



OPEN  ACCESS

DUJE

Dicle University Journal of Engineering

ISSN 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Siraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Siraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Bilal GÜMÜŞ
Atilla Gencer DEVECİOĞLU
Halime ABAKAY TEMEL
İdris BEDİRHANOĞLU
Mehmet Emin ÖNCÜ

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)
Elektronik posta : muhendislikdergisi@dicle.edu.tr
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>, <https://duje.dicle.edu.tr/journal/>

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.

- Yahya Hışman ÇELİK (Batman Üniversitesi)
Erkan BAHÇE (İnönü Üniversitesi)
Didem OKTAY (YTU)
Sıtkı AKINCIOĞLU (Düzce Üniversitesi)
Ali Rıza MOTORCU (Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi)
Barıř ÖZLÜ (Aksaray Üniversitesi)
Mehmet ALTUĞ (İnönü Üniversitesi)
Umut ÖNEN (Mersin Üniversitesi)
İsrafil KÜÇÜK (Gebze Teknik Üniversitesi)
Gurbet CANPOLAT (Siirt Üniversitesi)
Musa KILIÇ (Batman Üniversitesi)
Edip ÇETKİN (Batman Üniversitesi)
Hilmi COŞKUN (İskenderun Teknik Üniversitesi)
Baki ÖZTÜRK (Hacettepe Üniversitesi)
Üsame DEMİR (Bilecik Üniversitesi)
Ünal DEĞİRMENCİ (Bingöl Üniversitesi)
Cengiz YILDIZ (Fırat Üniversitesi)
Gülřah ÇAKMAK (Fırat Üniversitesi)
Erdal ÖZBAY (Fırat Üniversitesi)
Ahmet ÇINAR (Fırat Üniversitesi)
İbrahim Halil TEKE (EÜAŞ)
Engin ORAKDÖĞEN (İTÜ)
İdris Bedirhanoğlu (DU)
Senem YILMAZ ÇETİN (DU)
M. Zahir Düz (DU)
Ömer Faruk CAN (DU)
Emrah Aslan (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

Derin öğrenme ile 3 boyutlu nokta bulutlarının sınıflandırılmasına genel bir bakış
(Derleme Makalesi)
Review of the classification of 3 dimensional point clouds with deep learning
(Review Article)
Muhammed Ahmet Demirtaş **1**

Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemleri için Farklı Transformatör
Modellerinin Tasarımı ve Analizi (Research Article)
Design and Analysis of Different Transformer Models for Wireless Power Transfer Systems
of Electric Vehicles (Research Article)
Yıldırım Özüpak **11**

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitin farklı matkap uçlarıyla delinmesinde işleme
parametrelerinin delaminasyon hasarına etkisinin değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)
Evaluation of the effect of machining parameters on delamination damage in drilling of
carbon fiber reinforced polymer composite with different drill bits (Research Article)
Meltem Altın Karataş **19**

Süperelastik Nikel-Titanyum şekil hafızalı alaşımların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık
ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisi (Araştırma Makalesi)
The effect of high temperature and aging heat treatment on the mechanical properties of
superelastic Nickel-Titanium shape memory alloys (Research Article)
Sedat Güven, Meltem Altın Karataş, Hasan Gökkaya, Yüksel Akınay **27**

Sleipner Çeliğinin Yüzey Finiş Modellemesinde Takım Yolu Stratejisinin ve Kesme
Parametrelerinin MRR ve Ra Üzerine Etkisi (Araştırma Makalesi)
The Effect of Tool Path Strategy and Cutting Parameters on MRR and Ra in Surface Finish
Modeling of Sleipner Steel (Research Article)
Hasan Ballıkaya **35**

The effect of mullite addition on wear properties of titania doped zirconia ceramics
(Research Article)
Mehmet Akif Hafizoğlu, Tahsin Boyraz, Ahmet Akkuş **43**

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1020/RAMOR 500 çelik çiftinin mikroyapı ve
mekanik özelliklerinin incelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of the microstructural and mechanical properties of AISI 1020/RAMOR 500
steel couple joined by friction welding (Research Article)
Derya Abak, Anıl İmak, İhsan Kırık **51**

Experimental and Numerical Modal Analysis of a Bladed Rotor (Research Article)
Gözde Sarı, Ahmet Fatih Ak, Ahmet Alper Akış, Engin Aydınöğlü **57**

