpha+6)} \quad (13)$$

$$\frac{(\alpha^4+10\alpha^3+35\alpha^2+50\alpha+24)s^4+(-4\alpha^4-20\alpha^3+40\alpha^2+320\alpha+384)s^3+(6\alpha^4-150\alpha^2+864)s^2+(-4\alpha^4+20\alpha^3+40\alpha^2-320\alpha+384)s+(\alpha^4-10\alpha^3+35\alpha^2-50\alpha+24)}{(\alpha^4-10\alpha^3+35\alpha^2-50\alpha+24)s^4+(-4\alpha^4+20\alpha^3+40\alpha^2-320\alpha+384)s^3+(6\alpha^4-150\alpha^2+864)s^2+(-4\alpha^4-20\alpha^3+40\alpha^2+320\alpha+384)s+(\alpha^4+10\alpha^3+35\alpha^2+50\alpha+24)} \quad (14)$$

Bu çalışmada mikro şebeke sistem için önerilen kontrolör FOPID kontrolördür. Bu kontrolör denklem 15’de gösterilir. Kontrolörün λ ve μ değerleri için gerekli tam sayı yaklaşım karşılıkları Tablo 2’de verilmiştir.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (15)$$

Optimizasyon Algoritmaları

Gelişen sistemler ile beraber ortaya çıkan karmaşık ve çok yüksek boyutlu problemlerin çözümünde klasik optimizasyon teknikleri yetersiz kalmıştır. Bunun sonucu olarak problem çözümünde bütün çözümleri bulmak yerine olası çözümleri bulan sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar birçok probleme uyarlanarak çözümleri basit bir şekilde bulabilirler [25]. Meta-sezgisel ve evrimsel algoritmalar tipik olarak, problemlerin büyük çoğunluğunu oluşturan ve diğer teknikler kullanılarak kolayca veya hiç çözülemeyen problemlerin yakın olan en uygun çözümlerini hesaplamak için uygulanır. Rastgele arama yapıları nedeniyle, evrimsel algoritmaların herhangi bir soruna en uygun çözümü bulması asla garanti edilmez, ancak varsa, yakın olan en uygun çözümü bulurlar. Meta-sezgisel ve evrimsel algoritmalar, çok çeşitli problemlere uygulanabilen ve problemten bağımsız tekniklerdir. “Algoritma”, bir sorunu çözmek için gerçekleştirilen bir dizi işlem anlamına gelir. Algoritmalar, belirtilen bir yakınsama ölçütüne ulaşıldığında sona eren yinelemeli işlemlerden veya adımlardan oluşur [26].

Tablo 2. $s^{0.1}, s^{0.2}, \dots, s^{0.9}$ için rasyonel yaklaşımTable 2. Rational approximations for $s^{0.1}, s^{0.2}, \dots, s^{0.9}$

	1.derece yaklaşım	2. derece yaklaşım	3. derece yaklaşım	4. derece yaklaşım
$s^{0.1}$	$\frac{1.22s + 1}{s + 1.22}$	$\frac{1.351s^2 + 4.67s + 1}{s^2 + 4.67s + 1.351}$	$\frac{1.444s^3 + 11.421s^2 + 10.333s + 1}{s^3 + 10.333s^2 + 11.421s + 1.444}$	$\frac{1.518s^4 + 21.529s^3 + 44.596s^2 + 18.222s + 1}{s^4 + 18.222s^3 + 44.596s^2 + 21.529s + 1.518}$
$s^{0.2}$	$\frac{1.5s + 1}{s + 1.5}$	$\frac{1.833s^2 + 5.5s + 1}{s^2 + 5.5s + 1.833}$	$\frac{2.1s^3 + 14.67s^2 + 12s + 1}{s^3 + 12s^2 + 14.67s + 2.1}$	$\frac{2.316s^4 + 29.333s^3 + 56s^2 + 21s + 1}{s^4 + 21s^3 + 56s^2 + 29.333s + 2.316}$
$s^{0.3}$	$\frac{1.857s + 1}{s + 1.857}$	$\frac{2.5126s^2 + 6.5714s + 1}{s^2 + 6.5714s + 2.5126}$	$\frac{3.071s^3 + 19.1344s^2 + 14.1428s + 1}{s^3 + 14.1428s^2 + 19.1344s + 3.071}$	$\frac{3.57s^4 + 40.63s^3 + 71.546s^2 + 24.57s + 1}{s^4 + 24.57s^3 + 71.546s^2 + 40.63s + 3.57}$
$s^{0.4}$	$\frac{2.333s + 1}{s + 2.333}$	$\frac{3.5s^2 + 8s + 1}{s^2 + 8s + 3.5}$	$\frac{4.5769s^3 + 25.5s^2 + 17s + 1}{s^3 + 17s^2 + 25.5s + 4.5769}$	$\frac{5.594s^4 + 57.538s^3 + 93.5s^2 + 29.333s + 1}{s^4 + 29.333s^3 + 93.5s^2 + 57.538s + 5.594}$
$s^{0.5}$	$\frac{3s + 1}{s + 3}$	$\frac{5s^2 + 10s + 1}{s^2 + 10s + 5}$	$\frac{7s^3 + 35s^2 + 21s + 1}{s^3 + 21s^2 + 35s + 7}$	$\frac{9s^4 + 84s^3 + 126s^2 + 36s + 1}{s^4 + 36s^3 + 126s^2 + 84s + 9}$
$s^{0.6}$	$\frac{4s + 1}{s + 4}$	$\frac{7.428s^2 + 13s + 1}{s^2 + 13s + 7.428}$	$\frac{11.143s^3 + 50.143s^2 + 27s + 1}{s^3 + 27s^2 + 50.143s + 11.143}$	$\frac{15.076s^4 + 128.143s^3 + 177.428s^2 + 46s + 1}{s^4 + 46s^3 + 177.428s^2 + 128.143s + 15.076}$
$s^{0.7}$	$\frac{5.67s + 1}{s + 5.67}$	$\frac{11.77s^2 + 18s + 1}{s^2 + 18s + 11.77}$	$\frac{18.933s^3 + 76.846s^2 + 37s + 1}{s^3 + 37s^2 + 76.846s + 18.933}$	$\frac{26.965s^4 + 209.38s^3 + 267.54s^2 + 62.67s + 1}{s^4 + 62.67s^3 + 267.54s^2 + 209.38s + 26.965}$
$s^{0.8}$	$\frac{9s + 1}{s + 9}$	$\frac{21s^2 + 28s + 1}{s^2 + 28s + 21}$	$\frac{36.27s^3 + 133s^2 + 57s + 1}{s^3 + 57s^2 + 133s + 36.27}$	$\frac{54.41s^4 + 386.91s^3 + 456s^2 + 96s + 1}{s^4 + 96s^3 + 456s^2 + 386.91s + 54.41}$
$s^{0.9}$	$\frac{19s + 1}{s + 19}$	$\frac{50.1s^2 + 58s + 1}{s^2 + 58s + 50.1}$	$\frac{93.026s^3 + 308.45s^2 + 117s + 1}{s^3 + 117s^2 + 308.45s + 93.026}$	$\frac{147.04s^4 + 959.64s^3 + 1042.36s^2 + 196s + 1}{s^4 + 196s^3 + 1042.36s^2 + 959.64s + 147.04}$

Lig Şampiyonası Algoritması

LCA spor tabanlı bir metasezgisel algoritmadır [27]. LCA spor liglerindeki şampiyonluk sürecini taklit eden bir algoritmadır. Spor takımları olarak rol oynayan bireyler, yapay bir ligde birkaç hafta boyunca rekabet ederler (iterasyon). Her hafta lig programına bağlı olarak, takımlar çift olarak oynar ve oyun sonucu kazanma, kaybetme ve beraberlik açısından belirlenir, her takım tarafından takip edilen belirli takım formasyonu/düzenlemesi (çözüm) ile birlikte oyun gücü verilir. Önceki hafta etkinliklerini takip eden her takım, bir sonraki hafta yarışması için formasyon/oyun tarzında (yeni bir çözüm üretilir) gerekli değişiklikleri yapar ve şampiyona birkaç sezon boyunca devam eder (durma koşulu). LCA popülasyona dayalı bir algoritmadır ve burada takımlar parçacık sürü optimizasyonunun (PSO) “parçacıklarına” benzerdir ancak aramalarını gerçekleştirirken oldukça farklı bir yoluna sahiptirler. Bir LCA'nın takımıyla ilişkili yeni bir çözümün üretilme şekli, yaklaşan maçları için uygun bir düzenleme tasarlayarak koçlar tarafından takip edilen maç analizi sürecini taklit ederek yönetilir. Tipik bir maç analizinde, koçlar kendi oyun deneyimleri ve

rakiplerinin oyun tarzı temelinde düzenlemelerini değiştireceklerdir [25], [27], [28].

Karınca Kolonisi Algoritması

ACO meta sezgisel bir algoritma olup popülasyon temelli bir yaklaşımdır. Bu algoritma Dorigo ve arkadaşları tarafından ayrık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılmıştır [29]. ACO gerçek karıncaların bir besin kaynağı ile yuvaları arasındaki en kısa yolu bulma şeklini taklit eder. Karıncalar birbirleriyle feromon izleri aracılığıyla iletişim kurar ve hangi yolun izleneceği konusunda bilgi alışverişinde bulunurlar. Karınca sayısı belirli bir yolu ne kadar çok izlerse, bu yol (iz) o kadar çekici hale gelir ve bunu kendi feromonlarını bırakarak diğer karıncalar izler.

Optikten Esinlenen Optimizasyon

OIO algoritması içbükey ve dışbükey aynaların optik özelliklerine dayanan fiziksel tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Fizikte içbükey yüzeylerin/aynaların ışık ışınlarını ana eksene doğru yansıttığı gözlemlenmiştir (aynanın ortasından geçen ve aynaya dik bir çizgi). Böyle bir ayna ışık ışınlarının birleşmesine neden olur.

Diğer taraftan, dışbükey bir yüzey/ayna ile ana eksene paralel gelen ışık ışınları, ana eksenenden uzağa yansıtılır. Böylece ışık ışınlarının hepsi ayrışıyor gibi görünür. Bu fiziksel kurallar ile, OIO algoritması sayısal optimizasyonun arama sürecini gerçekleştirir. OIO, optimize edilecek sayısal işlevin yüzeyini yansıtıcı bir yüzey olarak ele alır; burada her tepe noktası dışbükey bir ayna olarak yansıtılır ve her vadi içbükey bir ayna olarak yansıtılır. Arama alanı içinde bir çözüm (R^n 'de bir alt küme) olarak eşlenen ortak arama/çözüm ve hedef alandaki (R^{n+1} 'de bir alt küme) her noktanın yapay bir ışık noktası olduğu varsayılır. Bu şekilde, yapay bir ışık noktasından parıldayan yapay ışın, yansıtıcı yüzey kısmen bir zirvenin bir parçası veya bir vadinin bir parçası olması ve yapay görüntü noktasına (arama/çözüm uzayında yeni bir çözüm olarak eşlenen amaç uzayında ve ortak aramada yeni bir nokta) dik olarak (arama alanındaki ışık noktası konumuna doğru) veya ters olarak (arama alanındaki ışık noktası konumunun dışına doğru) oluşturulması ile verilen işlev yüzeyi tarafından yapay olarak geri yansıtılır. Böyle bir model, optimum arayış sırasında hem keşif hem de keşif görevlerini yerine getirebilmemizi sağlar [30], [31].

Performans Kriteri

Kontrolörlerin parametre değerleri optimizasyon algoritmaları tarafından optimizasyon probleminin çözümü için bulunur. Bu nedenle en uygun optimizasyon çözümünün elde edilmesi için bir fonksiyon tanımlanmalıdır ve bu fonksiyona amaç fonksiyonu adı verilir. PID parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan algoritmaların optimizasyonu için literatürde hata karelerinin toplamı (Integral Squared Error (ISE)), mutlak hatanın toplamı (Integral Absolute Error (IAE)), zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (Integral Time-weighted Absolute Error (ITAE)), zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (Integral Time-weighted Squared Error (ITSE)), gibi fonksiyonlar önerilmiştir [32]. Bu fonksiyonların denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (16)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

Bu çalışmada çok amaçlı bir performans kriteri kontrol kazançlarını bulmak için kullanılır. Bu kriter yerleşme zamanı t_s , maksimum aşma M_p , sürekli durum hatası E_{SS} , $ITAE$ ve sönümleme oranı ζ değerlerinden meydana gelir. Bu çalışmada kullanılan performans kriteri $J(k)$ denklem 17 de verilir.

$$J(k) = w_1 M_p + w_2 t_s + w_3 E_{SS} + w_4 ITSE + w_5 / \zeta \quad (17)$$

Bu performans kriteri (17) 6 terimden oluşur ve her birinin önemi bir ağırlık faktörü w_i tarafından belirlenir. Bu ağırlık faktörlerinin değerleri istenilen özelliklere uygun olarak bu çalışmada $w_1 = 1$, $w_2 = 1$, $w_3 = 1000$, $w_4 = 500$ ve $w_5 = 0.25$ olarak seçilmiştir. Seçilen w_i değerlerindeki bir artış bu değer ile ilişkili özellikte bir gelişme ile sonuçlanacaktır. Ancak bu özellikteki gelişme diğer özelliklerde bir azalmaya yol açabilir [33].

Benzetim Sonuçları

Mikro şebeke sistem önerilen çok amaçlı maliyet fonksiyonu kullanılarak 3 farklı optimizasyon algoritması ile ayrı ayrı optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemleri sonrası elde edilen kontrolör parametre değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Çok amaçlı maliyet fonksiyonunu oluşturmak için kullanılan verilere ait değerler ve maliyet fonksiyonu sonuçları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4 verileri incelendiği zaman en iyi maliyet değeri ve sürekli durum hatası LCA için elde edilirken en kötü sonuç ACO için elde edilmiştir. ACO ile en iyi maksimum aşma değeri elde edilmiştir. Maksimum aşma hariç bütün değerler için en iyi sonuçlar LCA ile elde edilmiştir. OIO ile maksimum aşma için en kötü değer elde edilmiştir. En kötü sönümleme oranı, sürekli duruma erişme süresi ve sürekli durum hatası değeri ACO için elde edilmiştir.

Şekil 5'de farklı optimizasyon yöntemleri ile parametre değerleri optimize edilen IOA FOPID kontrolör için mikro şebekenin frekansının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil incelendiği zaman elde edilen sonuçların Tablo 4 değerleri ile uygun olduğu görülmektedir. Tablo 4'e göre en kötü sönümleme oranına sahip ACO algoritması için sistemin zaman yanıtı daha fazla salınımlara sahiptir. Şekilde yine en fazla aşma değerinin Tablo değerlerine uygun olarak OIO için elde edildiği görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere kontrolör

LCA algoritması ile elde edilen değerlere sahip iken .
en uygun dinamik zaman yanıtına sahiptir.

Tablo 3. IOA FODPID kontrollerin hesaplanan parametre değerleri

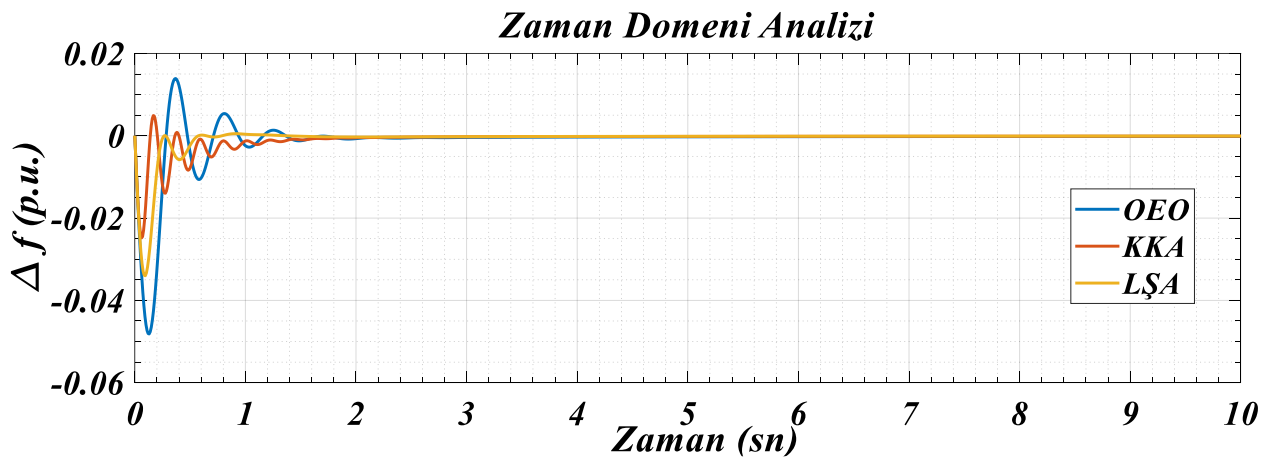
Table 3. Calculated parameter values of IOA FOPID controller

Kontroller	LSA	KKA	OEO
FC kontroller K_p	4.8518	2.5253	0.2495
FC kontroller K_i	9.5746	6.9697	7.6632
FC kontroller λ	0.9	0.9	0.9
FC kontroller λ derece	1	2	1
FC kontroller K_d	0.8596	1.6162	1.4832
FC kontroller μ	0.9	0.8	0.4
FC kontroller μ derece	1	1	1
DEG kontroller K_p	0.0094	8.2828	0.3985
DEG kontroller K_i	9.9815	9.8989	6.9804
DEG kontroller λ	0.9	0.9	0.8
DEG kontroller λ derece	1	3	1
DEG kontroller K_d	0.0426	2.3233	0.3324
DEG kontroller μ	0.1	0.9	0.3
DEG kontroller μ derece	2	1	2

Tablo 4. Farklı optimizasyon algoritmaları için elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Table 4. Comparison of the obtained values for different optimization algorithms

Optimizasyon yöntemi	M_p	t_s	E_{SS}	ITSE	ζ	$J(k)$
LCA	0.034	0.5424	3.549e-05	1.538e-05	0.3052	1.4387
ACO	0.0248	2.0006	8.5799e-05	1.7864e-05	0.1115	4.3623
OIO	0.048	1.5487	7.493e-05	6.586e-05	0.1934	2.9972



Şekil 3. Farklı optimizasyon algoritmaları ile tasarlanan kontrolör için mikro şebekenin zaman yanıtı

Figure 3. Time response of the microgrid for the controller designed with different optimization algorithms

Sonuçlar

Bu çalışmada, mikro şebeke yük frekans kontrolü için CFE metodu kullanılarak elde edilen bir IOA FODPID kontrolörün uygulaması gösterilmiştir. Önerilen IOA FOPID kontrolörün en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi için LCA, ACO ve OIO algoritmaları kullanılmıştır. Farklı optimizasyon algoritmaları ile en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi için çok amaçlı bir maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre IOA FOPID kontrolörün LCA ile optimizasyonu ile en iyi çok amaçlı maliyet fonksiyonu değeri elde edilmiştir. Ayrıca çok amaçlı maliyet fonksiyonunu oluşturan değerlerden sürekli duruma erişme süresi, sürekli durum hatası, sönmüleme oranı ve ITSE maliyet değeri için en iyi sonuçlar LCA algoritması ile elde edilmiştir. Bütün optimizasyon algoritmaları için gerçekleştirilen zaman domenı cevaplarından görüleceği üzere IOA FOPID kontrolör mikro şebeke LFC uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Kaynaklar

- [1] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*. The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [2] R. H. Lasseter *et al.*, "CERTS microgrid laboratory test bed," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 1, pp. 325–332, 2011.
- [3] R. Lasseter *et al.*, "The CERTS MicroGrid Concept," California, 2002.
- [4] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an AC microgrid: Online PSO-based fuzzy tuning approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1935–1944, 2012.
- [5] B. Yıldırım and M. T. Gençoğlu, "Oscillatory stability and eigenvalue analysis of power system with microgrid," *Electr. Eng.*, 2018.
- [6] M. Mordjaoui, S. Haddad, A. Medoued, and A. Laouafi, "Electric load forecasting by using dynamic neural network," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17655–17663, Jul. 2017.
- [7] S. Elkawafi, A. Khalil, A. I. Elgaiyar, and J. Wang, "Delay-dependent stability of LFC in Microgrid with varying time delays," in *2016 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2016, pp. 354–359.
- [8] P. C. Sahu, S. Mishra, R. C. Prusty, and S. Panda, "Improved-salp swarm optimized type-II fuzzy controller in load frequency control of multi area islanded AC microgrid," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 380–392, Dec. 2018.
- [9] A. Rezvani, M. Izadbakhsh, and M. Gandomkar, "Microgrid dynamic responses enhancement using artificial neural network-genetic algorithm for photovoltaic system and fuzzy controller for high wind speeds," *Int. J. Numer. Model. Electron. Networks, Devices Fields*, vol. 29, no. 2, pp. 309–332, Mar. 2016.
- [10] X. Zhang, D. Wang, T. Yu, Z. Xu, and Z. Fan, "Ensemble learning for optimal active power control of distributed energy resources and thermostatically controlled loads in an islanded microgrid," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 49, pp. 22474–22486, Dec. 2018.
- [11] T. Vigneysh and N. Kumarappan, "Autonomous operation and control of photovoltaic/solid oxide fuel cell/battery energy storage based microgrid using fuzzy logic controller," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 3, pp. 1877–1891, Jan. 2016.
- [12] F. Banis, D. Guericke, H. Madsen, and N. K. Poulsen, "Load–frequency control in microgrids using target-adjusted MPC," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 1, pp. 118–124, Jan. 2020.
- [13] M. M. Özyetkin and N. Tan, "Integer order approximation of fractional order systems," in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) IEEE*, 2010, pp. 949–952.
- [14] A. Yüce, F. N. Deniz, and N. Tan, "A New Integer Order Approximation Table for Fractional Order Derivative Operators," *IFAC-PapersOnLine*, 2017.
- [15] B. M. Vinagre, I. Podlubny, A. Hernandez, and V. Feliu, "Some Approximations of Fractional Order Operators Used in Control Theory and Applications," *Fract. Calc. Appl. Anal.*, 2000.
- [16] A. Oustaloup, F. Levron, B. Mathieu, and F. M. Nanot, "Frequency-band complex noninteger differentiator: Characterization and synthesis," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Fundam. Theory Appl.*, 2000.
- [17] K. Matsuda and H. Fujii, "H(infinity) optimized wave-absorbing control - Analytical and experimental results," *J. Guid. Control. Dyn.*, 2008.
- [18] B. T. Krishna, "Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey," *Signal Processing*, 2011.
- [19] Y. Q. Chen, I. Petráš, and D. Xue, "Fractional order control - A tutorial," in *Proceedings of the American Control Conference*, 2009.

- [20] G. E. Carlson and C. A. Halijak, "Approximation of Fractional Capacitors $(1/s)^{1/n}$ by a Regular Newton Process," *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1964.
- [21] B. YILDIRIM, M. T. OZDEMIR, and I. EKE, "Design of Integer Order Approximation Fractional Order Controller with for Automatic Voltage Regulation System," in *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, 2019, pp. 1–6.
- [22] S. Obara, "Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 3, pp. 323–336, 2007.
- [23] D. J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: Time-domain simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 1, pp. 311–320, 2008.
- [24] B. T. Krishna and K. V. V. S. Reddy, "Active and passive realization of fractance device of order $1/2$," *Act. Passiv. Electron. Components*, 2008.
- [25] M. T. Özdemir, B. Yıldırım, H. Gülan, and M. T. Gençoğlu, "Automatic generation control in an AC isolated microgrid using the league championship," *Sci. Eng. J Fırat Univ.*, vol. 29, pp. 109–120, 2017.
- [26] O. Bozorg-Haddad, M. Solgi, and H. A. Loáiciga, *Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization*. 2017.
- [27] A. Husseinzadeh Kashan, "League Championship Algorithm (LCA): An algorithm for global optimization inspired by sport championships," *Appl. Soft Comput.*, vol. 16, pp. 171–200, Mar. 2014.
- [28] H. Bingöl and B. Alataş, "Metasezgisel Optimizasyon Tekniklerine Spor Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım: Lig Şampiyonası Algoritması," *Fırat Üniv. Fen Bilim. Derg.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–11, 2015.
- [29] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, 1997.
- [30] A. H. Kashan, "Computers & Operations Research A new metaheuristic for optimization : Optics inspired optimization (OIO)," vol. 55, pp. 99–125, 2015.
- [31] M. T. Özdemir and D. Öztürk, "Comparative performance analysis of optimal PID parameters tuning based on the optics inspired optimization methods for automatic generation control," *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017.
- [32] E. Kılıç and M. T. Özdemir, "Güç Sistemlerindeki Optimum Otomatik Gerilim Regülasyonu için Çoklu Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi," *DÜMF Mühendislik Derg.*, 2019.
- [33] M. Zamani, M. Karimi-Ghartemani, N. Sadati, and M. Parniani, "Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization," *Control Eng. Pract.*, 2009.



Siirt ilindeki bazı binaların riskli bina tespit yönetmeliğine göre değerlendirilmesi

Ersin AYHAN

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
ersinayhan@siirt.edu.tr ORCID: 0000-0002-2108-0199

Gültekin AKTAŞ*

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
gaktas@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0002-5113-2738

Abdulhalim KARAŞİN

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
karasin@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0002-8802-0588

Geliş: 09.04.2019, Revizyon: 16.03.2020, Kabul Tarihi: 30.08.2020

Öz

Bir deprem ülkesi olan Türkiye’de, bina risk tespiti yapılmamış büyük bir yapı yoğunluğu bulunmaktadır. Bu durum endişe vericidir. Siirt ili deprem riski yüksek bir şehir olarak yerini almaktadır. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE 2019) kapsamında yapıların risk tespitini yapmanın koşulları daha da kolaylaşmıştır. Bu yönetmelik kapsamında herhangi bir bölgede risk teşkil edebilecek yapılar hakkında bilgiler alınarak risk haritası çıkarılabilmekte ya da elde edilen veriler ile bir dağılım yapılabilir. Bu hususta Riskli Bina Tespit Yönetmeliği ile ilk aşamada yapılar hakkında fikir sahibi olmak için yapı performans puanı hesaplanabilmektedir. Risk tespiti yapılmamış ve yapı yoğunluğu bulunan illerden biri de Siirt’tir. Bu durumun çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Bu nedenlerden en önemlisi yapı sahiplerinin, yapılarında risk şüphesi olduğunu bilmelerine rağmen yenileme hususunda ekonomik imkânlarla sahip olmamalarıdır. Diğer birçok neden, riskli yapıların tespiti konusunda yeterli bilgiye sahip olmamaları, bilinen hiçbir yıkıcı deprem koşulunun olmaması nedeniyle yeterince ciddiye almamalarıdır. Ayrıca müstakil evlerde yaşayanların apartman tipi dairelerde yaşamak istememesi gibi nedenlerle açıklanabilir. Bu çalışma kapsamında Siirt il merkezinde risk tespiti yapılmış ve idarece yıkım kararı alınmış 5 adet yapıya ait elde edilen bilgiler ışığında bina performans puanlarının hesaplanması hususu ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bina Risk Tespiti; Bina Performans Puanı Değerlendirilmesi; Siirt Kentsel Dönüşüm

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Türkiye'deki mevcut yapıların deprem karşısında yüksek riske sahip olma ihtimaline karşın potansiyel risk taşıyan yapıların bir öncelik haline getirilerek belirlenmesi ve bu kapsamda güçlendirilmesi veya yıkılarak yerine yenisinin inşa edilmesi son derece öncelikli bir konudur (Anıl vd., 2017).

Bu konuyu ciddi yapan ise Türkiye'nin bir deprem ülkesi olduğu ve geçmiş yıllarda en son 2011 yılı Van-Erciş depremi ile 1999 yılı Kocaeli-Gölcük depremleri ile yaşanan acıların gerçeğidir. 2 ayrı şehir 2 ayrı fay hattı ama aynı ülkenin topraklarında yaşanmış yıkımlar ve bunların sonucunda giden hayatlar. Bu tecrübeler aslında mevcut durumda ağır sorumluluklar yüklemektedir.

20.yy dan bu yana istatistiki çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre Türkiye'de yaşanan yıkıcı depremlerin takriben iki yılda bir ve çok yıkıcı depremlerin ise üç yılda bir yaşandığı şeklinde veriler elde edilmiştir (Uslu ve Uzun, 2014).

Bu gerçeklerden yola çıktığımızda risk potansiyeli taşıyan yapıların yenilenerek daha güvenilir bir hale getirilmesi oldukça önemlidir. Çünkü zayıf yapı stoklarının yıkıcı bir deprem öncesinde tespit edilerek sorunların çözüme kavuşması hem can hem de mal kaybının yaşanma riskini belki de yok denecek kadar azaltacaktır. (Gezer, 2014).

Türkiye'nin birçok şehrinde olası büyük bir depreme karşı koyamayacak birçok yapının olduğu bir gerçektir. Bu şehirlerden birisi de Siirt'tir. Geçmişten günümüze bilinen yıkıcı bir deprem ile karşılaşmasa da Siirt ilinde 4 şiddeti üzerinde bir deprem en son 2015 yılında 4.1 şiddetinde merkez üssü Pervari ilçesinde yaşanmıştır.

Siirt ili 2013 yılı itibari ile Kentsel Dönüşüm Yasası çerçevesinde kendi içinde başta küçük te olsa bir hareketlenme başlatmıştır. Bu kapsamda Siirt Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünden elde edilen veriler ışığında, 2013 yılı içerisinde yalnızca 8 adet yapı kentsel dönüşüm yasasından

faydalanarak risk tespiti yaptırmış ve yasal haklarından faydalanarak eski yapılarını yıktırıp depreme karşı daha güvenli ve yeni yapı inşa ettirmişlerdir. Kentsel Dönüşüm Yasası hakkında bilinç, sağduyu arttıkça ve imkânlarından haberdar oldukça sonraki yıllarda sırasıyla 2014 yılında 99 adet, 2015 yılında 73 adet, 2016 yılında 102 adet yapı riskli yapı olarak tescillenip yıkım kararı alınmıştır. Bu noktada düşünülmesi gereken şey toplamda 316 adet yapının riskli olduğu ortaya çıkmış ve olası bir depremde bu yapılarda daha önce yaşayanların can ve mal güvenliğinin tehlikede olduğu sonucu ortaya çıkmıştır (ÇŞB Siirt, 2018).

Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) verilerine göre Siirt ilinde 2013 yılında konut 1.el satışı 1021 adet iken sonraki yıllarda sırasıyla 2014 için 1322 adet, 2015 yılı için 1498 adet, 2016 yılı için 1342 adet olmuştur. Kentsel Dönüşüm ile beraber konut satışlarının olumlu etkilenmiş olduğu söylenebilir (TUİK, 2017).

Her yıl 1000 den fazla 1.el satışı yapan Siirt ili için boş imar parsellerinde inşa etmek yerine mevcut riskli yapı stokunun Kentsel Dönüşüm çerçevesinde yenilenmesi, hem Kent'e estetik açıdan hem emniyet açısından hem ekonomik açıdan hem de işlevsellik açısından büyük imkânlar ve sonuçlar ortaya çıkaracaktır.

Siirt il merkezinde Kentsel Dönüşümden faydalanmak üzere yüzlerce yapı için risk tespiti yapılmış ve yapının riskli olduğu sonucuna varılmıştır. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar dikkate alınır. Bu yönetmelik kapsamına, yağma yapılar ile yüksekliği 25 m'yi aşmayan veya zemin döşemesi üstünden itibaren 8 katı geçmeyen betonarme yapılar girmektedir. Siirt il genelinde bu tarz yapılara oldukça sık rastlamak mümkündür. Birçok yapı risk potansiyelini taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında gerek Siirt Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü gerekse de Siirt Nazıyapı Denetim firmasından 5 adet risk grubuna girmiş yapı ile alakalı ön veriler alınmış ve bu kapsamda bir değerlendirme yapılmıştır.

5 Adet yapı ile ilgili değerlendirmeye geçmeden önce bu konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan bahsetmek gerekir. Daha önce yapılan benzer çalışmalar şöyle sıralanabilir:

Coşkun (2007), çalışmasında gerek Türkiye’de gerekse de Dünyada yapı performanslarının üzerinde durulması gereken bir kavram olduğu, bu nedenle yabancı kaynaklı literatür çalışmaları yapmış olup Türkiye’nin mevcut yönetmelikleri ile mukayese yapmıştır. Araştırmaları ile Türkiye’nin mevcut yönetmeliklerine yabancı yöntemlerin ve esasların uyumluluğuna bakmıştır.

Gündoğan (2014), çalışmasında 1999 yılı Marmara depremi ile 2011 yılı Van depreminin yaratmış olduğu tahribatın bir daha yaşanmaması gerektiğini ve bunun için olası depremlere karşı önceden zayıf yapıların tespitinin sağlanması gerektiğini ifade etmiştir. Çalışmasında mevcut betonarme yapıların değerlendirilmesi hususunda 1975 Türkiye Deprem Yönetmeliğine göre inşa edilmiş 9 adet yapı ile önceki verileri kullanarak toplamda 30 adet yapıyı esas alarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), 2007’deki Doğrusal Elastik Yöntemler ve Performans Temelli Hızlı Değerlendirme Yöntemini (Performance Based Rapid Assessment Method, PERA) kullanmıştır.

Işık ve Tozlu (2015), çalışmalarında mevcut durum itibari ile bina stoklarının fazla olması, bununla beraber süre ve eleman hususunda yetersizliklerin olması sebebiyle olası depremler karşısında meydana gelebilecek kayıpları minimize etmek gerektiğini açıklamışlardır. 2013 yılında resmi gazetede yayımlanan Riskli Bina Tespit Yönetmeliği kapsamındaki 1.Aşama Değerlendirme Yöntemini kullanarak mevcut 5 kattan oluşan betonarme bir binanın teknik özelliklerini dikkate alarak performans puanını hesaplamışlardır.

Uygun (2015), çalışmasında mevcut bina stokunun fazla olduğu ve bu nedenle klasik usul yöntemlerin tüm yapılara ayrı ayrı uygulanmasının oldukça fazla vakit alacağı,

dolayısıyla hızlı yöntemlerin bu soruna ilk etap olası afet öncesi güvenlik riski olan binaların ayıklanması açısından daha iyi olacağını belirtmiştir. Bu kapsamda dünya genelinde yaygın kullanılan Japon Sismik İndeks Yöntemini, Türkiye’deki mevcut esaslara uyarlayarak geliştirilmiş Deprem Güvenliği Tarama Yöntemi (DGTY) kullanılmıştır.

Işık (2015), çalışmasında, 2011 yılında Van İlinde meydana gelen depremde tamamı yıkılan Gedikbulak İlköğretim Okulu yapısını esas alarak bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında Japon Sismik İndeks, Kanada Sismik Tarama ve P25 Hızlı Değerlendirme yöntemlerini dikkate alarak gerekli hesaplamaları yapmıştır. Bu hesaplamalar ile hâlihazırda çöken bir binanın göstermiş olduğu reel performans durumu ile teorik esas ile hesaplaması yapılan hızlı değerlendirme yöntemlerini kullanarak ortaya çıkan 2 durumu karşılaştırmak istemiştir.

Gürbüz (2015) ve Tekin (2015), çalışmalarında olası bir afet durumu karşısında hazırlıklı olmak açısından mevcut yapıların risk önceliklerinin belirlenmesi gerektiği üzerinde durmuştur. Bu kapsamda 2013 yılında Resmi Gazetede yayımlanmış olan “Binaların Bölgesel Deprem Risk Dağılımını Belirlemek İçin Kullanılabilecek Yöntemler” adındaki yöntemi kullanarak performans puanı hesaplaması yapmışlardır.

Çırak (2016), çalışmasında Denizli ilinde bulunan farklı sayıda kata sahip ve 1975 deprem yönetmeliği ile 1998 afet yönetmeliğine göre inşa edilmiş 95 adet binanın deprem performansını incelemiştir. Statik itme analizini kullanarak binaların yapısal performanslarını incelemiştir. Ayrıca hızlı değerlendirme yöntemlerinden zemin özellikleri ve yapısal parametrelere dayanan P25 ile Riskli Bina Tespit Yönetmeliğinde yer alan 1. Aşama Değerlendirme Yöntemini kullanarak ayrıntılı değerlendirme ile bir kıyaslama yapılmıştır.

Anıl ve diğerleri (2017), çalışmalarında Beyoğlu bölgesinde 6306 sayılı Kentsel Dönüşüm Yasası esas alınarak 6 mahallede (Fetihtepe,

Kaptanpaşa, Keçeci Piri, Kulaksız, Piri Paşa ve Piyale Mahalleleri) yer alan toplam 5561 adet yapı için performans değerlendirmesi yapmıştır. İncelenen yapılardan 3848 adedinin betonarme yapı olduğu geri kalan 1713 adedinin ise yığma yapı olduğu ifade edilmiştir. Betonarme yapıların daha çok 4 katlı ve yığma yapıların da daha çok 1 katlı yapılardan oluştuğu ifade edilmiştir.

Özbek ve diğerleri (2017), çalışmalarında yığma yapıların düşey taşıyıcı elamanlarının yatay deprem yükleri altındaki davranışlarının, betonarme esaslı olan yapıların düşey taşıyıcı elamanlarına oranla daha zayıf karakterde olduğu açıklanmıştır. Ayrıca Türkiye'nin doğusunda yer alan 2 fay hattı olan Doğu Anadolu Fay Hattı ile Kuzey Anadolu Fay Hattının potansiyel afet ihtimallerine karşın ön inceleme gereğinin hayati olduğu ifade edilmiştir. Bu esasa Diyarbakır ili Suriçi bölgesi esas alınarak mevcut 5 adet yığma yapı gerek mimari açıdan gerekse de statik açıdan ele alınarak incelenmiştir.

Okuyucu ve diğerleri (2018), çalışmalarında Erzurum iline bağlı Palandöken ilçesinde belli bir alanı içerisine alan bölgede Riskli Yapı Tespit Yönetmeliği esaslarınca 1194 tane betonarme esaslı bina üzerinde incelemeler yapılmış, bu binalardan 18'inin 8 kat ve üzeri olması nedeniyle yönetmeliğin çerçevesinin dışında tutularak geri kalanları 6306 sayılı kanunda yer alan 1.Aşama Değerlendirme Yöntemi kullanılarak değerlendirmeye alınmıştır.

Materyal ve Yöntem

Siirt il merkezinde ele alınan yapıların tamamı betonarme esastır. Tamamı Siirt il merkezinde yer almakta olup, tümü kentsel dönüşüm yasasından faydalanarak işlem görmüştür. Bu kapsamda yapılar riskli yapı grubuna dahil edilmiş olup tamamı için yıkım kararı alınmıştır.

Şekil 1, 2, 3, 4, 5' te verilen A, B, C, D, E yapılarına ait resimlerde de görüleceği üzere A yapısı 2 katlı olup, Siirt ili merkez Kooperatif Mahallesi 475 ada 3 nolu parsel taşınmaz üzerinde, B yapısı 2 katlı, Bahçelievler Mahallesi 330 ada 36 nolu parsel taşınmaz üzerinde, C yapısı 3 katlı olup, Siirt ili merkez Bahçelievler Mahallesi 302 ada 77 nolu parsel taşınmaz üzerinde, D yapısı 2 katlı olup Evren Mahallesi 233 ada 3 parsel taşınmaz üzerinde, E yapısı 3 katlı olup Kooperatif Mahallesi 1146 ada 4 nolu parsel taşınmaz üzerinde bulunmaktadır.



Şekil 3. C yapısına ait görüntü



Şekil 4. D yapısına ait görüntü



Şekil 1. A yapısına ait görüntü



Şekil 5. E yapısına ait görüntü



Şekil 2. B yapısına ait görüntü

5 adet yapı ile ilgili Tablo 1. de bina kimlik bilgileri hazırlanmıştır. Kimlik bilgileri verilen yapılar hakkındaki veriler ışığında 5 yapı için performans puan hesabı yapılmış ve bunlar Tablo 1, 2, 3, 4, 5 te verilmiştir..

Tablo 1. 5 adet yapıya ait bina kimlik bilgileri

BİNA KİMLİK BİLGİLERİ					
Bina İsimleri	A	B	C	D	E
Bölge No	Siirt	Siirt	Siirt	Siirt	Siirt
Mahalle	Koperatif	Bahçelievler	Koperatif	Afetevleri	Koperatif
Cadde/ Sokak	1729.sok.	Edip Turhan	Abdullah Bağış	Kurtalan Yolu	Nihat Aykut
Kapı No/Bina	-	-	-	-	-
Pafta/Ada/Parsel	475/3	330/36	302/77	233/3	1146/4
Binanın Tahmini Yaşı	37 Yıl	38 Yıl	19 Yıl	39 Yıl	37 Yıl
Coğrafi Koordinatları(GPS)	37.940597 (E)	37.934299(E)	37.936540(E)	37.943097(E)	37.94136335(E)
	41.926633 (B)	41.937515(B)	41.931585(B)	41.906009(B)	41.93297099(B)
Yapısal Sistem Türü	Ba Çerçeve	X	X	X	X
	Ba Çerçeve ve Perde				
Serbest Kat Adeti	2	2	4	2	3
Yapı Nizamı	Ayrık	X	X	X	X
	Bitişik				
	Köşede Bitişik				
Bitiş Binalar İle Döşeme Seviyesi	Aynı				
	Bitişik Bina Yok	X	X	X	X
	Farklı				
Ağır Çıkmalar	Var	X	X	X	X
	Yok			X	X
Zayıf/Yumuşak Kat	Var			X	
	Yok	X	X	X	X
Kısa Kolonlar	Var	X	X		
	Yok			X	X
Düşeyde Düzensizlik	Var				X
	Yok	X	X	X	X
Planda Düzensizlik	Var			X	
	Yok	X	X	X	X
Bina Görsel Kalitesi	İyi				
	Orta				
	Kötü	X	X	X	X
Tabii Zemin Eğimi	Düz	X	X	X	X
	Eğim>30 ⁰				
Zemin Sınıfı	ZA				
	ZB				X
	ZC	X	X	X	X
	ZD				
	ZE				
Normal Katlar Fonksiyonu	Konut	X	X	X	X
	Ticaret				X
	Sanayi				
	Kamu				
	Metruk				

Tablo 2. Taban ve yapısal sistem puanı tablosu(RYTEİE 2019)

Toplam kat sayısı	Taban puanı				Yapısal sistem puanı (YSP)	
	Tehlike bölgesi				Yapısal sistem	
	I	II	III	IV	BAÇ	BAÇP
1 ve 2	90	120	160	195	0	100
3	80	100	140	170	0	85
4	70	90	130	160	0	75
5	60	80	110	135	0	65
6 ve 7	50	65	90	110	0	55

Tablo 3. Deprem Tehlike Bölgeleri(RYTEİE 2019)

Tehlike bölgesi	S _{DS}	Zemin Sınıfı
I	$S_{DS} \geq 1.0$	ZC/ZD/ZE
II	$S_{DS} \geq 1.0$	ZA/ZB
	$1 \geq S_{DS} \geq 0.75$	ZC/ZD/ZE
III	$1 \geq S_{DS} \geq 0.75$	ZA/ZB
	$0.75 \geq S_{DS} \geq 0.50$	ZC/ZD/ZE
IV	$0.75 \geq S_{DS} \geq 0.50$	ZA/ZB
	$0.50 \geq S_{DS}$	Tüm zeminler

Tablo 4. Olumsuzluk parametre değerleri (O_i)(RYTEİE 2019)

Olumsuzluk parametre no	Olumsuzluk parametresi	Durum 1		Durum 2	
		Parametre tespiti	Parametre değeri	Parametre tespiti	Parametre değeri
1	Yumuşak kat	Yok	0	Var	1
2	Ağır çıkma	Yok	0	Var	1
3	Görünen kalite	İyi	0	Orta (Kötü)	1 (2)
4	Kısa kolon	Yok	0	Var	1
5	Tabii Zemin Eğimi	Yok	0	Var	1
6	Yapı Nizamı	Ayrık	0	Bitişik/Köşede Bitişik	1
7	Düşeyde Düzensizlik	Yok	0	Var	1
8	Planda düzensizlik	Yok	0	Var	1

Tablo 5. Olumsuzluk parametre puan (OP_i) tablosu(RYTEİE 2019)

Toplam kat sayısı	Olumsuzluk parametre puanları (OP)										
	Yumuşak kat	Görünen kalite	Ağır çıkma	Kat seviyesi/Bağımsız bina durumu				Düşeyde düzensizlik	Planda düzensizlik / Burulma	Kısa kolon	Tabii Zemin Etkisi
				Aynı		Farklı					
				Orta	Kenar	Orta	Kenar				
1,2	-10	-10	-10	0	-10	-5	-15	-5	-5	-5	-3
3	-20	-10	-20	0	-10	-5	-15	-10	-10	-5	-3
4	-30	-15	-30	0	-10	-5	-15	-15	-10	-5	-3
5	-30	-25	-30	0	-10	-5	-15	-15	-10	-5	-3
6,7	-30	-30	-30	0	-10	-5	-15	-15	-10	-5	-3

16.02.2019 tarih ve 30688 sayı ile Resmi Gazete’de yayımlanan Yönetmelik değişikliği ile 6306 sayılı Kanunun Uygulama Yönetmeliği’nin Ek-2’sinde yer alan Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar’da (RYTEİE) değişiklik yapılmıştır. Aynı kanun kapsamında belirli alanlarda riskli olabilecek binaların bölgesel dağılımının belirlenmesi ve önceliklendirme kararı verilmesi amacıyla kullanılabilir, bina özelliklerini ve deprem tehlikesini dikkate alan basitleştirilmiş yöntemler için oluşturulmuş tablolardan faydalanılmıştır. Riskli binaların tespit edilmesine dair yönetmelik gereğince kimlik bilgileri hazırlanmış olan 5 adet yapıya ait tüm bilgiler Tablo 1’de yer almaktadır. Betonarme binaların performans puanları, binaların buldukları yerin deprem tehlikesini ve mevcut bina özelliklerini yansıtan parametrelere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tablo 1’de binalara ait veriler ışığında Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5 te ilgili değer ve puanlar tespit edilerek performans puanları hesaplanmıştır. Performans puanlarının hesaplanması şu şekilde formüle edilmiştir:

$$PP = TP + \sum_{i=1}^n (O_i * OP_i) + YSP$$

PP : Bina için performans puanı

TP : Binanın bulunduğu yerin deprem tehlike bölgesine ve katsayısına bağlı taban puanı

O_i : Olumsuzluk parametresi değeri (*i* = 1’den 8’e kadar)

OP_i : Olumsuzluk parametre puanı

YSP : Yapısal sistem puanını olumlu parametre olarak temsil etmektedir.

A yapısının kimlik bilgileri dikkate alındığında yapılacak hesaplama sonrası puanı ;

$$PP = 160 + 2*(-10) + 1*(-10) + 1*(-5) = 125 \text{ puan}$$

B yapısının kimlik bilgileri dikkate alındığında yapılacak hesaplama sonrası puanı ;

$$PP = 160 + 2*(-10) + 1*(-10) + 1*(-5) = 125 \text{ puan}$$

C yapısının kimlik bilgileri dikkate alındığında yapılacak hesaplama sonrası puanı ;

$$PP = 130 + 2*(-15) = 100 \text{ puan}$$

D yapısının kimlik bilgileri dikkate alındığında yapılacak hesaplama sonrası puanı ;

$$PP = 160 + 2*(-10) + 1*(-10) + 1*(-10) + 1*(-5) = 115 \text{ puan}$$

E yapısının kimlik bilgileri dikkate alındığında yapılacak hesaplama sonrası puanı ;

$$PP = 140 + 2*(-10) + 1*(-10) = 110 \text{ puan}$$

Yapılan hesaplamalarda da görüleceği üzere, tüm yapılar daha önce idari ilgili kurumlarca risk grubuna alınıp yıktırılmış ise de konu ile alakalı bir risk önceliği çalışması yapılmamıştır. Dolayısıyla risk grubuna giren tüm yapılar için performans puanları hesaplanarak kategorik risk haritası çıkarılabilir.

Sonuçlar ve Tartışma

Siirt il merkezinde riskli yapı grubuna girmiş ve kent dönüşüm yasasından da faydalanmış yapılardan 5 adedi esas alınarak bir performans değerlendirmesi yapılmıştır. Siirt ilinin deprem bölgesinde olduğu dikkate alındığında hala potansiyel risk taşıyan birçok yapının zaman kaybedilmeden hızlı değerlendirme yöntemi ve ön çalışma olan 1.Aşama Değerlendirme Yöntemine başvurularak performans puanının hesaplanması ve risk haritasının çıkartılmasının çok büyük faydaları olacaktır. Böylece yapısal olarak en yüksek potansiyel tehlikeden en düşük tehlikeye doğru potansiyel risk yapı grupları üzerinde gerekli çalışmalar yapılarak kentsel yenilemede hem güvenlik hem de estetik kavramları doğru bir şekilde yerine oturmuş olacaktır. 5 yapı için elde edilmiş olan performans puanlarına bakıldığında en düşük puan ile en yüksek puan arasında 25 bazlık bir puan olduğu görülmektedir. 2 adet yapının puanı aynı çıkmıştır. Elde edilen puanlar, yapılarda risk önceliğini belirlemede önemli bir ön çalışma olarak görülebilir. İşlemin kolaylığı potansiyel risk taşıyan yapıların tespitinde hem zaman açısından hem de fikir elde etme açısından oldukça büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Kaynaklar

- Anıl, Ö., Şahmaran M., Koçkar M.K., (2017). 6306 Sayılı Kentsel Dönüşüm Yasası Risk Değerlendirme Tekniklerinin Saha Uygulaması: Beyoğlu Örneği, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Eskişehir.
- Coşkun, A., (2007). Mevcut Betonarme Binaların Deprem Etkisindeki Yapısal Performanslarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği(TBDY), 2018.
- Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Kentsel Dönüşüm Birimi, (2018). ‘Siirt il merkezinde Kentsel Dönüşümden Faydalanan Yapılar ile ilgili istatistikî ve sayısal veriler’, Siirt.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar, 2019.
- Çırak, Ç., (2016). Mevcut Binalarda Hızlı Değerlendirme ve Ayrıntılı İnceleme Yöntemleri İle Belirlenen Deprem Performanslarının Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Gezer, İ., (2014). Kentsel Dönüşüm; Ne, Niçin, Nasıl?. Sosyal Politika, 41.
- Gündoğan, S., (2014). Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Projelendirilen Mevcut Betonarme Binaların Deprem Performanslarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürbüz, A. ve Tekin, M., (2015). Performans Sıralaması Yöntemiyle Mevcut Binaların Bölgesel Deprem Risk Dağılımının Belirlenmesi, *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **11**, 1, 37-48.
- Işık, E. ve Tozlu, Z., (2015). Farklı Değişkenler Kullanılarak Yapı Performans Puanının Hesaplanması, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 2, 161-172.
- Işık, E., (2015). Hasarlı Bir Betonarme Binaların Performans Puanının Hesaplanması, *IAAOJ, Scientific Science*, **3**, 2, 47-52.
- Okuyucu, D., Savaş, G.K., Gedik, B., Şuşarlıoğlu, M.F. ve Kara, T., (2018). Sokaktan Tarama Yöntemiyle Binaların Bölgesel Deprem Risk Dağılımının Belirlenmesi: Erzurum – Yenişehir Örneği, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **30**, 1, 219-231.
- Özbek, O., Akyıldız, M.H., Karaşin, A.H., Öncü, M.E. ve Yılmaz Çetin, S., (2017). Suriçi’ndeki çok katlı yığma binaların 2007 deprem yönetmeliğine göre değerlendirilmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **8**, 2, 395-402.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), (2017). ‘2015-2016 yılı Siirt ili adrese dayalı nüfus kayıt sistemine göre nüfus sayısı. 2015-2017 yıllarındaki konut satış sayısı.’ Erişim:[<http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?meto d=temelist>].Erişim Tarihi : 08.05.2017
- Uslu, G. ve Uzun, B., (2014). Kentsel Dönüşüm Projelerinde Deprem Etkisi, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **6**, 2, 1-11.
- Uyğun, T., (2015). Deprem Güvenliği Tarama Yöntemi ve Bir Uygulama, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Calculating the performance score of some risky buildings in Siirt province

Extended abstract

There are a lot of structures of which risk assessment has not been made in Turkey where earthquake is expected. The situation is at the alarming rate. Siirt province is also located in the earthquake zone. The conditions for making risk assessments of structures within the scope of principles for identifying risky structures (RBTEIE 2019) have made it even easier. Within the scope of this regulation, risk maps can be obtained by getting information about the structures that may pose a risk in any region or a distribution can be provided with the data obtained. Owing to the earthquakes in Turkey, quickly to identify the structures at risk are very important. With the rapid evaluation method which does not need detailed analysis, priority of the structures at high risk can be determined. In the light of the data obtained about the buildings in this regard, Performance score can be calculated in order to have an idea about the structures by the first stage evaluation method of risky building detection regulation. Preliminary information is obtained about the structures with a view to calculate the performance scores of buildings. There are many buildings built in Siirt province where there is a risk of earthquake according to earthquake regulations in 1997. These structures are likely to be at risk according to the earthquake regulations in 2007 and 2018. Siirt is one of the provinces with many structures that are waiting to be identified as risky. There are several reasons for this situation. One of the most important these is that the owners of buildings do not have economic opportunities for rebuilding although they are aware of the risk in their buildings. The other reason is that they do not have sufficient knowledge of the detection of risky structures, because there is no any experience of destructive earthquake result. It can also be explained by the fact that people living in detached houses do not want to live in apartments. It is vital for towns to keep up with the changing conditions. Siirt is located in a flat area surrounded by mountains. Housing on flat ground is more common. In addition, the new areas opened for the zoning of the city are limited to structures of the flat ground. This situation arises as a problem for Siirt that is a province with limited flat ground structure. Due to the possibility of constructing multi-storey buildings in development areas, old and non-earthquake resistant buildings can be demolished and multi-storey

buildings can be constructed in accordance with the regulations and project for the new one. Thus, both the aesthetic appearance and the living standards of the city will be at the desired level with the renovation of the old buildings. Currently, the housing need of Siirt is met from new development zoning areas since there are no concrete works related to many buildings in the process of risk assessment. This situation gives rise to the loss of importance of the older settlements in time. Thus, the density of the city shifts to new areas. With the shifting of density into other areas, the demand for renewal of residential areas, which have gradually lost importance, will gradually decrease. It is vital to make a quick preliminary evaluation of the old structures without damaging the historic fabric of the old settlement areas. After pre-evaluation, special incentives and necessary renewal studies can be facilitated in the areas with high-risk areas. This situation will both reduce the need to open new zoning areas and ensure the safety of life in case of a possible earthquake with the replacement of old houses and new houses. The need to make a large-scale study is essential especially in the older residential areas of Siirt soon. Within the scope of this study, risk assessment was made in downtown of Siirt and the calculation of the building performance scores in the light of the information obtained from the five buildings that were decided to be demolished were discussed.

Keywords: Building Risk Detection, Structure Performance Score Calculation, Siirt Urban Renewal

Bitki İndeksleri Kullanarak Buğday Bitkisinin Rekolte Tahmini

Wheat Yield Estimation Using Vegetation Indices

Yunus Kaya^{1*}, Nizar Polat¹

¹ Harran Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, yunuskaya@harran.edu.tr, nizarpolat@harran.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 17 Şubat 2020
Düzeltilme: 29 Temmuz 2020
Kabul: 30 Temmuz 2020

Anahtar kelimeler:

Uzaktan algılama, verim tahmin modeli, buğday, bitki örtüsü indeksi

ÖZET

Uzaktan algılama, yer bazlı cihazlar, uçaklar veya uydular gibi uzak platformlardan yeryüzündeki nesnelere hakkında bilgi edinmeyi sağlayan bilim dalıdır. Uydu verileri farklı analizler yardımıyla işlenerek çeşitli alanlarda kullanılabilir. Uydu görüntülerinden elde edilen bitki örtüsü indeksleri yeryüzüne ilişkin farklı bilgiler sağlamaktadır. Kuraklık haritalarının oluşturulması, ürün deseni belirleme çalışmaları, zamana bağlı ürün veya bitki örtüsü değişimi çalışmaları bunlardan bazılarıdır. Gerek iklim koşullarının uygun olması gerekse de zengin tarım arazilerinin olması sebebiyle, tarım Türkiye ekonomisi için önemli bir alandır. Bu sebeple hem işletme sahipleri hem de ilgili bakanlıklar tarım arazilerinden maksimum verim alınması konusunda ilgilidirler. Türkiye’de en çok üretim alanına sahip ürün ise buğdaydır. Bu çalışmada Şanlıurfa’nın güneydoğusunda bulunan Tarım İşletmeleri Genel Müdürlüğüne ait araziye buğday verimi incelenmiştir. Uydu görüntülerinden elde edilen bitki indeksleri ve geçmiş yıllara ait parsel verim değerleri kullanılarak verim tahmin modeli kurulmuş ve modelin doğruluğu farklı bir yıldaki verim değerleri ile sorgulanmıştır. Ayrıca NDVI, MSAVI ve GNDVI bitki indekslerinin doğrulukları araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda her üç indekse ait çiçeklenme öncesi, çiçeklenme evresi ve çiçeklenme sonrasındaki yansıtım değerleri kullanılarak 2018-2019 sezonuna ait verim tahmini yapılmış ve en yüksek başarı %82 ile çiçeklenme evresindeki NDVI değeriyle sağlanmıştır.

Doi: 10.24012/dumf.860325

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 February 2020
Revised: 29 July 2020
Accepted: 30 July 2020

Keywords:

Remote sensing, yield estimation model, wheat, vegetation indices

ABSTRACT

Remote sensing is the science that provides information about objects on earth from remote platforms such as ground-based devices, planes or satellites. Satellite data can be processed with different analyzes and used in various fields. Vegetation indexes obtained from satellite images provide different information about the earth. Some of these are drought maps creation, product pattern determination studies, time-dependent product or vegetation change studies. Should not be appropriate due to the climatic conditions both in the rich agricultural lands, agriculture is an important area for Turkey's economy. For this reason, both business owners and related ministries are concerned with the maximum yield from agricultural land. Wheat is the most produced cereal in Turkey. In this study, the wheat yield in the land belonging to the General Directorate of Agricultural Enterprises located in the southeast of Şanlıurfa was investigated. The yield estimation model was established using vegetation indexes obtained from satellite images and parcel yield values from previous years and the accuracy of the model were questioned with the yield values in a different year. In addition, the accuracy of NDVI, MSAVI and GNDVI vegetation indexes were investigated. As a result of the study, the yield prediction for 2018-2019 season was made using the reflection values of all three indices before flowering, in the flowering phase and after flowering, and the highest success was achieved with 82% NDVI value in the flowering phase.

* Sorumlu yazar / Correspondence
Yunus KAYA
✉ yunuskaya@harran.edu.tr

Giriş

Günümüzde dünya nüfusu; sağlık alanındaki gelişmeler, insanların bilinçlenmesi vb. sebeplerden dolayı sürekli artmakta ve yaşam süresi uzamaktadır. Nüfusun artması ve doğal kaynakların yetersizliğinden dolayı tarım alanlarının ölçülmesi ve izlenmesi önemli bir hale gelmiştir [1]. Diğer yandan iklim koşullarının tarıma elverişli olması ve verimli topraklara sahip olmamız sebebiyle tarım, Türkiye ekonomisinde önemli bir yere sahiptir.

Buğday bitkisi dünya tahıl üretimi dikkate alındığında ikinci sırada yer alırken Türkiye tarımında en çok üretilen tahıl konumundadır. Türkiye İstatistik Kurumunun 2018 verilerine göre tahıl üretimi için ayrılan alanların %62 sinde buğday yetiştirilmektedir. Üretim açısından incelendiğinde ise yıllık tahıl üretiminin %37 sini buğday oluşturmaktadır (TÜİK 2018 raporu).

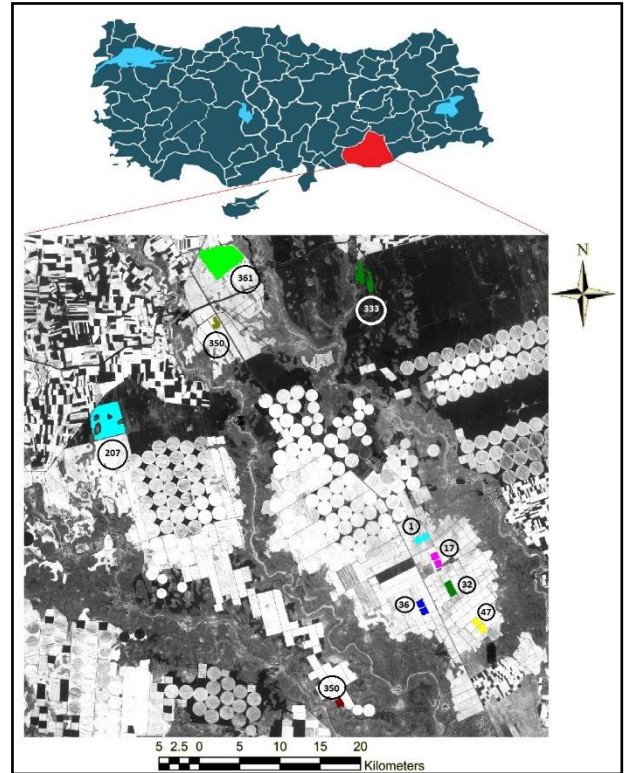
Tarım alanlarının verimli bir şekilde kullanılabilmesi için bu arazilerin belirli aralıklarla kontrol edilmesi ve mevcut durumlarının incelenmesi gerekmektedir. Uzaktan algılama teknikleri ve uydu verileri arazi örtüsünün belirlenmesinde [2], tarım arazilerinin izlenmesinde [3, 4], zamana bağlı değişimlerin izlenmesinde [5, 6, 7] ve rekolte tahmini çalışmalarında [8, 9, 10] aktif olarak kullanılmaktadır. Uydu sistemleri üzerine yerleştirilen özel algılayıcılar sayesinde üretilen bitki indeksleri bitkinin gelişim evrelerinin incelenmesi ve verim tahmin modelinin kurulması için önemli katkılar sağlamaktadır. Geçmiş yıllara ait uydu görüntü verileri, hem geçmiş yıllara ilişkin tarım alanlarının belirlenmesinde hem de gelecek yıllara ilişkin tarım alanlarının yönetilmesine yardımcı olmaktadır [11]. 1972 yılında Landsat-1 uydusunun fırlatılmasıyla birlikte yeryüzüne ilişkin bilgilerin toplanmasında uzaktan algılama teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Landsat-1 uydusunun faaliyete geçmesinden sonra basit oran indeksine dayalı olarak çok sayıda bitki örtüsü indeksi bulunmuştur. Rouse vd. [12] ilk kez Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksini (NDVI-Normalized Difference Vegetation Index) kullanmışlardır. Bitki örtüsü indeksleri kullanılarak gelecek yıllara ilişkin rekolte

tahmini çalışmaları başlamıştır. Colwell vd. [13] ve Li [14] kışlık buğday verimini incelemek için Landsat uydu görüntüsünden yararlanmışlar. Özellikle büyük yüzölçümüne sahip alanlar için uzaktan algılama yaygın kullanılan bir yöntemdir [15, 16] ve belirli zaman aralıklarında elde edilen spektral değerler [17] ile hesaplanan bitki örtüsü indeksleri [18] buğday verimi tahmininde başarılı sonuçlar vermektedir [19, 20].

Bu çalışmada çiçeklenme öncesi, evresi ve sonrasında belirlenecek verim tahmin modelinin doğruluğu araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada farklı bitki örtüsü indekslerinin farklı evrelerdeki tutarlılığı araştırılmıştır.

Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak Şanlıurfa ilinin güneydoğusundaki Ceylanpınar ilçesinde bulunan Tarım İşletmeleri Genel Müdürlüğü (TİGEM) arazisi seçilmiştir (Şekil 1). Sulu tarım yapılan buğday arazilerinden 5 adet ve kuru tarım yapılan buğday arazilerinden 3 adet olmak üzere toplam 8 adet parsel modelin oluşturulmasında kullanılmıştır. Parsellere ait verim değerleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı(UTM-Zone:37)

TİGEM arazisi 966 bin dekarı tarla arazisi olmak üzere 1,6 milyon dekar büyüklüğündedir ve Ceylanpınar ilçesinde bulunan TİGEM arazisinin yüzölçümü Türkiye genelinde bulunan TİGEM arazilerinin toplam yüzölçümünün yarısına eşittir (Tablo 2).

Uydu verileri

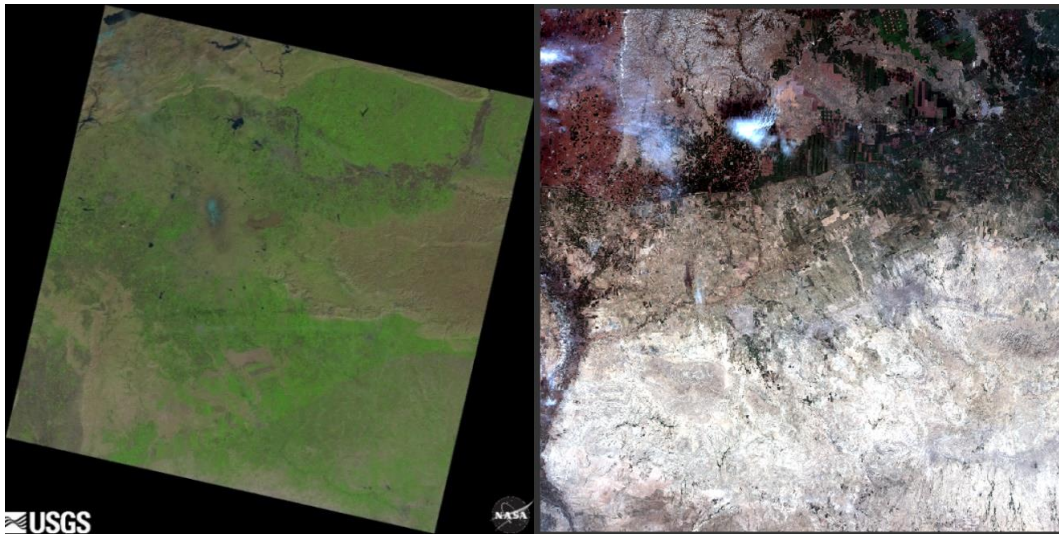
2016-2017 sezonu için belirlenen buğday tarlalarının izlenmesi için 2 adet Landsat-8 ve 14 adet Sentinel-2 uydu verisi kullanılmıştır (Şekil 2). Landsat-8 uydusuna ait genel özellikler Tablo 3'te, Sentinel-2 uydusuna ait özellikler ise Tablo 4'te verilmiştir. Kullanılan uydu verilerinin tarihleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 1. Parsel verim değerleri

Sulu Tarım Arazisi		Kuru Tarım Arazisi	
Parsel Numarası	Verim (kg/da)	Parsel Numarası	Verim (kg/da)
1	506,20	350	125,10
17	558,40	354	37,30
32	403,10	361	46,60
36	371,80		
47	445,00		

Tablo 2. TİGEM arazi alanları

Arazi Türü	Ceylanpınar-Şanlıurfa arazileri (da)	Tüm TİGEM arazileri (da)
Tarla arazisi	966 436	2 039 362
Tabii mera arazisi	404 433	629 829
Bahçe arazisi	64 512	120 245
Kültür altı arazi toplamı	1 435 381	2 789 436
Kültür dışı arazi	198 481	485 637
Sulanan arazi	696 568	942 499
Toplam arazi	1 633 862	3 275 073



Şekil 2. Örnek Landsat [21] ve Sentinel [22] uydu görüntüsü ayak izi

Tablo 3. Landsat 8 uydu özellikleri

Landsat 8 OLI-TIRS		
Şerit Genişliği (km)	170 x 183	
Radyometrik Çözünürlük (bit)	12	
Landsat 8	Dalga Boyu (µm)	Çözünürlük (m)
Bant 1	0.43-0.45	30
Bant 2	0.45-0.51	30
Bant 3	0.53-0.59	30
Bant 4	0.64-0.67	30
Bant 5	0.85-0.88	30
Bant 6	1.57-1.65	30
Bant 7	2.11-2.29	30
Bant 8	0.50-0.68	15
Bant 9	1.36-1.38	30
Bant 10	10.6-11.19	100
Bant 11	11.50-12.51	100

Tablo 4. Sentinel 2 uydu özellikleri

SENTINEL-2		
Radyometrik Çözünürlük (bit)	8	
Sentinel-2	Dalga Boyu (µm)	Çözünürlük (m)
Bant 1- Kıyı Aerosolü	0.443	60
Bant 2- Mavi	0.49	10
Bant 3- Yeşil	0.56	10
Bant 4- Kırmızı	0.665	10
Bant 5- Kırmızı Kenar (Red Edge)	0.705	20
Bant 6- Kırmızı Kenar (Red Edge)	0.74	20
Bant 7- Kırmızı Kenar (Red Edge)	0.783	20
Bant 8- Yakın Infrared (NIR)	0.842	10
Bant 8A- Kırmızı Kenar (Red Edge)	0.865	20
Bant 9- Su Buharı	0.945	60
Bant 10- Kısa Dalga Infrared (SWIR)	1.375	60
Bant 11- Kısa Dalga Infrared (SWIR)	1.610	20
Bant 12- Kısa Dalga Infrared (SWIR)	2.190	20

Tablo 5. Kullanılan uydu verilerinin tarihleri

2017-2018 Sezonu			
ARALIK	4.12.2017	NİSAN	8.04.2018
	8.12.2017		13.04.2018
	14.12.2017		23.04.2018
OCAK	9.01.2018	MAYIS	18.05.2018
	13.01.2018		23.05.2018
ŞUBAT	2.02.2018	HAZİRAN	7.06.2018
			12.06.2018
MART	19.03.2018		17.06.2018
		22.06.2018	

Bitki örtüsü indeksleri

Buğday bitkisine ait yansıtımları belirlemek için NDVI, MSAVI ve GNDVI indeksleri kullanılmıştır. NDVI [11] bant aritmetiği, elektromanyetik spektrumun yakın kızılötesi ve kırmızı dalga boyundaki ışık değerlerinin birbirinden çıkarılıp daha sonra iki bandın toplamına bölünmesiyle elde edilir [23] ve en çok kullanılan bitki indekslerindedir [24]. NDVI (1) eşitliği ile hesaplanır.

Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi (Soil-Adjusted Vegetation Index-SAVI) toprak etkisinin de dikkate alındığı bir indekstir. Bundan dolayı formülünde arka plan ayar faktörü olarak L parametresini barındırır. Bitki örtüsünün yoğun olduğu arazilerde L değeri 0 ya da 0'a çok yakın bir değer alırken bitki örtüsünün seyrek olduğu yerlerde L değeri 1 veya 1'e yakın değerler almaktadır. Ancak belirlenen bu sabit L değeri bitki örtüsü yapısının homojen olmamasından kaynaklı olarak her zaman aynı doğruluğu sağlamamaktadır. Bu nedenle toprağın etkisine en uygun ayarın elde edilmesi için L arka plan ayar faktörünün mevcut bitki örtüsü miktarına göre değişmesi gerekmektedir. Bu şekilde tanımlanan ve Modifiye Edilmiş Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi (Modified Soil Adjusted Vegetation Index-MSAVI) olarak adlandırılan indeks (2) eşitliği ile hesaplanır.

Yeşil Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (Green Normalized Difference Vegetation

Index-GNDVI) ise NDVI'dan farklı olarak kırmızı dalga boyu yerine yeşil dalga boyunu kullanır ve (3) eşitliği ile hesaplanır (Tablo 6).

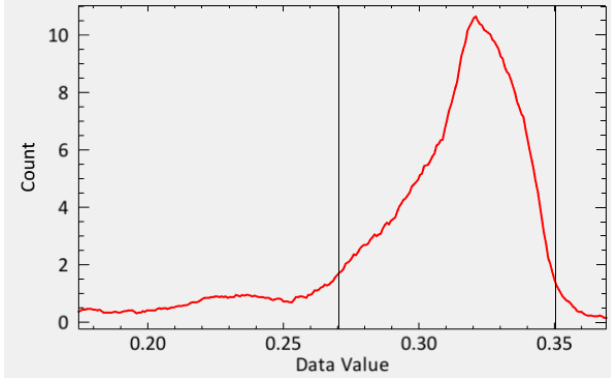
Uygulama

Görüntülerin işlenmesi ve değerlendirilmesi

Landsat uydusundan elde edilen görüntüler ENVI (Environment for Visualizing Images) yazılımında, Sentinel uydusundan elde edilen görüntüler ise SNAP (Sentinel Application Platform) yazılımında değerlendirilerek NDVI histogramları oluşturulmuş ve sayısal olarak dışarıya aktarılmıştır. Optik uydu görüntülerinin handikaplarından birisi bulutlu havalarda ve yeryüzündeki yansıtıcı yüzeylerden kaynaklı olarak bazı piksellerin gerçek değerden farklı çıkmasıdır. Dolayısıyla çalışmada kullanılan piksel değerlerinde ortalama çok uzakta değer alan piksellerin elenmesi bu ilgisiz piksellerin temizlenmesi için gereklidir. Aktarılan veriler içinde ilgisiz indeks değerlerine sahip pikseller ayıklanmıştır. Bu işlem belirlenirken her parsel için mevcut piksel sayısındaki indeks değerlerine bakılmıştır ve piksel sayısının %5 i kadar piksel elenmiştir. Eleme işlemi indeks değerinin alt ve üst sınırından alınmıştır (Şekil 3). Geriye kalan indeks değerleri yardımıyla ağırlıklı ortalama indeks değeri bulunmuştur. Çalışmada bant oranlaması kullanıldığı için topoğrafik düzeltme yapılmamıştır.

Tablo 6. Kullanılan bitki örtüsü indeksleri

İndeks	Formül	Kaynak
(1) Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse vd. [12]
(2) Modifiye Edilmiş Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi	$MSAVI = \frac{2xNIR + 1 - \sqrt{(2xNIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}}{2}$	Richardson ve Wiegand [25]
(3) Yeşil Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Gitelson [26]



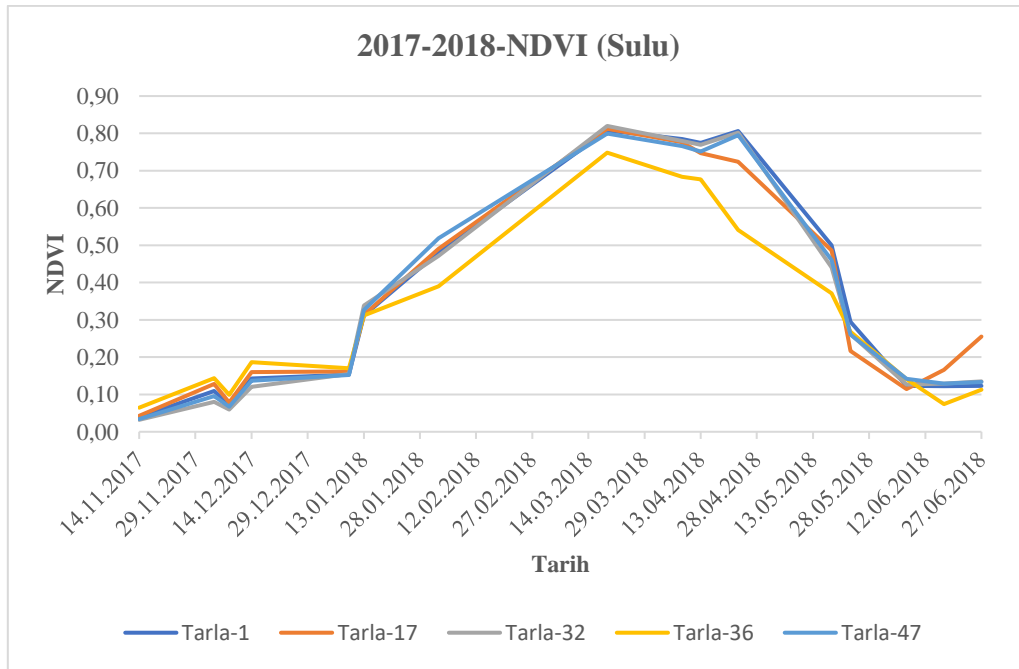
Şekil 3. Örnek histogram grafiği(NDVI)

Fenolojik evrelerin belirlenmesi

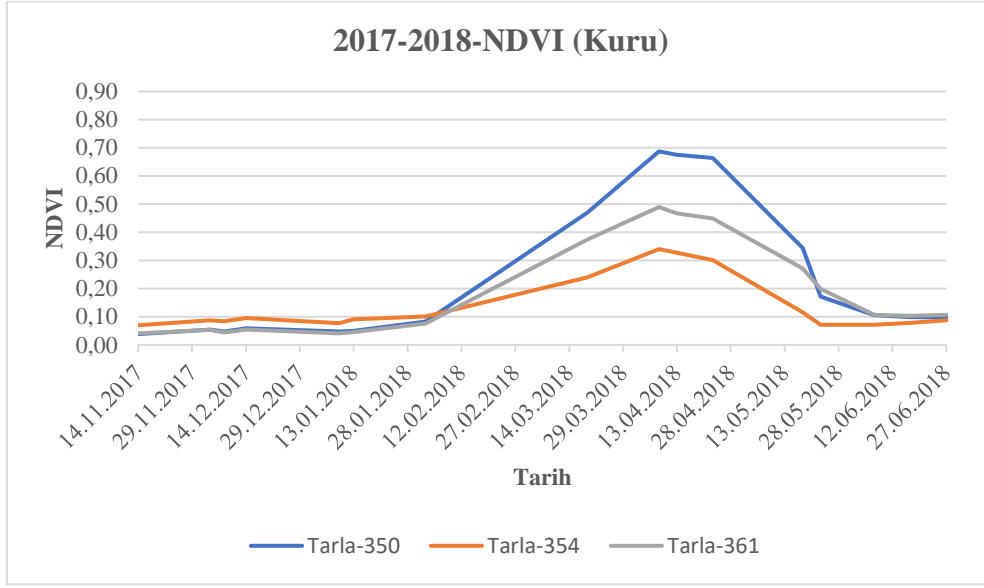
Buğday bitkisinin gelişim evreleri temel olarak 4 aşamada incelenebilir. Bunlar; çimlenme ve fide aşaması, kardeşlenme ve kök uzaması, çiçeklenme ve olgunlaşma aşamalarıdır. Bu aşamalardan önemli olanı ise çiçeklenme aşamasıdır. Çünkü buğday bitkisi çiçeklenme

aşamasında en yeşil formuna ulaşır ve NDVI değeri maksimum seviyede olur. Bundan dolayı NDVI değerinin maksimum değere ulaştığı tarihler çiçeklenme evresi olarak kabul edilmiştir. Çiçeklenme öncesinden bir önceki uydu görüntüsünün tarihi çiçeklenme öncesi, bir sonraki uydu görüntüsünün tarihi ise çiçeklenme sonrası olarak kabul edilmiştir. 2017-2018 sezonuna ait sulu ve kuru tarım yapılan tarlalardaki NDVI değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 4 ve 5'ten incelendiğinde NDVI değerinin maksimuma ulaştığı tarih (08.04.2018) çiçeklenme evresi olarak belirlenmiştir. Buna göre 19.03.2018 tarihi çiçeklenme öncesi, 18.05.2018 tarihi de çiçeklenme sonrası olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan indeks değerleri Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 4. 2017-2018 sezonu sulu parsellere ait NDVI grafiği



Şekil 5. 2017-2018 sezonu kuru parsellere ait NDVI grafiği

Tablo 7. Farklı evrelerdeki indeks değerleri

İndeks	Tarla	Çiçeklenme öncesi	Çiçeklenme evresi	Çiçeklenme sonrası
NDVI	1	0.48	0.81	0.50
	17	0.49	0.81	0.49
	32	0.47	0.82	0.44
	36	0.39	0.75	0.37
	47	0.52	0.80	0.46
	350	0.47	0.69	0.34
	354	0.24	0.34	0.12
	361	0.37	0.49	0.27
	GNDVI	1	0.42	0.68
17		0.44	0.68	0.36
32		0.41	0.69	0.41
36		0.38	0.46	0.42
47		0.44	0.67	0.43
350		0.46	0.35	0.60
354		0.30	0.27	0.28
361		0.41	0.36	0.56
MSAVI		1	0.27	0.62
	17	0.28	0.68	0.18
	32	0.25	0.64	0.24
	36	0.23	0.35	0.26
	47	0.28	0.60	0.25
	350	0.27	0.17	0.48
	354	0.11	0.06	0.08
	361	0.21	0.15	0.41

Verim tahmin modeli

Buğday alanları için NDVI, GNDVI ve MSAVI değerleri göz önüne alınarak doğrusal regresyon analizi yapılarak verim tahmin modeli kurulmuştur. Kurulan modelde buğdayın çiçeklenme öncesi, çiçeklenme evresi ve çiçeklenme sonrasındaki indeks değerleri ile verim değerleri arasında ilişki kurulmuştur. Parsellere ait verim değerleri TİGEM'den temin edilmiştir. Verim denklemleri, korelasyon katsayıları (r) ve determinasyon katsayıları (r²) değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8 incelendiğinde en yüksek korelasyon değerinin MSAVI'de (0,96) olduğu görülmektedir. Genel olarak korelasyon değerleri incelendiğinde MSAVI ve GNDVI indekslerinde çiçeklenme evresinde diğer evrelere göre büyük bir fark gözükmemektedir. NDVI'da ise çiçeklenme evresi ve çiçeklenme sonrasında yüksek korelasyon gözlenmiştir.

Doğruluk analizi

2017-2018 sezonundaki belirli parsellerdeki verim değerleri ile yansıtım değerleri arasında uygulanan doğrusal regresyon modeli sonucu elde edilen denklem değerleri 2018-2019 sezonundaki buğday verim tahmini için uygulanmıştır. Elde edilen indeks değerleri incelenerek çiçeklenme öncesi, çiçeklenme evresi ve çiçeklenme sonrası belirlenmiş ve bu tarihlerdeki tüm indeks değerleri verim modelinde elde edilen denkleme uygulanmıştır. Tablo 8'de verilen verim denklemleri kullanılarak 2018-2019 sezonuna ait verim değerleri tahmin edilmiştir. Daha sonra elde edilen tahmini verim değerleri TİGEM'den alınan gerçek verim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Doğruluk oranları (4) eşitliği ile elde edilmiştir. Sonuçlar NDVI, MSAVI ve GNDVI değerleri için sırasıyla Tablo 9, 10 ve 11'de verilmiştir.

Tablo 8. Farklı evrelerdeki verim denklem değerleri

İndeks	Evre	Denklem	Korelasyon Katsayısı (r)	Determinasyon Katsayısı (r ²)
NDVI	Çiçeklenme Öncesi	1680,5x-409,61	0,73	0,53
	Çiçeklenme Evresi	1040,5x-404,18	0,89	0,78
	Çiçeklenme Sonrası	1461,6x-234,37	0,91	0,82
MSAVI	Çiçeklenme Öncesi	2726,6x-304,42	0,69	0,48
	Çiçeklenme Evresi	878,82x-15,606	0,96	0,92
	Çiçeklenme Sonrası	-481,48x+435,36	0,26	0,07
GNDVI	Çiçeklenme Öncesi	1505,1x-386,5	0,41	0,17
	Çiçeklenme Evresi	943,3x-259,13	0,93	0,87
	Çiçeklenme Sonrası	-470,52x+562,23	0,28	0,08

$$\text{Model Doğruluğu} = \left(1 - \frac{|\text{Tahmini verim} - \text{Gerçek verim}|}{\text{Gerçek verim}}\right) * 100 \quad (4)$$

Tablo 9. Doğruluk analizi(NDVI)

EVRE	Tarla	NDVI	Tahmini Verim (kg/da)	Gerçek Verim (kg/da)	Doğruluk Oranı (%)	Doğruluk Ort. (%)
Çiçeklenme Öncesi	1	0.41	279.4	459.6	60.8	56
	17	0.51	447.4	268.5	33.4	
	32	0.36	195.4	202.9	96.3	
	36	0.53	481.1	265.0	18.5	
	47	0.38	229.0	219.8	95.8	
	207	0.53	481.1	340.5	58.7	
	333	0.58	565.1	324.8	26.0	
Çiçeklenme Evresi	1	0.75	376.2	459.6	81.9	82
	17	0.71	334.6	268.5	75.4	
	32	0.49	105.7	202.9	52.1	
	36	0.68	303.4	265.0	85.5	
	47	0.63	251.3	219.8	85.7	
	207	0.73	355.4	340.5	95.6	
	333	0.71	334.6	324.8	97.0	
Çiçeklenme Sonrası	1	0.64	701.1	459.6	47.5	60
	17	0.46	438.0	268.5	36.9	
	32	0.34	262.6	202.9	70.6	
	36	0.41	364.9	265.0	62.3	
	47	0.29	189.5	219.8	86.2	
	207	0.29	189.5	340.5	55.7	
	333	0.3	204.1	324.8	62.8	

Tablo10. Doğruluk analizi(MSAVI)

EVRE	Tarla	MSAVI	Tahmini Verim (kg/da)	Gerçek Verim (kg/da)	Doğruluk Oranı (%)	Doğruluk Ort. (%)
Çiçeklenme Öncesi	1	0.23	92.7	459.6	20.2	63
	17	0.31	230.8	268.5	86.0	
	32	0.22	75.4	202.9	37.2	
	36	0.33	265.4	265.0	99.9	
	47	0.24	110.0	219.8	50.0	
	207	0.34	282.6	340.5	83.0	
	333	0.3	213.6	324.8	65.8	
Çiçeklenme Evresi	1	0.53	397.2	459.6	86.4	76
	17	0.5	373.8	268.5	60.8	
	32	0.33	241.4	202.9	81.0	
	36	0.45	334.9	265.0	73.6	
	47	0.44	327.1	219.8	51.2	
	207	0.51	381.6	340.5	87.9	
	333	0.48	358.2	324.8	89.7	
Çiçeklenme Sonrası	1	0.42	233.1	459.6	50.7	71
	17	0.3	290.9	268.5	91.7	
	32	0.21	334.2	202.9	35.3	
	36	0.25	315.0	265.0	81.1	
	47	0.19	343.9	219.8	43.5	
	207	0.19	343.9	340.5	99.0	
	333	0.19	343.9	324.8	94.1	

Tablo11. Doğruluk analizi(GNDVI)

EVRE	Tarla	GNDVI	Tahmini Verim (kg/da)	Gerçek Verim (kg/da)	Doğruluk Oranı (%)	Doğruluk Ort. (%)
Çiçeklenme Öncesi	1	0.3	65.0	459.6	14.1	55
	17	0.44	275.7	268.5	97.3	
	32	0.34	125.2	202.9	61.7	
	36	0.52	396.2	265.0	50.5	
	47	0.39	200.5	219.8	91.2	
	207	0.65	591.8	340.5	26.2	
	333	0.6	516.6	324.8	41.0	
Çiçeklenme Evresi	1	0.45	165.4	459.6	36.0	63
	17	0.63	335.1	268.5	75.2	
	32	0.41	127.6	202.9	62.9	
	36	0.52	231.4	265.0	87.3	
	47	0.58	288.0	219.8	69.0	
	207	0.49	203.1	340.5	59.6	
	333	0.44	155.9	324.8	48.0	
Çiçeklenme Sonrası	1	0.42	364.6	459.6	79.3	62
	17	0.5	327.0	268.5	78.2	
	32	0.35	397.5	202.9	4.1	
	36	0.54	308.1	265.0	83.7	
	47	0.41	369.3	219.8	32.0	
	207	0.33	407.0	340.5	80.5	
	333	0.32	411.7	324.8	73.3	

Tablo 8 incelendiğinde en yüksek indeks-verim korelasyonu çiçeklenme evresinde olduğu görülmektedir. Tablo 9, 10 ve 11 incelendiğinde de verim tahmininin her üç indeks için çiçeklenme evresinde gerçeğe daha yakın bir doğrulukta gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek doğruluk (%82) çiçeklenme evresinde NDVI indeksinde görülmektedir. MSAVI indeksinin çiçeklenme evresinde %76'lık, GNDVI indeksinin çiçeklenme evresinde ise %63 lük bir doğruluk elde edilmiştir. Korelasyon katsayılarından ve doğruluk analizinden anlaşılacağı üzere buğday bitkisine ilişkin verim tahmin değerleri çiçeklenme evresinde diğer evrelere göre daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

Sonuçlar

Büyük tarım arazilerine ve verimli topraklara sahip ülkemizde tarım alanlarının korunması ve mevcut tarım arazilerinin en iyi şekilde kullanılması ülke tarımı ve ekonomisi için önemlidir. Temel yaşam gıdalarından biri olan

buğday Türkiye'de en çok üretimi yapılan tahıl konumundadır. Bu sebeple buğday bitkisinin büyüme evrelerinin takip edilmesi ve rekoltenin hasattan önce belirlenmesi tarımsal politikaların belirlenmesi için önem taşımaktadır.

Uydu sistemleri farklı dalga boylarında enerji kaydedebilen algılayıcılarla donatıldıkları için bitki örtüsü hakkında faydalı bilgiler sunmaktadır. NDVI, GNDVI ve MSAVI indeksleri kullanılarak bitkilerdeki klorofil maddesinin yansıtımı yardımıyla bitkilerin yeşillik durumları analiz edilir. Bu şekilde arazideki bitki örtüsü yoğunluğu belirlenir ve bitkilerin sağlık düzeyleri kontrol edilebilir.

Bu çalışmada Şanlıurfa ili Ceylanpınar ilçesinde bulunan TİGEM arazisinde bulunan buğday tarlalarının fenolojik evreleri incelenmiştir. Ayrıca 2017-2018 sezonundaki uydu görüntülerinden elde edilen bitki örtüsü indeksi değerleri ve verim değerleri kullanılarak verim tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu

model 2018-2019 sezonunda belirli parseller için uygulanmış ve verim değerleri ortalama olarak çiçeklenme evresinde NDVI'da 82, MSAVI'de %76, GNDVI'da ise %63 doğruluk ile elde edilmiştir. İndeks-verim denklemleri incelendiğinde en yüksek korelasyon çiçeklenme evresinde MSAVI'de (%96) gözlemlenmiştir.