Sürtünme kaynağı ile AA7075 alüminyum alaşımının kaynak edilebilirliğinin araştırılması (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of weldability of AA7075 aluminum alloy by friction welding (Research Article)</i>	65
Thermal and Mechanical Properties of Building Stones Used in Some provinces in the Marmara Region (Research Article) Ayşe Biçer	71
Maden Mühendisliği / Mining Engineering	
Eskişehir Bastnasit Cevherinde Bulunan Lantanın Zenginleştirilmesi (Araştırma Makalesi) <i>Benthic foraminifers and paleoenvironmental interpretation of the Miocene Eskigarzan Enrichment of Lanthanum from Eskişehir Bastnaesite Ore (Research Article)</i>	79
İbrahim Dolak, Rüstem Keçili	
İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering	
Sodyum Karbonat ile Aktive Edilmiş Cüruf Esaslı Karışımların Reolojik Özellikleri: Uçucu Kül ve Sıcaklık Etkisi (Araştırma Makalesi) <i>Detection of structural problems in historical buildings with non-destructive methods; Rheological Properties of Sodium Carbonate Activated Slag-Based Mixes: Effects of Fly Ash and Temperature (Research Article)</i>	87
Büşra Aktürk	
Moment Aktaran Çelik Çerçeve Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranışa Bağlı Yanal Yük Dağılımının İncelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of lateral load distribution in steel moment frame based on nonlinear behavior (Research Article)</i>	95
Mehmet Fatih Arat, Hakan Tacettin Türker	
Tarihi Diyarbakır sur kapılarındaki yapısal hasarların georadar (GPR) yöntemiyle belirlenmesi: Urfa Kapı örneği (Araştırma Makalesi) <i>Determination of the structural damages in the historical Diyarbakır city walls by georadar (GPR) method: The example of the Urfa Gate (Research Article)</i>	101
Nursen Işık, Fatma Meral Halifeoğlu, Mehmet Şakir Güler	
Asma katın neden olduğu döşeme süreksizliklerinin yapısal performans üzerine etkisi (Araştırma Makalesi) <i>The effect of slab discontinuities on structural performance caused by mezzanine (Research Article)</i>	111
Ercan Işık, İbrahim Baran Karaşin, Mehmet Emin Öncü	
Documentation and Sustainability of Construction Techniques for the Protection of Cultural Heritage: Kitchen Hearths and Chimneys in Traditional Diyarbakır Houses (Research Article) Anıl İnal, Neslihan Dalkılıç	127
Effect of Elastomeric Bearings in Bridge Piers (Research Article) Fevzi Sarıtaş	139

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.



Derin öğrenme ile 3 boyutlu nokta bulutlarının sınıflandırılmasına genel bir bakış

*Review of the classification of 3 dimensional point clouds with deep learning***Muhammed Ahmet DEMİRTAŞ¹**¹Muş Alparslan University, Muş, Turkey, ma.demirtas@alparslan.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4092-7284¹Kocaeli University, Kocaeli, Turkey, ahmet.demirtas@kocaeli.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*Geliş 3 Şubat 2022
Revizyon 23 Mart 2022
Kabul 25 Mart 2022
Online 30 Mart 2022*Anahtar Kelimeler:**Nokta bulutu, dering öğrenme, 3B nesne sınıflandırma*

ÖZ

Nokta bulutu (NB) bir vektör uzayında nesneye ait bilgilerin x,y,z koordinat sisteminde matematiksel olarak temsil edilen noktalar kümesidir. Noktalar kaydedilen uzaysal koordinat sisteminde sınıflandırılarak nesne ya da bir alanı ifade eden anlamsal bilgileri tanımlarlar. 3 boyutlu (3B) nokta bulutu gelişen teknolojilerle beraber nesnelere sınıflandırma, algılama ve tanıma alanlarında son zamanlarda oldukça popüler bir hale gelmiştir. Lazer tarama sistemleri ile taranan nesnelere 3B nokta bulutuna dönüştürülmüş ve bu verilerin sanal ortama aktarılması ile farklı veri setleri elde edilmiştir. 3B noktasal verileri derin ağlar ile başarılı bir şekilde sınıflandırmak için geliştirilen yöntemler detaylı olarak incelenmiştir. Nokta bulutlarına 3B koordinat sistemi ile birlikte farklı bilgiler dâhil ederek (derinlik ya da RGB (red-green-blue) farklı boyutlarda veya farklı yoğunlukta nokta bulutları oluşturulmuştur. Ayrıca nokta bulutu veri kümesindeki her bir noktaya ait; harici veya dâhili bilgiler eklenmiş RGB değerleri ile nesnelere renklendirilmiştir. Bu çalışmada 3B nokta bulutunu derin ağlar ile sınıflandıran yöntemlerin başarı performansları, avantajları, dezavantajları analiz edilmiştir. Özellikle uygulanan algoritmalar, denenmiş yöntemler ve oluşturulan modeller karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Son olarak makalede gelecekteki çalışmalara hız ve yön vermesi için güncel yöntemler kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