Çalışmada belirli bir yıla ilişkin uydu görüntüleri kullanılarak verim tahmin modelinin başarısı üzerinde durulmuştur. İleriki çalışmalarda farklı yıllardan elde edilen uydu görüntüleri ve farklı yapılaraya sahip bitki örtüsü indekslerinin kullanılması amaçlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Yılmaz, H.M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., Bilgiliöğlü, S.S., (2018). İnsansız Hava Aracı İle Ortofoto Üretimi Ve Aksaray Üniversitesi Kampüsü Örneği, *Geomatik Dergisi*, 3,2,103-110.
- [2] Cengiz, T., Akbulak, C., Özcan, H., Baytekin, H., (2013). Gökçeada'da Optimal Arazi Kullanımının Belirlenmesi, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 19,148-162.
- [3] Dewan, A.M., Yamaguchi, Y., (2009). Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960–2005, *Environmental Monitoring and Assessment*, 150, 237-249.
- [4] Shalaby, A., Tateishi, R., (2007). Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt, *Applied Geography*, 27,1,28-41.
- [5] Hegazy, I.R., Kaloop, M.R., (2015). Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4, 117-124.
- [6] Genç, L., Bostancı, Y.B., (2007). TROİA Milli Parkı Arazi Kullanım ve Bitki Örtüsü Değişiminin Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemi Yardımıyla Belirlenmesi, *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 4, 1, 27-41.
- [7] Dengiz, O., Demirdağ Turan, İ., (2014). Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistem Teknikleri Kullanılarak Arazi Örtüsü / Arazi Kullanımı Zamansal Değişimin Belirlenmesi: Samsun Merkez İlçesi Örneği (1984-2011), *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 2014, 1, 78-90.
- [8] Prasad, A.K., Chai, L., Singh, R.P., Kafatos, M., (2006). Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, 26-33.
- [9] Singh, R., Semwal, D.P., Rai, A., Chhikara, R. S., (2002). Small area estimation of crop yield using remote sensing satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 23, 1, 49-56.
- [10] Bognár, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, G., Timár, Molnár, G., Pásztor, S. Z., Steinbach, P., Székely, B., Ferencz, O. E., Ferencz- Árkos, I., (2010). Crop yield estimation by satellite remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 25, 20, 4113-4149.
- [11] Kaya, Y , Polat, N ., (2020). Investigation Of Phenological Stages of Wheat Plant Using Vegetation Index . *Mersin Photogrammetry Journal* , 2 (1) , 24-28
- [12] Rouse Jr, J., Haas, R. H., Schell, J., Deering, D. W., (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains With ERTS, *Third ERTS Symposium*, 309-319.
- [13] Colwell, J. E., Rice, D. P., Nalepka, R. F., (1977). Wheat Yield Forecasts Using Landsat Data, *Proceedings of 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1245-1254.
- [14] Li, Y. Z., (1990). Estimating Production of Winter Wheat by Remote Sensing and Unified Ground Network. II. *Nationwide Estimation of Wheat Yields. In Applications of Remote Sensing in Agriculture*, 149-158.
- [15] Aronoff, S., (1989). Geographic Information Systems: A Management Perspective. *Geocarto International*, 4, 4, 58.
- [16] Evsahibiöğlü, A. N., (2008). Sulu Tarım Alanlarında Küçük Parselli Bitki Desenlerinin Uzaktan Algılanma Potansiyeli. 2. *Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu*, 305-314.
- [17] Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., Schepers, J. S., (2001). In-Season Prediction of Potential Grain Yield in Winter Wheat Using Canopy Reflectance, *Agronomy Journal*, 93, 1, 131-138.
- [18] Şimşek, O., Yıldız, A. M. H., Özaydın, K. A., Çakmak, B., (2007). AgroMetShell Modeli Kullanılarak Türkiye'de Buğdayın Verim Tahmini. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 13, 3, 299-307.
- [19] Pinter, P. J., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S., Uphurch, D. R., (2003). Remote Sensing for Crop Management,

- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 6, 647-664.
- [20] Jiang, D., Yang, X., Clinton, N., Wang, N., (2004). An Artificial Neural Network Model for Estimating Crop Yields Using Remotely Sensed Information, *International Journal of Remote Sensing*, 25, 9, 1723-1732.
- [21] <https://earthexplorer.usgs.gov> (Son Erişim: 14.07.2020).
- [22] <https://scihub.copernicus.eu> (Son Erişim: 14.07.2020).
- [23] Çelik, M. A., Karabulut, M., (2017). Uydu Tabanlı Kuraklık İndisi (SVI) Kullanılarak Yarı Kurak Akdeniz İkliminde (Kilis) Buğday Bitkisinin Kurak Koşullara Verdiği Tepkinin İncelenmesi, *Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15, 1, 111-130.
- [24] Tucker, C. J., Townshend, J. R. G., Goff, T. E., (1985). African Land Cover Classification Using Satellite Data. *Science*, 9227, 4685, 369-375.
- [25] Richardson, A. J., Wiegand, C., (1977). Distinguishing Vegetation From Soil Background Information, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 43, 12, 1541–1552.
- [26] Gitelson, A.A., (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remotequantification of Biophysical Characteristics of Vegetation, *Journal of Plant Physiology* 161, 165-173.



Spatial variation model of seismic ground motion for Istanbul

Ebru Harmandar^{1,*}, Eser Çaktı², Mustafa Erdik²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, Turkey; ORCID ID: 0000-0001-9802-2993

² Department of Earthquake Engineering, Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Research Institute, İstanbul, Turkey

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 March 2020
 Received in revised form 5 October 2020
 Accepted 7 October 2020
 Available online 13 January 2020

Keywords:

Istanbul Earthquake Rapid Response System, Coherency Model, Target Spectrum, Spectral Matching, Spatially Variable Simulated Earthquake Data

ABSTRACT

Earthquake induced base motions of elongated structures will not be uniform. This variation of ground motion has a nonnegligible effect on the dynamic response of lifelines that has led to investigations of characterization and modelling of the spatially varying earthquake ground motion within the last decade. In this context, spatial variation of seismic ground motion in Istanbul is analyzed. After the introduction of the concept of coherency function and its conventional estimation procedure, estimation of coherency from recorded data and its interpretation are presented. The lagged coherency is calculated by the conventional coherency estimation scheme applied to six earthquakes registered by the Istanbul Earthquake Rapid Response System. A coherency model for Istanbul is derived that will enable to simulate spatially variable ground motion needed as input in the design of extended structures. Simulation of ground motion at pairs of closely spaced locations is presented that consider the derived coherencies in their scheme. The results are compared with actual recordings from the same locations. Simulation of spatially variable ground motion consistent with a coherency function is stated.

Doi: 10.24012/dumf.701211

* Corresponding author

Ebru Harmandar

✉ e-mail: eburharmandar@mu.edu.tr

Introduction

Several researches have been done about the relationship between coherency, frequency of earthquake ground motion, and the distance among the stations. For the quantification of the variability of seismic ground motion, Fourier amplitude spectra is used by Schneider et al. [1]; acceleration response spectra is studied by Abrahamson and Sykora [2]; the correlation between the peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV) and magnitude, distance and site conditions is examined by Joyner and Boore [3] and Abrahamson [4]. The variability of PGAs as a function of separation distance among the stations is studied by Kawakami and Mogi [5]. Additionally, Field et al. [6] examined the pseudo-velocity response spectra (PSV) in terms of variability. The analyses repeated for the relation between the PSV and inter-station distance by Evans et al. [7]. Moreover, the spatial variation is described by coherency. The strong dependence of spatial variation of strong ground motion on frequency has been indicated in early studies by Loh [8], McLaughlin [9], Abrahamson [10] among others. Coherency models have been developed by several researchers such as Abrahamson [11], Harichandran and Vanmarcke [12], Harichandran [13], Harichandran [14], Loh [8], Loh and Yeh [15], Loh and Lin [16], Novak [17], Oliveira et al. [18], Ramadan and Novak [19], Vernon et al. [20], Zerva and Zhang [21], and Cacciola and Deodatis [22]. An overview of the spatial variation of ground motion has been done by Zerva and Zervas [23] and Zerva [24]. Song et al. [25] explored the relation between spatial coherence between earthquake source parameters. The statistical properties of spatial variability of ground motion data of two earthquakes recorded by IERRS have been studied by Harmandar et al. [26, 27]. A new methodology has been developed for the interpolation of peak ground acceleration (PGA) from discrete array stations using data from IERRS by Harmandar et al. [28].

Consideration of spatial variability in modelling of earthquake ground motion is important for the design of above or under ground structures and systems where multiple-support excitation needs to be considered. Spectral representation method [29, 30]; auto-regressive, moving-average, and auto-regressive-moving-average models [31, 32,

33, 34]; local average subdivision method [35] and the covariance matrix decomposition [36, 37] are some of the methods used for the simulation of spatially variable strong ground motion. Additionally, Abrahamson [38] studied envelope functions considering random phase variability; Ramadan and Novak [39] proposed coherency function estimation using a Fourier series. Moreover, Yamamoto [40] proposed that for the probabilistic assessment of the performance of structures ground motion simulation with appropriate coherency is required.

As aforementioned, uniform earthquake ground motion data cannot reflect the spatial variability of field. For stochastic response analysis and reliability assessment of extended and multi-supported structures, coherence model is necessary for this variability effect. Besides, several bridges and infrastructures have been built in Istanbul. For the design of these extended structures, it is important to investigate the spatial variability of earthquake ground motion data.

In this context, the purpose of this study is to derive a coherency model, which could be used in the simulation of non-stationary ground motion needed for the design of extended structures, based on data recorded by Istanbul Earthquake Rapid Response System (IERRS) stations. Istanbul is the most important city in the world that has suffered many devastating earthquakes throughout history, such as the 1766 Istanbul earthquake with an estimated magnitude of 7.1. Therefore, it is crucial to handle the properties of earthquake data, which affect the dynamic analysis of extended structures.

Furthermore, simulation of ground motion compatible with target spectrum is constituted using the computed coherency model. The aim is to simulate earthquake ground motion data for the absent stations throughout in an array, considering a reference station.

Determination of coherency

The procedure for analyzing stochastic spatial variation of seismic motions from recorded data is considered to be realizations of random space-time fields. To obtain the information about spatial variability, some assumptions should be

done: The random field is homogeneous in space; the time histories recorded at stations are stationary random processes; stationary time histories at the recording stations are ergodic. For the characterization of random field, the definition of coherency is required in terms of cross spectral density and power spectral density.

Definition of coherency

The cross spectrum of the time histories can describe the random field of data as

$$S_{xy}(w) = \sum_{m=-M}^{+M} W(mDw) A_x^*(w+mDw) A_y(w+mDw) \quad (1)$$

where M is the spectral window, $W(w)$, is the Fourier transform of lag window, Dw is the frequency step, A is Fourier transform of time histories, m is , and * is complex conjugate.

The power spectrum of data at two stations on ground surface is expressed as

$$S_{xy}(w) = \sum_{m=-M}^{+M} W(mDw) |A_k(w+mDw)|^2 \quad (2)$$

Correlation and coherency can characterize the spatial variability of ground motion. Correlation represents the phase variability in time; coherency represents in frequency domain. The coherency is used due to its mathematical relevance in random vibration analysis. The variability in frequency domain is studied by Matsushima [42], Abrahamson [43], Harichandran [14], and Zerva and Zervas [23]. The coherency function $\gamma_{xy}(\omega)$, between ground motion data at two stations x and y is given as :

$$g_{xy}(w) = \frac{S_{xy}(w)}{\sqrt{S_{xx}(w)S_{yy}(w)}} \quad (3)$$

in which ω is frequency, $S_{xy}(\omega)$ is the cross-power spectral density between stations x and y, $S_{xx}(\omega)$ is the power spectral density at station x and $S_{yy}(\omega)$ is the power spectral density at station y. The results of coherency will be complex numbers. When the absolute value of the coherency (lagged coherency) is taken, the effects of inclined plane wave propagation will be removed. It is generally used in engineering purposes [44].

Array configuration and earthquakes

The Earthquake Rapid Response System in Istanbul (IERRS) is composed of 100 strong motion stations and associated peripherals for data storage and communication. A significant number of earthquake events are registered by the IERRS six of which are utilized in this study for the estimation of coherency values. A comprehensive description of the IERRS can be found in Erdik et al. [45]. Figure 1 provides the distribution of 100 IERRS stations. Harmandar et al. [28] represented that the station separation distances of the IERRS vary from 0.67 km to 56 km. The epicenters of earthquakes utilized in the present work are shown in Figure 2. General properties of the chosen events are summarized in Table 1.

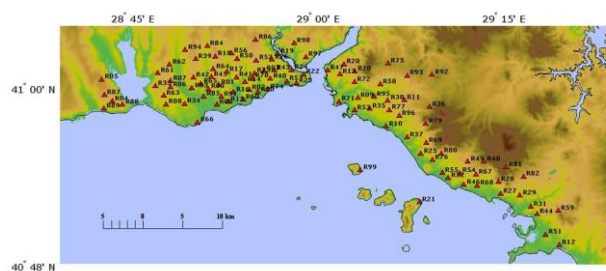


Figure 1. Locations of the stations in Istanbul Earthquake Rapid Response System (Harmandar et al. [28])

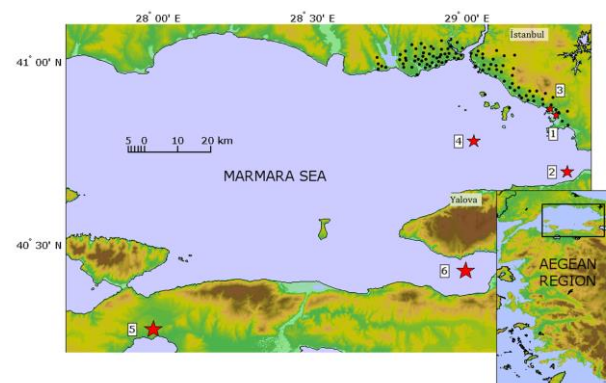


Figure 2. Epicenters of the selected earthquakes recorded by the Istanbul Earthquake Rapid Response System (after Harmandar et al. [28])

Data processing

For the generation of the coherency values, selection of the specific time windows is

necessary. The shear wave part of acceleration in most cases has the strongest energy in the record, and generally, is the most damaging component from the engineering perspective.

The baseline-corrected acceleration traces are filtered with a butter-worth filter (4th order) using the range detected by Fourier amplitude spectrum and signal to noise ratio. The selected time windows are aligned by considering a reference station to remove the apparent wave propagation effect across the array for a better characterization of the homogeneity of ground motion [46]. Also, high frequency surface waves and the variation of the low frequency surface waves generated by wave propagation in the crust are not observed over the shallow depth range in the area [47]. S-wave window lengths are identified and a five per cent cosine tapering is applied. After preprocessing and alignment operations, the coherency function is obtained by estimating the power spectral densities and cross-spectral density (Figure 3).

Evaluation of coherency values

Application of smoothing windows is essential in the coherency spectrum estimation procedure. An 11-point Hamming window is suggested when the data length is less than 2000 steps and the coherency estimates are intended for structural analysis [44].

A code is written in MATLAB environment for the calculation of the coherency values. Its flowchart is shown in Figure 3. Data taken from Event 5 triggered by the SMART-1 array [48] are used for the application of the code. The calculated coherencies based on SMART-1 data for a window length of 5 are illustrated in Figure 4.

After the application of the code, the coherency values for the six events recorded by IERRS are calculated for the different station separation distance bins. Earthquake ground motion data from east-west (EW); north-south (NS); radial (R); and transversal (T) components are used in the analyses. Two different windows are considered: 11- and 15- point hamming windows. Seven distance bins are used. The bins are represented in Figure 5. The average values of coherencies are used in each distance bin. In Figure 5, the average coherency values are

shown for the September 29, 2004 earthquake. For all remaining events studied, not shown here for brevity, the coherencies of EW component of the data using 11-point hamming window show more coherent distribution with distance and frequency than the others. As shown in Figure 5, coherency values calculated from EW component using 11-point hamming window are higher than the coherencies of NS, R and T components for both 11- and 15-point window lengths. Coherence values are predicted to decrease as separation distance increases. EW component has higher coherency at about 3 Hz for the separation distance 0-2 km (Fig. 5a). Also, the behaviour of EW coherency with respect to frequency is clearer. As a result, for the estimation of the coherency values, the window length is selected as 11 point based on Abrahamson et al. [44] suggestions. Finally, R and T components of coherency values are considered to examine the relationship between wave propagation and the coherency. There was no compatibility between coherency and wave propagation direction for earthquake ground motion data triggered by six earthquakes. Each station pair has a different separation distance. The distributed distances should be categorized due to an accurate regression analysis.

The coherency values for distance bins associated with September, 19 2003; May 16, 2004; September, 29 2004; October 20, 2006; October 24, 2006; and March 12, 2008 earthquakes are demonstrated by Figure 6; (a), (b), (c), (d), (e), and (f), respectively. 332 ground motion data are used, totally. 9837 sets are utilized to obtain the coherency values in Eq. 1. As shown in Figure 6, coherency values for frequency-distance behaviour is not clear in terms of dependence of magnitude. The main reason behind this is that the number of recording stations and their location vary from earthquake to earthquake. For example for the earthquake in Figure 6a, although the epicentral distances were smallest, the number of recording stations was relatively small. Therefore, the coherency behaviour is not explicit. In Figure 6b and Figure 6c, the coherency values in terms of distance and frequency is clearly presented. The reason is attributed to higher number of earthquake ground motion data in these two earthquakes. High coherencies (0.8) are detected in the distance range of 1.5-3 km for frequencies

of 0-3 Hz except for September 19, 2003 (Figure 6a) and November 20, 2006 earthquakes (Figure 6b). Mostly, coherency values are higher than 0.6 at the frequencies less than 5 Hz. Coherency values are approximately 0.65 at the frequencies 2-4 Hz and at the distances 1.5-2.8 km (Figure 6b, c, e, f).

Process for coherency model

As it is known and estimates based on IERRS data, the decay of the coherency in terms of frequency and distance is approximately exponential (Figure 5).

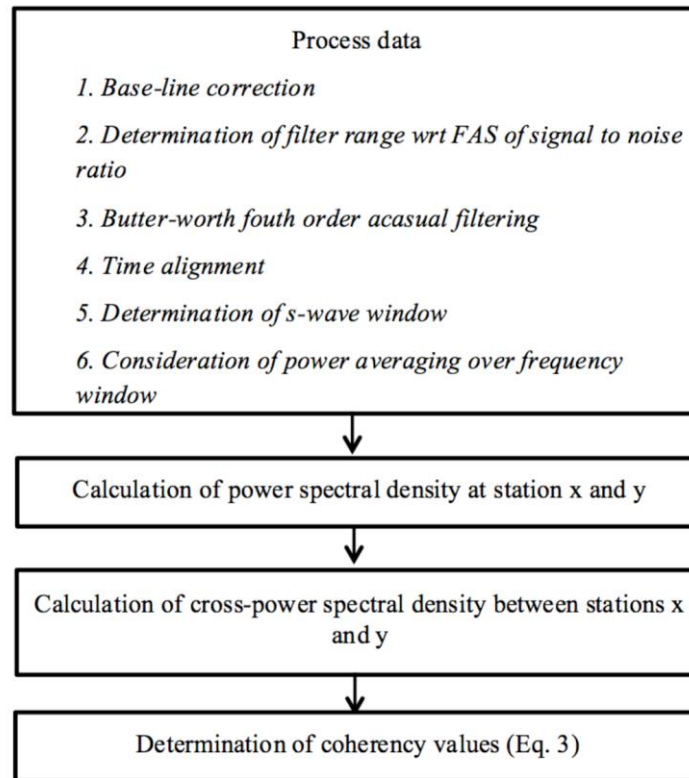


Figure 3. Procedure for calculation of coherency values

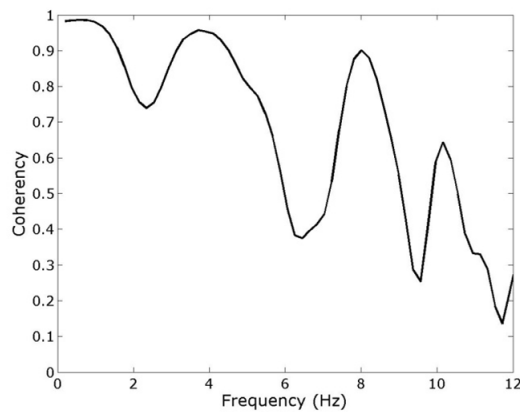


Figure 4. The lagged coherency between stations I06 and I12 recorded by SMART-1 (Window length, $M = 5$)

Table 1. Source properties of the earthquakes registered by IERRS (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/default.htm>) (after Harmandar et al. [28])

Eq No	Earthquake	Date	Latitude N	Longitude E	GMT	M_L	M_d	Depth (km)	Fault mechanism	Number of recording stations	Maximum Epicentral Distance (km)	Minimum Epicentral Distance (km)
1	Güzelyalı	19/09/2003	40.8498	29.2867	00:51	3.1	3.2	10.3	Strike-slip	16	16	1
2	Yalova	16/05/2004	40.6957	29.3222	03:30	4.3	4.2	9.1	Strike-slip	72	58	14
3	Marmara Sea	29/09/2004	40.7797	29.0200	15:42	4.0	-	8.3	Strike-slip	86	34	14
4	Kuşgözü	20/10/2006	40.2635	27.9843	21:15	-	5.2	5.4	Strike-slip	43	130	101
5	Gemlik	24/10/2006	40.4240	28.9947	17:00	-	5.2	9.2	Strike-slip	47	70	52
6	Çınarcık	12/03/2008	40.6210	29.0110	20:52	4.8	-	8.9	Normal	54	50	30

M_d : Earthquake Duration Magnitude, M_L : Local Magnitude

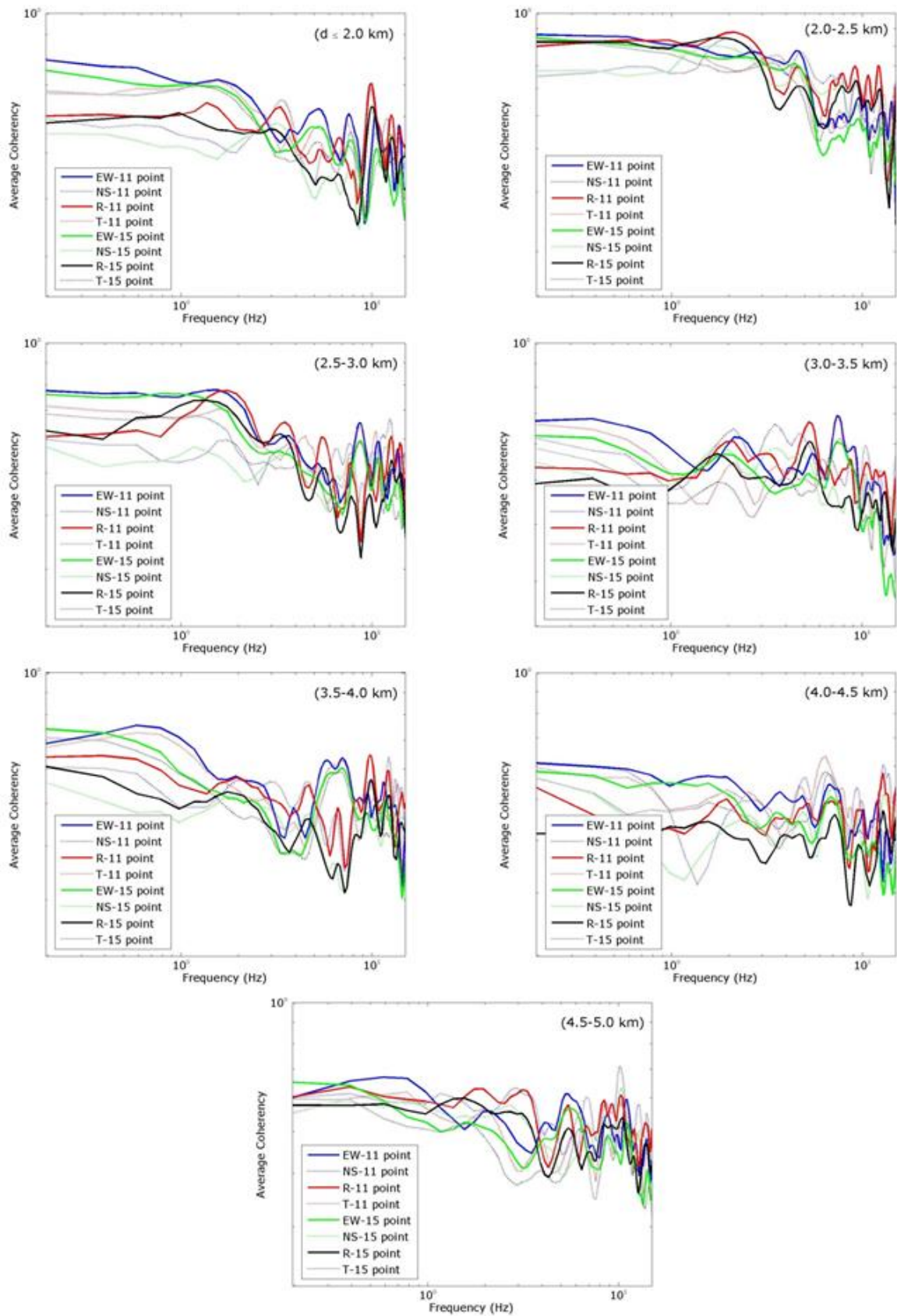


Figure 5. Average coherency values of distance bins with respect to direction and smoothing window length –September 29, 2004 earthquake

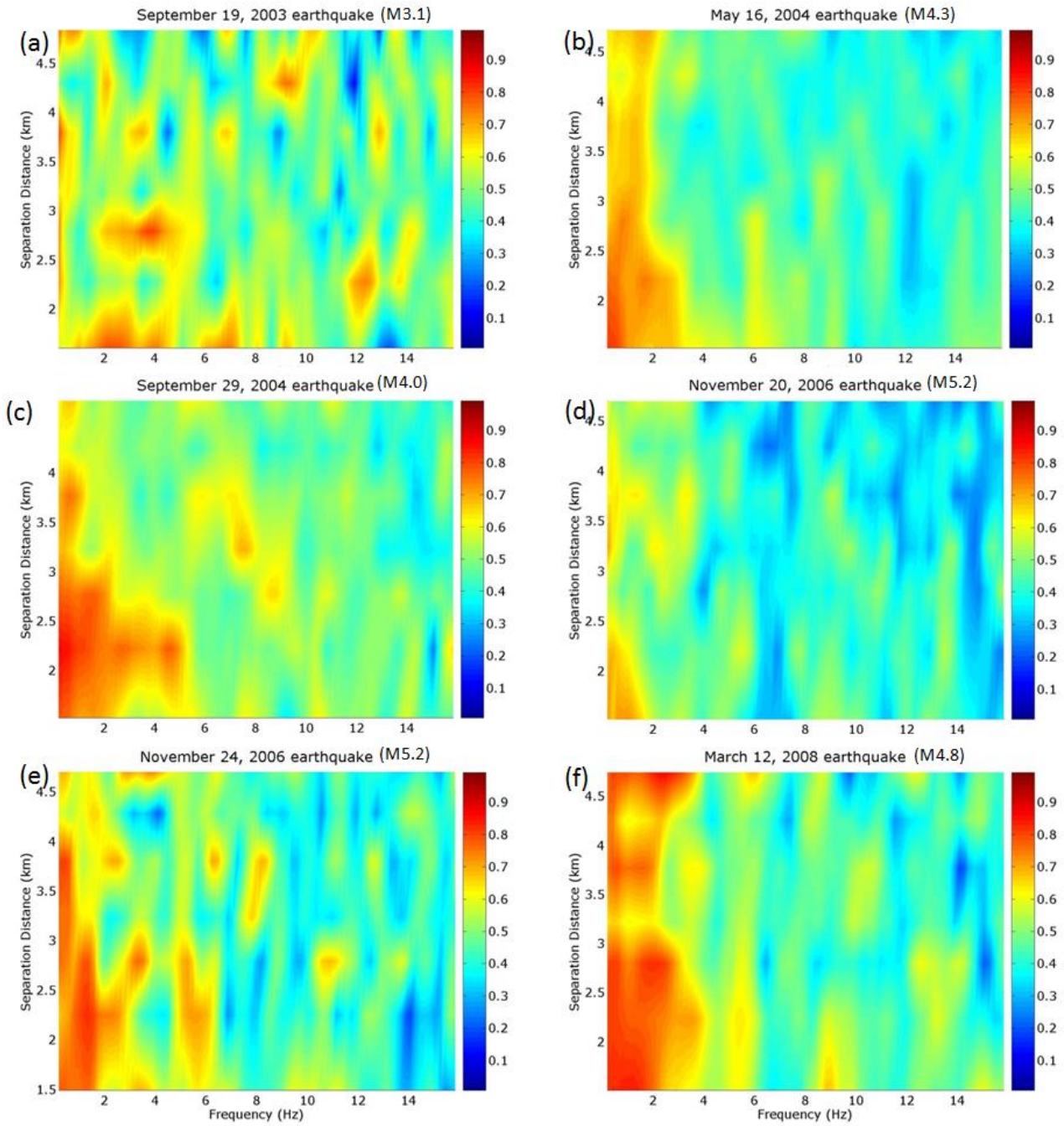


Figure 6. Coherency values for distance ranges in the EW direction (11-point): (a) September, 19 2003 earthquake; (b) May 16, 2004 earthquake; (c) September, 29 2004 earthquake, (d) October 20, 2006 earthquake, (e) October 24, 2006 earthquake, (f) March 12, 2008 earthquake

Based on the aforementioned proposed models in the literature, this exponential decay and variation of frequency and distance decay, the coefficients are situated. Therefore, the following initial coherency model is selected:

$$|g(d, f)| = a_1 + e^{-(a_2 d)^2} + e^{-(a_3 f)^2} \quad (4)$$

where γ is the coherency; a_1 , a_2 , and a_3 are constants; d is the station separation distance; f is the frequency. The least-squares regression of the coherency on frequency by distance bins yields parameters a_1 , a_2 , and a_3 . As this initial model (Eq. 4) did not match all data and earthquakes, particularly due to misfits associated with distance, it is improved as in Eq. 5:

$$|g(d, f)| = a_1 + \left(\frac{a_2}{d}\right) \left(e^{-(d)^2} + e^{-(a_3 f)^2} \right) \quad (5)$$

In this formula, the parameter a_3 , which is related to distance, does not converge due to the irregularities of coherency values with respect to distance (Table 2). When the separation distance is taken as zero or almost zero, the coherency should be one or close to one. Eq. 5 has the inverse separation distance as a variable that forces it to infinity when the separation distance is zero. Therefore a new equation related to Eq. 5 needs to be developed, where both the frequency and distance variables are in exponential terms. The equation is expressed as

$$|g(d, f)| = a_1 e^{(a_2 - a_3 \sqrt{d}) 0.01 f} + (1 - a_1) e^{(-a_4 - a_5 d^2) (0.01 f)^2} \quad (6)$$

Again, regression analyses to obtain coherency model are proposed by considering six earthquakes individually. Table 3 summarizes the results of regression analysis. The last column of Table 3 shows the results of the regression analysis carried out using the whole data set. It is seen that five regression parameters, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , and a_5 , are close to each other for every earthquake and the whole earthquake dataset. Figure 7 represents the comparison of the coherency model with respect to observed coherency values for distance bins $d=2.0-2.5$ km and $d=4.5-5.0$ km.

The difference of observed and estimated coherency values are logarithmically calculated to obtain the residuals. In Figure 8, the

logarithmic residuals of these six earthquakes are shown for seven separation distance bins. All residuals involve the combination of coherency values calculated from the six earthquakes. The mean residuals range from +0.2 to -0.2. As it seems in Figure 8, residuals do not have any systematic trend and dependency on the frequency or the distance bin.

The coherency model, calculated by Eq. 6 using data from earthquakes having magnitudes smaller than 5.2, for Istanbul is shown in Figure 9 for different distances: 100m, 300m, 500m, 1000m, 3000m, and 5000m.

Simulation of spatially variable ground motion

Methodology

In addition to realistic characterization of spatial variation, simulation of spatially varying time histories is a crucial part of the study considering the structural response of extended structures [49]. However, the generation of spatially variable ground motion for the performance-based design of lifeline structures, such as bridges, dams, pipelines, power transmission systems, etc., will be received the attention it deserves [50]. Das and Gupta [51], Bi and Hao [52], Abrahamson [38] and Abrahamson [11] proposed methods for generating spatially variable ground motion given a target spectrum, coherency function and an initial time history. An approach is developed by Shama (2007) for the simulation of spatially correlated ground motion at different stations with respect to a reference record subdivided into time windows for the treatment of frequency and temporal variations. Simulated ground motion is compatible with the target auto spectrum of the reference record and the coherency function. According to Shama [34], this method is accurate to generate spatially correlated ground motion for multi-supported structures.

The estimated data should be consistent with the defined target spectrum at a reference station and the coherency values of these estimated data have to be compatible with

Table 2. Regression coefficients based on Eq. 5 for East-West direction of the earthquakes data recorded by IERRS

	2003.09.19 earthquake	2004.05.16 earthquake	2004.09.29 earthquake	2006.10.20 earthquake	2006.10.24 earthquake	2008.03.12 earthquake	All data
a ₁	0.4369	0.4238	0.4762	0.3846	0.4298	0.4551	0.440
a ₂	0.3951	0.6719	0.5082	0.5497	0.5888	0.062	0.564
a ₃	508.6517	17.4640	-43.7637	-1.2550	2177.3574	108.9232	35.239
a ₄	0.0999	0.2577	0.1899	0.2887	0.1845	0.2569	0.214

Table 3. Regression coefficients based on Eq. 7 for data recorded by IERRS

	2003.09.19 earthquake	2004.05.16 earthquake	2004.09.29 earthquake	2006.10.20 earthquake	2006.10.24 earthquake	2008.03.12 earthquake	All data
a ₁	0.5298	0.4813	0.5620	0.4708	0.4702	0.5023	0.5130
a ₂	0.0253	0.0867	0.4155	0.0777	0.1071	0.1320	0.0781
a ₃	0.0170	0.0399	0.0263	0.0446	0.0398	0.0517	0.0380
a ₄	0.3795	0.1925	0.1444	0.3081	0.2137	0.1926	0.2643
a ₅	0.0067	0.0233	0.0409	0.1000	0.0248	0.0302	0.0301

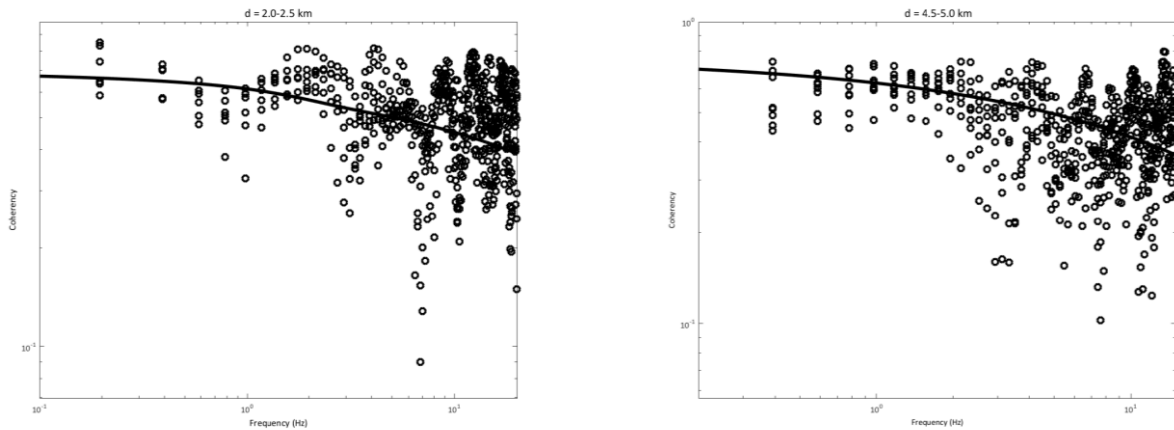


Figure 7. Comparison of coherency model with respect to observed coherency values for distance bins: (a) d=2.0-2.5 km, (b) d=4.5-5.0 km

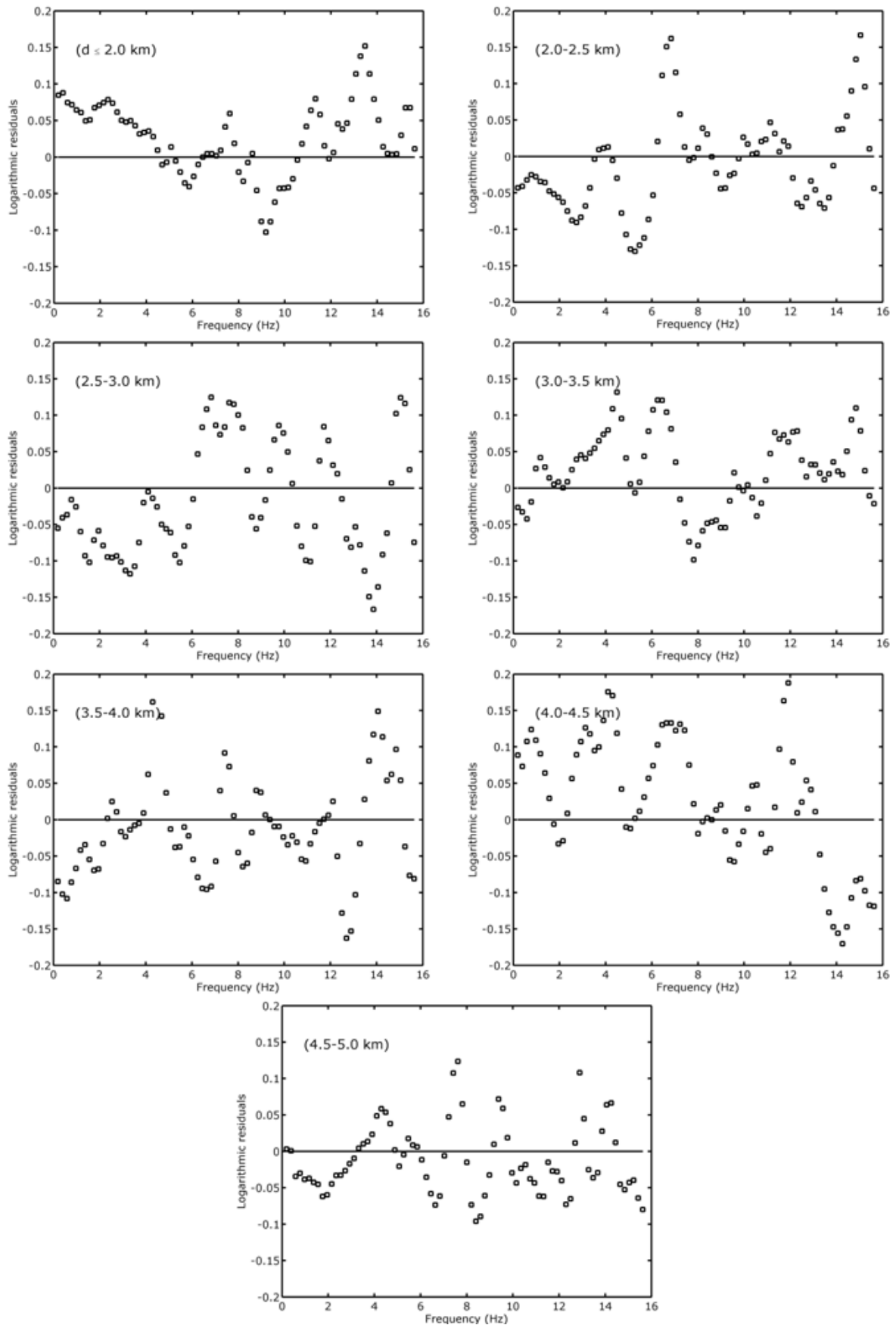


Figure 8. Residuals of the coherency model (Eq. 6) for each distance bin

the target coherency function. First, earthquake ground motion data compatible with design response spectrum are generated by code RSPMATCH2005 [53, 54]. Then, the ground motion data is simulated following Shama [34] to produce coherencies in agreement with the target coherency function.

Shama [34] assumed that the spatial variation of ground motion is the combined result of wave scattering and wave passage effects. A coherency model is used in which the wave scattering effects on the simulated ground motion is accounted for by the coherency phase $\mu_{i,j}$ and the wave travel effect is taken care of by the time lag between two stations as:

$$a(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^{N_f} \sqrt{S_g(\omega_i)} DW \cos[\omega_i(t - t_j) + j_i + m_{i,j}] \tag{7}$$

in which $a(t)$ is the estimated ground motion acceleration; $S_g(\omega_i)$ is power spectrum of the initial motion; $\Delta\omega = \omega_u/N_f$, with ω_u as the cut-off frequency; τ_j represents the time lag between the two stations as $\tau_j = d_j/V$, where d_j is the separation distance between two stations; V is the apparent seismic wave velocity; ϕ_i represents the phase angle and N_f is number of frequency intervals.

The coherency phase $\mu_{i,j}$ for the i^{th} frequency at station j in Eq. 7 is stated as

$$m_{i,j} = \cos^{-1} \left[g(d_j, \omega_i) b \left(j_i, \frac{\omega_i d_j}{V} \right) \right] \tag{8}$$

where $\gamma(d_j, \omega_i)$ is the coherency model defined in Eq. 6 and written again as

$$|g(d, f)| = 0.513e^{(0.0781 - 0.038\sqrt{d})0.01f} + (1 - 0.513)e^{(-0.2643 - 0.0301d^2)(0.01f)^2} \tag{9}$$

where d is the separation distance between two stations and f is the frequency.

β is a function related to the coherency phase angle [34] and is defined as:

$$b = \begin{cases} +1 & 0 < j \leq 2\rho \\ -1 & 2\rho < j \leq 4\rho \\ +1 & 4\rho < j \leq 6\rho \\ -1 & 6\rho < j \leq 8\rho \\ +1 & 8\rho < j \leq 10\rho \\ -1 & 10\rho < j \leq 12\rho \\ +1 & 12\rho < j \leq 14\rho \\ -1 & 14\rho < j \leq 16\rho \\ +1 & 16\rho < j \leq 18\rho \\ -1 & 18\rho < j \leq 20\rho \end{cases} \quad \text{for } \frac{wd}{V} \leq 0.8 \tag{10a}$$

$$b = \begin{cases} -1 & 0 < j \leq \frac{\rho}{2} \\ +1 & \frac{\rho}{2} < j \leq \rho \\ -1 & \rho < j \leq \frac{3\rho}{2} \\ +1 & \frac{3\rho}{2} < j \leq 2\rho \end{cases} \quad \text{for } 0.8 \leq \frac{wd}{V} \leq 2.5 \tag{10b}$$

$$b = \begin{cases} -1 & 0 < j \leq \frac{\rho}{2} \\ \frac{\rho}{m} - 1 & \frac{\rho}{2} < j \leq \rho \\ \frac{\rho}{m} + 1 & \rho < j \leq \frac{3\rho}{2} \\ \frac{2\rho}{m} - 1 & \frac{3\rho}{2} < j \leq 2\rho \end{cases} \quad \text{for } \frac{wd}{V} > 2.5 \tag{10c}$$

where V is the apparent wave velocity.

Numerical Application

The numerical procedure explained above is applied to simulate ground motion at two locations with a relatively small separation distance for two example cases. In the first case, we select two stations, set 1.82 km apart, from the IERRS. We simulate acceleration recorded at one of them during a real earthquake with the help of recording at the other station and compare the results. We use an earthquake that is not included in the development of the coherency model for Istanbul. In the second case, we carry out a blind simulation. We select a recording of the 1999 Kocaeli earthquake. Using this record, we estimate ground motion 500 m away from the station, acknowledging the fact that the magnitude of the earthquake we simulate for, is beyond the magnitude range, for which we have developed our coherency model.

Briefly, the spectrum compatible time histories that have coherency values consistent with the prescribed coherency function are used to generate earthquake ground motion. The spectrum compatible acceleration is subdivided into time windows. The target power spectrum of each time window is formed by an autoregressive (AR) model. In this approach, ground motion is idealized by using a stochastic

harmonic model. A coherency model, which decreases exponentially, is used to represent the statistical dependence of the ground motion at another station [34].

This coherency model described in the previous section and expressed in Eq. 9 was employed as the coherency phase stated in Eq. 8. The computed power spectra, phase spectra, and coherency phase are used to generate the coherency model compatible with the earthquake ground motion (Eq. 7).

Results and Discussion

As the first example, the methodology is used to simulate an acceleration time history at station R85 of the IERRS. The distance from the record at station R00 (reference station) 1.82 km. The earthquake data obtained during the October 3, 2010 earthquake with a local magnitude of 4.4 is used. The reference acceleration ground motion data is shown at the top row in Figure 10a. As compared in Figure 10, the estimated ground motion data, at 1.82 km are compatible with those of the observed record. Furthermore, generated acceleration, ground velocity and displacement time histories are consistent with observed ground motion. Besides the fact that the Fourier amplitude spectrum of estimated ground motion data is in good agreement with the observed data at 1.82 km in the range of less than 10 Hz (Fig. 10d). As shown in Figure 10e, the acceleration response spectrum of the simulated motion slightly underestimates the observed response spectrum for low periods. On the contrary, the compatibility is good for the higher periods.

The target coherency spectrum (Eq. 9) at 1.82 km separation distance is plotted in Figure 10f. The coherency values calculated from simulated data are compared with the target coherency model. As shown in Figure 10f, the computed coherency values are consistent with that of the target coherency model.

As the second example, the procedure is applied to simulate an accelerogram at a distance of 500 m from the original record taken from MSK station of the August 17, 1999 Kocaeli earthquake (Mw 7.5). The hypo-central distance of the MSK station is 92.14 km. The sampling frequency of recorded ground motion is 200 Hz.

The initial reference time history is shown in Figure 11a. This time history is modified to obtain the ground motion that is consistent with the target spectrum demonstrated in Figure 11c using RspMatch2005 software. It is seen that the five per cent damped response spectra for the simulated ground motion appear to be in good agreement with the target spectrum. The generated time histories compatible with prescribed target spectrum are displayed in Figure 11b. The results are consistent with the initial time histories shown in Figure 11a.

The acceleration time history demonstrated in Figure 11b is subdivided into windows with a power of 2 in length.

Acceleration, velocity, and displacement time histories of the initial reference station are compared with the acceleration, velocity, and displacement time histories at a distance of 500 m from the reference point. It is observed that the simulated time histories shown at the left column in Figure 12; conforms to the reference record. The differences between the simulated and initial ground motion, named as relative time history, are displayed at the right column in Figure 12a for acceleration; in Figure 12b for velocity; and in Figure 12c for displacement.

The frequency contents of the simulated data to that of reference data are compared. The Fourier amplitude spectra of the simulated and reference accelerations are plotted at the left hand side of Figure 13. The Fourier amplitudes of the reference data are compatible with those of the simulated motion. The target spectrum and the matched spectrum computed as a result of generation of target response spectrum compatible ground motion in Figure 11c are compared with spectral amplitudes of simulated data at the right column of Figure 13.

It can be argued that simulation of an earthquake of magnitude 7.2, using a coherency model developed for the magnitude range of 3.1 to 5.2, would lead to underestimation of ground motion for frequencies less than about 3 Hz. However, considering the Fourier amplitudes and response spectra of actual and simulated ground motion (Figure 13) does not suggest any significant deviation.

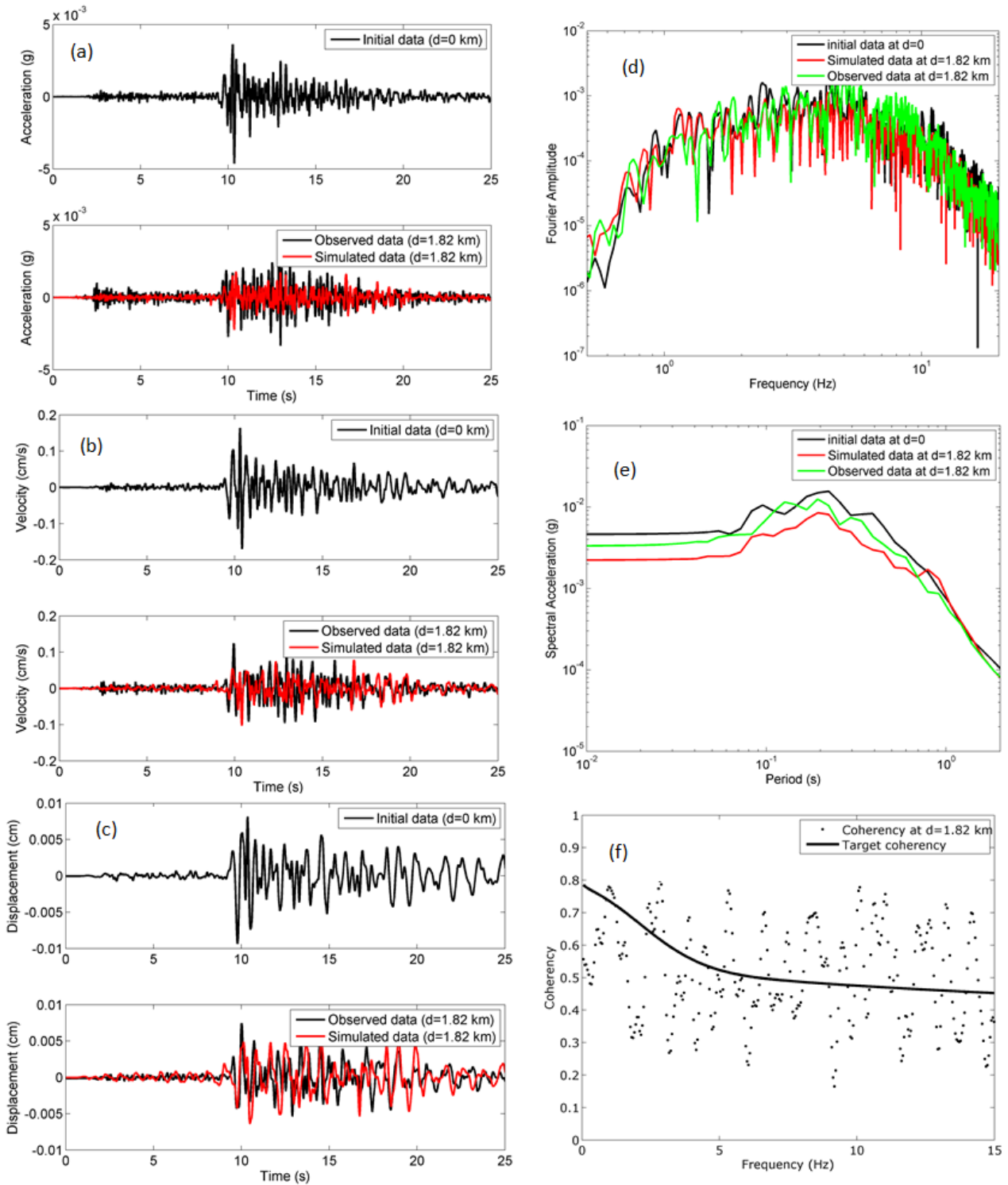


Figure 10. Comparison of observed and simulated acceleration data at $d=1.82$ km: (a) Acceleration time histories, (b) Velocity time histories, (c) Displacement time histories, (d) Fourier amplitude spectra, (e) Response spectra, (f) Coherency spectra

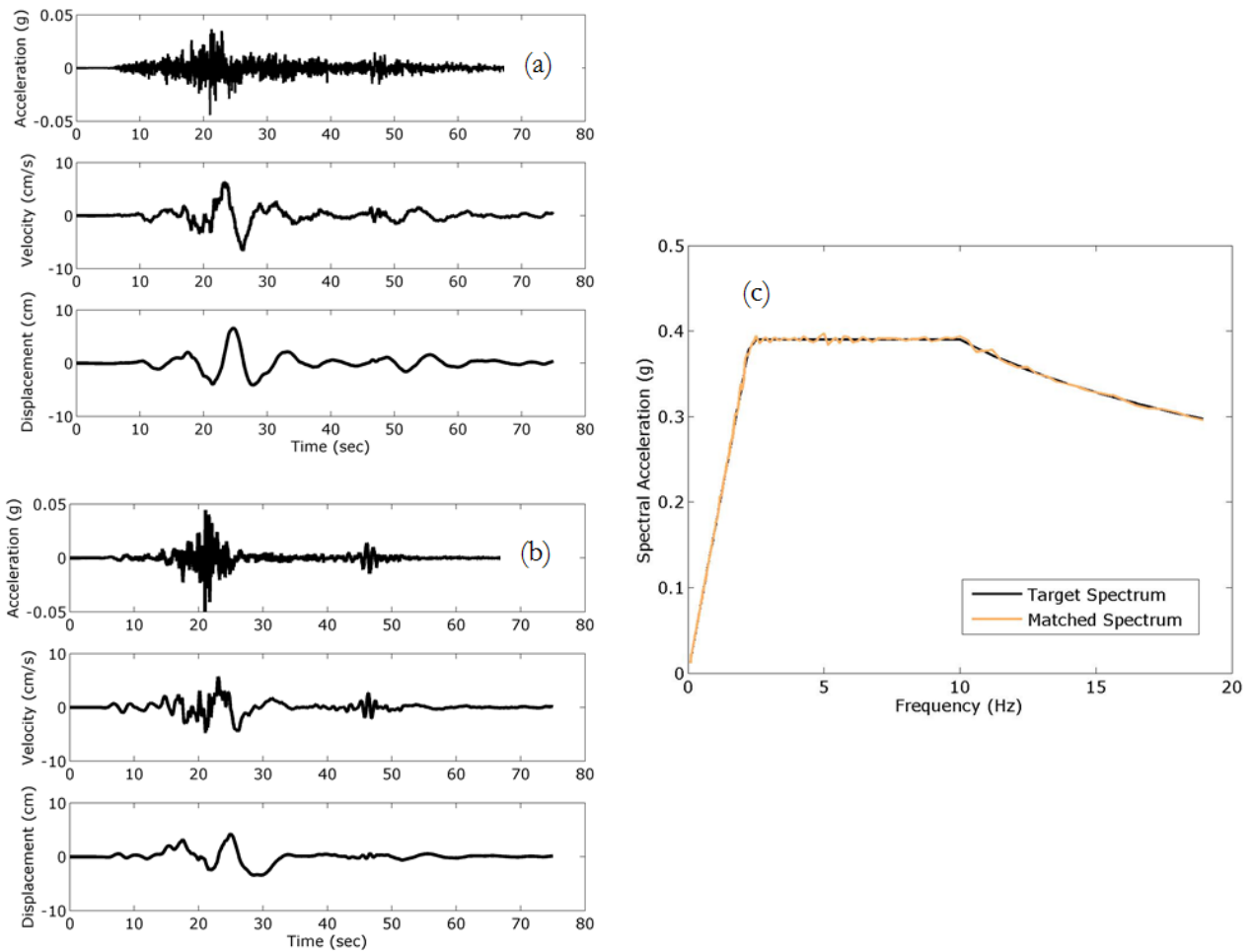


Figure 11. (a) The August 17, 1999 Kocaeli earthquake recorded at MSK station: Acceleration (g), velocity (cm/s) and displacement (cm); (b) Target spectrum compatible time histories: Acceleration (g), velocity (cm/s) and displacement (cm); (c) Comparison of target spectrum and the matched response spectrum

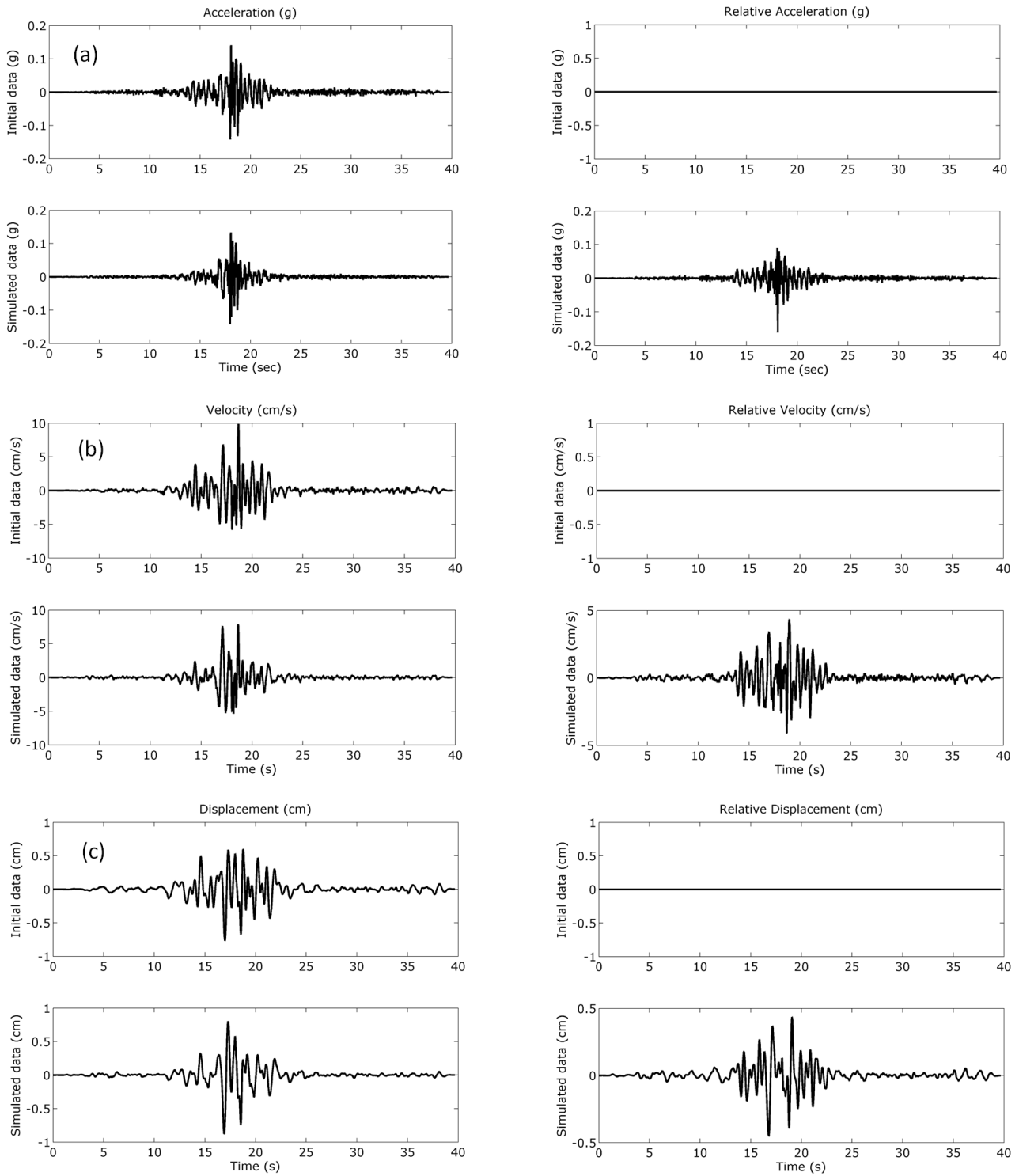


Figure 12. Acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) time history of reference station and simulated data at $d=500$ m (left); relative related time history with respect to reference station (right)

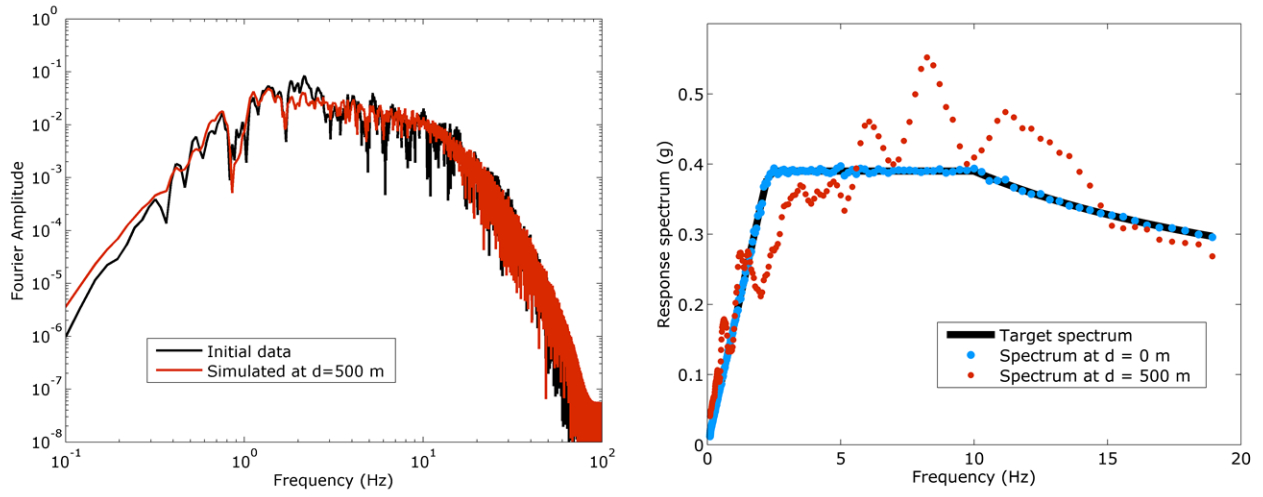


Figure 13. Comparison of Fourier amplitude of reference station and simulated data at d=500 m (left); comparison of target, spectrum at reference station and spectrum at d=500 m (right)

Conclusions

The design of extended structures such as bridges, pipelines should preferably be done considering the spatial variability of earthquake ground motion. In this context, frequency content of recorded earthquake ground motion data is used to obtain this variability.

In this paper, a coherency function for Istanbul is proposed. It is valid for the magnitude range of 3.1 to 5.2 and separation distances of up to 5 km. The proposed empirical coherency function considering frequency and separation distance is consistent with the observed data triggered by IERRS. The model can be utilized for the estimation of spatially variable earthquake ground motion in Istanbul. Then, the ground motion data is simulated following Shama [34] to produce coherencies in agreement with the target coherency function.

Secondly, the coherency values consistent with the prescribed coherency function are used for the spectrum compatible time histories, and then earthquake ground motion are generated using these values. For the validation of procedure, two separation distances, 0.5km and 1.82km are utilized. The simulated and reference acceleration ground motion data are in good agreement for both cases. Furthermore, velocity and displacement time histories are also compatible with observed data.

State-of-the-art studies show that simulation of the spatially correlated earthquake ground motion data for use in dynamic analysis of extended structures, tunnels, nuclear power plants (Liu and Hongs [55], Chen et al. [56], Ahmed et al. [57], Papadopoulos et al. [58], Wu et al. [59]).

In this context, this study forms the skeleton to simulate the ground motion consistent with the response and coherency characteristics of a region at stations distributed over an extended area.

References

1. Schneider, J.F.; Abrahamson, N.A.; Somerville, P.G.; Stepp, J.C. Spatial Variability of Ground Motion from EPRI's Dense Accelerograph Array at Parkfield, California. *Proc Fourth U. S. National Conf Earthq Eng*, EERI, Palm Springs, 375-384, 1990.
2. Abrahamson, N.A.; Sykora, D. Variations of Ground Motions Across Individual Sites. *Proc Fourth DOE Natl Phenom Hazards Mitig Conf*, 9192-9198, Atlanta, Georgia, 1993.
3. Joyner, W.B.; Boore, D.M. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake. *Bull Seism Soc Am* **1981**, *71*, 2011-2038.
4. Abrahamson, N.A. Statistical Properties of Peak Ground Accelerations Recorded by the Smart 1 Array. *Bull Seismol Soc Am* **1988**, *78*, 26-41.
5. Kawakami, H.; Mogi, H. Analyzing Spatial Intraevent Variability of Peak Ground Accelerations as a Function of Separation Distance. *Bull Seism Soc Am* **2003**, *93*, 1079-1090.
6. Field, H.E.; Hough, S.E. The Variability of PSV Response Spectra across a Dense Array Developed During the Northridge Aftershock Sequence. *Earthq Spectra* **1997**, *13*, 243-257.
7. Evans, J.R.; Hamstra, R.H.; Spudich, Jr.P.; Kündig, C.; Camina, P.; Rogers, J.A. TREMOR: A Wireless, MEMS Accelerograph for Dense Arrays. *U.S.G.S. Open File Report* **2003**, 03-159.
8. Loh, C.H. Analysis of the Spatial Variation of Seismic Waves and Ground Movements from SMART-1 Array Data. *Earthq Eng Struct Dyn* **1985**, *13*, 561-581.
9. McLaughlin, K.L. Spatial Coherency of Seismic Waveforms, PhD Thesis, University of California, Berkeley, 1983.
10. Abrahamson, N.A. Estimation of Seismic Wave Coherency and Rupture Velocity Using the SMART-1 Strong Motion Array Recordings. *EERC Report No. EERC/UCB/85-02* 1985, Earthquake Engineering Research Center, University of California.
11. Abrahamson, N.A. Spatial Variation of Multiple Support Inputs. *Proc the First U.S. Semin Seism Eval Retrofit Steel Bridges*, San Francisco, 1993.
12. Harichandran, R.S.; Vanmarcke, E. Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time. *J Eng Mech ASCE* **1986**, *112*, 154-174.
13. Harichandran, R.S. Local Spatial Variation of Earthquake Ground Motion. In *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation*; Von Thun, J. L. (editor),. American Society of Civil Engineers, New York, 1988; pp. 203-217.

14. Harichandran, R.S. Estimating the Spatial Variation of Earthquake Ground Motion from Dense Array Recordings. *Struct Saf* **1991**, *10*, 219-233.
15. Loh, C.H.; Yeh, Y.T. Spatial Variation and Stochastic Modeling of Seismic Differential Ground Movement. *Earthq Eng Struct Dyn* **1988**, *16*, 583–596.
16. Loh, C.H.; Lin, S.G. Directionality and Simulation in Spatial Variation of Seismic Waves. *Eng Struct* **1990**, *12*, 134–143.
17. Novak, M. Discussion on Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time by R. S. Harichandran and E. H. Vanmarcke. *J Eng Mech Div* **1987**, *113*, 1267–1270.
18. Oliveira, C.S.; Hao, H.; Penzien, J. Ground Motion Modeling for Multiple-Input Structural Analysis. *Struct Saf* **1991**, *10*, 79–93.
19. Ramadan, O.; Novak, M. Coherency Functions for Spatially Correlated Seismic Ground Motions. *Geotechnical Research Center Report No. GEOT-9-93*, 1993; University of Western Ontario, London, Canada.
20. Vernon, F.; Fletcher, J.; Carroll Chave, A.; Sembera, E. Coherence of Seismic Body Waves as Measured by a Small Aperture Array. *J Geophys Res* **1991**, *96*, 11981–11996.
21. Zerva, A.; Zhang, O. Correlation Patterns in Characteristics of Spatially Variable Seismic Ground Motions. *Earthq Eng Struct Dyn* **1997**, *26*, 19–39.
22. Cacciola, P.; Deodatis, G. A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes. *Soil Dyn Earthq Eng* **2011**, *31*, 351-360.
23. Zerva, A.; Zervas, V. Spatial Variation of Seismic Ground Motions: An Overview. *Appl Mech Rev* **2002**, *55*, (3): 271-297.
24. Zerva, A. *Spatial Variation of Seismic Ground Motions*. CRS Press, New York: 2009.
25. Song, S.G.; Pitarka, A.; Somerville, P. Exploring Spatial Coherence between Earthquake Source Parameters. *Bull Seism Soc Am* **2009**, *99* (4): 2564-2571.
26. Harmandar, E.; Durukal, E.; Erdik, M.; Özel, O. Spatial Variation Strong Ground Motion in Istanbul: Preliminary Results based on Data from the Istanbul Earthquake Rapid Response System. *European Geosciences Union (EGU) General Assembly*, Vienna, Austria, 2006.
27. Harmandar, E.; Durukal, E.; Erdik, M.; Ozel, O. Spatial Variation of Strong Ground Motion in Istanbul. *First European Conf Earthq Eng Seism*, Geneva, 2006.
28. Harmandar, E.; Durukal, E.; Erdik, M. A method for spatial estimation of peak ground acceleration in dense arrays. *Geophys J Int* **2012**, *191*, 1272–1284.
29. Rice, S.O. Mathematical Analysis of Random Noise. *Bell Syst Technical J* **1944**, *23*, 282–332.
30. Shinozuka, M. Monte Carlo Solution of Structural Dynamics. *Computers and Structs* **1972**, *2*, 855–874.
31. Conte, J.P.; Pister, K.S.; Mahin, S.A. Non-Stationary ARMA Modeling of Seismic Ground Motions. *Soil Dyn Earthq Eng* **1992**, *11*, 411-426.
32. Ellis, G.W.; Cakmak, A.S. Time Series Modeling of Strong Ground Motion from Multiple Event Earthquakes. *Soil Dyn Earthq Eng* **1991**, *10*, 42-54.
33. Mignolet, M.P.; Spanos, P.D. Simulation of Homogeneous Two-Dimensional Random Fields: Part I—AR and ARMA Models. *J Appl Mech* **1992**, *59*, 260–269.
34. Shama, A. Simplified Procedure for Simulating Spatially Correlated Earthquake Ground Motions. *Eng Struct* **2007**, *29*, 248-258.
35. Fenton, G.A.; Vanmarcke, E.H. Simulations of Random Fields via Local Average Subdivision. *J Eng Mech* **1990**, *116*, 1733-1749.
36. Hao, H.; Oliveira, C.S.; Penzien, J. Multiple-Station Ground Motion Processing and Simulation based on SMART-1 Array Data. *Nuclear Eng Des* **1989**, *111*, 293-310.
37. Zerva, A.; Katafygiotis, L.S. Selection of Simulation Scheme for the Nonlinear Seismic Response of Spatial Structures. *Proc Fourth Int Colloq Computation of Shell and Spatial Structs*, Chania, Greece, 2000.
38. Abrahamson, N.A. Generation of Spatially Incoherent Strong Motion Time Histories. *Proc Tenth World Conf Earthq Eng*, Madrid, Spain, 1992.
39. Ramadan, O.; Novak, M. Simulation of Multidimensional Anisotropic Ground Motions. *J Eng Mechs* **1994**, *120*, 1773–1785.
40. Yamamoto, Y. Stochastic model for earthquake ground motion using wavelet packets. PhD Thesis, Stanford University, 2011.
41. Mirrashid, M.; Givehchi, M.; Miri, M.; Madandoust, R. Performance investigation of neuro-fuzzy system for earthquake prediction. *Asian J Civ Eng (BHRC)* **2016**, *17*, 213–223.
42. Matsushima, Y. Stochastic Response of Structure due to Spatially Variant Earthquake Excitations. *Proc Sixth World Conf Earthq Eng*, Vol. II, 1077-1082, Sarita Prakashan, Meerut, India, 1977.
43. Abrahamson, N.A.; Schneider, JF, and Stepp C. Spatial Variation of Strong Ground Motion for Use in Soil-Structure Interaction Analyses. *Proc Fourth*

- U.S. Natl Conf Earthq Eng, Palm Springs, California, 1990.
44. Abrahamson, N.A.; Schneider, J.F.; Stepp, J.C. Empirical Spatial Coherency Functions for Applications to Soil-Structure Interaction Analyses. *Earthq Spectra* **1991**, *7*, 1-27.
 45. Erdik, M.; Fahjan, Y.; Ozel, O.; Alcik, H.; Mert, A.; Gul, M. Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System. *Bull Earthq Eng* **2003**, *1*, 157-163.
 46. Boissieres, H.P.; Vanmarcke, E.H. Estimation of Lags for a Seismograph Array: Wave Propagation and Composite Correlation. *Soil Dyn Earthq Eng* **1995**, *14*, 5-22.
 47. Parolai, S.; Ansal, A.; Kurtulus, A.; Strollo, A.; Wang, R.; Zschau, J. The Ataköy vertical array (Turkey): Insights into seismic wave propagation in the shallow-most crustal layers by waveform deconvolution. *Geophysical Journal International* **2009**, *178*, 3, 1649–1662.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04257.x>.
 48. Bolt, B.A.; Tsai Y.B.; Yeh. K.; Hsu, M.K. Earthquake strong ground motion recorded by a large near-source array of digital seismographs. *Earthq Eng Struct Dyn* **1982**, *10*, 561-573.
 49. Porter, K.A. An Overview of PEER's Performance-based Earthquake Engineering Methodology. Proc Ninth Intern Conf Appls Stat Probab Civil Eng, San Francisco, California, 2003.
 50. Songtao, L. Physical Characterization of Seismic Ground Motion Spatial Variation and Conditional Simulation for Performance-Based Design. PhD Thesis, Drexel University, 2006.
 51. Das, S.; Gupta, V.K. Wavelet-Based Simulation of Spectrum-Compatible Aftershock Accelerograms. *Earthq Eng Struct Dyn* **2008**, *37*, 1333-1348.
 52. Bi, K.; Hao, H. Simulation of Spatially Varying Ground Motions with Non-Uniform Intensities and Frequency Content. Earthq Eng Aust Conf, Ballarat, Australia, 2003.
 53. Abrahamson, N.A. Non-stationary spectral matching program RSPMATCH. Pacific Gas and Electric Company Internal Report, 1998.
 54. Hancock, J.; Watson-Lamprey, J.; Abrahamson, N.A.; Bommer, J.J.; Markatis, A.; McCoy, E.; Mendis, E. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *J Earthq Eng* **2006**, *10*, Special Issue I, 67-89.
 55. Liu, T.J.; Hong, H.P. Application of spatially correlated and coherent records of scenario event to estimate seismic loss of a portfolio of buildings. *Earthq Spectra* **2015**, *31.4*: 2047-2068.
 56. Chen, Z.; Liang, S.; He, C. Effects of different coherency models on utility tunnel through shaking table test. *J Earthq Eng* **2020**, *24.4*: 579-600.
 57. Ahmed, K.; Kim, D.; Lee, S.H. Effect of the incoherent earthquake motion on responses of seismically isolated nuclear power plant structure. *Earthq Struc* **2018**, *14.1*: 33-44.
 58. Papadopoulos, S.; Sextos, A.; Know, O.; Gerasimidis, S.; Deodatis, G. Impact of spatial variability of earthquake ground motion on seismic demand to natural gas transmission pipelines. Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE, 2017.
 59. Wu, Y.; Gao, Y.; Zhang, N.; Zhang, F. Simulation of spatially varying non-Gaussian and nonstationary seismic ground motions by the spectral representation method. *J Eng Mech* **2018**, *144.1*: 04017143.



Selection of Pile Foundation Systems: An Integrated Multi-Criteria Decision Making

Ender BAŞARI^{1*}, Özgür ESKİ², Özlem UZUN ARAZ³, Mustafa Erkan TURAN⁴

¹ Manisa Celal Bayar University, Department of Civil Engineering, Manisa/Turkey, ORCID ID: 0000-0001-6908-1281

² Manisa Celal Bayar University, Department of Industrial Engineering, Manisa/Turkey, ORCID ID: 0000-0001-5454-8029

³ Manisa Celal Bayar University, Department of Industrial Engineering, Manisa/Turkey, ORCID ID: 0000-0001-5630-6170

⁴ Manisa Celal Bayar University, Department of Civil Engineering, Manisa/Turkey, ORCID ID: 0000-0003-2501-2481

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 May 2020

Received in revised form 29

October 2020

Accepted 11 November 2020

Available online 13 January 2020

Keywords: Pile Foundations, Multi Criteria Decision Making, AHP, VIKOR, PROMETHEE

ABSTRACT

Pile foundations have been used for transmitting loads from structure to the soil. Design of pile foundation involves the determination of the design parameters such as pile type, pile diameter, pile length, pile layout etc. This study proposes an integrated methodology for selecting the most appropriate pile foundation design for a given soil profile. The methodology incorporates Analytical Hierarchy Process (AHP) and Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR)/Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) and Finite Element Analysis (FEM). While AHP is used for determining the weights of criteria, VIKOR and PROMETHEE are employed in order to acquire final rankings of alternatives. Then, a finite element analysis is applied on a selected set of best alternatives to provide precise results. Finally, a case study is conducted to show the effectiveness of the proposed methodology. Based on the findings of the case study, the methodology proposed paves the way for making an efficient decision for pile foundation selection.

Doi: 10.24012/dumf.740120

Introduction

Structures may be subjected to heavy loads through horizontal and vertical directions as the size of them getting larger due to the contemporary legal or architectural needs. These loads must be transferred safely to the soil by the foundation systems. However, in some cases it's very difficult to achieve this by shallow foundation design because of poor soil condition or heavy load. In such cases, deep foundation systems are required to transfer loads from the structure through weak soils or to the stiff soils or rocks at depth. One of the most well-known deep foundation is the

pile foundation systems. In the design of pile foundation, the design parameters (pile type, pile diameter, pile length, pile layout etc.) that satisfy technical and economic criteria should be determined. Different design methods such as finite element, finite difference methods etc. are used to determine the design parameters. Although finite element method (FEM) analysis gives accurate results, it requires large amount of experimental data, time and effort in order to build and solve the pile foundation problems on it. Moreover, different pile foundation alternatives that satisfy technical and economic constraints can be obtained by combining different sets of

* Corresponding author

Ender Başarı

✉ e-mail: ender.basari@cbu.edu.tr

design parameters. Choosing the most appropriate alternative among these combinations considering the priorities of the designer is a decision-making problem. The increase in the number of parameters and alternatives makes it difficult to determine design parameters by using FEM. In most of real-world applications, decision makers select the appropriate pile foundation based on their experience and knowledge. A design that completely based on the knowledge and the experience may lead to poor pile foundations that may not completely satisfy economic and technical criteria. A best pile design alternative should correspond to the cost-efficient solution attaining a compromise among the number of the piles, pile diameter and pile length etc. considering the priorities of the decision makers. Therefore, the decision makers need methodologies that can be applied easily, are able to give results in timely manner and consider their point of view in decision making process.

Selecting the best pile alternative is characterized by several aspects which makes it suitable for the Multi Criteria Decision Making (MCDM) approach. MCDM techniques generally rank the alternatives from best to the worst considering several conflicting criteria. MCDM techniques are widely used in engineering for design problems [1]–[3]. Moreover, MCDM techniques have been used in civil engineering problems in a variety of areas such as water resources, construction building technology, transportation etc. [4]–[6].

It is observed that there have been a limited number of MCDM studies on pile foundations. Kolios et al., [7] proposed a systematic methodology for classification and evaluation of the different available offshore wind turbines support structure alternatives using Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method. They identified 13 unrelated technical and non-technical criteria for evaluating 11 different options of support structures.

Zavadskas, Turskis and Vilutiene [8], present a process of selection the most appropriate foundation instalment alternative for buildings which stands on the soil. They considered the aforementioned suggestions and references of experts and evaluated three alternatives by Additive Ratio Assessment (ARAS) method. The set of criteria considers include costs of

installation, instalment duration, index of advantages, index of loses, the complexity of maintenance, transferability of decisions.

Sušinskas et al. [9], propose a MCDM based methodology to select the best pile foundation instalment alternatives. They evaluated seven different pile instalment methods considering the criteria such as cost of instalment, labor expenditures, machinery expenditures, earthwork amount and instalment tolerance. Criteria weights were determined by entropy method. The solution of the problem was made by applying ARAS method.

Zavadskas et al. [10], have developed a MCDM methodology for selecting a pile-column technology. They evaluated five different technological alternatives for installing pile columns. They considered a set of cost-based criteria consisting labor expenditures, cost of installation, consumption of concrete, consumption of steel, machinery expenditures, and consumption of energy. Their methodology incorporates TOPSIS, ARAS, COPRAS (Complex Proportional Assessment) methods. Integrated criteria weights are determined by using the AHP and the expert judgement method.

Dachowski and Gałek [11] presented a MCDM based methodology in which PROMETHEE II method was used in ranking of selected methods of underpinning foundations. They considered five different underpinning pile foundation methods.

Turskis et al. [12], used a methodology based on Weighted Aggregated Sum Product Assessment method with grey numbers (WASPAS-G) and AHP for selecting the type of foundation for a single-storey house. The criteria weights were determined by using the AHP and experts' judgement methods.

As can be seen from the literature given above, MCDM techniques such as TOPSIS, ARAS, COPRAS, AHP have been used in order to select pile types, pile technology or pile layout for a given soil profile considering the only one aspect of the problem. In addition, researchers generally used cost-based criteria sets. In this study, we proposed an integrated MCDM based methodology in order to select the best pile foundation alternative for a given soil profile considering multiple criteria. The proposed methodology comprises AHP, VIKOR,

PROMETHEE. In the first phase of the methodology, criteria values of the alternatives were calculated empirically for the ease of computation. Criteria weights are determined by AHP method. Then the feasible alternatives were ranked by VIKOR and PROMETHEE methods. The final ranking is obtained by averaging the VIKOR and PROMETHEE ranks of alternatives. Finally, finite element analysis is applied for the selected number of the best alternatives to provide more precise criteria values.

The novelty of the work reported in this paper can be summarized as follows.

- For the first time, VIKOR and PROMETHEE methods are used for selecting the best pile foundation alternatives.
- Pile foundation alternatives are evaluated by taking into consideration qualitative, and quantitative criteria based on economic and technical point of view. Different from the current literature we have considered a set of criteria that combines settlement (S), safety factor of bearing capacity (SFBC), cost (C), ease of installation (EI), length - diameter ratio (LDR).
- In most of the current literature, the MCDM methods are generally used to determine the best pile types, most appropriate pile foundation technology and pile layout etc. considering only one aspect of the problem. This study differs from its predecessors since proposed methodology determines the most appropriate pile foundation alternative considering pile design parameters such as pile diameter, pile length, number of piles and pile foundation layout.

This paper is organized as follows. Section 2 presents multiple criteria decision-making methods used in this study. Next section covers the details of the proposed methodology and its application on a hypothetical case study. The last section includes concluding remarks and suggestions for future studies.

Multiple Criteria Decision-Making (MCDM)

Selecting the most appropriate pile foundation process requires balancing multiple conflicting objectives. MCDM provides a compromise

solution when there is not a certain solution that fully satisfies all criteria simultaneously.

In this study, we have proposed an integrated methodology that employs AHP, VIKOR, PROMETHEE together in order to select the most appropriate pile foundation for a given soil profile. Following sections contain brief information about the techniques employed in the proposed methodology. The flowchart of the proposed methodology is illustrated in Fig.1.

Analytic Hierarchy Process (AHP)

The Analytic Hierarchy Process (AHP) introduced by Saaty [13], is a quantification process for dealing with complex decision making, and it also helps the decision makers set his/her priorities. AHP uses pairwise comparison matrix which can be used both to compare the alternatives with respect to multiple criteria and to determine weights of criteria. Classical AHP procedure has five steps:

1. *Define objectives*: In this step the unstructured problem and their characteristics should be stated clearly (i.e. objectives and outcomes).
2. *Build structures*: The complex problem is decomposed into a hierarchical structure with decision elements (objective, attributes i.e. criterion map layer and alternatives).
3. *Calculate pairwise comparisons*: The relative importance between two criteria is measured using Saaty's Pairwise Comparison Scale which is a numerical scale from 1 to 9 [13].
4. *Calculate weights*: The criteria weights are computed as the row average of the normalized matrix.
5. *Evaluate alternatives based on their weights*: The alternatives are sorted, and the top alternative is selected as the best. This is an optional step if AHP method is used for determining criteria weights.

AHP method provides consistency checking on decision makers' judgments. The consistency ratio shows whether the relationship between the values given in the pairwise comparison is consistent. Consistency ratio is bigger than 0.1, indicates inconsistency in pairwise comparison matrix.

The pairwise comparisons can allow decision makers for determining the weight coefficients relative easily. In this study, AHP method is used for determining the weights of criteria.

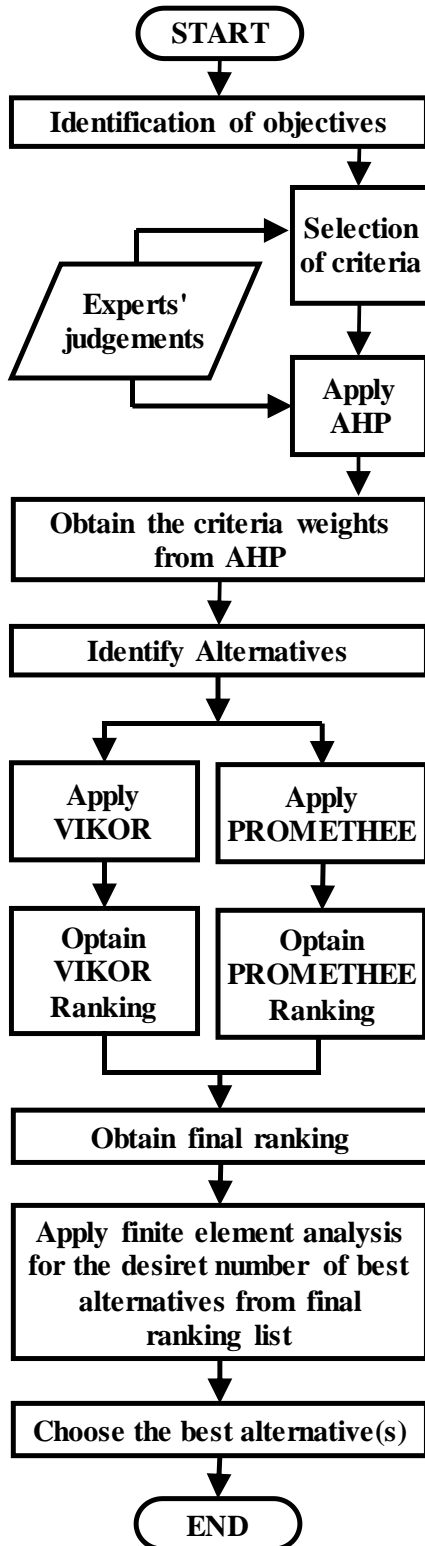


Figure 1. Flowchart of the methodology

Vise Kriterijumska Optimizacija I Compromising Resenje (VIKOR)

VIKOR is a multi-criteria decision-making method proposed by Opricovic [14]. In this method, a compromise solution (F^c) of the problem is obtained by comparing the measure of closeness to the ideal solution. The compromise solution (F^c) is the closest solution to the ideal solution (F^*), and provides an agreement established by mutual concessions. Distance of alternative a_j from ideal solution (F^*) is expressed by L_p -metric in Eq. 1 that is the distance function called as the group regret for a decision.

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{f_i^* - f_i^-} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad 1 \leq p \leq \infty; j=1, 2, \dots, J \quad (1)$$

where n, J, f_{ij}, p are number of criteria, number of alternatives, evaluation value of the i^{th} criterion for alternative a_j , respectively. For $p=1$, L_{pj} becomes $L_{1,p}$ and is expressed S_j , that means concordance. It provides information about maximum group utility (majority). For $p=\infty$, L_{pj} becomes $L_{\infty,p}$ and is expressed R_j , that means discordance. It provides information about minimum individual regret of the opponent. The VIKOR method can be summarized as follows:

Step 1: According to the benefit or cost of the criterion, the best f_i^* and worst f_i^- value of each criterion a_j is calculated as in Eq. 2 and Eq. 3;

$$f_i^- = \begin{cases} \min_j f_{ij}, & \text{if the criterion represents benefit} \\ \max_j f_{ij}, & \text{if the criterion represents cost} \end{cases} \quad (2)$$

$$j=1, 2, \dots, J$$

$$f_i^* = \begin{cases} \max_j f_{ij}, & \text{if the criterion represents benefit} \\ \min_j f_{ij}, & \text{if the criterion represents cost} \end{cases} \quad (3)$$

$$i=1, 2, \dots, I, \quad j=1, 2, \dots, J$$

Step 2: For each alternative, the average group score S_j and the worst group score R_j are calculated as in Eq. 4 and Eq. 5;

$$S_j = \sum_{i=1}^n \frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (4)$$

$$R_j = \max_i \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{ij})}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (5)$$

Step 3: For each group, maximum group benefit Q_j is calculated as in Eq. 6;

$$Q_j = v * \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + \frac{(1-v)(R_j - R^*)}{R^- - R^*} \quad (6)$$

where $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$. $v \in [0,1]$ is called the weight of the strategy of the "the majority of criteria" or "the maximum group utility" and is usually equal to 0.5.

Step4: S , R and Q values of alternatives are ranked in decreasing order.

Step 5: The alternative that has minimum Q value chosen as the best alternative, if following two conditions are satisfied. The first condition, C_1 , called as "the acceptable advantage" in Eq. 7.

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ \quad (7)$$

where a' , a'' are alternatives at first and second position by Q ranking list, respectively. DQ is given in Eq. 8.

$$DQ = \frac{1}{j-1} \quad (8)$$

The second condition " C_2 " called as the "the acceptable stability in decision making"; in order to determine that a' alternative is the best, it must be the best alternative in at least one by S or R ranking list. For a stable compromise solution, which could be: "voting by majority rule" (when $v > 0.5$ is needed), "by consensus" $v \approx 0.5$, or "with veto" ($v < 0.5$).

The weight of the decision-making strategy is denoted by " v " that called "the majority of criteria" or "the maximum group utility".

If C_1 and C_2 are not satisfied, a set of compromise solutions is obtained by the following rules;

- Alternatives a' and a'' if only condition C_2 is not satisfied, or
- Alternatives a' , a'' , ..., $a^{(M)}$ if condition C_1 is not satisfied and $a^{(M)}$ is determined by the relation for $Q(a^{(M)}) - Q(a') < DQ$ for maximum M (the positions of these alternatives are "in closeness")

This paper is organized as follows. Section 2 presents multiple criteria decision-making methods used in this study. Next section covers the details of the proposed methodology and its application on a hypothetical case study. The last section includes concluding remarks and suggestions for future studies.

Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)

PROMETHEE is a multi-criteria decision-making method proposed by Brans [15]. The PROMETHEE steps are as follows.

Step 1: In order to compare two alternatives a_i and a_k , the difference of their values ($d_j(a_i, a_k)$) on each criterion is determined by Eq. 9.

$$d_j(a_i, a_k) = g_j(a_i) - g_j(a_k) \quad (9)$$

Step 2: For each pair of actions, a preference function $F_i(a_i, a_k)$ that represents preference level of a_i over a_k on criterion j can be defined. Brans and Vincke [16] proposed six different preference functions as: (1) usual criterion, (2) U-shape criterion, (3) V-shape criterion, (4) level criterion, (5) V-shape within deference criterion and (6) Gaussian criterion. In this study, v-shaped function with indifference criterion is used. According to this preference function, $F_i(a_i, a_k)$ represents the preference level of a_i on criterion j can be defined as in Eq. 10:

$$F(a_i, a_k) = \begin{cases} 0, & d_j(a_i, a_k) \leq q_j \\ \frac{d_j(a_i - a_k) - q_j}{q_j - p_j}, & p_j \leq d_j(a_i, a_k) \leq q_j \\ 1, & d_j(a_i, a_k) \geq p_j \end{cases} \quad (10)$$

where q_j is the predefined in difference threshold and p_j is the predefined preference threshold.

Step 3: The preferences aggregated by weights, w_j , in order to evaluate alternatives considering more than one criterion with Eq.11.

$$\Pi(a_i, a_k) = \sum w_j F_j(a_i, a_k) \quad (11)$$

Step 4: Entering flow and leaving flow are determined in order to show how alternative a_i is outranked by all other alternatives as in Eq. 12 and Eq. 13.

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(a, x) \text{ leaving flow} \quad (12)$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(x, a) \text{ entering flow} \quad (13)$$

Step 5: In PROMETHEE I, alternative a_i is preferred to alternative a_k , $a_i P a_k$, if the following conditions are satisfied;

$$a_i P a_k \text{ if: } \phi^+(a_i) \geq \phi^+(a_k) \text{ and } \phi^-(a_i) \leq \phi^-(a_k)$$

In the indifference situation ($a_i I a_k$), we cannot say that any alternative is preferred to the other since a_i and a_k alternatives have the same leaving and entering flows as stated below;

$$a_i I a_k \text{ if: } \phi^+(a_i) = \phi^+(a_k) \text{ and } \phi^-(a_i) = \phi^-(a_k)$$

Step 6: Alternatives a_i and a_k are considered as incomparable, $a_i R a_k$ if a_i has a greater leaving flow than a_k , while a_i has smaller entering flow than a_k or vice versa;

$$a_i R a_k \text{ if: } \phi^+(a_i) > \phi^+(a_k) \text{ and } \phi^-(a_i) > \phi^-(a_k) \text{ or } \phi^+(a_i) < \phi^+(a_k) \text{ and } \phi^-(a_i) < \phi^-(a_k)$$

Two alternatives are considered incomparable, $a_i R a_k$, if alternative a_i has larger leaving flow than alternative a_k , while a_i has smaller entering flow than alternative a_k , or vice versa.

Since PROMETHEE I evaluation produces in difference and incomparability situations between alternatives, it provides partial rankings. PROMETHEE II can be preferred if decision

maker wants to obtain a complete ranking. PROMETHEE II uses the net flow of each alternative which quantifies the position of each alternative with respect to the remaining alternatives. On the other hand, the larger the net flow " $\phi(a)$ " the better the alternative.

$$\phi(a) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_k)$$

Proposed Methodology and Its Application

The proposed methodology incorporates three MCDA methods; namely AHP, VIKOR, PROMETHEE. In the first step the objective of the study is identified as selecting the best pile foundation alternative. Then, the set of criteria is determined by literature review results and experts' opinions. In the third step, AHP method is used for determining criteria weights. In the next step, all feasible alternatives are identified, and criteria scores of the alternatives were calculated by using conventional methods of geotechnics for ease of computation. Then the feasible alternatives were ranked by VIKOR and PROMETHEE methods. In the next step, Spearman rank correlation analysis is performed to check if there is a correlation between VIKOR and PROMETHEE results. Then the final ranking based on VIKOR and PROMETHEE results is obtained by averaging the ranks of the alternatives. Finally, finite element analysis is applied for the selected number of the best alternatives to provide more precise results.

A case study is performed to investigate the effectiveness of proposed methodology. In this manner, we considered a hypothetical bored pile foundation for a building which is constructed on saturated silty soil (Fig. 2). The saturated silty soils can often be encountered in provincial centers close to the sea such as İzmir, Çanakkale, Mudanya, Gemlik etc. Soil properties of foundation are given in Table 1. Representative soil parameters and layer properties are chosen appropriately İzmir – Mavişehir soil properties which were determined in the past with field and laboratory investigations. The groundwater table is 5 m below ground surface.

Table 1. Soil Properties

Layer No	Description	H _o (m)	γ _n (kN/m ³)	γ _s (kN/m ³)	L _L (%)	PI (%)	φ (°)	c (kN/m ²)	c _c	e _o	E _s (kN/m ²)	v
1	Topsoil	1	18.5	-	-	-	28	0	-	-	15000	0.30
2	Silty Soil	34	18.5	20.5	48	18	30	5	0.11	0.885	30000	0.45
3	Sandy soil	26	-	21			35	0	-	-	60000	0.45
4	Gravelly soil	>10	-	21			42	0	-	-	85000	0.45

γ_n: Moist unit weight of soil, γ_s: Saturated unit weight of soil, L_L: Liquid limit water content, PI: Plasticity index, φ: internal friction angle, c: cohesion, c_c: compression coefficient, e_o: void ratio, E_s: Modulus of elasticity, v: Poisson ratio. H_o: Thickness of soil layers.

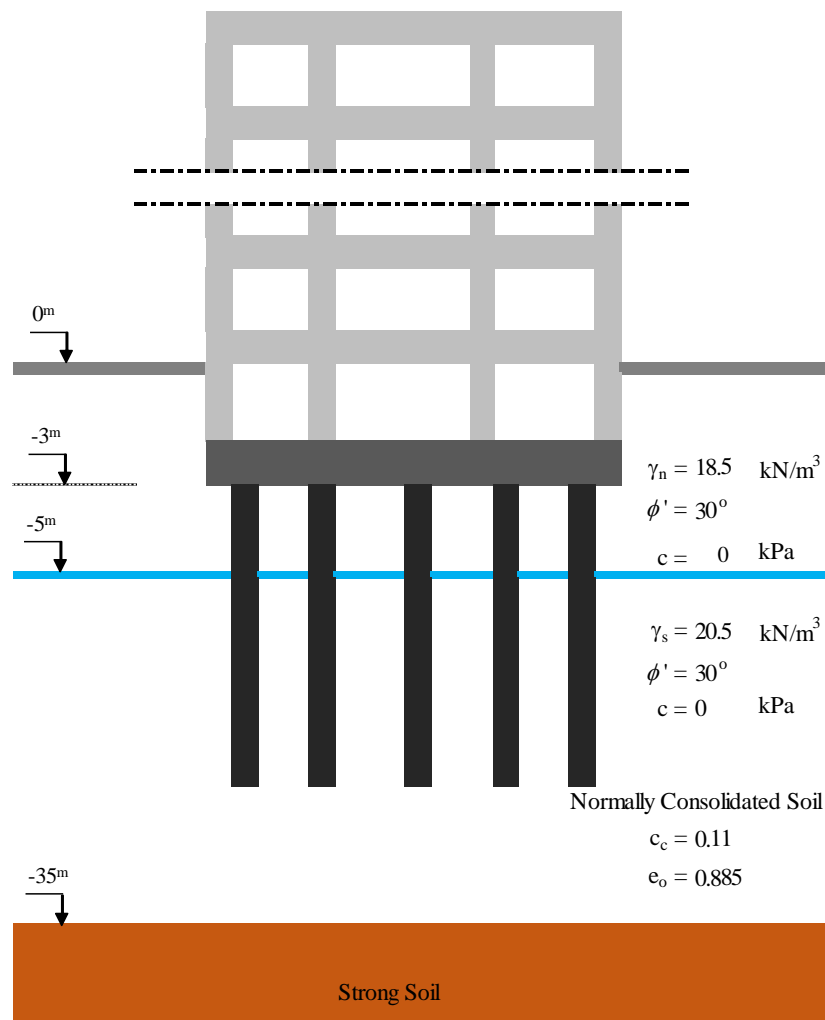


Figure 2. Considered hypothetical building, pile foundation and soil profile.

Total weight of the building was calculated as 44520 kN (Table 2). The raft foundation width, length and thickness are 15 m, 20 m, and 1 m respectively. Depth of the raft foundation base is 3 m below the ground surface.

Proposed methodology will be explained step by step and the results obtained for each steps of selected case will be given below.

1. Identification of the objectives: The main objective of this study is to select the best pile foundation alternative considering multiple criteria.

2. Selection of Criteria: Settlement (S), safety factor of bearing capacity (SFBC), ease of installation (EI), length – diameter ratio (LDR) as technical criteria and cost (C) as financial criteria were determined for selection of the pile foundation alternatives considering literature review and experts’ opinions. While the technical criteria were selected in terms of engineering, the cost is one of the important criteria for decision makers in today's competitive conditions. The pile foundation alternatives were described by five criteria as can be seen in Table 3.

A brief description and calculation methods of the criteria are given as follows.

Settlement (S): Soil layers under the structure are compressed and deformed because of the loads coming from the structure. Vertical deformations of the soil layers cause a vertical displacement in the foundation and structure. Total vertical displacement of the foundation or structures is called as settlement and can be calculated by Eq 14.

$$S = H_o \frac{c_c}{1+e_o} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \quad (14)$$

where, S, settlement of soil layer, H_o , initial thickness of soil layer, c_c , compression coefficient, e_o , initial void ratio of soil layer, σ'_0 , effective geostatic stress, and $\Delta\sigma$, induced stress due to pile foundation. Soil parameters and layer properties given above are determined by field and laboratory investigations.

Safety factor of bearing capacity (SFBC) : SFBC is a ratio of the ultimate bearing capacity and the foundation loads (Eq. 15).

Table 2. Total weight of building

Length (m) :	15
Width (m) :	20
Area (m ²) :	300
Number of Floors :	12
Foundation Thickness (m) :	1
Total Weight of Foundation (t)	:
	720
Total Weight of Rouf (t) :	132
Average Design Loads (t/m ²) :	1
(Total Dead and Live Weights)	:
Total Weights of one Floor (t)	:
	300
Total Weights of all Floors (t) :	3600
Total Weight of Building (t) :	4452
(kN) :	44520
γ_{concrete} (t/m ³) :	2.4

Table 3. Set of Criteria

Criteria	Unit	Notation	Extreme
S	cm	C1	Minimum
SFBC	-	C2	Maximum
EI	-	C3	Minimum
LDR	-	C4	Minimum
C	₺	C5	Minimum

$$F_s = \frac{Q_u}{W_s} \quad (15)$$

where, safety factor of bearing capacity, ultimate bearing capacity, weight of structure are denoted by F_s , Q_u , W_s , respectively. In the conventional approach, ultimate bearing capacity of single and group piles can be calculated by Eq. 16 [17].

$$Q_u = Q_b + Q_f - W_p \quad (16)$$

where, W_p is the pile weight, Q_b and Q_f are end resistance of pile and friction resistance of pile. Different methods are proposed for estimation of the Q_b and Q_f . In this paper, bearing capacity was calculated according to Meyerhof [18].

Ease of installation (EI) : This parameter describes the relative ease of installation of the support structure on site, in terms of equipment needed and its availability, manpower and time.

Length - Diameter Ratio (LDR) : It is the ratio of pile length and the pile diameter. Length – diameter ratio of pile widely is used for pile analyses.

Cost (C) : In this study, cost of piles was calculated using unit price method and 2019-unit prices were taken into consideration. Unit prices cover the costs of labor, material, and construction. Unit prices were taken from "*Construction and Installation Unit Prices Book*" published by Turkish Ministry of Environment and Urbanism [19].

3. Determining Weights of Criteria: Determining the criteria weights is one of the important phases of a MCDA analysis. The weights show the relative importance of the criteria. In this study, AHP method is used to determine weights of the criteria. Pairwise comparison matrix is given in Table 4.

Consistency Ratio for pairwise comparison matrix in this study was obtained as 0.01615, which is smaller than 0.1. As a result of the application of AHP method, weights of criteria were obtained as shown in Table 4.

4. Identify Alternatives: In this phase the pile foundation design parameters and values of parameters are determined. At first, the pile design parameters were identified as diameter (D), length (L) and the distance between piles (DBP) through expert's opinions. Then, the levels of pile design parameters were determined according to case study as shown in Table 5.

As can be seen from Table 5, for the parameters of D, L and DBP were defined 4, 4 and 3 levels respectively.

The alternatives were created using values from Table 4. Therefore, as a total, $4 \times 4 \times 3 = 48$ alternatives were obtained.

Then the criteria values of all alternatives were calculated as explained in Step 2 and applicable 48 alternatives are presented in Table 6.

5. Ranking of the Alternatives: In this study two well-known multi-criteria techniques, VIKOR and PROMETHEE are used to sort pile foundation alternatives. The weight matrix for the

two MCDA methods were calculated by the AHP method and is given in Table 4.

Table 4. The pairwise comparison matrix and weights of criteria

	S	SFBC	EI	LDR	C
S	1	5	2	3	0.5
SFBC	0.2	1	0.5	0.5	0.2
EI	0.5	2	1	2	0.33
LDR	0.33	2	0.5	1	0.25
C	2	5	3	4	1
Weights	0.27	0.06	0.15	0.1	0.42

Table 5. Values of parameter

Description	Unit	Value
Diameter (D)	m	0.45
		0.65
		0.80
		1.00
Length (L)	m	15
		20
		25
		30
Distance between piles (DBP)	m	2D
		3D
		4D

• **VIKOR Results**

Firstly, the best \bar{f}_j^* values and the worst \bar{f}_j^- values are calculated for all the criteria using the weight matrix given in Table 5. Obtained \bar{f}_j^* values and \bar{f}_j^- values are given in Table 7.

Q, S, R values are calculated for all alternatives and then they are ranked by Q, S, R values. Q, R, S values. The ranking obtained is given in Table 8 for top five alternatives.

Having obtained the rankings according to $Q, S,$ and $R,$ acceptable advantage and stability conditions are checked. Since the condition $C1$ is not satisfied, the alternatives, A16, A12 and A11 are the same compromise solution and there are no competitive advantages among them, but these

three alternatives have competitive advantage over alternatives A8 and A7.

By comparing the rankings of Q , S and R , as in Table 8, we can see that it follows a trend. Since A16, A12 and A11 are the top 3 alternatives in rankings by both Q and S , the second condition is satisfied. Therefore, we may conclude that A16, A12 and A11 are stable within the decision-making process.

• **PROMETHEE Results**

PROMETHEE method was applied to the problem defined in the case study. Considering the deviations based on the pairwise comparison of the alternatives $d_j(a_i, a_k)$ values are computed. Then using a V-shaped preference function, threshold values of indifference (q) and difference (p) are computed as shown in Table 9.

Then, using weights determined by AHP, the net outranking flows are calculated considering Φ^+ and Φ^- values, and the alternatives are ranked based on the net flows in descending order as shown in Table 10. (PROMETHEE II).

6. *Obtaining the final ranking:* As can be seen from Table 11, the alternative A13 is the best alternative for both methods and the rankings of other alternatives are quite similar. The similarity between VIKOR and PROMETHEE II is also measured by Spearman's rank correlation coefficient (Eq. 17).

$$\rho_{ki} = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \tag{17}$$

where n is the number of alternatives and d_i is the difference between the ranks of two MCDM methods. Rho is calculated as 0.95 which indicates a strong, positive correlation between

VIKOR and PROMETHEE II results. The ranking list is extended to six to cover top five alternatives provided by both methods. Then the final ranking based on VIKOR and PROMETHEE II result is obtained by averaging the ranks as shown in Table 11.

Table 6. Feasible alternatives

Alter-native No	D (m)	L (m)	Number of Pile (#)	S (cm)	SFBC	EI	LDR	C (₺)
1	0.5	15	99	8.41	2.79	1.7	33.3	234027
2	0.5	20	99	6.02	4.7	2.1	44.4	312036
3	0.5	25	99	4.25	5.94	2.5	55.6	390045
4	0.5	30	99	2.9	7.18	3	66.7	468054
5	0.7	15	48	8.81	2.86	1.3	23.1	195305
6	0.7	20	48	6.32	3.95	1.6	30.8	279751
7	0.7	25	48	4.47	5.04	1.9	38.5	349689
8	0.7	30	48	3.06	6.13	2.2	46.2	419627
9	0.8	15	35	8.41	2.81	1.2	18.8	188764
10	0.8	20	35	6	3.94	1.5	25	275199
11	0.8	25	35	4.23	5.07	1.8	31.3	343999
12	0.8	30	35	2.89	6.2	2	37.5	412798
13	1	15	20	9.94	2.18	1	15	162759
14	1	20	20	7.14	3.13	1.2	20	241016
15	1	25	20	5.09	4.08	1.4	25	301270
16	1	30	20	3.55	5.03	1.6	30	361524
17	0.5	15	165	8.48	5.76	2.5	33.3	390045
18	0.5	20	165	6.07	7.83	3.3	44.4	520059
19	0.5	25	165	4.28	9.9	4	55.6	650074
20	0.5	30	165	2.92	12	4.7	66.7	780089
21	0.7	15	80	8.75	4.77	1.9	23.1	325509
22	0.7	20	80	6.27	6.59	2.4	30.8	466252
23	0.7	25	80	4.44	8.41	2.9	38.5	582815
24	0.7	30	80	3.05	10.2	3.4	46.2	699378
25	0.8	15	54	8.78	4.33	1.7	18.8	291237
26	0.8	20	54	6.29	6.08	2.1	25	424593
27	0.8	25	54	4.44	7.82	2.5	31.3	530741
28	0.8	30	54	3.05	9.56	2.9	37.5	636889
29	1	15	35	9.08	3.82	1.4	15	284828
30	1	20	35	6.5	5.48	1.8	20	421778
31	1	25	35	4.61	7.14	2.1	25	527223
32	1	30	35	3.17	8.8	2.4	30	632667
33	0.5	15	374	8.08	13.1	5.2	33.3	884101
34	0.5	20	374	5.77	17.8	6.8	44.4	1178801
35	0.5	25	374	4.05	22.4	8.4	55.6	1473502
36	0.5	30	374	2.76	27.1	10	66.7	1768202
37	0.7	15	180	8.22	10.7	3.8	23.1	732395
38	0.7	20	180	5.88	14.8	4.9	30.8	1049067
39	0.7	25	180	4.14	18.9	6	38.5	1311334
40	0.7	30	180	2.81	23	7.1	46.2	1573601
41	0.8	15	117	8.41	9.39	3.1	18.8	631013
42	0.8	20	117	6	13.2	4	25	919951
43	0.8	25	117	4.23	16.9	4.9	31.3	1149938
44	0.8	30	117	2.89	20.7	5.8	37.5	1379926
45	1	15	80	8.14	8.74	2.7	15	651037
46	1	20	80	5.83	12.5	3.5	20	964065
47	1	25	80	4.1	16.3	4.2	25	1205081
48	1	30	80	2.78	20.1	5	30	1446097

7. Finite Element Analysis (FEM) : As discussed in introduction section, more precise criteria values can be obtained by FEM analyses but it not practical to evaluate 48 alternatives since it requires large amount of data, time and effort. Therefore, in this methodology, FEM analysis is performed only for the top 5 alternatives in the final ranking list to provide more precise S and SFBC values for decision makers. Numerical models of the five alternatives was performed by using Plaxis 3D software. The numeric models were analyzed for drained condition and mohr-cloumb model with soil properties which were given in Table 1. Settlement and safety factor values obtained by FEM and conventional methods are given in Table 12. As can be seen from Table 12, S and SFBC values obtained by conventional methods and FEM follow a similar trend and they are close to each other. Having obtained more precise S and SFBC values for top five alternatives, decision makers may choose one of the alternatives that best satisfies their preferences.

Table 7. Best f_i values and worst f_i^- values for all the criteria

	C1	C2	C3	C4	C5
f_i	2.76	27.12	1	15	162759.13
f_i^-	9.94	2.18	10	66.67	1768202.2

Table 8. Q, R, S Values for top 5 Alternatives

Alterna- tive No	Q	Alterna- tive	S	Alterna- tive	R
16	0	16	0.18	11	0.06
12	0.02	12	0.18	16	0.07
11	0.03	11	0.2	12	0.06
8	0.05	15	0.21	7	0.07
7	0.07	8	0.23	8	0.07

Table 9. p and q values

Para- meter	S	SFBC	EI	LDR	C
Q	0	2	0	1	1000
P	7	22	8	50	1250000

Table 10. ϕ^+ and ϕ^- values for Top Five Alternatives

Flow Value	A16	A12	A11	A15	A8
ϕ^+	11.03	10.92	10.11	10.35	10.31
ϕ^-	1.408	1.973	1.726	2.059	2.713
ϕ_{net}	9.622	8.949	8.387	8.29	7.594

Table 11. Final ranking

Alter- native No	PROMETHEE II Rank	VIKOR Rank	Average Rank	Final Rank
16	1	1	1	1
12	2	2	2	2
11	3	3	3	3
8	5	4	4.5	4
15	4	6	5	5
7	6	5	5.5	6

Table 12. Settlement and safety factor values for the best five alternatives

Alterna- tive No	Settlements (cm)		Safety factor of bearing capacity	
	Conven- tional Method	FEM analyses	Conven- tional Method	FEM Analyses
	16	3.55	3.962	5.03
12	2.89	3.96	6.2	6.55
11	4.23	4.897	5.07	6.03
8	3.06	3.9	6.13	6.36
15	5.09	4.738	4.08	5.7

Conclusion

Selection of appropriate pile foundation is a common problem in civil engineering. In most of real-world applications, decision makers select the appropriate pile foundation based on their experience and knowledge. The methods completely based on knowledge and experience is difficult to use when it is required to evaluate so many alternatives with multiple criteria. Therefore, such methods may lead to poor pile foundations that do not well satisfy economic and technical criteria. In most cases there is not a certain solution that satisfies all criteria simultaneously. MCDM analyses are able to provide a compromise solution in such cases. In this study an integrated MCDA based methodology is proposed for selecting appropriate pile foundation for a given soil profile. The methodology proposed incorporates AHP, VIKOR/PROMETHEE and finite element analysis. The methodology provides a systematic basis for pile selection process and allows decision makers to reflect their preferences in decision making process.

Differently from the existing methodologies, in this study, VIKOR and PROMETHEE methods were used for the first time in selecting the best pile foundation problem. Moreover, the proposed methodology differs from the existing MCDM based pile selection studies by considering pile design parameters and pile foundation layout together.

The findings of the numerical analysis showed that the proposed methodology can be effectively used for selecting the most appropriate pile foundation for a given soil profile. A further study may be required to extend the methodology so that it can be used for different soil profiles in a generic manner.

References

1. Vujić, S.; Hudej, M.; Miljanović, I. Results of the promethee method application in selecting the technological system at the majdan III open pit mine. *Arch. Min. Sci.* 2013, 58, 1229–1240.
2. Büyüközkan, G.; Görener, A. "Evaluation of product development partners using an integrated AHP-VIKOR model," *Kybernetes*, vol. 44, no. 2, pp. 220–237, Feb. 2015, doi: 10.1108/K-01-2014-0019.
3. Thirugnanam, A.; Singh Sivam, S.P.S.; Saravanan, K.; Harshavardhana, N.; Kumaran, D. "Conventional Super Plastic Forming and Multi-attribute Optimization through VIKOR and ANOVA," *Int. J. Veh. Struct. Syst.*, vol. 12, no. 1, Jun. 2020, doi: 10.4273/ijvss.12.1.07.
4. Zavadskas, E.K.; Antuchevičienė, J.; Kapliński, O. Multi-criteria decision making in civil engineering. Part II – applications. *Eng. Struct. Technol.* 2015, 7, pp.151–167. doi:10.3846/2029882X.2016.1139664.
5. Navarro Martínez, I.; Martí Albiñana, J.V.; Yepes Piqueras, V. Multi-Criteria Decision Making Techniques in Civil Engineering Education for Sustainability. *ICERI2018 Proc.* 2018, 1, 9798–9807.
6. Rehman, A.U.; Abidi, M.H.; Umer, U. Multi-Criteria Decision-Making Approach for Selecting Wind Energy Power Plant Locations. *Sustainability* 2019, 11, 6112.
7. Kolios, A.; Collu, M.; Chahardehi, A.; Brennan, F.P.; Patel, M.H. A multi-criteria decision making method to compare support structures for offshore wind turbines, *EWEC*, Warsaw, Poland, 2010.
8. Zavadskas, E.K.; Turskis, Z.; Vilutiene, T. Multiple criteria analysis of foundation instalment alternatives by applying Additive Ratio Assessment (ARAS) method. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2010, 10, pp.123–141. doi:10.1016/S1644-9665(12)60141-1
9. Sušinskas, S.; Zavadskas, E.K.; Turskis, Z. Multiple Criteria Assessment of Pile-Columns Alternatives, *Balt. J. Road Bridg. Eng.* 2011, 6, pp.145–152. doi:10.3846/bjrbe.2011.19.
10. Zavadskas, E.K.; Sušinskas, S.; Daniūnas, A.; Turskis, Z.; Sivilevičius, H. Multiple criteria selection of pile-column construction technology. *J. Civ. Eng. Manag.* 2012, 18, pp.834–842. Doi:10.3846/13923730.2012.744537
11. Dachowski R. and Gałek K. Selection of the Best Method for Underpinning Foundations Using the PROMETHEE II Method, *Sustainability* 2020, 12, 5373; doi:10.3390/su12135373
12. Turskis, Z.; Daniūnas, A.; Zavadskas, E.K.; Medzvieckas, J. Multicriteria Evaluation of Building Foundation Alternatives. *Comput. Civ.*

- Infrastruct. Eng.* 2016, 31, pp.717–729.
doi:10.1111/mice.12202
13. Saaty, T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Second Edition, McGraw-Hill, California, 1980, p.287, ISBN 0-07-054371-2.
 14. Opricovic, S. *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998, p.1302.
 15. Brans J-P. *L'ingénierie de la décision: Elaboration d'instruments d'aide à la décision*. In: Nadeau R, Landry M (eds) *L'aide à la décision: nature, instruments et perspectives d'avenir*. Presse de l'Université de Laval, Québec, 1982, pp.183–213.
 16. Brans J.P.; Vincke, P. A Preference Ranking Organization Method, *Manage. Sci.* 1985, 31(6), pp.647–656.
 17. Tomlinson, M. J; Woodward J. *Pile Design and Construction Practice*. Spon Press, Fifth Edition, London, and New York, 2007, p.551.
 18. Meyerhof, G.G. Bearing Capacity and settlement of Pile Foundations, *ASCE J. Geotech. Eng. Div.* 1976, 102(GT3), pp.195–228.
 19. Turkish Ministry of Environment and Urbanism, "2019 Construction and Installation Unit Prices," Ankara, 2019.

Silika Aerojel Katkılı Hibrit Silis Dumanı Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal İletkenlik ve Mikro Yapı Özellikleri

Mechanical, Pore Structure, Thermal Conductivity and Microstructure Properties of Silica Aerogel-Incorporated Hybrid Silica Fume Mortars

Levent Bostancı^{1*}¹ Beykent Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Programı, İstanbul, leventbostanci@beykent.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 18 Haziran 2020
Düzeltilme: 10 Ocak 2021
Kabul: 11 Ocak 2021

Anahtar kelimeler:

Hibrit harç, silika aerojel, termal iletkenlik, silis dumanı, por yapısı.

ÖZET

Çimento esaslı karışımlarda yüksek miktarda silika aerojel kullanımının çimento esaslı malzemelerin termal yalıtım özelliklerine üstün düzeyde katkı sunduğu iyi bilinen bir gerçektir. Bununla birlikte, günümüz koşullarında silika arojellerin üretim maliyeti geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla oldukça yüksektir. Bu çalışma, düşük katkı oranlarında silika aerojel tozu içeren alkali-aktive edilmiş hibrit silis dumanı harç özelliklerine odaklanmaktadır. Bu amaçla aerojel katkı oranları çimento ağırlığına %0, %0.25 ve %0.5 düzeylerinde tasarlandı ve harç karışımlarının alkali aktivasyonu çimento ağırlığına %0.1 ve %0.2 dozajlarındaki sodyum karbonat (Na_2CO_3) ile gerçekleştirildi. 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin tamamlanmasından sonra, az miktardaki silika aerojel ilavesinin hibrit harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, por yapısı özellikleri ve mikro yapı morfolojisi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, % 0.25 aerojel katkılı numunelerde maksimum % 2.4'lük basınç dayanımı düşüşüne karşın numunelerin termal yalıtım özelliklerinin % 28 düzeyinde gelişebildiğini göstermektedir. Hibrit silis dumanı harçlarında jel gözenek oluşumunun yüksek seviyesine (≈ 40) bağlı olarak, silika aerojel ilavesinin harç numunelerinin mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi sınırlanmaktadır. Bu çalışma hibrit silis dumanı harç karışımlarında silika arojellerin kullanımı hakkında yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Doi: 10.24012/dumf.754876

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 June 2020
Revised: 10 January 2021
Accepted: 11 January 2021

Keywords:

Hybrid mortar, silica aerogel, thermal conductivity, silica fume, pore structure.

ABSTRACT

It is a well-known fact that the use of a high amount of silica aerogel in cement-based mixtures contributes significantly to the thermal insulation properties of cement-based materials. However, the current manufacturing cost of silica aerogels is quite expensive compared to traditional insulating materials. This study focuses on the properties of alkali-activated hybrid silica fume mixtures containing silica aerogel powder at a low content rate. For this purpose, aerogel inclusion ratios were designed at 0%, 0.25% and 0.5% by weight of binder and the alkaline activation of the mortar mixtures was carried out with sodium carbonate (Na_2CO_3) at dosage rates of 0.1% and 0.2%, by weight of binder. After 2, 7 and 28 days of curing, the effect of the inclusion of a small amount of silica aerogel powder on the mechanical, thermal conductivity, pore structure properties and microstructure morphology of the hybrid silica fume mortar samples were investigated in detail. Experimental results show that the thermal insulation properties of the samples can be improved by 28% with a maximum compressive strength reduction of 2.4% in 0.25% aerogel-incorporated samples. Due to the high level of gel pore formation (≈ 40) in hybrid silica fume mortars, the negative effect of silica aerogel addition on the mechanical properties of the samples is limited. This study provides a new perspective on the use of silica aerogels in hybrid silica fume mortar mixtures.

* Sorumlu yazar / Correspondence

Levent BOSTANCI

✉ leventbostanci@beykent.du.tr

Giriş

Çimento üretimi için kil ve kireçtaşının temel hammadeler olarak kalsinasyonu zorunlu olmakla birlikte kalsinasyon işlemi önemli miktarda karbondioksit (CO₂) salınımına yol açmaktadır. Son yıllarda, CO₂ salınımını azaltan teknolojiler geliştirilmesine rağmen, çimento üretimi hala dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının tek başına %6'sından sorumludur [1]. Bununla birlikte, doğadaki mevcut kil ve kireçtaşı stoğu da klinker üretimi için çimento endüstrisi tarafından her geçen gün tüketilmektedir [2-4]. Günümüzdeki enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik politikaları, bağlayıcı malzeme endüstrisinde geleneksel bağlayıcı malzeme olan çimentoya kıyasla endüstriyel bağlayıcı malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir. Yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül, çimento endüstrisinde endüstriyel yan ürün kökenli atık türü bağlayıcılar olarak yaygın olarak kullanılabilir. Atık türü bağlayıcılar arasında silis dumanı kalsiyum-silikat yapısına olan üstün katkıları nedeniyle diğer atık türü bağlayıcılara kıyasla oldukça dikkat çekicidir [5].

Silis dumanının, kalsiyum - silikat yapısındaki mikro dolgu özelliği sayesinde, özellikle hidrasyonun ilk günlerinde daha düşük gözenekliliğe sahip bir mikro yapı elde edilebilmektedir. Genel olarak, silis dumanı partikülleri çimento partiküllerine kıyasla 10 kat daha ince parçacıklardan oluşmaktadır, bu da daha hızlı kimyasal reaksiyona ve daha yüksek düzeyde mekanik özelliklere olanak sağlar [6,7]. Hidratasyon esnasındaki kalsiyum hidroksit (CH) tüketimi genellikle silis dumanının kimyasal reaksiyonlardaki aktivasyon yeteneğini göstermektedir. Zelic ve ark.[8] hibrit bağlayıcı karışımlarda silis dumanının hidrasyon kinetiği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, silis dumanının puzzolanik aktivitesinin özellikle ilk 3 günlük kür süresinin tamamlanmasından sonra dikkat çekici olduğunu göstermiştir. Hidratasyon ilerledikçe, silis dumanının CH ile olan aktivasyonu neticesinde dayanıma katkı sunan ilave kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli oluşabilmektedir [9].

Enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik politikaları ile uyumlu olarak çimento matrisinde atık türü bağlayıcıların kısmi olarak çimento ile birlikte kullanımı önem arz etmekle birlikte enerji verimliliği açısından dikkate alınması gereken hususlardan biri de yapılarda mevcut ısı yalıtım özelliklerinin geliştirilmesidir [10]. Binalar, dünya genelinde toplam yıllık enerji tüketiminin %40'ından tek başına sorumludur ve pratik olarak malzemelerde ısı yalıtım özelliklerinin geliştirilmesi için önemli bir çaba harcanması gerektiği açıktır [11].Günümüzdeki mevcut çalışmalar, alkali-aktive edilmiş karışımlar ile ısı yalıtım özelliği yüksek malzemelerin bir araya getirildiği kompozitler üzerine odaklanmaktadır [12].Yakın geçmişte yapılan deneysel çalışmalar nano-teknolojik ısı yalıtım malzemelerinin çimento matrisinde kullanımının potansiyelini işaret etmekle birlikte silika aerojeller üstün yalıtım özellikleri ve çimento matrisi ile olan uyumları dikkate alındığında çimento esaslı malzemeler ile birlikte kullanım açısından oldukça dikkat çekmektedir [13,14].

Silika aerojeller, ilk kez 1930'larda S. Kistler tarafından üretilmiştir [15]. Başlangıçta otomotiv, elektronik, giyim, kimya gibi farklı sektörlerde kullanılan silika aerojeller sonraki dönemlerde üstün yalıtım özellikleri nedeniyle çimento esaslı yapı malzemesi üretiminde de kullanım alanı bulmaya başlamışlardır [16,17]. Silika aerojeller, 500-1200 m²/g'lik yüksek yüzey alanları, 0.003 g/cm³'lük düşük yoğunlukları, %99.8' varan yüksek poroziteleri ve 0.005 W/(m.K)'lık oldukça düşük termal iletkenlik katsayıları ile dünyanın en hafif katısı olarak tanımlanabilmektedir [18,19].

Literatürde yer alan çalışmalar, yüksek üretim maliyetlerine karşın çimento esaslı malzemelerde genellikle yüksek katkı oranlarında silika aerojel kullanımına odaklanıldığını göstermektedir. Ayrıca, silika aerojel katkılı- çimento esaslı malzemelerin ısı yalıtım performansı ile ilgili çalışmaların çoğu yüksek ısı yalıtımı-düşük basınç dayanımı ilişkisine odaklanmıştır. Ng ve diğ. [20] hacimce %80'e kadar aerjel içeren harç karışımları hazırladılar. Deneysel sonuçlar, hacimce %50 aerjel içeren karışımlarda 20 MPa'lık bir basınç

dayanımı ile 0.55 W/(m.K) termal iletkenlik değerinin saptanabileceğini göstermiştir. Aerojel partikülleri ve çimento matrisi arasındaki ara yüzey geçiş bölgesindeki zayıf etkileşimi arttırmak için yeni bir karıştırma prosedürü geliştirilmesi önerilmiştir. Liu ve diğ. [21] harç karışımlarındaki standart kumu %60 seviyesine kadar silika aerojel ile yer değiştirmiştir. %60 aerojel içeriğinde, numunelerde 0.1524 W/(m.K)'lık termal iletkenlik katsayısına karşın 2.15 MPa'lık basınç dayanımı saptanmıştır. Yapılan deneylerde, modifiye edilmiş SiO₂ aerojel partiküllerinin, modifiye edilmemiş SiO₂ aerojel partiküllerine kıyasla çimento matrisi ile daha iyi bir bağlanma mekanizması gösterdiği vurgulanmıştır. Wang ve diğ. [19] oluşturdukları karışımlardaki kumu %100'e kadar bir düzeyde agrega olarak aerojel ile doldurulmuş perlit ile değiştirmiştir. Agrega olarak %100 aerojel içeren karışım numunelerinde, 0.071 W / (mK) termal iletkenlik değeri ve 3.71 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, aerojel etkisinin 0.5 su/bağlayıcı oranında dikkat çekici olduğunu göstermiştir. Silika aerوجلlerin çimento içeriği azaltılmış hibrit bağlayıcı harçlarda kullanımı da oldukça başarılı sonuçlar verebilmektedir. Harç karışımlarına %60 düzeyinde kum ile yer değiştirilmek suretiyle eklenen silika aerوجلler vasıtasıyla uçucu kül içerikli hibrit harç numunelerinde 26.78 MPa'lık basınç dayanımı ve 5.48 MPa'lık eğilme dayanımı değerlerine karşın 0.918 W/(m.K) düzeyinde termal iletkenlik katsayısı elde edilebilmektedir [22].

Öte yandan, sınırlı sayıdaki deneysel çalışmada düşük miktardaki silika aerojel içeriğinin numunelerin mekanik ve termal yalıtım performanslarına olan etkisi araştırılmıştır. Kim ve diğ. [16] %2.0 düzeyine kadar silika aerojel içeren çimento karışımları hazırladılar. %0.5 silika aerojel katkılı numunelerde, 0.4 W/(m.K) termal iletkenlik değeri ile birlikte 13.1 MPa düzeyinde basınç dayanımı saptanmıştır. Çalışmanın sonuçları, aerojel içeriği ile termal yalıtım özellikleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bostancı ve Sola [12] bağlayıcı malzeme ağırlığınca %0.75 ve %1.0 düzeylerinde silika aerojel içeren cüruf harcı karışımları hazırladılar. %0.75 aerojel katkılı

alkali-aktive edilmiş cüruf harcı numunelerinde 34.1 MPa basınç dayanımı değerine karşın termal iletkenlik katsayısı değeri 1.32 W/(m.K) düzeyinde tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, silika aerojel katkısı aracılığı ile gözenekliliği artan por yapısı nedeniyle termal iletkenlik katsayısında önemli bir azalmanın elde edilebileceğini göstermiştir.

Bu araştırmanın odak noktası, düşük katkı oranlarındaki silika aerojel ilavesinin harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, por yapısı özellikleri ve mikro yapı morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmaktır. Literatür, yüksek düzeyde silika aerojel içeren karışımlara kıyasla düşük katkı oranlarında silika aerojel içeren karışımların özellikleri hakkında çok az veri bulunduğunu göstermektedir. Silika aerوجلlerin karışımlarda kum ile yer değiştirilerek kullanıldığı durumlarda meydana gelen yüksek düzeydeki termal yalıtkanlık artışının dramatik düzeyde mekanik dayanım düşüşlerine yol açtığı bilinmektedir. Bununla birlikte, silika aerوجلün çimento katkı maddesi olarak kullanımı için mekanik özellikler ile termal iletkenlik katsayısının değişimi yeterince araştırılmamıştır. Araştırmanın bir diğer yenilikçi yönü, silika aerojel kullanımının çimento karışımları yerine hibrit harç karışımlarında incelenmesidir.

Malzeme ve Yöntem

Kullanılan Malzemeler

Bağlayıcı Malzemeler

Deneysel çalışmalar kapsamında bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197 – 1[23] standardı esaslarına uygun olarak üretilmiş CEM I 42.5 R tipi çimento ve silis dumanından oluşan karma bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Tablo 1'de kullanılan çimento ve silis dumanına ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

	Çimento	Silis dumanı
Kimyasal kompozisyon (%)		
SiO ₂	20.14	93.29
Al ₂ O ₃	4.92	0.48
Fe ₂ O ₃	3.04	1.27
CaO	63.03	0.54
MgO	1.18	0.32
SO ₃	2.94	0.1
K ₂ O	0.73	0.89
Na ₂ O	0.16	0.27
Cl ⁻	0.01	-
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık	3.12	2.31
Yüzey alanı (m ² /kg)	380,4	23,336

Kum

Harç karışımlarında TS-EN 196-1 [24] standardı esaslarına uygun olarak Limak Trakya çimento fabrikasında üretilmiş olan standart Rilem kumu kullanılmıştır. Kullanılan kum için saptanan yoğunluk ve doygun-yüzey kuru özgül ağırlık değerleri sırasıyla 1.35 kg/dm³ ve 2.63'tür.

Alkali Aktivatör

Harç karışımlarında alkali aktivatör olarak sodyum karbonat (Na₂CO₃) kullanılmıştır. Tablo 2'de kullanılan Na₂CO₃'e ait kimyasal kompozisyon görülmektedir.

Tablo 2. Na₂CO₃ kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal kompozisyon	
Na ₂ CO ₃ (%)	>99.5
NaCl (%)	<0.1
Na ₂ SO ₄ (%)	<0.1

Silika Aerojel

Harç karışımlarında toz formda silika aerojel kullanılmıştır. Silika aerojel sipariş üzerine ENSATE Yalıtım Teknolojileri tarafından hazırlanmıştır. Tablo 3'de kullanılan silika aerojel'e ait özellikler görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan silika aerojelin özellikleri.

Yüzey alanı (m ² /g)	790-840
Por çapı (nm)	8-10
Porozite (%)	>%94
Görünür yoğunluk (kg/m ³)	90-100
Yüzey grubu	- OH

Karışım Oranları

Hibrit silis dumanı harç karışımlarına düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerine olan etkisini araştırmak amacıyla 5 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Her karışımdan üçer adet harç numunesi üretilmiştir. Karışımlar, su/bağlayıcı oranları 0.5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Oluşturulan harç karışımlarında iki farklı dozajda alkali aktivatör ve iki farklı katkı oranında silika aerojel katkısı bağlayıcı malzeme ağırlığınca karışımlara ilave edilmiştir. Harç karışımları oluşturulurken gerek silika aerojel katkısının gerekse aktivatör dozajının düşük oranlarda kullanılması planlanmıştır. Tablo 4' de üretilen harç numunelerine ait karışım oranları görülmektedir.

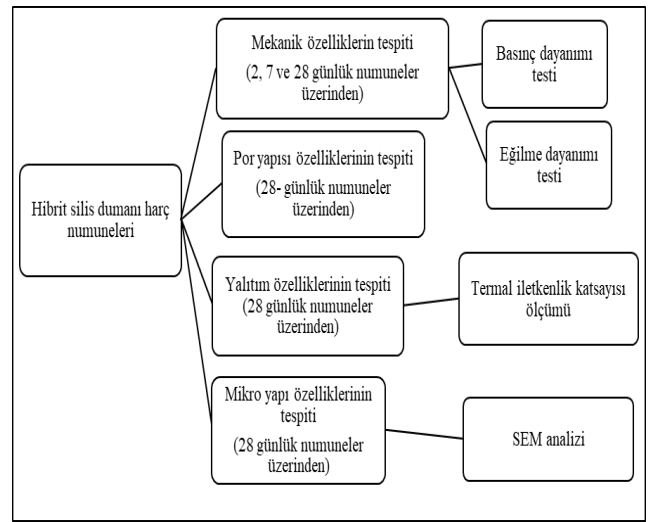
Tablo 4. Karışım oranları.

Karışım	Aerojel (g)	Na ₂ CO ₃ (g)	Silis dumanı (g)	Çimento (g)	Su/bağlayıcı	Su (ml)	Kum (g)
S1	0	0.45	225	225	0.5	225	1350
S2	1.125	0.45					
S3	1.125	0.9					
S4	2.25	0.45					
S5	2.25	0.9					

Numune Hazırlanması, Kür Koşulları Ve Uygulanan Testler

DeneySEL çalışmalar kapsamında 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Deneylerde kullanılan silika aerojel partiküllerinin karışımlardaki homojenliğini sağlamak amacıyla başlangıçta kuru bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımlara su ilavesi azar azar yapılmış ve aerojel partiküllerinin bağlayıcı malzeme ile tamamen kaplanmasına özellikle dikkat edilmiştir.

Üretilen harç numuneleri oda sıcaklığında 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve 2,7 ve 28 günlük farklı kür süreleri için laboratuvar ortamında (20 ± 3 C°) sıcaklığındaki kür havuzunda daldırılmak suretiyle tutulmuştur. Kür süresi gelen harç numuneleri sırasıyla eğilme dayanımı, basınç dayanımı, termal iletkenlik katsayısı ölçümü, mikro yapı analizi ve por yapısı analizi testlerine tabi tutulmuşlardır. Mekanik dayanım testleri 2,7 ve 28 günlük kür süresini tamamlayan tüm numunelere uygulanırken termal iletkenlik katsayısı ölçümü, mikro yapı analizi ve por yapısı analizi testleri sadece 28 günlük harç numunelerine uygulanmıştır. Şekil 1'de uygulanan test programı görülmektedir.



Şekil 1. Test programı

Kür süresini tamamlayan harç numunelerine ilk olarak 3 noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testi TS EN 1015-11 [25] standardı esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme testinin uygulanması esnasında yükleme hızı 50 ± 10 N/s ayarlanmış ve yükleme esnasında orta açıklık 100 mm olacak şekilde eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışıma ait 3 farklı numuneye eğilme testi ayrı ayrı uygulanmış ve üç farklı numune için aritmetik ortalama alınarak karışımın eğilme dayanımı tespit edilmiştir.

Eğilme dayanımı testi sonrasında ikiye ayrılan numuneler muhafaza edilerek her bir karışıma ait 3 farklı numuneden elde edilmiş 6 farklı numune parçasına basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Bu sayede karışımın basınç dayanımı, toplam 6 adet test sonucunun ortalaması olarak tespit

edilebilmiştir. Basınç dayanımı testi, 40x40 mm yüzey alanlı numune parçaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Mekanik dayanım testlerinin tamamlanmasının ardından geriye kalan numune parçaları üzerinden termal iletkenlik katsayısı ölçümü, mikro yapı analizi ve por yapısı analizi testleri gerçekleştirilebilmiştir.

Termal iletkenlik katsayısı ölçümü TCI- Thermal Conductivity Analyzer model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz hassas sensörü sayesinde minimum 3 cm çapa sahip numunelerin termal iletkenlik katsayılarını ölçebilmektedir. Termal iletkenlik testi esnasında ölçüm işleminin hassasiyeti için numune parçalarının yüzey düzgünlüğü ve pürüzsüzlüğüne özellikle dikkat edilmiştir. İletkenlik katsayısı ölçümü, numunelerin farklı bölgeleri için 5 kez tekrarlanmış ve farklı bölgelerden elde edilen ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak harç numunelerinin termal iletkenlik katsayıları tespit edilmiştir.

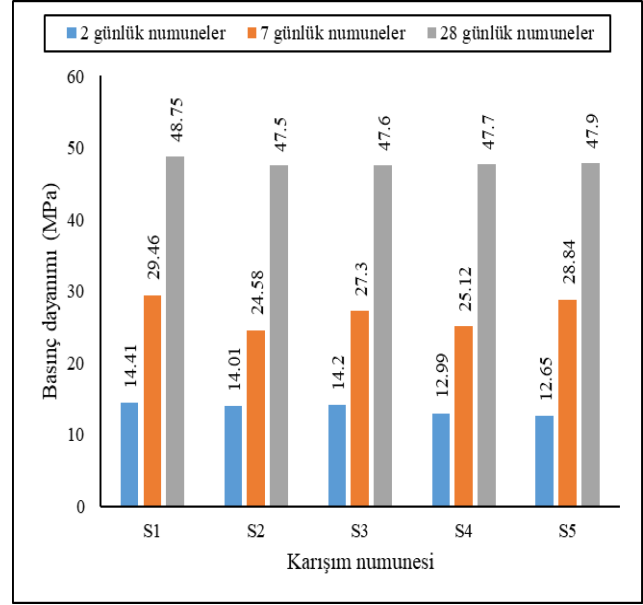
Numune parçaları üzerinden hasarsız olarak gerçekleştirilen termal iletkenlik katsayısı ölçümünün ardından aynı numune parçalarına por yapısı özelliklerinin tespiti için cıva porozimetresi testi uygulanmıştır. Cıva porozimetresi testi ile harç numunelerine ait toplam porozite, por çapı boyutları ve çap dağılımları gibi por yapısı özellikleri tespit edilebilmiştir. Cıva Porozimetresi deneyi, Micromeritics marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz ile 3 – 360,000 nanometre (nm) aralığındaki por çapları tespit edilebilmektedir.

Cıva porozimetresi analizine benzer şekilde 28 günlük basınç dayanımı testinden geriye kalan numune parçaları üzerinden mikro yapı özelliklerinin tespiti amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı testinde oluşan kırılma yüzeyi üzerinden hassas olarak alınan toz halindeki numune parçaları karbon ile kaplanarak mikro yapı analizine uygun hale getirilmiştir. SEM analizleri LEO 1430 VP model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Deneyel Bulgular ve Tartışmalar

Basınç Dayanımı Test Sonuçları

Şekil 2’de 2, 7 ve 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından hibrit harç numunelerinde saptanan basınç dayanımı sonuçları görülmektedir.



Şekil 2. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde basınç dayanımı test sonuçları

Şekil 2’de görüldüğü gibi, kontrol harcı 2 günlükken 14.41 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Genel olarak, harç karışımlarındaki aerjel miktarı arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımları azalmıştır. Karışımlara ilave edilen %0.25’lik aerjel katkısı nedeniyle S2 ve S3 harç örneklerinin 2 günlük basınç dayanımları kontrol örneğinden sırasıyla %2.77 ve %1.45 daha düşüktür. Karışımlara %0.5 oranında aerjel eklendiğinde de harç numunelerinin basınç dayanımlarında benzer eğilimler gözlenmiştir. S4 ve S5 numunelerinin basınç dayanımlarında, S1 örneğine kıyasla, sırasıyla %9.85 ve %12.21 düzeyinde düşüşler tespit edilmiştir. Aerjel parçacıklarının çimentonun hidrasyonu esnasında stabil kaldığı iyi bilinen bir gerçektir [21]. Bu noktada, kimyasal reaksiyonlara katılmayan serbest aerjel partiküllerinin harç por yapısı özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği söylenebilir. Por yapısında yer alan boşluklar, hidrasyon ürünleri yeterince doldurulmadığında dayanımlarda düşüşlere neden olabilmektedir. Öte yandan, aerjel içeriği

kontrol durumuna kıyasla daha düşük basınç dayanımlarına yol açmış olsa da %0.5 aerojel içeriğine kıyasla %0.25'lik aerojel içeriğinde dayanım düşüşleri oldukça sınırlı düzeydedir.

Alkali-aktive edilen kalsiyum-silikat yapısında, aktivatör dozajındaki artış nedeniyle basınç dayanımları da genellikle artış eğilimindedir [26]. 2 günlük kür süresinin tamamlanması ile elde edilen sonuçlar, aktivatör dozajındaki artış nedeniyle gelişen basınç dayanımlarının, özellikle sınırlı dayanım düşüşlerinin saptandığı % 0.25 aerojel içeriğinde saptanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple; S3 numunesinde, S2 numunesine kıyasla kısmi bir dayanım artışı elde edilirken daha yüksek aerojel içeriğinde, artan aktivatör dozajının basınç mukavemeti üzerindeki olası pozitif etkisi tespit edilememiştir (S4 ve S5 numuneleri). Ayrıca, artan aerojel içeriğinin basınç mukavemeti üzerindeki negatif etkisi, artan aktivatör dozajının dayanım üzerindeki pozitif etkisine kıyasla daha baskındır. Bu nedenle, S4-S5 numunelerinde dayanım artışı gözlemlenememiştir. Buradaki en olası mekanizma, artan aerojel katkısı nedeniyle hidrasyonun ilk günlerinde daha yavaş hızda seyreden reaksiyonlar neticesinde harç gözenek yapısında oluşan ve hidrasyon ürünleri ile doldurulamayan aşırı por içeriğine atfedilebilir.

7 günlük numunelerde, 2 günlük kür süresi sonunda tespit edilen dayanım sonuçları ile uyumlu olarak silika aerojel içeren tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımları, kontrol örneğinden daha düşük seviyede tespit edilmiştir. S2 ve S3 harç numunelerinin basınç mukavemetleri, kontrol numunesinden sırasıyla %16.56 ve %7.33 düzeylerinde daha düşüktü. Bununla birlikte, aerojel katkı oranındaki %0.25'ten % 0.5'e olan artış, eşit aktivatör dozajı altında S4 ve S5 numunelerinin dayanımlarında S2 ve S3 numunelerine kıyasla sırasıyla %2.2 ve %5.64 düzeylerinde artışlara neden olmuştur. Dayanım artışları sınırlı düzeyde olsa da deneysel sonuçlar, artan aktivatör dozajına kıyasla artan silika aerojel katkısının dayanım üzerindeki negatif etkisinin, hidrasyonun ilk günleri ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, daha yüksek aerojel içeriğine rağmen, artan aktivatör dozajı sayesinde daha yüksek basınç mukavemetleri elde edilebilmiştir. Öte yandan, 2

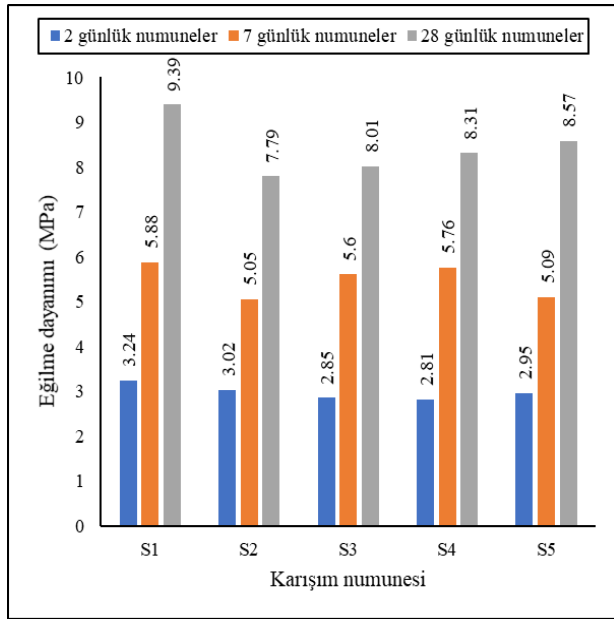
günlük numunelerde gözlemlenen belirsiz eğilimin aksine, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları artan aktivatör dozajları ile uyum içindedir. Aktivatör dozajındaki artış, harç numunelerinin basınç dayanımlarında artışlara olanak sağlayabilmektedir. Eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı sayesinde S3 ve S5 numunelerinin basınç dayanımlarında S2 ve S4 numunelerine kıyasla sırasıyla %11.06 ve %14.8 düzeylerinde artışlar saptanmıştır. Buradaki en olası mekanizma, artan aktivatör dozajının dayanım üzerinde olumlu etki gösteren ilave C-S-H bağları oluşturma potansiyeline atfedilebilir [12].

28 günlük numunelerdeki basınç dayanımları incelendiğinde ise, aerojel içeren tüm numunelerin dayanım gelişiminin 28 günlük kontrol örneğine benzer düzeyde olduğu gözlenmiştir. Kontrol harcında 48.75 MPa'lık bir basınç dayanımı saptanırken S2 ve S3 harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları, kontrol numunesinden sırasıyla %2.56 ve %2.35 düzeylerinde daha düşüktür. %0.5 aerojel katkısı içeren numunelerde de benzer eğilimler gözlenmektedir. S1 numunesine kıyasla S4 ve S5 numunelerinin basınç dayanımlarında %2.15 ve %1.74 düzeylerinde kısmi düşüşler tespit edilmiştir. Daha önce tartışıldığı gibi, hidrasyonun ilk günlerinde özellikle %0.5 aerojel katkılı numunelerde %12 düzeyinde bir basınç mukavemeti düşüşüne neden olan silika aerojel içeriği, 28 günlük numunelerde hidrasyonun ilk günlerine kıyasla önemli ölçüde bir mukavemet azalmasına yol açmamaktadır. Bu, kalsiyum-silikat yapısına ilave edilen silika aerojel partiküllerinin kimyasal olarak inaktif özellikleri nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Öte yandan, silika aerjellerin çimento matrisi ile olan zayıf etkileşimleri ve suyun aerojel partikül yapısında kolayca hareket edebilmesine olanak sağlayan yüksek boşluklu aerojel por yapısı, tespit edildiği gibi sınırlı düzeyde mukavemet azalmasına yol açabilmektedir [27-29]. Diğer taraftan, hidrasyon ilerledikçe, 28 günlük numunelerinin basınç dayanımlarındaki değişiklikler 7 günlük numunelerde tespit edilen eğilime oldukça benzer eğilim göstermektedir. Eşit aerojel içeriğinde, artan aktivatör dozajının numunelerin basınç mukavemeti üzerindeki pozitif etkisi belirgin bir

şekilde görülebilmektedir. Bu sayede S3 ve S5 numunelerinde S2 ve S4 numunelerinin dayanımlarına kıyasla artan aktivatör dozajı nedeniyle kısmi bir mukavemet artışı saptanabilmektedir. Artan aktivatör miktarı, çimento matrisindeki gözenekleri hidrasyon ürünleri ile doldurur ve daha yoğun yapıdaki çimento matrisi daha yüksek basınç mukavemetleri elde edilmesine yol açar [12]. Tüm kür süreleri sonunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, aerjel ilavesi nedeniyle basınç dayanımlarında yaşanan düşüşlerin artan kür süresi ile minimum düzeye indiğini ve 28 günlük kür süresi sonunda aerjel içeren tüm numunelerde maksimum %2.56 düzeyinde dayanım düşüşü saptanabileceğini ortaya koymaktadır.

Eğilme Dayanımı Test Sonuçları

Şekil 3'te 2, 7 ve 28 günlük numunelerde tespit edilen eğilme dayanımı sonuçları görülmektedir.



Şekil 3. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde eğilme dayanımı test sonuçları

Şekil 3'te görüldüğü üzere tüm kür süreleri sonunda elde edilen sonuçlar, düşük katkı oranlarındaki silika aerjel ilavesinin, kontrol karışımına kıyasla tüm aerjel içeren numunelerde daha düşük eğilme dayanımlarının saptanmasına yol açtığını göstermektedir. 2 günlük kür süresi sonunda eşit aktivatör dozajında artan aerjel içeriğine bağlı olarak S1 numunesine kıyasla S3 ve S5 numunelerinin

eğilme dayanımlarında düşüşler tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarındaki eğilime benzer yönde, artan aktivatör dozajının eğilme mukavemeti gelişimi üzerindeki olumlu etkisi düşük aerjel katkısı içeren S2 ve S3 örnekleri numunelerinde tespit edilememiştir. Ayrıca, eşit aerjel katkı oranında artan aktivatör dozajının, 2 ve 7 günlük numunelerde aktivatör dozajının bir fonksiyonu olarak sürekli mukavemet gelişimi için mutlak faydalı olmadığı görülmektedir. Ancak yine de 2 günlük kür süresi sonunda eşit aerjel katkı oranında artan aktivatör dozajı sayesinde S4 numunesine kıyasla S5 numunesinde %4.98 düzeyinde eğilme dayanımı artışı saptanırken 7 günlük numunelerde S2 numunesine kıyasla S3 numunesinin dayanımındaki artış %10.89 düzeyindedir.

Hidrasyonun ilerlemesi ile 28 günlük kür süresi sonunda, 2 ve 7 günlük numunelerden farklı olarak artan aerjel içeriğinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi dikkat çekiciydi. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, sonuçların 28 günlük basınç dayanım sonuçları ile uyumlu son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Daha önce tartışıldığı gibi, kontrol numunesinin eğilme mukavemeti basınç mukavemetine benzer şekilde aerjel içeren tüm numunelerden biraz daha yüksektir. Ancak, karışımlarda aktivatör ve aerjel içeriklerinin artan dozajı, numunelerin eğilme mukavemetini de basınç dayanımında olduğu gibi olumlu yönde etkileyebilmektedir. Eşit aktivatör dozajında artan aerjel içeriği sebebiyle S4 ve S5 numunelerinin eğilme mukavemetlerinde S2 ve S3 numunelerine kıyasla sırasıyla %6.67 ve %6.99 düzeylerinde artışlar tespit edilmiştir. Aktivatör dozajı S2-S4 ve S3-S5 karışımlarında sabit tutulduğundan, eğilme mukavemetini arttıran tek parametre artan aerjel içeriğidir. Benzer şekilde eşit aerjel içeriğinde artan aktivatör dozajı sayesinde, S3 ve S5 numunelerinin eğilme mukavemetlerinde S2 ve S4 numunelerine kıyasla %3'e kadar kısmi artışlar saptanmıştır. Bu açıdan; eğilme dayanımı testinden elde edilen sonuçlar, basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. Bu noktada, 28 günlük aerjel içeren numunelerde artan aerjel içeriğinin ve aktivatör dozajının hem basınç hem de eğilme

dayanımlarını kısmi olarak geliştirdiği net olarak söylenebilir.

Cıva Porozimetresi Test Sonuçları

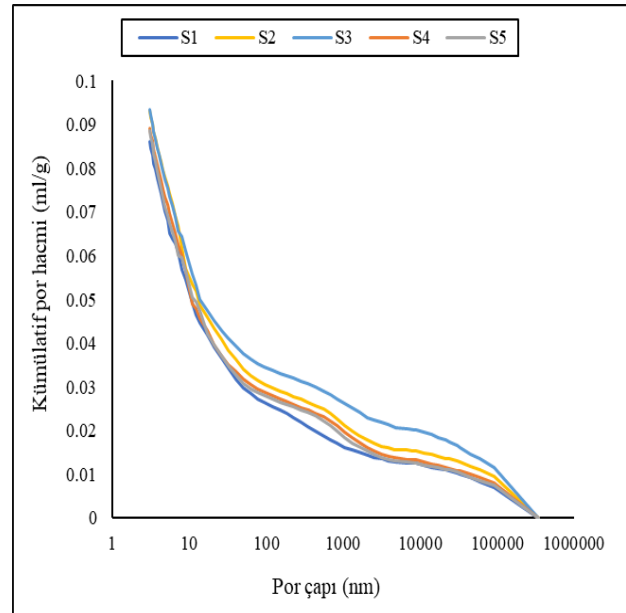
Cıva porozimetresi analizi, çimento esaslı malzemelerde por yapısı özelliklerinin gelişimini anlamak için sıkça tercih edilen temel ve güvenilir bir tekniktir. Numunelerin toplam porozite, ortalama por çapı ve por boyutu dağılımları gibi por yapısı özellikleri bu yöntemle ölçülebilir [30,31]. Bu çalışmada, por yapısının değerlendirilmesi boşlukların silindirik olduğu ve temas açısının 140° olduğu olağan cıva porozimetresi varsayımına göre gerçekleştirilmiştir [32,33]. Cıva porozimetresi analiz sonuçları Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Cıva porozimetresi analiz sonuçları

Numune	Toplam porozite (%)	Alansal ortalama por çapı (nm)	Hacimsel ortalama por çapı (nm)
S1	16.74	4.8	10.4
S2	18.14	5	10.8
S3	18.04	4.7	11.1
S4	17.5	4.8	10.5
S5	17.34	4.6	10.3

S1 kontrol örneğinde toplam porozite değeri %16.74 olarak ölçülmüş olup tüm numuneler arasında minimum seviyededir. %0.25 ve %0.5 katkı oranlarındaki aerojel içerikleri nedeniyle aerojel içeren tüm karışımlarda kontrol numunesine kıyasla daha yüksek düzeyde porozite değerleri saptanmıştır. Bu durum, harç karışımlarına ilave edilen düşük miktardaki silika aerojel katkısının daha yüksek por yapısı karakteristiklerinin ölçülmesine yol açtığını ve aerojel ilavesinin harç por yapısında açık gözeneklerin oluşumunu teşvik ettiğini işaret etmektedir. Beklenildiği gibi, artan aerojel içeriği toplam porozitenin yanı sıra ortalama por çapları üzerinde de genişletici etki yaratmaktadır. S1 kontrol numunesine kıyasla aerojel içerikli numunelerinin hacimsel ortalama por çapı ve

alansal ortalama por çapı değerlerinde sırasıyla % 6.73 ve %4.16'a varan kısmi artışlar ölçülmüştür. Bununla birlikte, eşit aerojel katkı oranında aktivatör dozajındaki % 0.1'den %0.2'ye olan artış, S2 ve S4 numunelerine kıyasla S3 ve S5 numunelerinin alansal ortalama por çapı değerlerinde sırasıyla %6 ve %4.16 düzeylerinde düşümlere neden olmaktadır. Buradaki en olası mekanizma, artan aktivatör dozajı ile hızlanan puzolanik reaksiyonun olumlu etkisine atfedilebilir. Daha önce tartışıldığı gibi, artan aktivatör dozajı hidrasyon ürünleri ile yeterince dolmamış olan gözenekleri doldurmakta ve gözenek yapısı karakteristiklerinde daha düşük değerlere yol açabilmektedir [12].

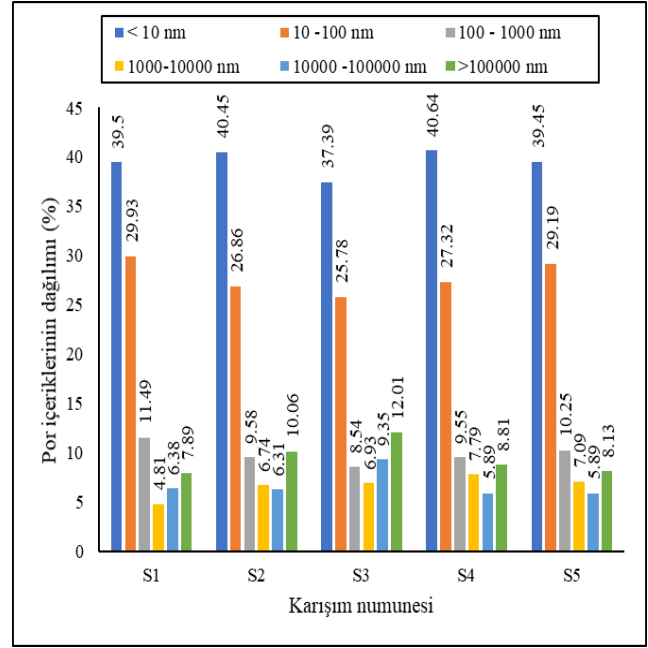


Şekil 4. Hibrit harç numunelerinde kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi

Şekil 4, 28 günlük kür süresinin tamamlanması ile tüm numuneler için kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisini ifade eden eğrilerin gelişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, aerojel katkısı içermeyen kontrol numunesi aerojel katkılı numunelere kıyasla ölçüm işleminin gerçekleştirildiği 3 ila 350,000 nm arasındaki tüm gözenek boyutlarında daha düşük kümülatif por hacmi sergilemiştir. Bu nedenle, numunelerin por yapısındaki toplam por hacminin porozite sonuçlarına da yansıtıldığı gibi düşük katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı vasıtasıyla kolayca arttırılabileceği görülmektedir. Kontrol numunesi için tespit edilen davranış ile uyumlu

olarak poroziteleri \approx %18 olan S2-S3 numuneleri, poroziteleri \approx %17 olan S4-S5 numunelerine kıyasla 3 ve 350,000 nm arasındaki por çapı aralığı boyunca daha yüksek por hacmi sergilemiştir. Bu nedenle, aerojel içeren numunelerin por hacmindeki artışın, numunelerin toplam porozite değerleri ile uyumlu olduğu net olarak gözükmemektedir. Öte yandan, toplam porozite değerindeki artış ile uyumlu olarak S4 örneğinin kümülatif por hacmi – por çapı eğrisinin tüm por çapı aralıkları boyunca S5 örneğine kıyasla yukarıda seyretmesi oldukça makuldür. Bununla birlikte, beklenenin aksine, S3 numunesinin kümülatif por hacmi eğrisi, daha düşük porozite değerine rağmen 20 ve 350,000 nm arasındaki por boyutlarında S2 örneğine kıyasla daha üst seviyede seyretmektedir. Marjinal davranışa yol açan esas faktör, ilgili numunelerin hacimsel ortalama por çapı değerlerinden görülebilmektedir. Eşit aerojel içeriğinde artan aktivatör dozajı sebebiyle toplam porozite ve alansal ortalama por çapı karakteristiklerindeki düşümlere rağmen, hacimsel ortalama por çapında ölçülen artış, por yapısının gelişimi üzerinden baskın etki yaratabilmektedir.

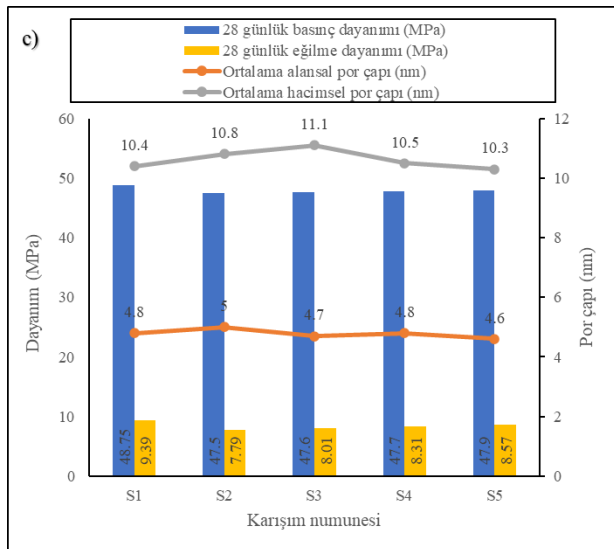
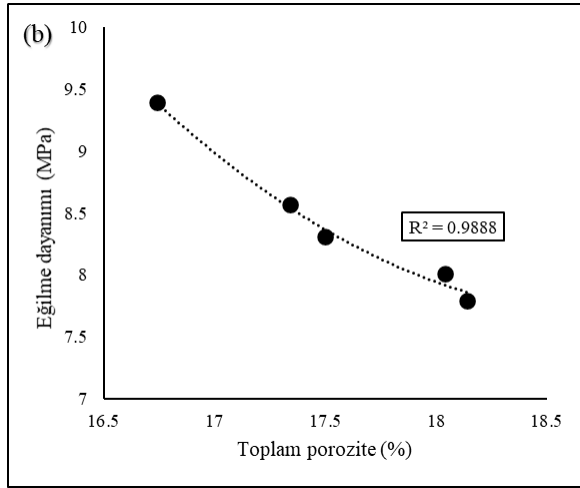
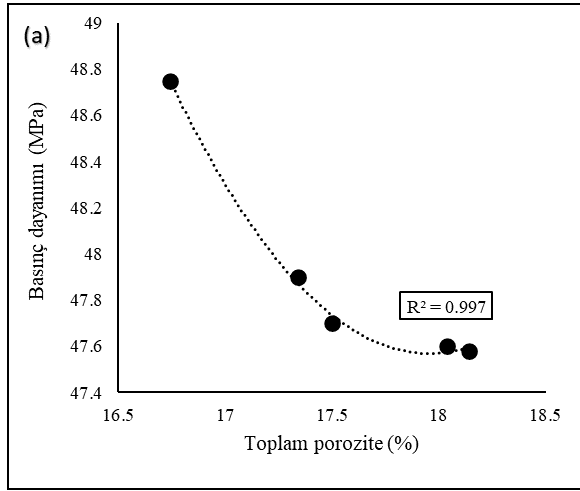
Çimento esaslı malzemelerin por yapılarının değerlendirilmesinde pek çok por yapısı sınıflandırması önerisi mevcut olmasına rağmen boşluklar genel olarak jel boşlukları (<10 nm), kapiler boşluklar (10 – 10,000 nm) ve makro boşluklar (>10,000 nm) olmak üzere üç ana kategoride değerlendirilebilmektedir [34]. Farklı aerojel katkı oranlarındaki harç numunelerinin por yapısı gelişimleri yukarıda belirtilen sınıflandırma esasına göre Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Harç por yapısında por içeriklerinin dağılımı (%)

Şekil 5'te görüldüğü gibi, hibrit karışımlarda kullanılan silis dumanının gözenek doldurma etkisine bağlı olarak, 10 nm ve altındaki boyutlardaki gözeneklerin hacmi, değişen aerojel içeriği ve aktivatör dozajına rağmen toplam por hacminin %37.39 ile %40.64'ü arasında değişmektedir. Bu durum, alkali-aktif edilmiş hibrit harç karışımlarında bağlayıcı malzeme içeriğinde silis dumanının kullanılmasının geleneksel çimento karışımlarına kıyasla daha yüksek jel boşluk oluşumuna yol açtığını işaret etmektedir. Öte yandan, 100,000 nm'den büyük çaplı boşluk oluşumlarındaki değişim incelendiğinde por yapısı gelişimi aerojel ilavesinden güçlü bir şekilde etkilenmiştir. Bu nedenle, kontrol numunesinde ölçülen 100,000 nm'den büyük por çaplarının oluşturduğu makro gözenek oluşumu %7.89 düzeyinde iken S2, S3, S4 ve S5 örneklerinde daha yüksek bir makro gözenek içeriği (sırasıyla %10.06, %12.01, %8.81 ve %8.13 düzeylerinde) tespit edilmiştir. Beklendiği gibi, %0.25 aerojel ilavesi için S2-S3 numunelerinde %0.5 aerojel içerikli numunelere kıyasla numunelerin daha yüksek toplam porozite değerleri ile uyumlu olarak daha yüksek makro gözenek oluşumları tespit edilmiştir. Bu nedenle, makro gözenek oluşumlarının numunelerin toplam porozite değerleri üzerinde belirleyici faktör olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca, partikül boyutu 8-10 nm arasında olan silika

aerojel partikülleri, karışımlara ilave edildiklerinde kendi jel boşluk düzeyindeki por çaplarına rağmen harç por yapısında makro gözenek oluşumunu tetikleyebilmektedir.



Şekil 6. Dayanım değerleri ile por yapısı parametreleri arasındaki ilişkiler

Şekil 6'da harç numunelerinde tespit edilen mekanik özellikler ile por yapısı karakteristikleri arasındaki ilişkiler görülmektedir. Mevcut ilişkiler, karışımlara düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin anlaşılmasına katkı sunabilecek düzeydedir. Elde edilen sonuçlar, por yapısı karakteristiklerinin, harç numunelerinin basınç ve eğilme mukavemetlerini önemli ölçüde etkileyebildiğini işaret etmektedir. Harç numunelerinin porozite değerlerindeki artış, alkali-aktivasyonu ile oluşturulan C-S-H jeli ile yeterince doldurulamayan büyük gözenekleri işaret etmektedir. Ek olarak, daha yüksek porozite değerlerinde saptanan daha yüksek ortalama çap değerlerinin varlığı boşluklu yapıyı doğrulamaktadır. Bu nedenle, porozite ve alansal ortalama por çapı değerleri arttığında, harçların hem basınç hem de eğilme mukavemetleri azalmaktadır. Eşit aerojel katkısında aktivatörün artan dozajı, daha önce tartışıldığı gibi, porozite ve ortalama por çapı değerlerinde düşüşlerle sonuçlanmıştır. Cıva porozimetresi sonuçlarına göre artan aktivatör dozu ilave C-S-H jeli oluşumuna katkıda bulunabilir. Gözeneklerde ilave C-S-H jelinin bulunması, daha az boşluklu ve daha yoğun boşluk yapısı elde edilmesine yol açar ve daha az boşluklu yapı numunelerin dayanım değerlerini olumlu yönde etkiler. Deneysel sonuçlar, harç karışımlarına ilave edilen düşük katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı ile harç numunelerinin toplam porozite değerlerinde maksimum %1.4'lük bir artışın gözlenebileceğini ve artan porozite sebebiyle de basınç mukavemetinde maksimum %2.56'lık bir azalmanın oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, basınç dayanımındaki sınırlı düşüşe karşın eğilme mukavemetinde %17'ye kadar saptanan kayıplar dikkat çekicidir. Tespit edilen mukavemet düşüşü esasen alansal ortalama por çapı değerinde ölçülen %4.16'a kadar olan artışla ilişkilidir. Bu noktada, aerojel katkılı numunelerin eğilme performanslarının, basınç etkisi altındaki performanslarına kıyasla por yapısı karakteristiklerindeki bir artışa daha duyarlı olduğu sonucuna varılabilir. İlâveten, mekanik özellikler ile por yapısı karakteristikleri arasında saptanan ilişkiler alkali-aktive edilmiş hibrit silis dumanı harçlarında 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının numunelerin toplam

porozite değerleri aracılığı ile sırasıyla $R^2=0.99$ ve 0.98 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Tespit edilen yüksek korelasyon, hibrit silis dumanı harçlarının tasarımı için por yapısı karakteristiklerinin esas alınmasını teşvik edici olmaktadır.

Termal İletkenlik Katsayısı Sonuçları

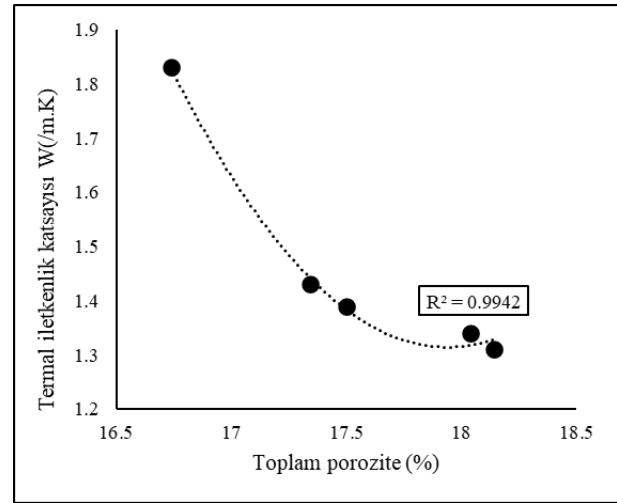
Tablo 6'da hibrit harç numunelerinin termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları görülmektedir. Harç örneklerinde saptanan termal iletkenlik katsayıları 1.31 ile 1.83 W/(m.K) aralığında değişmektedir.

Tablo 6. Termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları

Termal iletkenlik katsayısı W/(m.K)	
S1	1.83
S2	1.31
S3	1.34
S4	1.39
S5	1.43

Tablo 6'da görüldüğü gibi, termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçlarına dayanarak karışımlara ilave edilen düşük miktardaki silika aerojel katkısı sayesinde hibrit harç numunelerinin termal yalıtkanlık özelliklerinin önemli ölçüde gelişebileceği görülmektedir. Kontrol numunesinde termal iletkenlik katsayısı 1.83 W/(m.K) olarak saptanmıştır. Harç karışımlarına ilave edilen %0.25 oranındaki aerojel katkısı sayesinde S2 ve S3 harç numunelerinin termal iletkenlik katsayıları kontrol örneğinden sırasıyla %28.41 ve %26.77 düzeylerinde daha düşüktür. Termal iletkenlik katsayılarındaki düşüşler esas olarak aerojel partiküllerinin üstün ısıl yalıtım özelliklerinden kaynaklanmaktadır [30,31]. Harç karışımlarına % 0.5 katkı oranında aerojel dahil edilmesi durumunda da numunelerin yalıtkanlık performanslarında benzer eğilimler gözlenmiştir. Kontrol numunesine kıyasla S4 ve S5 numunelerinin ısıl iletkenliklerinde sırasıyla %24.04 ve %21.85 düzeylerinde düşüşler olduğu saptanmıştır. Öte yandan, hem %0.25 hem de %

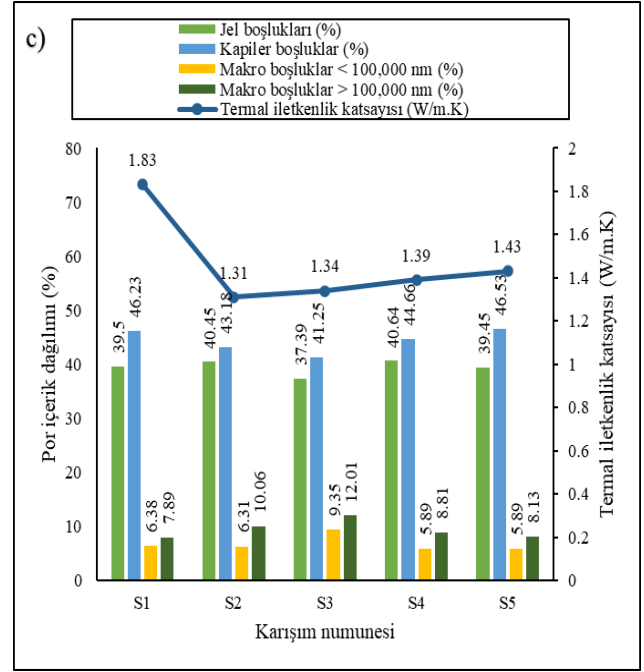
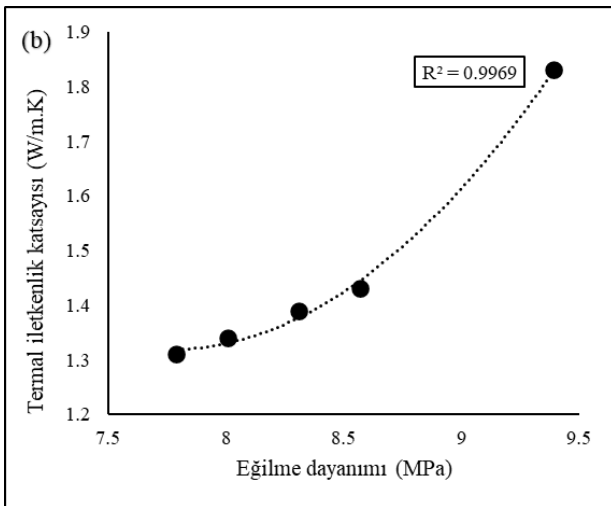
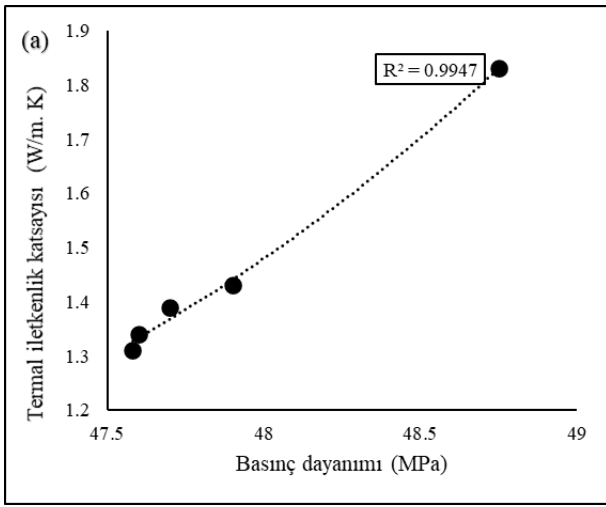
0.5 aerojel katkı oranlarında artan aktivatör dozajı ile termal iletkenlik katsayılarında kısmi düzeyde artışlar ölçülmüştür. Daha önce tartışıldığı gibi, aktivatör dozajının artırılması, daha az gözenekli yapıya sahip daha yoğun çimento matrisine yol açabilmektedir. Bu nedenle, ısı transferi için katı parçacıklar arasında kolaylaşan etkileşim, yukarıda gösterilen iletkenlik katsayılarındaki artışı açıklayabilir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar harç karışımlarında düşük miktardaki aerojel ilavesinde dahi numunelerin ısı yalıtım özelliklerinin %28 düzeyinde geliştiğini işaret etmektedir.



Şekil 7. Toplam porozite – termal iletkenlik katsayısı ilişkisi

Şekil 7, harç numunelerinde ölçülen toplam porozite-termal iletkenlik katsayısı değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Silika aerojel partiküllerinin üstün ısı yalıtım özelliklerine ek olarak, aerojel katkılı çimento esaslı malzemelerde por yapısının gelişimi, numunelerde daha düşük iletkenlik katsayılarının ölçülmesine katkıda bulunabilmektedir. Sonuçlardan, bağlayıcı malzeme içeriğine az miktarda silika aerojel tozu ilave edildiğinde ısıl muhafaza performansında önemli bir artış olduğu görülebilir. Hibrit silis dumanı harçlarında yüksek düzeydeki jel oluşumundan kaynaklı kararlı por yapısı nedeniyle numunelerin toplam porozite ve termal iletkenlik katsayıları arasında $R^2=0.99$ değeri ile anlaşılabilir üzere güçlü bir etkileşim bulunmaktadır. Kontrol numunesine kıyasla, S2 numunesinin toplam porozite değerinde maksimum %1.4'lük bir artış numunenin termal iletkenlik katsayısında

%28.41'lik düşüğe olanak sağlayabilmektedir. Gözenek yapısı ayrıca diğer numunelerin iletkenlik katsayıları üzerinde de bağlayıcı olmuştur. Eşit aktivatör dozajında aerojel içeriğinde %0.25'ten %0.5'e olan artış S2 ve S3 numunelerine kıyasla S4 ve S5 numunelerinin toplam porozite değerlerinde 0.64% ve 0.7% düzeylerinde düşümlere neden olmaktadır. Bu nedenle, daha yüksek aerojel içeriğinde por yapısı özelliklerinde tespit edilen düşüşler oluşan daha yoğun matrisi işaret etmekte ve bu durum artan partikül etkileşimi ile daha iyi ısı iletkenliğine yol açmaktadır.



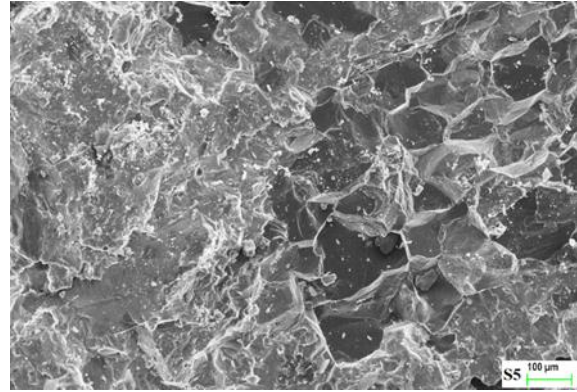
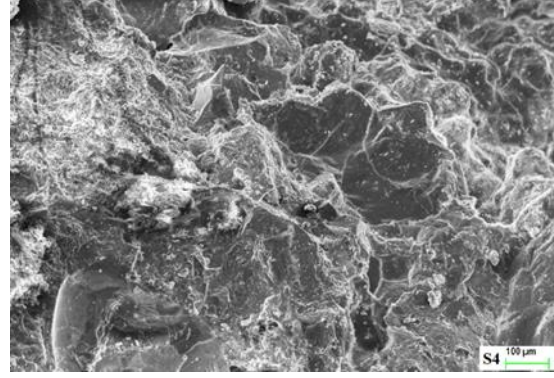
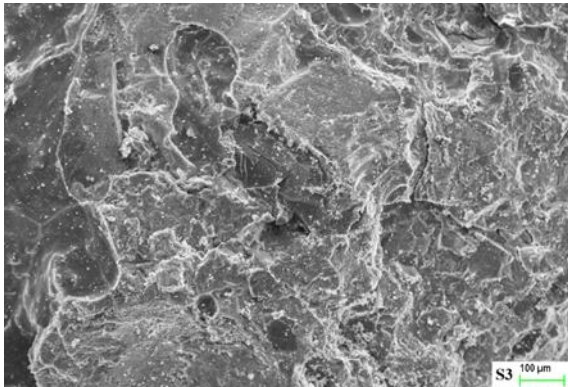
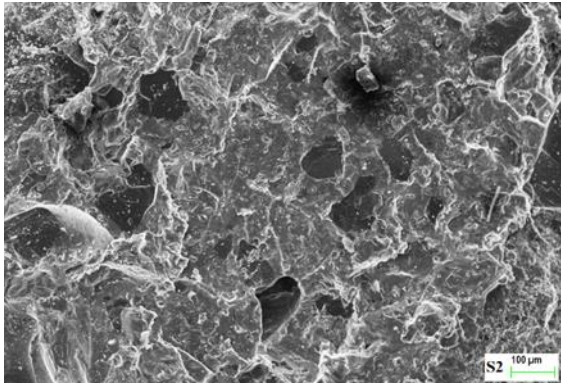
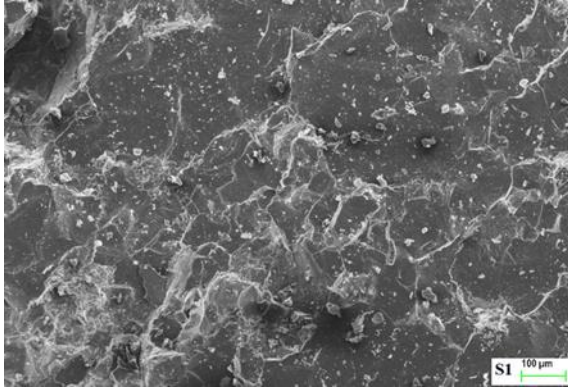
Şekil 8. Harç numunelerinin mekanik, por yapısı özellikleri ve termal iletkenlik katsayıları arasındaki ilişkiler

Şekil 8, harç numunelerinde tespit edilen mekanik özellikler, por yapısı özellikleri ve termal iletkenlik katsayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Beklendiği gibi, por yapısı karakteristikleri ile olan uyum göz önüne alındığında, dayanım sonuçları termal iletkenlik test sonuçları ile uyum içerisindedir. Numunelerde eşzamanlı olarak saptanan iletkenlik ve mukavemet düşüşleri, aerojel içeriğinde harç gözenek yapısındaki meydana gelen ilave gözenek oluşumuna bağlanabilir. Öte yandan, 100.000 ile 350.000 nm arasındaki por çapı aralıklarında saptanan por içerikleri, %0.5'lik aerojel katkı numunelere kıyasla daha düşük aerojel içeriğine rağmen %0.25 aerojel katkı numunelerde saptanan daha düşük termal iletkenlik katsayısı değerlerinin sebeplerini ortaya koymaktadır. S2 ve S3 numunelerinde 100.000 ve 350.000 nm arasındaki por içeriği, toplam por içeriğinin %10.06 ve %12.01'si kadardır. Bununla birlikte, % 0.5 aerojel katkısı durumunda, aynı çap aralığındaki por içeriği S4 ve S5 numunelerinde sırasıyla %8.81 ve %8.13 düzeylerinde saptanmıştır. Ayrıca, söz konusu gözenek boyutlarındaki por içeriği kontrol numunesinde minimum seviyededir (%7.89). Deneysel sonuçlar, numunelerdeki makro gözenek oluşumunun numunelerin termal

iletkenlik davranışı üzerindeki etkinliğini işaret etmektedir. Ayrıca, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı, numunelerin toplam porozite ve alansal ortalama por çapı gibi por yapısı özelliklerinde dramatik düşümlere neden olmaktadır, bu durum da artan aktivatör dozajının numunelerin termal iletkenlik katsayısında yol açtığı artışı desteklemektedir.

SEM Analizi

Taramalı elektron mikroskobu aracılığı ile harç numunelerinin mikro yapı özelliklerini tespit etmek amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Mekanik testlerden geriye kalan parçaların kırılma yüzeyinden hassas olarak alınan örnekler SEM analizine tabi tutulmuş ve elde edilen mikro yapı görüntülemeleri Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. 200x büyütmede harç örneklerinin SEM mikrografları

SEM mikro yapı görüntülemelerinde ayırt edilebileceği üzere düzgün olarak dağılmış aerojel partiküllerini içeren faz mikro yapı görüntülemelerinde açık gri renkte ve aerojel içermeyen homojen çimento matrisi ise koyu gri renkte belirginleşerek ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, aerojel içerik oranında %0.25'ten %0.5'e olan artış, S4 ve S5 numunelerinde S2 ve S3 numunelerine kıyasla daha belirgin ve daha açık gri tonlarda görsel olarak artan aerojel içeriğinin gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır. Silika aerojel partiküllerinin kalsiyum-silikat yapısındaki inert özelliklerinin bir sonucu olarak, yüzeyde aerojel toz parçacıklarının izleri belirgindir. Bu özellik, iyi hidrate olmuş çimento matrisinde aerojel partiküllerinin belirgin şekilde ayırt edilmesine olanak sağlar. S1 numunesinin SEM görüntülemesinde, diğer örneklerle karşılaştırıldığında, çimento matrisi en düşük seviyede ölçülen toplam porozite değeri ile uyumlu olarak oldukça yoğun formda görünmektedir. Düzgün yüzey dokusuna sahip olan yoğun matris yapısı, ısı transferi için katı parçacıklar arasındaki etkileşimi kolaylaştırmakta ve bu nedenle bu örnekte en

yüksek termal iletkenlik katsayısı kontrol numunesinde saptanmaktadır. Diğer yandan, aerojel katkılı numunelerin mikro yapı görüntülemeleri, aerojel partiküllerinin çimento matrisine dahil edilmesinin aerojel partikülleri ile çimento matrisinin etkileşim bölgelerinde gözenekli bir etkileşim mekanizmasına yol açtığını göstermektedir. Bu mekanizma sadece ısı transfer seviyesini güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda ısı transferini de büyük ölçüde engeller. Ayrıca, aerojel parçacıklarının hidrofobik yapısı, partiküllerin matris ile olan birleşim bölgelerinde su emilimini azaltarak ısı yalıtım hedefine katkı sunmaktadır [27].

Sonuçlar

Bu çalışmada, çimento katkı maddesi olarak düşük içerikteki silika aerojel ilavesinin hibrit harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, gözenek yapısı özellikleri ve mikro yapı morfolojisi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Harç karışımlarına çimento ağırlığınca düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısı numunelerin termal yalıtkanlık performansı üzerinde oldukça etkilidir.
- %0.25 aerojel katkılı numunelerde sadece %2.56 düzeyindeki basınç dayanımı düşüşüne karşın termal yalıtkanlık performansı %28 seviyesine kadar gelişebilmektedir.
- Geleneksel çimento harçlarından farklı olarak alkali-aktif edilmiş hibrit silis dumanı harçlarında jel gözenek oluşumu toplam por hacminin yaklaşık %40'ı düzeyindedir.
- Jel gözenek oluşumunun yüksek seviyesine bağlı olarak, kapiler gözeneklerin oluşumu sınırlanmakta ve böylece karışımlara ilave edilen silika aerojel katkısının harç numunelerinin basınç mukavemeti üzerindeki olumsuz etkisi sınırlanabilmektedir.
- Harç karışımlarına ilave edilen düşük katkı oranındaki silika aerojel içeriğinin numunelerin termal yalıtkanlık

performansı üzerindeki pozitif etkisi numunelerin por yapısı özellikleri gelişimi üzerindeki baskın etkisi nedeniyle oluşmaktadır. Bu sebeple numunelerin porozite değerleri ile termal iletkenlikleri arasında yüksek korelasyon saptanabilmektedir ($R^2 > 0.99$).

- Alkali-aktif edilmiş hibrit silis dumanı harçlarında numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile termal iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki de oldukça güçlüdür ($R^2 > 0.99$).
- Harç numunelerinin termal yalıtkanlık performansı artan por hacmi ile orantılı olup toplam porozite ve alansal ortalama por çapı değerlerinde eş zamanlı artış olması durumunda, ısı iletkenlik katsayısındaki azalma maksimum düzeyde seyretmektedir.
- Harç karışımlarına ilave edilen silika aerojel katkısının numunelerin mekanik performansı üzerindeki olumsuz etkisi basınç dayanımlarına kıyasla daha çok eğilme performansı üzerindedir. Yine de eğilme dayanımlarında tespit edilen maksimum %17 düzeyindeki düşüşe karşın saptanan minimum 7.79 MPa'lık eğilme dayanımı değeri mekanik performans açısından oldukça yeterli seviyededir.
- Aerojel partiküllerinin çimento matrisine dahil edilmesi, çimento matrisinde aerojel partiküllerinin çevresinde gözenekli ve zayıf bir katı-katı etkileşim mekanizmasına yol açmaktadır. Bu mekanizma mekanik dayanımlarda kısmi düzeyde düşüslere sebep olsa da ısı transfer oranının düşürülmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Özetle bu çalışma, aerojel partiküllerinin harç karışımlarında yüksek katkı oranlarında yer almasını öngören aerojel-kum yer değişimi esaslı tasarım tercihlerine alternatif olarak, harç karışımlarına çimento katkı maddesi olarak aerojel ilavesinin numunelerin mekanik, por yapısı, termal iletkenlik ve mikro yapı özellikleri üzerindeki etkisini detaylı olarak göstermiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar,

çimento katkı maddesi olarak silika aerojel ilavesi durumunda, harç numunelerinin mekanik özelliklerinde sınırlı düzeydeki düşümlere karşın numunelerin termal yalıtkanlığında dikkate değer bir artışın mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır. Karışımın homojenliği ve aerojel partiküllerinin çimento matrisinde iyi dağılımı, gelişmiş ısı yalıtımı ile mekanik özelliklerin saptanmasında önemli bir faktör gibi görünmektedir. Son olarak, bu çalışma alkali-aktif edilmiş hibrit silika aerojel içerikli harçların tasarımı hakkında yeni bir perspektif açarak sürdürülebilirlik politikaları ile uyumlu harç tasarımı gelişimine katkı sunmaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Arbi, K., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A. (2013). Alkali-activated blends of calcium aluminate cement and slag/diatomite, *Ceramics International*, **39**, 9237–9245.
- [2]. Cheah, C. B., Tan, L. E., Ramli, M. (2019). The engineering properties and microstructure of sodium carbonate activated fly ash/ slag blended mortars with silica fume, *Composites Part B*, **160**, 558–572.
- [3]. Madani, H., Norouzfard, M. N., Rostami, J. (2018). The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete, *Construction and Building Materials*, **174**, 356–368.
- [4]. Imbabi, M. S., Carrigan, C., McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology, *International Journal of Sustainable Built Environment*, **1**, 194–216.
- [5]. Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N. (2019). An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials, *Resources, Conservation and Recycling*, **144**, 297–309.
- [6]. Schröfl, C., Gruber, M., Plank, J. (2012). Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Research*, **42**, 1401–1408.
- [7]. Gesoglu, M., Guneyisi, E., Asaad, D.S., Muhyaddin, G.F. (2016). Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica, *Construction and Building Materials*, **102**, 706–713.
- [8]. Zelic, J., Rusic, D., Veza, D., Krstulovic, R. (2000). The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration, *Cement and Concrete Research*, **30**, 655–1662.
- [9]. Rossen, J.E., Lothenbach, B., Scrivener, K. L. (2015). Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition, *Cement and Concrete Research*, **75**, 14–22.
- [10]. Ng, S., Jelle, B. P., Stæhli, T. (2016). Calcined clays as binder for thermal insulating and structural aerogel incorporated mortar, *Cement and Concrete Composites*, **72**, 213–221.
- [11]. Luo, Y., Jiang, Y., Feng, J. (2019). Synthesis of white cement bonded porous fumed silica-based composite for thermal insulation with low thermal conductivity via a facile cast-in-place approach, *Construction and Building Materials*, **206**, 620–629.
- [12]. Bostancı, L., Sola, O.C. (2018). Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Aerogel-Incorporated Alkali-Activated Slag Mortars, *Advances in Civil Engineering*, **2018**, 1-9.
- [13]. Szodrai, F., Lakatos, Á., Kalmár, F. (2016). Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load, *Energy*, **115**, 820–829.
- [14]. Lakatos, Á. (2019). Stability investigations of the thermal insulating performance of aerogel blanket, *Energy and Buildings*, **185**, 103–111.
- [15]. Huang, Y., Niu, J.-l. (2015). Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong, *Construction and Building Materials*, **94**, 57–72.
- [16]. Kim, S., Seo, J., Cha, J., Kim, S. (2013). Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel, *Construction and Building Materials*, **40**, 501–505.
- [17]. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., Riffat, S.B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **34**, 273–299.
- [18]. Dorcheh, A.S., Abbasi, M.H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, *Journal of Materials Processing Technology*, **199**, 10–26.
- [19]. Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., Zhang, Y., Li, Z. (2018). Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel, *Construction and Building Materials*, **188**, 747–757.
- [20]. Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., Wallevik, O. H. (2015). Experimental investigations

- of aerogel-incorporated ultra-high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, **77**, 307–316.
- [21]. Liu, Z. H., Ding, Y.D., Wang, F., Deng, Z.P. (2016). Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel, *Construction and Building Materials*, **122**, 548–555.
- [22]. Al Zaidi, A. K. A., Demirel, B. , Atis, C.D. (2019). Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica, *Construction and Building Materials*, **199**, 501–507.
- [23]. TSI, TS EN 197-1. Cement-Part 1: Compositions and conformity criteria for common cements. Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute; 2002.
- [24]. TSE, TS EN 196-1. Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength. Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute; 2009 [in Turkish].
- [25]. TS EN 1015-11 Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar.
- [26]. Bilim, C. , Atis, C.D. (2012). Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, **28**, pp. 708–712.
- [27]. Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study, *Construction and Building Materials*, **52**, 130–136.
- [28]. Woignier, T., Phalippou, J. (1988). Mechanical strength of silica aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **10**, 404–408.
- [29]. Júlio, M.F., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., de Bito, J. (2016). Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders, *Cement and Concrete Composites*, **72**, 309–318.
- [30]. Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O. C., Uysal, M., (2020). Effect of curing methods and scrap tyre addition on properties of mortars, *Gradevinar*, **72**, 4, 311-322.
- [31]. Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O., Uysal, M., (2019). Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties, *Gradevinar*, **71**, 8, 651-661.
- [32]. Hanif, A., Lu, Z., Cheng, Y., Diao, S., Li, Z. (2017). Effects of different lightweight functional fillers for use in cementitious composites, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **11**, 99–113.
- [33]. Lu, J.-X. , Poon, C.S. (2018). Improvement of early-age properties for glass-cement mortar by adding nanosilica, *Cement and Concrete Composites*, **89**, 18–30.
- [34]. Wyrzykowski, M., Kiesewetter, R., Kaufmann, J., Baumann, R., Lura, P. (2014). Pore structure of mortars with cellulose ether additions – Mercury intrusion porosimetry study, *Cement and Concrete Composites*, **53**, 25–34.

Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modelinin Yeraltı Suyu Kalitesinin Değerlendirilmesinde Kullanımı

The Use of Partial Least Squares Structural Equation Model in the Evaluation of Groundwater Quality

Zeki Doğan¹, Hamza Yalçın^{2,*}, İbrahim Yenigün³, A. Volkan Bilgili⁴

¹ Harran Üniversitesi, Zootekni Bölümü, Şanlıurfa, zdogan@harran.edu.tr

² Harran Üniversitesi, Zootekni Bölümü, Şanlıurfa, hyalcin@harran.edu.tr

³ Harran Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Şanlıurfa, brahimyenigun@harran.edu.tr

⁴ Harran Üniversitesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa, vbilgili@harran.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 27 Ekim 2020

Düzeltilme: 2 Aralık 2020

Kabul: 2 Aralık 2020

Anahtar kelimeler:

su kalitesi, anyonlar, katyonlar, yapısal eşitlik modeli

ÖZET

Bu çalışmada su kalitesi ikinci nesil çok değişkenli bir istatistik metodu olan Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modeli (KEKK-YEM) kullanılarak incelenmiştir. KEKK-YEM gözlenen değişkenlerden yola çıkıp doğrudan gözlemlenemeyen (latent) değişkenler arasındaki ilişkileri açıklamaya çalışır. KEKK – YEM modelinde kullanılan gözlenen su kalitesi faktörleri pH, TDS katyonlar (Mg^{2+} , Na^+) ve anyonlar (HCO_3^- , Cl^- ve SO_4^{2-}). Çalışmada kullanılan KEKK-YEM modeli iki aşamada değerlendirilmiştir; ölçüm modelinin uygunluğu farklı uyum indisleri ile birinci aşamada değerlendirildikten sonra ikinci aşamada yapısal model değerlendirilmiştir. YEM model sonuçlarına göre, su kalitesi üzerinde katyonların ($\gamma=0.598$, $p<0.05$) anyonlardan ($\gamma=0.259$, $P<0.05$) daha etkili olduğu ve yine pH üzerinde katyonların ($\gamma=0.643$, $P<0.05$) anyonlardan ($\gamma=-0.512$, $P>0.05$) daha etkili olduğu tahmin edilmiştir. Su kalitesi varyansının %65'i ($R^2=0.650$) ve pH'nin varyansının %19.5'i ($R^2=0.195$) anyonlar ve katyonlar tarafından açıklandığı görülmüştür. Sonuç KEKK-YEM'in su kalitesinin değerlendirilmesinde klasik çok değişkenli ve bazı önkoşullara sahip daha fazla örneğe ihtiyaç duyan geleneksel istatistiksel metodların yerine başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

Doi: 10.24012/dumf.816469

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 October 2020

Revised: 2 December 2020

Accepted: 2 December 2020

Keywords:

water quality, anions, cations, structural equation model (PLS-SEM)

ABSTRACT

In this study, water quality was analyzed using the Partial Least Squares Structural Equation Model (PLS-SEM), which is a second-generation multivariate statistical method. PLS-SEM explains the relationships between variables that cannot be directly observed using observed variables. The observed water quality factors used in PLS-SEM model are pH, TDS; cations (Mg^{2+} , Na^+); and the anions (HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-}). The model used in the study was evaluated in two stages; after the appropriateness of the measurement model was evaluated with different fit indices in the first stage, the structural model was evaluated in the second stage. According to the results of the PLS-SEM model, it was found that cations ($\gamma=0.598$, $P<0.05$) were more effective than anions ($\gamma=0.259$, $P<0.05$), and cations ($\gamma=0.643$, $P<0.05$) was predicted to be more effective on pH than anions ($\gamma=-0.512$, $P>0.05$). It was seen that 65% of the variance of water quality ($R^2=0.650$) and 19.5% ($R^2=0.195$) of the variance of pH were explained by anions and cations. The result has shown that PLS-SEM can be used successfully instead of traditional statistical methods, which require more samples with some prerequisites and with classical multivariate statistical techniques for the assessment of water quality.

* Sorumlu yazar / Correspondence

Hamza YALÇIN

✉ hyalcin@harran.edu.tr

Giriş

Yeraltı suyu hem içme hem de sulama amacıyla kullanılmaktadır. Yeraltı su kalitesini etkileyen faktörlerin takibi ve kontrolü sürdürülebilir bir yer altı suyu kullanımı için gereklidir. Düşük kaliteli veya kirlenmiş yeraltı suları doğrudan içme amaçlı veya sulama suyu olarak kullanıldıklarında dolaylı yollardan bitkilerden insanlara geçtiğinde farklı sağlık sorunlarına neden olabilir [1].

Bu amaçla yer altı suları arazi ve laboratuvar ortamında düzenli aralıklarla örneklenir, gözlemlenir ve sulardaki kirleticilerin konsantrasyonları belirlenir. Elde edilen farklı kalite parametrelerinin bir araya getirilmesi ile yeraltı sularının içme ya da sulama amacına uygunluklarının ortaya koyulması amacıyla kaliteleri belirlenir [2]. Mevsimsel, yersel dağılımları ve farklılıkları korelasyon analizi, kümeleme analizi, faktör analizi, temel bileşenler analizi (PCA) gibi tek ve çok değişkenli istatistiksel yaklaşımlar ile sıkça ortaya koyulmuş ve araştırılmıştır [2], [3].

Kısmi en küçük kareler veya varyans tabanlı yapısal eşitlik modelleri (VT-YEM; partial least squares structural equation modeling-PLS-SEM) çok değişkenli ikinci nesil çok değişkenli analiz teknikleri olarak Wold (1975) tarafından önerilmiş. VT-YEM modeli olarak bilinen, kısmi model yapılarını temel bileşenler analizi (TBA) ve kısmi en küçük kareler regresyonu ile birleştirilerek tahmin eden bir metottur. VT-YEM daha karmaşık modelleri çözümlenmeye yönelik bir yaklaşım olarak düşünülmektedir [5].

İkinci nesil bir veri analiz tekniği olarak Yapısal eşitlik modellemesi (YEM), regresyon gibi doğrudan ölçülebilen bağımlı-bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri inceleyen birinci nesil istatistiksel tekniklere kıyasla, doğrudan ölçülemeyen değişkenler arasındaki ilişkilerin değerlendirilebilir ayrıca her bir ilişki için farklı bir analize gerek duyulan regresyon analizlerinin aksine, değişkenler arasında belirlenen tüm ilişkilerin tek bir analizle ortaya konulabilmesi gibi üstünlüklere sahiptir [6]. Ayrıca YEM gözlemlenen (ölçülen) (pH, SO₄ vs.) ve doğrudan gözlenmemiş gizil değişkenleri (latent yapılar) (su kalitesi, hava kirliliği vs.) beraber değerlendiren çok değişkenli bir teknik iken, geleneksel yöntemler sadece ölçülen

değişkenler arasındaki ilişkileri analiz etmektedir [7]. YEM metodu ile parametre tahminlerini belirlemek için eşzamanlı çoklu denklemler çözülür ve YEM araştırmacıların ölçümlerinin kusurlu niteliğini ortaya çıkarmasına olanak tanır. Geleneksel yöntemler, ölçme işlemi hata olmadan gerçekleşirken, YEM açıkça hata belirtir [8].

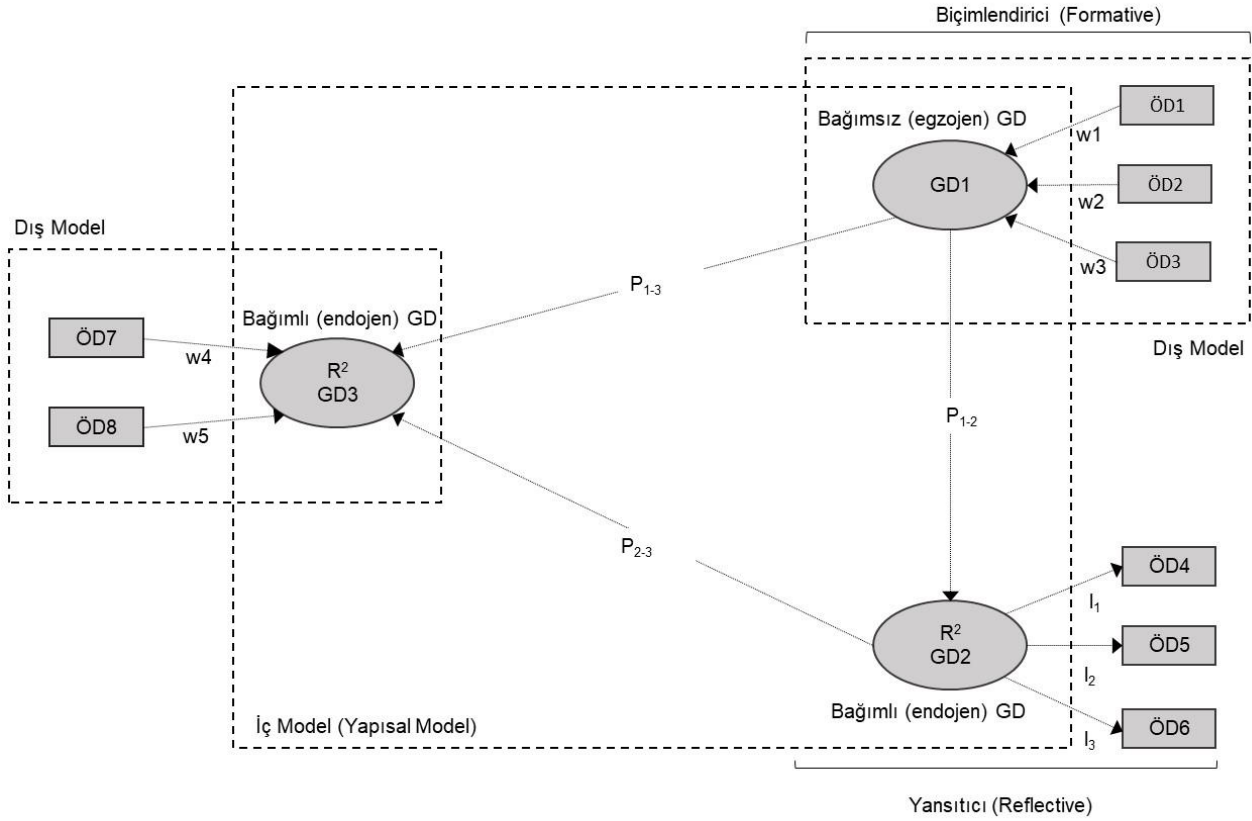
YEM modeli farklı iki grup altında kullanılmıştır; Kovaryans tabanlı Yapısal eşitlik modellemesi (CB-SEM) ve varyans tabanlı yapısal eşitlik modellemesi olarak da bilinen Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi (VT YEM; PLS-SEM). VT-YEM tekniği tarafından önerilen örnek sayısı ve verinin normal dağılım göstermesi gibi önkoşullara sahip kovaryans tabanlı CB-SEM modeline bir alternatif olarak önerilmiştir [6]. Varyans tabanlı yapısal eşitlik modeli olarak da bilinen VT-YEM modeli CB-SEM modeline göre örnek dağılımındaki esneklik, daha az örnekle çalışabilme ve daha kompleks modellerin çözülebilmesi gibi bir takım avantajları olduğundan daha fazla tercih edilmektedir [9]. CB-SEM verilerin kovaryans matrisini kullanır ve model parametrelerini tahmin etmek için sadece ortak varyansı kullanırken, VT-YEM varyans tabanlı bir model olarak toplam varyansı açıklar ve gizil bağımlı yapıya ait R² değerlerini en büyük yapan katsayıları kestirir [10]. Bu avantajlarından dolayı VT-YEM metodu daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada çok değişkenli normal dağılım gerektirmeyen ve az sayıda örnekle çalışabilen çok değişkenli istatistik metot olan VT-YEM yöntemi kullanılmıştır.

YEM modelinde, ölçüm değişkenleri (biçimlendirici ölçme modeli ve yansıtıcı ölçme modeli) ve yapısal değişkenler olarak ikiye ayrılır. Ölçme değişkenleri (dışsal model olarak da isimlendirilir) yakınsayana kadar iteratif olarak çalışır, gizil değişkenlerin (latent variables) yol katsayıları, güven aralıkları ve ilgili R² değerleri elde edilir [7]. Gizil değişkenlere ait veriler sürekli verilerdir. Elde edilen bu değerler sayesinde gizil değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla sıralı en küçük kareler regresyon (OLS) analizi uygulanır. Model kalite kontrolleri (AVE, VIF, HTMT, R² vs.) yapıldıktan sonra nihai raporlama yapılır.

Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi (VT-YEM)

VT-YEM metodu gizil (Latent) değişkenler arasındaki ilişkiyi modelleyen yapısal eşitlik modeli olup 1980 yılında Wold tarafından geliştirilmiştir (Wold, 1980). Şekil 1 genel olarak bir PLS metodunu göstermektedir. VT-YEM gizil değişkenler (GD) ve bunların arasındaki bağlantılardan meydana gelen iç (inner) yapısal model ile ölçüm modeli olan dış (outer) model olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. İç model kısmında gizil değişkenler arasındaki bağlantılar yol katsayıları (path coefficients; P veya γ) ile; dış model ile göstergeler arasındaki ilişkilerin derecesi ise ağırlıklar (w)/yükler (l) ile gösterilir. Yol katsayıları gizil bağımlı değişkenlerin (endojen) üzerine gizil bağımsız değişkenlerin (eksojen) etkisini temsil eder [5].

VT-YEM’de genel olarak biçimlendirici (formative) ve yansıtıcı (reflective) olmak üzere iki farklı ölçme modeli analiz edilebilir. Yansıtıcı modeller, gizil değişkenden başlayıp ölçülmüş değişkende sonlanan yollarla karakterize edilirken, biçimlendirici modellerde tersinedir ve yolun istikameti ölçülen değişkenden gizil değişkene doğrudur. Yansıtıcı modellerde ölçülen değişkenler gizil değişkenin etkisi olarak görülürken; biçimlendirici modellerde ölçülen değişkenler gizil değişkenlerin nedenleri olarak görülmektedir. VT-YEM modeli son zamanlarda yönetim, uluslararası yönetim, insan kaynakları,



Şekil 1. VT-YEM Modeli; ÖD: Ölçülen değişkenler; GD: Gizil değişkenler; w : Ağırlıklar; P : Yol katsayısı; l : Yükler (loading); R^2 : Endojen değişken(ler)e ait belirleme katsayısı.

Figure 1. PLS-SEM Model; ÖD: Measured variables; GD: Latent variables; w : Weights; P : Path coefficient; l : Loadings; R^2 : The coefficient of determination of the endogenous variable(s).

market ve pazarlama, işletme, tedarik zinciri yönetimi gibi alanlarda kullanılmıştır [11]. Bahsedilen sosyal alanların haricinde VT-YEM modeli fen bilimleri alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır [12].

Genel olarak bu çalışmanın amacı VT-YEM modelinin su kalitesinin belirlenebilirliğinde kullanılabilirliği test etmek ve bu alanda çok farklı ve yeni bir yaklaşım olarak elde edilen sonuçların yorumlanabilirliğini göstermektir. Çalışmada VT-YEM modeli mevcut bir veri üzerinde denenmiştir [13].

Materyal ve Metot

Veri seti

Makalede kullanılan veriler Viswanath vd. (2015)'den alınan veriler ile oluşturulmuştur. Makalede SO_4 , HCO_3 ve NO_3 değişkenlerinde yer alan "0" (sıfır) rakamları silinip ilgili yerlere ilgili değişkenin ortalaması yerleştirilmiştir. Parantez içleri $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinde değerlendirilmiştir ve bu değer katsayımın anlamlılığını ifade eder.

Metot

Varyans Tabanlı Yapısal Eşitlik modellemesi (VT-YEM)

VT-YEM ya da PLS-SEM yapısal eşitlik modelleri ailesinin bir üyesidir. İkinci jenerasyon çok değişkenli bir istatistik metodudur. Herman wold [14] tarafından geliştirilmiş olup normal dağılım şartı aramadığı için "yumuşak modelleme" olarak tarif edilmiştir. Dolayısıyla VT-YEM, parametrik olmayan bir yöntem olarak kabul görmüştür. Kovaryans tabanlı YEM'e göre daha az örneklem istemesi, normal olmayan bir dağılımla çalışabilmesi (basıklık ve çarpıklık değerlerinin -1 ile 1 arasında olması istenir [5]), modeli kurmak için ön şartlardan sadece modelin belirlenmesi ve tanımlanması gibi şartların istenmesi ve en önemlisi de çok karmaşık modelleri, biçimlendirici ve yansıtıcı ölçme modelleri dahil olmak üzere, analiz edebilmesi öne çıkan avantajlarından [15].

VT-YEM, gözlenen değişkenlerden yola çıkıp doğrudan gözlemlenemeyen değişkenler arasındaki ilişkileri açıklar [5]. VT-YEM, dışsal ölçme modeli ve içsel ölçme modeli olmak üzere iki kısımdan oluşur. Dışsal ölçme modeli, gözlenen değişkenlerden hesaplanır ayrıca biçimlendirici (formative) ve yansıtıcı (reflective) olmak üzere iki ölçme modelinden oluşur. Biçimlendirici ölçme modelinde oklar göstergeden yapıya doğrudur, yani göstergeler yapıya neden olur. Yansıtıcı ölçme modelinde (en yaygın kullanılan ölçme modelidir) ise oklar yapıdan göstergelere işaret eder yani, yapı göstergelere sebep olur, dolayısıyla her bir göstergeye ait bir hata vardır (Şekil 1). VT-YEM, eğer bir regresyon gibi düşünülürse, içsel bağımsız değişkenlere eksojen ve içsel bağımlı değişkenlere ise endojen değişken denir.

VT-YEM, temelde iki aşamada çalışır: birinci aşamada dışsal ölçme modeli ağırlıkları/yükleri hesaplanır, ikinci aşamada ise yapısal yol katsayıları ve R^2 hesaplanır. VT-YEM, alt çalışma aşamaları hesaba katılırsa toplam 7 adımda çalışır [16]:

Adım 1: Dışsal ölçme modellerinin (biçimlendirici ya da yansıtıcı) tüm keyfi ağırlıkların atanması

Adım 2: Gizil değişkenlerin değerlerinin dışsal modelden tahmininin hesaplanması

Adım 3: İç (yani yapısal ya da gizil) modelin ağırlıklarının elde edilmesi (gizli değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkisi).

Adım 4: Gizli değişkenlerin iç tahminlerinin hesaplanması

Adım 5: Dış modelin yeni ağırlıklarının hesaplanması

Ağırlıklar yakınsayana kadar Adım 2-5'i tekrarlanması

Adım 6: Yapısal modelin yol katsayılarını (ağırlıkları) tahmin edilmesi

Adım 7: Dış ölçüm modeli için yükleri (ağırlıkları) tahmin edilmesi

Bu çalışmada modelleri analiz ve hipotezleri test etmek için SmartPLS 3 [17] paket programı kullanılmıştır. Modellerin değerlendirilmesi Hair ve

ark.'na [10] göre yapılmıştır. VT-YEM metodunun kovaryans tabanlı YEM metodu gibi global uyum indisleri bulunmamakta fakat kendine özgü değerlendirme kriterleri vardır. Bu kriterler iki kısma ayrılır: birinci kısım ölçme modellerinin değerlendirilmesi (biçimlendirici ve yansıtıcı ölçme modelleri ayrı ayrı değerlendirilir), ikinci kısım ise yapısal modelin değerlendirilmesidir. Bu çalışmada sadece biçimlendirici ölçme modelleri kullanıldığından yansıtıcı ölçme modellerine ait değerlendirme kriterlerine yer verilmeyecektir.

Biçimlendirici (dışsal) ölçme modellerinin değerlendirilmesi:

- Varyans şişme faktörünün (Variance Inflation Factor-VIF) <5 olması
- Yakınsak geçerlilik için artıklık (redundancy) analizinin yapılması ve korelasyonun ≥ 0.70 olması
- Bootstrap prosedürüne göre gösterge ağırlıklarının ilgili ve anlamlı olması istenir.

Yapısal (içsel) modelin değerlendirilmesi

- Eksojen (içsel bağımsız) değişkenlerin her bir endojen (içsel bağımlı) değişkeni belirleme katsayısı (R^2) ile açıklanan varyasyonun değerlendirilmesi sonucu elde edilen R^2 değeri 0 ile 1 aralığında değişir ve R^2 değerleri 0.75-önemli, 0.50-orta ve 0.25-xayıf olarak tanımlanmaktadır.
- Varyans şişme faktörünün (Variance Inflation Factor-VIF) <3 olması istenir VIF <5 de kabul edilir.
- Etki büyüklüğü (f^2) 0.02-küçük, 0.15-orta ve 0.35-büyük olarak tanımlanır.

Son olarak, parametrik olmayan bootstrap prosedürü kullanılarak (yapısal) yol katsayıları, dışsal

ağırlıklar, dışsa yüklerin anlamlılıkları ($p < 0.05$) değerlendirilir. Tahmin edilen standart hata değerleri ile t istatistiği (> 1.96) ve güven aralıklarının hesaplanması için parametrik olmayan bootstrap (yeniden örnekleme) kullanılır. Yeniden örneklemin 5000 olması tavsiye edilmektedir [5].

Araştırma Bulguları

Yapısal eşitlik modelinin kestirilmesi

VT-YEM modeli toplam 4 gizil değişken arasındaki 4 ilişkiyi tahmin etmiştir. Gizil değişkenler arasındaki ilişkiler Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmanın tamamında, ilgili gizil değişkenler arasındaki ilişkilerin tahmin edilmesi için 7 tane göstergeli kullanılmıştır. Tek göstergeli gizil değişkenler hariç (pH ve su kalitesi) diğer gizil değişkenler biçimlendirici ölçüm modeline göre kurulmuştur. Sonuç olarak tüm ilişkilerin anlamlı olup olmadığı bootstrap prosedürü ile 5000 alt örneklem oluşturularak hesaplanmıştır.

Ölçme modellerinin değerlendirilmesi

Bu çalışmada, VT-YEM tahminler için biçimlendirici ölçme modeli kullanılmıştır. VT-YEM modelinin birinci aşamaya ait tahmin sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. KEEK-YEM yönteminde biçimlendirici ölçüm modellerinin değerlendirilmesinde, göstergeler arası korelasyondan kaynaklı, varyans şişme faktörü (VIF<3 istenir, <5 de olabilir) büyük rol oynamaktadır. Katyonlar gizil değişkenine ait Mg^{2+} ve Na^+ göstergelerin VIF değerleri aynı olup 1.02 olarak görülmektedir. Katyonlar değişkeni üzerinde Mg^{2+} ve Na^+ göstergelerinin katkıları (ağırlıkları) sırasıyla 0.967 ve 0.421 olarak tahmin edilmiştir. Tablo 2'de gösterildiği gibi Mg^{2+} anlamlı oluşu halde Na^+ katkısı anlamlı görülmemektedir. Tablo

Tablo 1. Biçimlendirici ölçme modeli tahmin sonuçları

Table 1. Estimation results of formative measurement model

Biçimlendirici Ölçme Modeli	Dış Ağırlıklar (Dış Yükler)	t Değeri	Önem ($p < 0.05$)?	95% Bootstrap Güven Aralığı	VIF
Mg^{2+}	0.967 (0.909)	7.208	Evet	[0.680, 1.200]	1.019
Na^+	0.421 (0.289)	1.508	Hayır	[-0.124, 0.798]	1.019
Cl^-	0.660 (0.942)	1.753	Evet	[-0.162, 1.070]	2.248
HCO_3^-	0.140 (-0.146)	0.513	Hayır	[-0.313, 0.547]	1.100
SO_4^{+}	0.445 (0.897)	1.234	Hayır	[-0.038, 1.128]	2.128

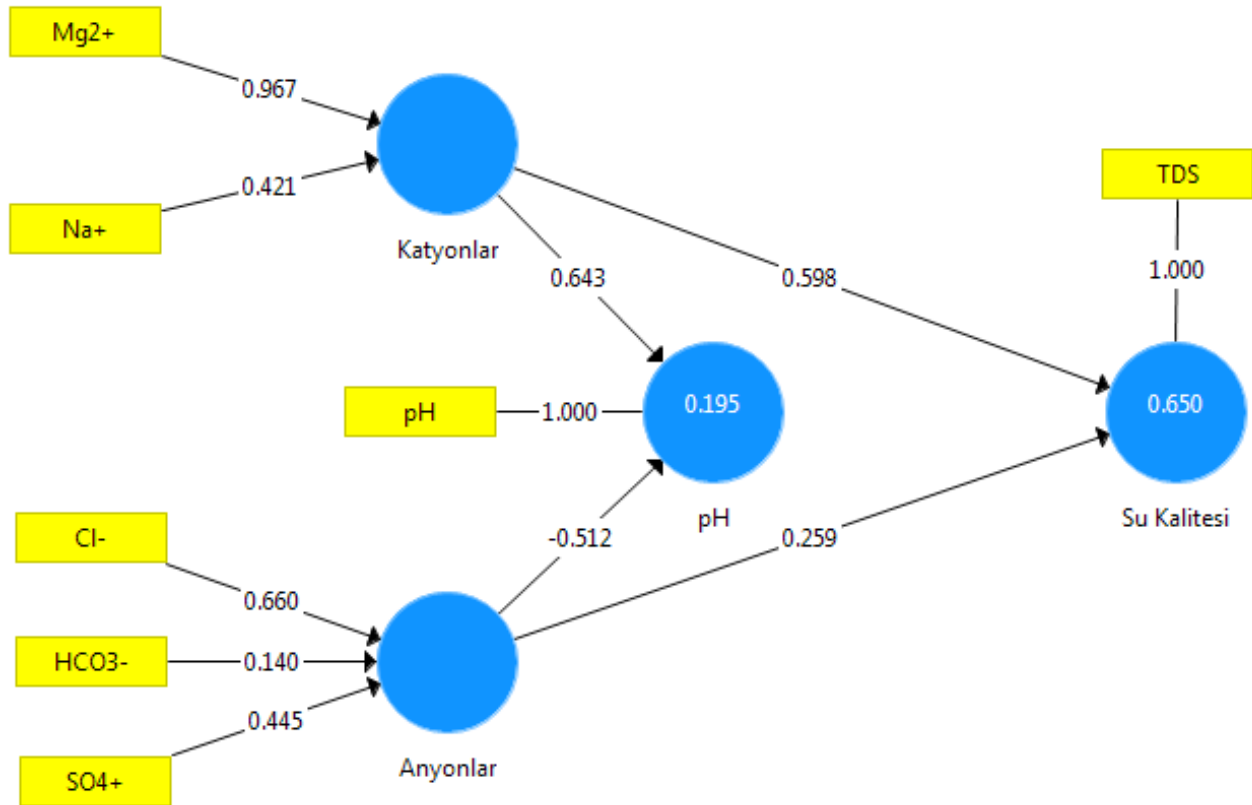
2'deki bilgiler göz önüne alındığında, göstergelerin katyonlar gizil değişkenine olan tahmini etkisi sıralandığında Mg^{2+} (0.967) > Na^+ (0.421) olduğu görülmektedir.

Aynı şekilde, Anyonlar gizil değişkenine ait Cl^- , HCO_3^- ve SO_4^{+} ölçümlerinin VIF değerleri sırasıyla 2.25, 1.1 ve 1.13 olduğu görülmektedir. Cl^- , HCO_3^- ve SO_4^{+} ölçümlerinin Anyonlar değişkeni üzerindeki katkıları (ağırlıklar) sırasıyla 0.660, 0.140 ve 0.445 şeklinde kestirildiği görülmektedir. SO_4^{+} değişkenine ait ağırlık değeri (0.445)

orta düzey olmasına rağmen anlamlı çıkmadığı görülmüştür. Anyonlar değişkenini etkileyen göstergelerden sadece Cl^- değişkeninin anlamlı bir etkiye sahip olduğu, HCO_3^- ve SO_4^{+} değişkenlerinin ise anlamlı olmadığı görülmektedir. Tablo 2'de, aynı zamanda, güven aralıklarının tahminleri de verilmiştir.

Yapısal modelin değerlendirilmesi

Yapısal modelin hesaplanması (yol katsayıları-



Şekil 2. Yer altı sularının yapısal eşitlik modeli ile hesaplanması. Yuvarlaklar gizil değişkenleri, kutucuklar ise ölçüm değişkenlerini (göstergeleri) ifade etmektedir. Gizil değişkenler arasındaki ilişkiler oklarla (yol katsayıları) gösterilmiştir. Yuvarlaklar ve kutucuklar arasındaki oklar ise ağırlıkları (biçimlendirici ölçme modelinde hesaplanır) göstermektedir. Yuvarlaklar (sadece endojen değişkenler için hesaplanır) içindeki rakamlar belirleme katsayısını (R^2) ifade eder. Şekil 1'deki şekil sadece genel yapısal eşitlik modeli şemasını ifade eder. Şekil 2 ise gizil değişkenler ve bunlarla ilişkili olan ölçüm değişkenlerini göstermektedir.

Figure 2. Calculation of groundwater using structural equation model. Circles represent latent variables, and squares represent measurement variables (indicators). The relationships between latent variables are shown by arrows (path coefficients). The arrows between the circles and boxes show the weight (calculated in the formative measurement model). Numbers in circles (calculated only for endogenous variables) represent the coefficient of determination (R^2). The figure in Figure 1 only expresses the general structural equation model scheme. Figure 2 shows the latent variables and the measurement variables associated with them.

nın vs.) ikinci adımda gerçekleşir (Şekil 2). Toplam 4 gizil değişkene ait 4 yol katsayısından 3'ü anlamlı ($p < 0.05$) bulunmuştur (Tablo 3). Tüm değişkenler için VIF değeri 2.135, yani gizil değişkenler arasında ortak bağlantı probleminin olmadığı söylenebilir [5]. Katyonlar değişkeninin ve anyonlar değişkeninin su kalitesi değişkeni üzerindeki yol katsayıları anlamlı olup ($p < 0.05$) sırasıyla 0.598 ve 0.259; pH üzerindeki yol katsayıları ise sırasıyla 0.598 ($p < 0.05$) ve (-0.402) olarak tahmin edilmiştir. Katyonlar değişkeninin su kalitesi ve pH üzerindeki etkileri Anyonlar değişkeninden daha yüksek olduğu görülmüştür. pH ve su kalitesi açısından etki büyüklüklerinin katyonlar değişkeni için sırasıyla orta ve üzeri; Anyonlar değişkeni için ise ortaya yakın ve orta olarak sonuçlanmıştır.

Belirleme katsayısı (R^2) için sonuçlar şu şekildedir: model, pH'deki varyansın 0.195'ini, su kalite-

çalışmada yansıtıcı ölçme modeli kullanılmadığı için bu modelle ilgili kriterlere değinilmemiştir. Yapısal eşitlik modelleri ölçüm modeli ve yapısal model olmak üzere iki kısma ayrıldığı için bulgular kısmında olduğu gibi bu kısımda da ayrı ayrı incelenmiştir.

Ölçme modelinin değerlendirilmesi

Yapısal eşitlik modellerinde yansıtıcı model ile biçimlendirici model arasında cetvelle ayrılacak bir ayrımın olmadığı bildirilmiştir [5]. Bunu belirlemek için alanyazında yayınlanmış çalışmalara odaklanılması gerektiği belirtilerek nihayetinde literatür ve uzman bilgisi eşliğinde modelin belirlenebileceği ifade edilmiştir [5]. Literatüre bakıldığında mevcut çalışmada biçimlendirici ölçme modelini kullanmanın uygun olabileceği düşünülmüştür. Çünkü, belirtilen göstergeler ait oldukları yapıları oluşturmaktadır. Bu açıdan düşünüldüğünde en uygun ölçme modelinin biçim-

Tablo 2. Yapısal modele ait tahmin sonuçları

Table 2. Estimation results of the structural model

Yapılar	Yol katsayıları	95%bootstrap güven aralıkları	Önem ($p < 0.05$)?	f^2 Değeri	VIF	
Katyonlar	→ pH	0.643	[-1.317, -0.112]	Evet	0.241	2.135
	→su kalitesi	0.598	[-0.110, 0.419]	Evet	0.478	2.135
Anyonlar	→ pH	-0.512	[0.142, 1.072]	Hayır	0.152	2.135
	→su kalitesi	0.259	[0.395, 0.793]	Evet	0.089	2.135

tesindeki varyansın 0.65'ini açıklamıştır. pH için açıklanan varyansın zayıf, su kalitesi için açıklanan varyansın yüksek olduğu görülmektedir. Böylece modelde, katyonlar ve anyonlar su kalitesi varyansını pH'nin varyansına kıyasla yaklaşık 4 katı daha fazla oranda açıklamıştır.

Tartışma

SmartPLS 3, gösterge ağırlıkları/yükleri, yapı geçerliliği (composite reliability-CR), açıklanan ortalama varyans (average variance extracted-AVE), yol katsayıları, fornell-larcker kriteri, çapraz yükler, korelasyonların heterotrait-monotrait oranı (HTMT), varyans şişme faktörü (VIF) (hem göstergeler hem de yapılar için), t-değeri ve p-değerini ve daha fazlasını rapor eder. Şekil 2'de görüldüğü gibi 2 yapı ve bu yapılara ait sekiz göstergeli teorik bir model oluşturulmuş ve modelin testi için SmartPLS ile analiz edilmiştir. Bu

lendirici ölçme modeli olabileceği kararına varılmıştır. Sonuç olarak, yapısal eşitlik modellerinde biçimlendirici ölçme modellerinin deneysel çalışmalar için daha uygun olduğu bildirilmiştir [12].

Mevcut çalışmada gizil değişkenler için istenilen kriterlerin yerine getirildiği görülmüştür. Katyonların Mg^{2+} , Na^+ ve daha birçok değişkenden meydana literatürde mevcuttur. Bu çalışmada uyum indislerini Mg^{2+} ve Na^+ sağladığı için katyonlar gizil değişkenini meydana getiren göstergeler olarak seçilmiştir. Bu çalışmaya göre, Katyonlar değişkeni üzerinde Mg^{2+} (0.967) göstergesinin Na^+ (0.421) göstergesinden daha fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Mg^{2+} , yapı üzerinde anlamlı ($p < 0.05$) bir gösterge iken Na^+ anlamlı olmaya yakın ($p = 0.066$) bir tahmin gerçekleştirmiştir. Buna rağmen Na^+ 'nın yapı üzerindeki etkisi anlamlı

görünmese de ağırlık katsayısı 0.421 olarak bulunmuştur. Mg genel olarak yeraltı sularında Na^+ ya kıyasla sıralama yönünden daha az başat durumdadır [18], [19]. Buna rağmen yeraltı sularının kimyasal özellikleri ve kalite parametrelerinin seviyeleri su kaya interaksiyonları ve iyon değişim proseslerinden ve diğer antopojenik faktörlerin kontrolü altında olduğu bilinmektedir [1]–[3].

Anyonlar değişkenine gelindiğinde, bu yapıyı Cl^- , HCO_3^- ve SO_4^{2-} 'ün oluşturduğu görülmektedir. Modelde, örneklem alınan bölge için anyonlar değişkenine Cl^- göstergesinin anlamlı bir şekilde ve HCO_3^- ve SO_4^{2-} 'ten daha fazla katkı sağladığı tahmin edilmiştir. Cl^- 'nin daha etkili olması Cl^- un genel olarak yeraltı sularında anyonlar arasında en başat anyon olarak gösterilmesi ile açıklanabilir [18], [19]. Su örneklerindeki yüksek Cl^- genel olarak kirlilik indeksi olarak düşünülmüş ve yer altı sularında kirliliğin takip edilmesinde bir izlenice olarak ele alınmıştır [20]. Ayrıca ilgili yapı üzerinde SO_4^{2-} 'ün HCO_3^- 'ten daha etkili olduğu ama iki göstergenin de anlamlı olmadığı ($p>0.05$) kestirilmiştir. SO_4^{2-} 'ün HCO_3^- 'ten daha fazla etkili olmasının sebebi SO_4^{2-} 'ün katyonlar grubunda daha etkili olan Mg^{2+} ile oluşturabileceği MgSO_4 tuzlarının varlığı olabilir. Bu çalışmada uygulanan yapısal eşitlik modelinin doğrudan ölçülemeyen yapıların tutarlı bir şekilde ölçülebileceğini ortaya koymuştur.

Yapısal modelin değerlendirilmesi

Kovaryans tabanlı yapısal eşitlik modelinde (CB-YEM) gizil değişkenler en az iki gösterge ile ölçülebilirken kısmi en küçük kareler tabanlı YEM yönteminde gizil değişkenler bir gösterge (single item) ile ölçülebilmektedir [5]. Ayrıca bir yapı ne kadar çok göstergeye sahipse ilgili modelin kapsamı daha da artacak ve dolayısıyla elde edilecek bilgi, tahmin edilecek parametre ve elbette modelin karmaşıklığı da artacaktır. CB-YEM çok kompleks modellerde kısıtlı bir modele dönüşebilir ama VT-YEM için model ne kadar karmaşık olursa o kadar iyi tahmin yapılacaktır [5].

Bu modelde yapıların birbiriyle ilişkisi oldukça

tutarlı görünmektedir. Yol katsayıları açısından Katyonlar değişkeninin pH üzerinde pozitif anlamlı bir katkısı ($\gamma=0.598$) görülürken anyonlar değişkeninin negatif anlamlı bir etkisinin ($\gamma=-0.402$) olduğu tahmin edilmiştir. Su ile katyonların teması neticesinde su moleküllerindeki pozitif yüklü H iyonlarının katyonlarla yer değiştirmesi ve OH iyonlarının ortamda çoğalması neticesinde pH oranında yükselmelerin oluşması ile açıklanabilir. Ayrıca bu modele göre pH üzerinde katyonların anyonlardan katsayıca daha etkili olduğu görülmüştür. Buda örnekleme alanı, örnek sayısı, örnekleme zamanı ve kirlenici etmenlerin farklılığına göre değişim gösterebilir. pH değerleri su içerisinde yer alan toksik bileşiklerin yanısıra suyun biyolojik ve kimyasal parametrelerinden de etkilenir. Ek olarak katyonlar ve anyonlar değişkenlerinin pH değişkenini %19.5 (R^2) açıkladığı tahmin edilmiştir.

Su kalitesi üzerinde (temel yol modeli ile) farklı YEM çalışmaları bulunmaktadır [13], [21] fakat bu çalışmada gizil değişkenlere sahip bir modelin olması alan yazına daha fazla katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Su kalitesini ölçmek için birçok parametre bulunmasına rağmen bu çalışma kapsamında toplam çözünmüş katı maddeler (TDS) göstergesi YEM kriterlerini sağladığı için modele katılmıştır. TDS su kalitesini ölçmede kullanıldığı için bu göstergenin ait olduğu yapıya su kalitesi adı verilmiştir.

Su kalitesini katyonlar anyonlar ve daha birçok değişkenin etkilediği açıktır [13]. Bununla birlikte bu çalışma kapsamında mevcut verilere göre su kalitesi bir yapı olarak değerlendirilmiştir. Model tahminlerine göre katyonlar ($\gamma=0.598$), anyonlardan ($\gamma=0.259$) daha fazla su kalitesini etkilemiştir. Ayrıca katyonların pH yol katsayısı su kalitesi yol katsayısından daha yüksek, anyonların da mutlak değerce aynı şekilde yüksek olduğu tahmin edilmiştir. Ek olarak, model tahminlerine göre katyonlar ve anyonlar yapılarının su kalitesine ait varyansın %65'ini açıkladığı görülmüştür. Bu modelde sadece doğrudan yani eksojen değişkenlerin endojen değişkenler üzerinde tek yolla etkileri vardır. Bunlar katyonlar ve anyon-

lar değişkenlerinin pH ve su kalitesi üzerine etkileridir. YEM sonuçlarına göre regresyon eşitliği gibi eşitlikler yazılabilir [22]. Bağımsız anyonlar ve katyonlar değişkenlerinin bağımlı pH ve su kalitesi değişkenleri üzerindeki etkilerine ait eşitlikler Eşitlik 1 ve 2'deki gibi verilebilir (K: Katyonlar, A: Anyonlar):

Eşitlik 1:

$$pH = -0.00002 + (0.643)*K + (-0.512)*A$$

Eşitlik 2:

$$Su\ Kalitesi = 0.00004 + (0.598)*K + (0.259)*A$$

Burada hem pH hem su kalitesi üzerinde tahmin edilen katyonlar regresyon katsayılarının anyonlar katsayılarına nispeten yüksek olduğu görülmektedir.

Sonuç ve Öneriler

YEM modelleri, gösterge-gösterge, gösterge-yapı, yapı-yapı arasındaki ilişkileri korelasyonel ve regresyonel incelemesi açısından önemlidir. Bu çalışmada katyonların ve anyonların pH ve su kalitesi arasındaki ilişkilere bakılmıştır. Mevcut çalışmada, doğrudan ölçülemeyen değişkenlerin diğer bir ifadeyle sözel değişkenlerin birbiri arasındaki ilişkilerin incelenmesi açısından önem arz etmektedir.

Mevcut çalışmada gösterilen metodolojinin, hidrokimyasal bilgiler (değişkenler) arasındaki tüm olası etkileşimleri dikkate alan istatistiksel bir modele dahil etmeye izin verdiği görülmektedir. Model, hidrokimyasal değişkenlerin istatistiksel entegrasyonunu sunarak daha sağlam bir yorumlama sağlar. Araştırma, yer altı suyu kalitesini araştırmayı amaçlamaktadır. İncelenen akiferdeki hidrokimyasal varyasyonu kontrol eden süreci tanımlamak mümkündür. Ayrıca önerilen metodoloji, hidrokimyasal verilerin mevcut olduğu birçok tipik akiferde faydalı olabilir. Gösterilen yaklaşım, çalışmanın sonuçlarının yalnızca kavramsal modeldeki değişkenler arasında önerilen ilişkilerin örnek veri tarafından desteklendiği sınırlamasını sergilemektedir. Uyum in-

deksleri, nispeten küçük örneklem boyutu olmasına rağmen verilerin çok iyi bir YEM uyumu gösterdiği anlaşılmaktadır. Gelecek çalışmalarda daha fazla gösterge ile daha fazla yapının birbiriyle ilişkileri, su kalitesi gibi kavramlar üzerindeki etkileri incelenebilir.

Kaynaklar

- [1] M. İ. Yeşilnacar *et al.*, "Geomedical assessment of an area having high-fluoride groundwater in southeastern Turkey," *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, no. 2, p. 162, Jan. 2016, doi: 10.1007/s12665-015-5002-6.
- [2] P. Sahu, G. C. Kisku, P. K. Singh, V. Kumar, P. Kumar, and N. Shukla, "Multivariate statistical interpretation on seasonal variations of fluoride-contaminated groundwater quality of Lalganj Tehsil, Raebareli District (UP), India," *Environmental Earth Sciences*, 2018, doi: 10.1007/s12665-018-7658-1.
- [3] İ. Yolcubal, Ö. C. Ataş Gündüz, and N. Kurtuluş, "Origin of salinization and pollution sources and geochemical processes in urban coastal aquifer (Kocaeli, NW Turkey)," *Environmental Earth Sciences*, 2019, doi: 10.1007/s12665-019-8181-8.
- [4] H. Wold, "Quantitative sociology," in *International Perspectives on Mathematical and Statistical Modeling*, H. M. Blalock, Ed. New York: Seminar Press, 1975, pp. 307–357.
- [5] J. Hair, G. Hult, C. Ringle, and M. Sarstedt, *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*. Thousand Oaks: SAGE, 2017.
- [6] J. Hair, C. M. Ringle, and M. Sarstedt, "PLS-SEM: Indeed a Silver Bullet," *Journal of Marketing Theory and Practice*, vol. 19, no. 2, pp. 139–152, Apr. 2011, doi: 10.2753/MTP1069-6679190202.
- [7] M. Sarstedt, C. M. Ringle, and J. Hair, "Partial Least Squares Structural Equation Modeling," in *Handbook of Market Research*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1–40.
- [8] R. G. Lomax, "The Effect of Measurement Error in Structural Equation Modeling," *The Journal of Experimental Education*, vol. 54, no. 3, pp. 157–162, Apr. 1986, doi: 10.1080/00220973.1986.10806415.
- [9] W. W. Chin and P. R. Newsted, "Structural equation modeling analysis with small samples using partial least squares," in *Statistical strategies for small sample research*, R. H. Hoyle, Ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 1999, pp.

- 307–341.
- [10] J. Hair, J. J. Risher, M. Sarstedt, and C. M. Ringle, “When to use and how to report the results of PLS-SEM,” *European Business Review*, vol. 31, no. 1, pp. 2–24, Jan. 2019, doi: 10.1108/EBR-11-2018-0203.
- [11] J. Hair, C. L. Hollingsworth, A. B. Randolph, and A. Y. L. Chong, “An updated and expanded assessment of PLS-SEM in information systems research,” *Industrial Management & Data Systems*, vol. 117, no. 3, pp. 442–458, Apr. 2017, doi: 10.1108/IMDS-04-2016-0130.
- [12] V. S. Rodrigues, R. F. do Valle Júnior, L. F. Sanches Fernandes, and F. A. L. Pacheco, “The assessment of water erosion using Partial Least Squares-Path Modeling: A study in a legally protected area with environmental land use conflicts,” *Science of the Total Environment*, vol. 691, pp. 1225–1241, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.216.
- [13] N. C. Viswanath, P. G. D. Kumar, and K. K. Ammad, “Statistical Analysis of Quality of Water in Various Water Shed for Kozhikode City, Kerala, India,” *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 1078–1085, 2015, doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.136.
- [14] H. Wold, *Model Construction and Evaluation When Theoretical Knowledge Is Scarce. Theory and Application of Partial Least Squares*. Academic Press, 1980.
- [15] S. Akter, S. Fosso Wamba, and S. Dewan, “Why PLS-SEM is suitable for complex modelling? An empirical illustration in big data analytics quality,” *Production Planning & Control*, vol. 28, no. 11–12, pp. 1011–1021, Sep. 2017, doi: 10.1080/09537287.2016.1267411.
- [16] D. Ghosh, A. Olewnik, and K. Lewis, “Application of autoencoders in cyber-empathic design,” *Design Science*, vol. 4, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1017/dsj.2018.11.
- [17] C. M. Ringle, S. Wende, and J.-M. Becker, “SmartPLS 3.” SmartPLS GmbH, 2015.
- [18] M. I. Yesilnacar and I. Yenigun, “Effect of irrigation on a deep aquifer: a case study from the semi-arid Harran Plain, GAP Project, Turkey,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 70, no. 2, pp. 213–221, May 2011, doi: 10.1007/s10064-010-0299-6.
- [19] D. Marghade, D. B. Malpe, and A. B. Zade, “Geochemical characterization of groundwater from northeastern part of Nagpur urban, Central India,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 62, no. 7, pp. 1419–1430, Apr. 2011, doi: 10.1007/s12665-010-0627-y.
- [20] M. Loizidou and E. Kapetanios, “Effect of leachate from landfills on underground water quality,” *The Science of The Total Environment*, vol. 128, no. 1, pp. 69–81, Jan. 1993, doi: 10.1016/0048-9697(93)90180-E.
- [21] I. Chenini and S. Khemiri, “Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2009, doi: 10.1007/BF03326090.
- [22] V. Esposito Vinzi, W. W. Chin, J. Henseler, and H. Wang, *Handbook of Partial Least Squares*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

Yığma duvarların mikro modellemesinde harcın çekme dayanımı ve kayma gerilmesi iletim katsayısının etkisi

Effect of tensile strength and shear transfer coefficient of the mortar in micro modeling of masonry walls

Muhammet Karaton^{1*}, Kağan Çanakçı²

¹ Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, mkaraton@firat.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-1498-4659>

² Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, canakcikagan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8701-2762>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 9 Aralık 2019
Düzeltilme: 7 Ocak 2021
Kabul: 10 Ocak 2021

Anahtar kelimeler:

Eindhoven duvarları, mikro modelleme, yayılı çatlak modeli, harcın basınç dayanımı ve kayma gerilmesi iletim katsayısı.

ÖZET

Bu çalışmada, yığma duvarların mikro model ile analizinde 3 boyutlu sabit doğrultulu yayılı çatlak modelinin etkinliği incelenmiştir. Duvarın harç ve tuğla kısımlarının lineer olmayan davranışını hesaplamak için William ve Warnke modelinin özel hali olan üç değişkenli beton modeli kullanılmıştır. Nümerik analizler için Ansys sonlu eleman programı içerisinde bulunan Solid65 beton elemanı seçilmiştir. Nümerik sonuçların karşılaştırılması amacıyla, JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi ile oluşan çatlak bölgeleri kullanılmıştır. Harcın çekme dayanımının ve bu bölgenin sonlu eleman modelinde tanımlanan kayma gerilmesi iletim katsayısının nümerik çözümler üzerine olan etkisi incelenmiştir. Yığma yapıların mikro seviye statik itme analizlerinde kullanılması amacıyla harcın çekme dayanımı için bir katsayı ve kayma gerilmesi iletim katsayıları için bazı değerler önerilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 9 December 2019
Revised: 7 January 2021
Accepted: 10 January 2021

Keywords:

Eindhoven walls, micro modelling, smeared crack model, compressive strength of mortars and shear transfer

ABSTRACT

In this study, the effectiveness of 3-dimensional smeared crack model in the micro-model analysis of masonry walls is investigated. The three parameters concrete model which special case of William Warnke model, is used to calculate the nonlinear behavior of mortar and brick regions of the wall. For numerical analysis, Solid65 concrete element in Ansys finite element program is selected. For the comparison of the numerical results, the base shear force-top displacement curve and the fracture zones obtained from the experimental results of the Eindhoven walls which called as JD4, JD6 and JD7, are used. Tensile strength of the mortar and defined shear transfer coefficient in finite element model of mortar region are investigated effect on the numerical solutions. For purpose of using in micro level static pushover analyzes of masonry walls, a coefficient for tensile strength of the mortar, and some values for shear stress transfer coefficients are recommended.

Doi: 10.24012/dumf.656781

* Sorumlu yazar / Correspondence
Muhammet KARATON
✉ mkaraton@firat.edu.tr

Giriş

Yığma duvarlar, bina inşaatlarında belirli alanların ayrılmasında tercih edilen önemli yapı elemanlarıdır. Yığma duvarlar tuğla/taş ve harçtan meydana geldiği için kompozit bir malzeme davranışına sahiptir. Bu duvarların nümerik olarak modellenmesi farklı malzeme etkileşim ve davranışlarından dolayı karmaşık işlemler gerektirmektedir. Bu nedenle söz konusu yapıların nümerik modellenmesi üzerinde otuz yılı aşan bir süreden beri araştırmalar devam etmektedir. Yığma duvarların nümerik modellenmesi konusunda mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modelleme teknikleri geliştirilmiştir [1]. Mikro ölçekli analizlerde yığma birimler ayrı ayrı modellenmektedir. Basitleştirilmiş mikro modelde ise tuğla/taş ile harç arasında yer alan ara yüzey bölgesi sonlu elemanlarla, diğer kısımlar ise rijit veya şekil değiştirebilen ayırık elemanlarla modellenmektedir. Makro modelleme tekniğinde ise tuğla/taş ve harç eşdeğer bir malzemeye dönüştürülmektedir [1].

Yığma duvarların mikro ölçekli analizlerinde birçok araştırma yapılmış olup bunlar içerisinde, Adam ve ark. [2], sonlu elemanlar yöntemi ile bir mikro mekanik model geliştirmişlerdir. Sonlu eleman modelinde harç ve tuğla, katı eleman olarak bu iki ortamın ara yüzü ise ara yüzey elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Katı elemanların doğrusal olmayan davranışları için sabit doğrultulu yayılı çatlak modelini kullanmışlardır. Doğrusal olmayan nümerik analiz sonuçları ile deney sonuçları yük-yer değiştirme ve eğilme momenti-dönme tepkileri açısından karşılaştırılmıştır. Mohyeddin ve ark. [3], üç boyutlu ayırık sonlu elemanlar kullanarak yığma duvar ile doldurulmuş betonarme çerçevelerin analizlerini elde etmişlerdir. Çözümlerinde, Ansys sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Harç ve tuğla bölgelerinin doğrusal olmayan davranışları için sabit doğrultulu yayılı çatlak modelini kullanmışlardır. Bu modelin etkinliğini incelemek amacıyla literatürde yer alan deneysel verilerden yararlanmışlardır. Modelin düzlem içi ve düzlem dışı yüklenme durumlarında, dolgu çerçeve üzerindeki etkisini doğru bir şekilde yansıttığını göstermişlerdir. Petracca ve ark. [4]

yığma duvarların analizi için yeni bir hasar mekaniği tabanlı sürekli ortama ait mikro model sunmuşlardır. Bu modeli literatürde yer alan ayırık mikro modelleme yöntemleriyle karşılaştırmışlardır. Zucchini ve Lourenço [5], yığma duvarların, doğrusal olmayan analizi için bir mikro mekanik model geliştirmişlerdir ve Vermeltfoort ile Raijmackers [6]' ın yığma duvarlar için yaptıkları deney sonuçlarını kullanarak modelin doğrulamasını yapmışlardır. Chaimoon ve Attard [7], donatısız yığma duvarların, kesme ve basınç yüklemeleri altındaki doğrusal olmayan davranışını analiz etmek için bir model sundular ve bu modelin doğrulamasını yapmak amacıyla Vermeltfoort ve ark. [8]' nın yığma duvarlar için yaptıkları deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

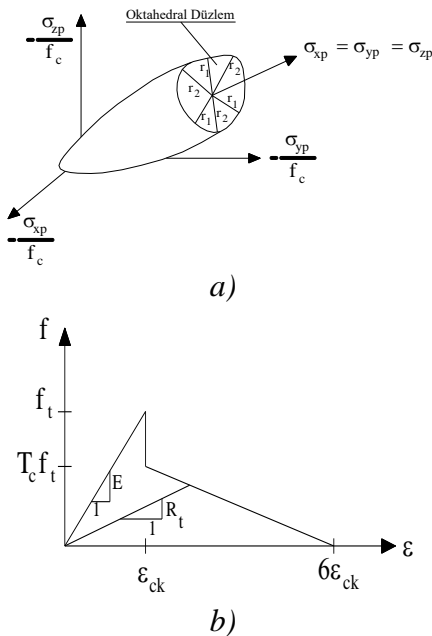
Yukarıda verilen literatür incelemesinden yığma duvarların nümerik analizlerinde kırılma ve hasar mekaniği teorilerinden faydalandığı görülmektedir. Yığma duvarların mikro ölçekli analizlerinde sabit doğrultulu yayılı çatlak modeli en yaygın olarak kullanılan modellerden biridir. Bu sebepten yığma yapıların mikro ölçekli analizlerinde söz konusu metodun nümerik çözümler üzerindeki etkinliğinin incelenmesi önem arz etmektedir. Birçok araştırmacı Eindhoven duvarı deney sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve çatlak geometrisini elde etmek için makro ve mikro modelleme tekniklerini kullanarak incelemeler yapmışlardır. [9] Bu nedenle nümerik sonuçları karşılaştırmak amacıyla Eindhoven duvarı deney sonuçlarından elde edilen deney verileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, yığma duvarların mikro model ile analizinde JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının [6] 3 boyutlu sabit doğrultulu yayılı çatlak yaklaşımı ile doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Duvarın harç ve tuğla kısımlarının lineer olmayan davranışını hesaplamak için William ve Warnke modelinin özel bir hali olan üç değişkenli beton modeli kullanılmıştır. Nümerik analizler için Ansys sonlu eleman programı içerisinde bulunan Solid65 beton elemanı seçilmiştir. Bu model yığma duvarların nümerik modellenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır [1-3]. Tüm bu

sebeplerden bu çalışmada mikro seviye modelde kullanılan harcın çekme dayanımının ve kayma gerilmesi iletim katsayısının nümerik çözümler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Eindhoven duvarlarının deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi ile oluşan çatlak bölgeleri nümerik sonuçlarla karşılaştırılarak yöntemin etkinliği incelenmiştir.

William-Warkne modeli

Bu çalışmada, William ve Warnke [10], modelinin özel hali olan üç değişkenli beton modeli kullanılmıştır. Üç değişkenli model William tarafından geliştirilmiş olup, düşük basınç altında çekmeye maruz kesitlerdeki beton için göçme yüzeyini tanımlamaktadır. Zeinkiewicz ve Taylor [11], beton gibi gevrek özelliğe sahip malzemeler için bu malzeme modelinin kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 1. Üç parametrelili model için a) göçme yüzeyi ve b) tek eksenli gerilme-şekil değiştirme bağıntısı [9].

William-Warnke' nin beton göçme yüzeyi modeli yığma yapıların geniş çapta modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılmıştır [12]. Bu model, Şekil 1.a' da görüldüğü gibi kesiti konveks olan bir koniye yakın görünüme sahiptir. Konveks kesit, simetrik ve düzgün

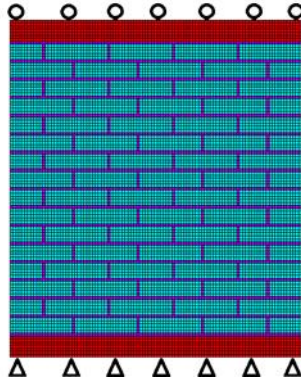
yapıdadır. Burada, σ_{xp} , σ_{yp} ve σ_{zp} birbirlerine dik asal gerilmeleri, f_c ise malzemenin tek eksenli basınç dayanımını belirtmektedir. Aynı zamanda, von Mises veya Drucker-Prager yaklaşımları bu modelin özel bir durumu olarak belirlenebilir [13]. Bu modelde, göçme yüzeyi içerisinde kalan gerilme değerleri elde edildiğinde malzeme doğrusal elastik davranış göstermektedir. Göçme yüzeyinin dışına çıkılan gerilme değerleri elde edildiğinde ise malzemede çatlama ve ezilmelerin ortaya çıkacağı ifade edilmektedir. Malzemede ortaya çıkan çatlaklar gerilme yumuşaması (stress softening) olarak dikkate alınmaktadır (Şekil 1.b).

JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven yığma duvarlarının mikro model analizi

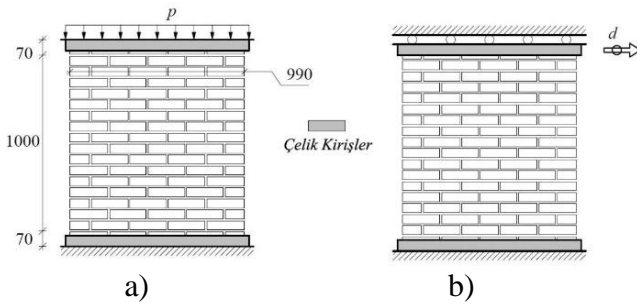
Bu çalışmada, JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven yığma duvarlarının mikro ölçekli modeli kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Bu duvarların boyutları $990 \times 1000 \times 100$ mm olup $210 \times 52 \times 100$ mm ölçülerinde sahip tuğlalar ile harç kalınlığı 10 mm olacak şekilde 16 sıra tuğla-harç kullanılarak inşa edilmiştir. Modelin en üst ve en altında 2 sıra çelik kiriş yer almaktadır. Deneysel çalışmada, ön yükleme olarak üst kirişe düşey bir tekil yük uygulanmış olup sonraki yükleme adımında ise aynı kirişe yatay yer değiştirme yükü uygulanarak duvarın kuvvet-yer değiştirme grafiği ile çatlak bölgeleri elde edilmiştir. Söz konusu bu ön yükleme durumu 30, 120 ve 210 kN olarak uygulanmış ve Eindhoven yığma duvarları sırasıyla JD4, JD6 ve JD7 olarak adlandırılmıştır.[6]. Bu duvarlar arasındaki tek fark toplam düşey yüküdür.

Bu modelde harç ve tuğla için ayrı ayrı malzeme özellikleri tanımlanmış olup malzemeler arası bağlantının rijit olduğu kabul edilmiş ve herhangi bir ara yüzey elemanı kullanılmamıştır. Çözümler için Ansys sonlu eleman programı kullanılmıştır. Sayısal modelde 33600 adet düğüm noktası ve 21978 adet üç boyutlu katı sonlu eleman kullanılmıştır (Şekil 2). Duvarın tabanındaki çelik kirişlerin alt yüzeyi yatay ve düşey doğrultularda tutulu, üstteki çelik kirişin üst yüzeyi ise sadece düşey doğrultuda tutulu

olacak şekilde sınır şartları uygulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Eindhoven duvarlarının sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları.



Şekil 3. Eindhoven duvarlarının düşey ve yatay yükleme durumları.

Bu çalışmada, Eindhoven yığma duvarlarının mikro modelleme ile doğrusal olmayan statik itme analizlerinde; harçın çekme dayanımının ve kayma gerilmesi iletim katsayısı β_t 'nin çözümler üzerine olan etkisi incelenmiştir. Tuğla ve harç malzemelerinin elastik ve elastik olmayan malzeme özellikleri Hemant ve ark. [14]'nin önerdiği eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir. Bu araştırmada tuğla malzemesinin elastisite modülü,

$$E_b = 300 f_{b,c} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada $f_{b,c}$ tuğlanın tek eksenli basınç dayanımını göstermektedir. Tuğla malzemesinin tek eksenli çekme dayanımı $f_{b,t}$ ise,

$$f_{b,t} = f_{b,c} / 25 \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Harç malzemesinin elastisite modülü ise,

$$E_m = 200 f_{m,c} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Harçın çekme dayanımının çözümler üzerindeki etkisi

Bu bölümde JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarında kullanılan harçın çekme dayanımının, yığma duvarın nümerik analizleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarları için harçın tek eksenli basınç dayanımı 10 MPa olarak seçilmiş olup [14] harçın elastisite modülü değerleri (3) denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Harçın tek eksenli çekme dayanım ($f_{m,t}$) değerleri ise sırasıyla 1/25, 1/20, 1/15, 1/10 ve 1/5 katsayıları kullanılarak hesaplanmış olup Tablo 1' de verilmiştir [14]. Tablo 2' de ise söz konusu duvarların tuğla malzemesine ait malzeme özellikleri görülmektedir. Kayma gerilmesi iletim katsayıları ise her iki malzeme de aynı değerlere sahip olduğu kabul edilmiş olup çatlağın açık ve kapalı durumları için sırasıyla 0.05 ve 0.90 olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 1. JD4, JD6, JD7 Eindhoven duvarları harç malzeme özellikleri.

	M1	M2	M3	M4	M5
E_m	2000	2000	2000	2000	2000
$f_{m,c}$	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
$f_{m,t}$	0.40	0.50	0.67	1.00	2.00

Tablo 2. JD4, JD6, JD7 Eindhoven duvarları tuğla malzeme özellikleri.

	JD4	JD6	JD7
E_b	3750	9000	16500
$f_{b,c}$	12.50	30.00	55.00
$f_{b,t}$	0.50	1.20	2.20

JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 50.30 kN olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD4-M1, JD4-

M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için sırasıyla 50.50, 50.21, 43.41, 52.34 ve 59.11 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için sırasıyla %0.45, %0.13, %13.65, %4.11 ve %17.5 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az farkın JD4-M2 için hesaplandığı görülmektedir.

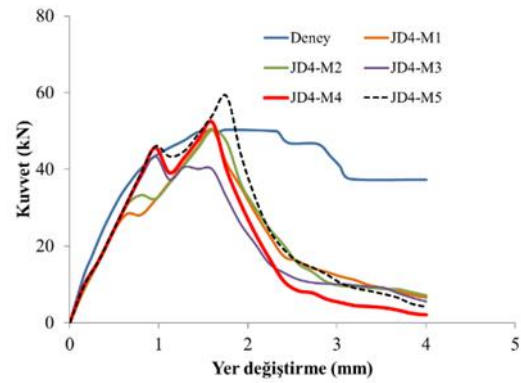
JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri (eşik yer değiştirme) 1.74 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için sırasıyla 1.60, 1.60, 0.96, 1.60 ve 1.76 mm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında, JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5'in nümerik sonuçları ile deney sonucu arasında sırasıyla %8.05, %8.05, %44.83, %8.05 ve %1.15 oranlarında farklar elde edilmiştir. Bu farklar içerisinde en küçük değer JD4-M5 çözümünden hesaplanmıştır. Ancak, taban kesme kuvvetleri arasındaki farklar dikkate alındığında en büyük farkın bu çözüm için elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle en uygun çözümün JD4-M2 için elde edildiği kabul edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. JD4 duvarı için harcın dayanım değeri değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

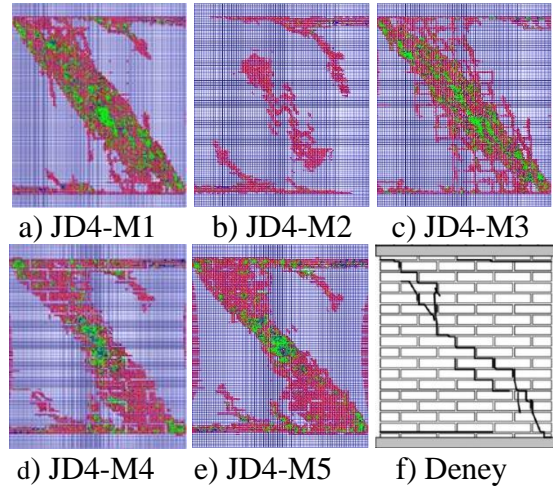
Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD4-M1	0.45	8.05
JD4-M2	0.13	8.05
JD4-M3	13.65	44.83
JD4-M4	4.11	8.05
JD4-M5	17.5	1.15

JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.60, 1.60, 0.96, 1.60 ve 1.76 mm'ye ulaştığı anlarda JD4 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 5' de görülmektedir. Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri

JD4 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında JD4-M2 çözümü hariç sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. JD4-M2 çözümünde ise bu diyagonal çatlak bölgesi sadece duvar orta bölgesinde yer almıştır. Üst ve alt kısımlarda elde edilen çatlak bölgeleri bu çatlak bölgesi etrafında dönerek ilerleyen bir forma geçiş yapmıştır. Bu durum JD4-M1, JD4-M4 ve JD4-M5 çözümlerinde de görülmektedir.



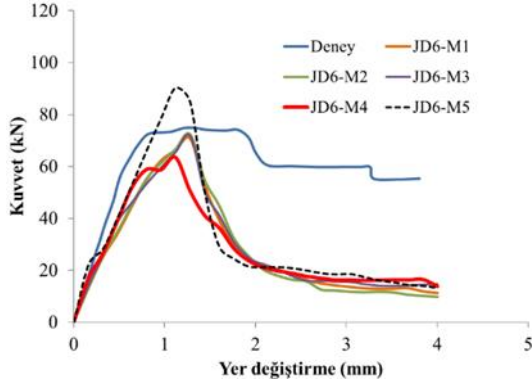
Şekil 4. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



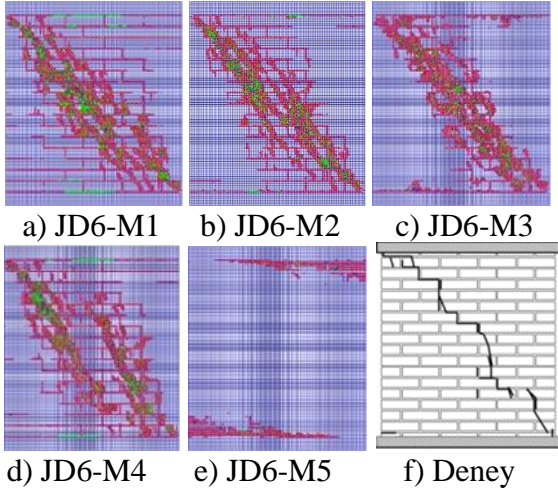
Şekil 5. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 74.87 kN olarak elde edilmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için sırasıyla

70.78, 72.46, 71.70, 63.49 ve 90.33 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 7. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

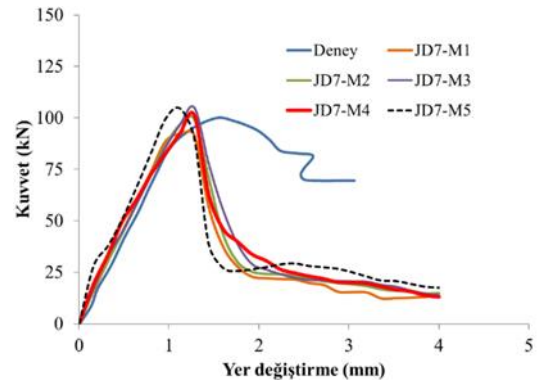
Tablo 4. JD6 duvarı için harcın dayanım değeri değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD6-M1	5.46	4.92
JD6-M2	3.22	4.92
JD6-M3	4.24	4.92
JD6-M4	15.20	8.20
JD6-M5	20.65	8.20

Nümerik sonuçlarda elde edilen maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için sırasıyla

%5.46, %3.22, %4.24, %15.20 ve %20.65 oranlarında farkların olduğu belirlenmiş olup en az fark JD6-M2 için hesaplanmıştır. JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri, 1.22 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.12 ve 1.12 mm olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında bu yer değiştirme değerleri deney sonuçlarına göre sırasıyla %4.92, %4.92, %4.92, %8.20 ve %8.20 oranlarında farklar elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark JD6-M2 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 4).

JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.12 ve 1.12 mm'ye ulaştığı anlarda JD6 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 7' de görülmektedir. Tüm nümerik çözümlerde çatlak bölgeleri JD6 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yüklemelerde JD6-M5 çözümü hariç, sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. JD6-M4 çözümünde elde edilen bu diyagonal çatlak bölgesi ise iki parça şeklinde elde edilmiştir.

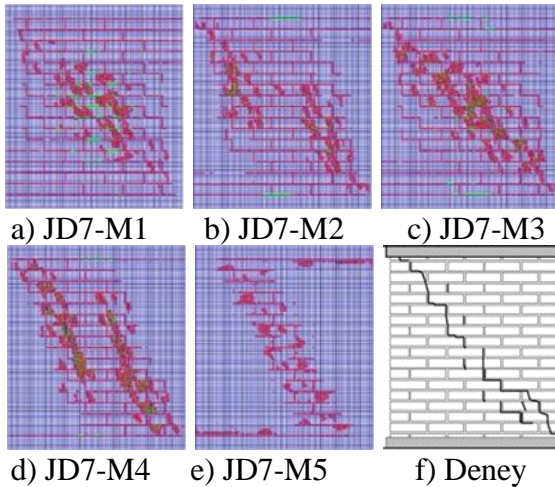


Şekil 8. JD7 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 100.17 kN olarak

belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için sırasıyla 93.38, 99.62, 104.98, 101.32 ve 104.70 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 8). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için sırasıyla %7.78, %0.55, %4.80, %1.15 ve %4.52 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az fark JD7-M2 için hesaplandığı görülmektedir. JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri 1.56 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için sırasıyla 1.12, 1.28, 1.28, 1.28 ve 1.12 mm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; deney sonucuna göre sırasıyla %28.20, %17.95, %17.95, %17.95 ve %28.20 oranlarında farklar elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark JD7-M2 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 5).

JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.12, 1.28, 1.28, 1.28 ve 1.12 mm' ye ulaştığı anlarda JD7 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 9' da görülmektedir.



Şekil 9. JD7 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri JD7 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında tüm çözümler için sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. Bu çatlak bölgesi JD7-M5 çözümü haricindeki tüm çözümlerde dağınık bir formda oluşmuştur. Aynı zamanda JD7-M4 çözümünde elde edilen bu diyagonal çatlak bölgesi iki parça şeklinde elde edilmiştir.

Tablo 5. JD7 duvarı için harcın dayanım değeri değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD7-M1	7.78	28.20
JD7-M2	0.55	17.95
JD7-M3	4.80	17.95
JD7-M4	1.15	17.95
JD7-M5	4.52	28.20

Bu bölümde harcın çekme dayanımı üzerine yapılan nümerik analizler dikkate alındığında, William-Warnke beton modeli için harcın çekme dayanımının 1/20 katsayısı kullanılarak hesaplanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Harcın β_1 katsayısının çözümler üzerindeki etkisi

Bu bölümde JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının nümerik çözümlerinde, harc malzemesine ait katsayısının çözümler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Harcın kayma gerilmesi iletim katsayıları; çatlakın kapalı durumu için 0.90 seçilmiş olup çatlakın açık durumu için sırasıyla 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 değerlerinde seçilmiştir. Seçilen bu katsayılar göre adlandırılan duvarlar Tablo 6' da görülmektedir. Tuğlanın kayma gerilmesi iletim katsayıları ise çatlakın açık ve kapalı durumları için sırasıyla 0.05 ve 0.90 olarak alınmıştır. Çözümlerde, tuğla malzemesinin mekanik özellikleri için Tablo 1' de JD4-M2, JD6-M2 ve

JD7-M2 çözümleri için verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 6. Çatlağın açık durumuna göre isimlendirilen Eindhoven duvarları.

	JD4	JD6	JD7
0.01	JD4-MBT1	JD6-MBT1	JD7-MBT1
0.05	JD4-MBT2	JD6-MBT2	JD7-MBT2
0.1	JD4-MBT3	JD6-MBT3	JD7-MBT3
0.2	JD4-MBT4	JD6-MBT4	JD7-MBT4
0.3	JD4-MBT5	JD4-MBT5	JD7-MBT5

JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 50.30 kN olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için sırasıyla 37.20, 50.21, 51.85, 51.45 ve 57.00 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 10). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için sırasıyla %25.97, %0.13, %3.15, %2.34 ve %13.58 oranlarında farkların oluştuğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az farkın JD4-MBT2 çözümünden hesaplandığı görülmektedir.

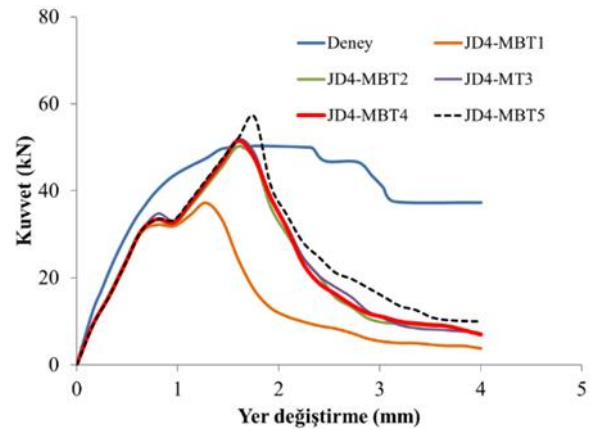
JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün oluştuğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri 1.74 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için sırasıyla 1.28, 1.60, 1.60, 1.60 ve 1.76 mm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında sırasıyla %27.27, %8.05, %8.05, %8.05 ve %1.15 oranlarında farklar elde edilmiştir. Bu farklar içerisinde en küçük değer JD4-MBT5 çözümünden hesaplanmıştır. Ancak, deney sonuçlarından ve nümerik çözümlerden elde edilen maksimum taban kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar dikkate alındığında en büyük farkın bu çözüm için elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle en uygun çözümün JD4-MBT2 için olduğu kabul edilmiştir (Tablo 7).

JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.60, 1.60, 1.60 ve 1.76 mm' ye ulaştığı anlarda JD4 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 11' de görülmektedir.

Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri, JD4 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yüklemelerinde sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri için en uygun çözüm olan JD4-MBT2' in hasar bölgesi deneyden elde edilen çatlak yörüngesine benzer bölgelerde meydana gelmiş olup çok dağınık bir formda elde edilmiştir.

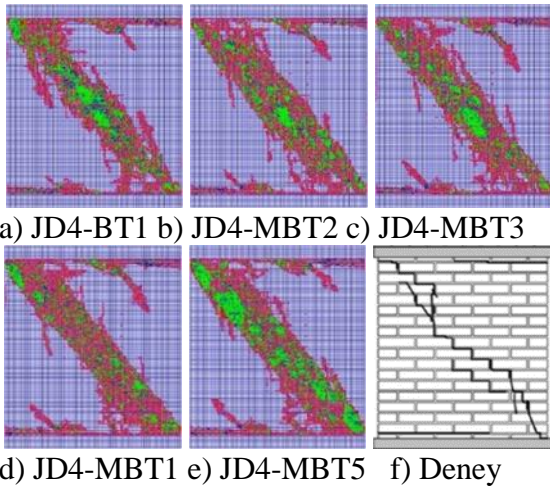
Tablo 7. JD4 duvarı için harcın β_t katsayısı değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD4-MBT1	25.97	27.27
JD4-MBT2	0.13	8.05
JD4-MBT3	3.15	8.05
JD4-MBT4	2.34	8.05
JD4-MBT5	13.58	1.15

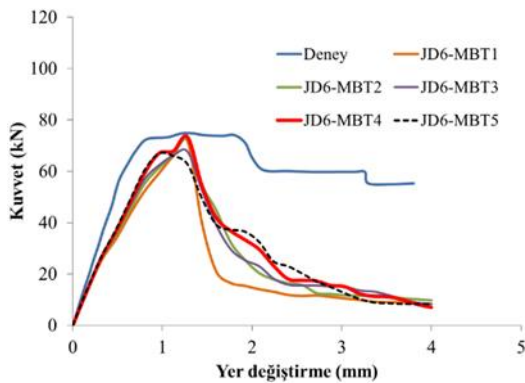


Şekil 10. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 74.87 kN olarak elde edilmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için sırasıyla 71.79, 72.46, 67.67, 73.35 ve 66.94 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 12). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için sırasıyla %4.11, %3.22, %9.62, %2.02 ve %10.60 oranlarında farkların oluştuğu belirlenmiş olup en az fark JD6-MBT4 için hesaplanmıştır.



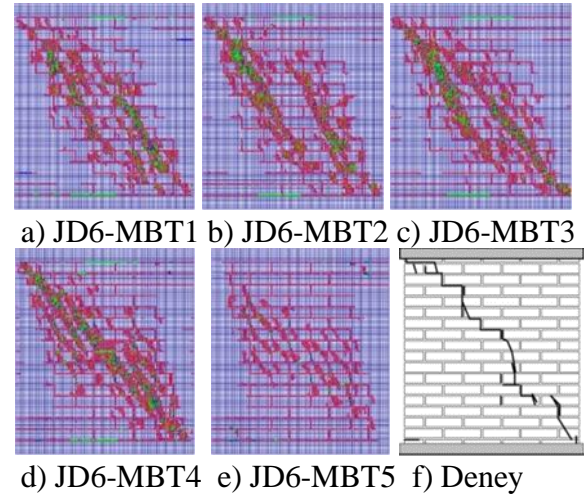
Şekil 11. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.



Şekil 12. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün oluştuğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri, 1.22 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme

değeri, JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.28 ve 0.96 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 çözümleri için sırasıyla %4.92, %4.92, %4.92, %4.92 ve %21.31 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark, JD6-MBT4 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 8).



Şekil 13. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

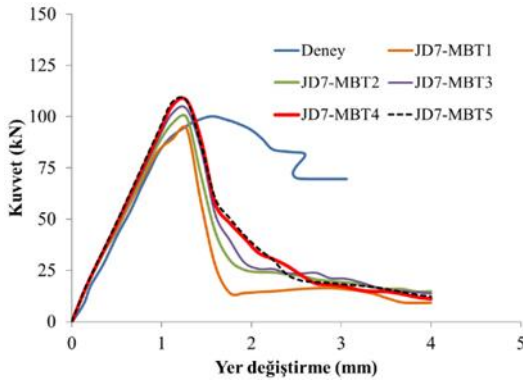
Tablo 8. JD6 duvarı için harcın β_1 katsayısı değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD6-MBT1	4.11	4.92
JD6-MBT2	3.22	4.92
JD6-MBT3	9.62	4.92
JD6-MBT4	2.02	4.92
JD6-MBT5	10.60	21.31

JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.28 ve 0.96 mm'ye ulaştığı anlarda JD6 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 13' de görülmektedir. Tüm

çözümlerde çatlak bölgeleri JD6 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında, JD6-MBT1, JD6-MBT2 ve JD6-MBT3 çözümlerinden elde edilen bu diyagonal çatlak bölgesi iki parça şeklinde elde edilmiştir. Bu çatlak bölgesi, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 çözümlerinde ise dağınık bir formda ortaya çıkmıştır.

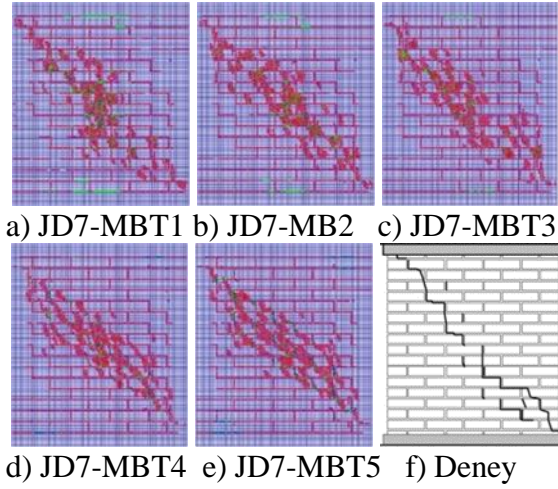
JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 100.17 kN olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 için sırasıyla 94.00, 99.63, 103.81, 107.83 ve 107.76 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 14). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 için sırasıyla %6.16, %0.55, %3.63, %7.65 ve %7.58 oranlarında farkların oluştuğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az fark, JD7-MBT2 için hesaplandığı görülmektedir.



Şekil 14. JD7 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün oluştuğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri 1.56 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 çözümlerinin tamamında 1.28 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yer değiştirme değeri deney sonucuyla karşılaştırıldığında %17.95 oranında daha küçük

olarak elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark JD7-MBT2 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 9).



Şekil 15. JD7 Eindhoven duvarının deneysel ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 için tepe yer değiştirme değerinin 1.28 mm'ye ulaştığı anlarda JD7 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 15'de görülmektedir. Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri JD7 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir.

Tablo 9. JD6 duvarı için harcın β_1 katsayısı değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD7-MBT1	6.16	17.95
JD7-MBT2	0.55	17.95
JD7-MBT3	3.63	17.95
JD7-MBT4	7.65	17.95
JD7-MBT5	7.58	17.95

Sonuçlar

Bu çalışmada, yığma duvarların mikro ölçekli analizinde 3 boyutlu sabit doğrultulu yayılı çatlak modelinin etkinliği incelenmiştir. Nümerik analizler için Ansys sonlu eleman programı içerisinde bulunan Solid65 beton elemanı seçilmiştir. Nümerik sonuçların karşılaştırılması amacıyla, JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri ve oluşan çatlak bölgeleri kullanılmıştır. Sabit doğrultulu yayılı çatlak modelinde, çatlama oluştuktan sonra kayma gerilmelerinin diğer yüzeye iletimi için “kayma gerilmesi transfer katsayısı” tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, harcın çekme dayanımının ve harcın kayma gerilmesi transfer katsayısının çözümler üzerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Harcın çekme dayanımı üzerine yapılan nümerik analizler dikkate alındığında, William-Warnke beton modeli için harcın çekme dayanımının 1/20 katsayısı kullanılarak hesaplanabileceği belirlenmiştir.
- Tüm duvarlarda harcın basınç ve çekme gerilmesi için kayma iletim katsayıları sırasıyla 0.90 ve 0.05 seçildiği zaman deney sonucundan elde edilen taban kesme kuvveti, eşik yer değiştirme değerleri ile nümerik çözümler arasında sırasıyla en fazla %3.22 ve %17.95’ lik farklar elde edilmiştir.
- Tüm Eindhoven duvarı için ilk hasarlar duvarların sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki çatlak bölgesi şeklinde elde edilmiştir. Sonraki yükleme adımlarında ise sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir.

Kaynaklar

[1] Karaton, M., Aksoy, HS., Sayın, E. ve Calayır, Y., “Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels”, *Engineering Failure Analysis*, 79, 408-421. (2017).

[2] Adam, JM., Brencich, A., Hughes, TG. and Jefferson, T., “Micromodelling of eccentrically loaded brickwork: Study of masonry wallettes”, *Engineering Structures*, 32, 1244-1251, (2010).

[3] Mohyeddin, A., Goldsworthy, HM. and Gad, EF., “FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading”, *Engineering Structures*, 51, 73-87, (2013).

[4] Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Zaghi, S., Camata, G. and Spacone, E., “Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls”, *Construction and Building Materials*, 149, 296-314, (2017).

[5] Zucchini, A., Lourenço, P.B., 2009, A micromechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls, *International Journal of Solids and Structures*, 46, 871-886.

[6] Vermeltfoort, AT. and Raijmakers, TMJ., “Deformation Controlled Tests in Masonry Shear Walls”, Part 2, Eindhoven University of Technology, Netherlands Scientific Report, TUE/BKO/93.08, (1993).

[7] Chaimoon, K., Attard, M. M., 2007. Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression, *Engineering Structures*, 29, 2056-2068.

[8] Vermeltfoort, A.Th, Raijmakers T.M.J., Janssen H.J.M., 1993, Shear tests on masonry walls. *Proceeding of the 6th North American masonry conference*. 1183-93.

[9] DOĞAN, H.N.A, 2016. Yığma duvarların mikro ve makro modelleme teknikleri ile lineer olmayan analizi, YL. Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[10] William, KJ. and Warnke, EP., “Constitutive Model for the Tri-axial Behaviour of Concrete, *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*”, Zurich, Switzerland, 19, 174, (1975).

[11] Zeinkiewicz, OC. and Taylor, RL., “Finite Element Method”, McGraw-Hill, Volume 2, 2th Edition, New York, USA, (1991).

[12] Cavicchi, A. and Gambarotta, C., Collapse “Analysis of Masonry Bridges Taking Into Account Arch Fill Interaction”, *Engineering Structures*, 27, 605-615, (2005).

[13] ANSYS, Finite Element Software, Houston, Texas, USA: Swanson Analysis System. Inc., (2015).

[14] Hemant, BK., Durgesh, CR. and Sudnir, KJ., “Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 728-739, (2007).