ARTICLE INFO

*Article history:*Received 3 February 2022
Received in revised form 23 March 2022
Accepted 25 March 2022
Available online 30 March 2022*Keywords:**point cloud, deep learning, 3D object classification*

ABSTRACT

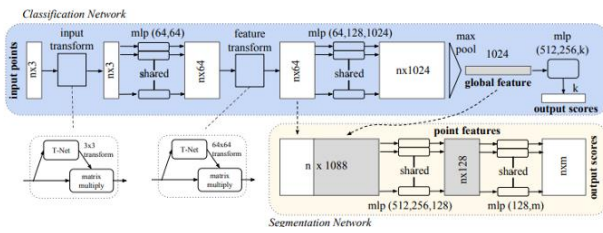
A point cloud is a set of points mathematically portrayed in a vectorial space or in the x, y, z coordinate plane of the object. Points are classified in the registered spatial coordinate plane and define semantic information that represents an object or an area. As technology develops, 3D point clouds have recently become eminently prominent in the range of classification, detection, and recognition of objects. Different data sets are attained by transforming the scanned objects into 3D point clouds and transferring them to the virtual environment with lidar scanning systems. Classification methods are developed to successfully classify 3D point data which is analyzed in detail. Dense point clouds of different sizes are created by encompassing distinctive information (depth or RGB) together with the 3D coordinate plane to the point clouds. In addition, for each point in the point cloud dataset; external or internal information has been supplemented and objects are colored with RGB values. In this paper, the success performances, advantages and disadvantages of the methods classifying the 3D point cloud with deep networks have been analyzed. In particular, the applied algorithms, the tried methods, and the created models are compared and discussed. As a result, the existing methods for giving speed and direction to future work are presented in a comprehensive manner.

Doi: 10.24012/dumf.1067736

* Sorumlu Yazar

Giriş

Derin öğrenme (DÖ) geçmiş yıllarda çok çeşitli bilgisayarlı görü görevlerinde, özellikle görüntü alanında oldukça yaygın ve başarılı bir performans göstermiştir. Bu sayede hava ve karasal lazer tarayıcılar, otonom araçlar ile toplanan nokta bulutu (NB) verileriyle daha net algılanan nesnelere elde edilmiştir. NB nesnelere ait bilgileri x,y,z koordinat düzleminde sayısal olarak ifade eden ve binlerce noktadan oluşan 3B dijital bir temsildir. Şekil 1.2'de gerçek hayatta kullanılan nesnelere dijital temsilleri verilmiştir. Ek olarak Lidar (Light Detection and Ranging) veya RGB-D kameralardan gelen 3B nokta bulutlarından 3B geometrik veriler elde edilmiştir. Bu verilerin elde edilmesi ile nokta bulutlarının DÖ modelleri ile kullanılmasını popüler bir araştırma noktası haline getirmiştir. NB doğrudan mekânsal yapılar, araçlar, yayalar, trafik işaretleri ve şehir planlaması gibi birçok alanda kullanılmıştır. Kullanım alanının genişlemesi bu alanda kullanılan DÖ yöntemlerinin NB işleme aşamalarında karşılaştığı problemleri genelleme yoluna gidilebilir bunlar; seyrek noktalar ile doğru bilgilerin nasıl temsil edileceği, kaynak kullanımı, büyük hacme sahip verilerin işlenmesi ve verilerin doğru bir şekilde segmentasyon ya da sınıflandırma yapılmasıdır. NB işlemek için ilk DÖ ağı PointNet kullanılmıştır. PointNet 3B NB işlemek için yeni bir DÖ ağı tasarlamış ve yaygın kullanılan bir model haline gelmiştir. Ayrıca PointNet çok katmanlı algılayıcılar (MLP) ve T-Net'ten yararlanarak yapısız 3B NB işlemek için ayrı bir ağ tasarlamıştır. PointNet T-Net'i değişmezliği korumak için kullanmış ve tahmin edilen dönüşüm matrisi ile geometrik dönüşümleri çarparak bu değişmezliği korumuştur. Sonrasında NB MLP ve maksimum havuz katmanından geçirilerek sınıflandırma yapılmıştır.



Şekil 1. PointNet mimarisi [1].

NB verileri düzensiz bir formatta olduğu için 3B voksel ızgaralarına dönüştürülür. Bu dönüşümde gereksiz yer kaplayan verilerin oluşması bazı sorunlara neden olmuştur. Bu sorunların üstesinden gelmek için PointNet nesne sınıflandırma, parça bölütleme, anlamsal sahne çözümlemeye kadar çeşitli uygulamalar için birleşik bir mimari sunmuştur [1]. PointNet modelinin şekil 1,1'de gösterilen bu temel yapısı sınıflandırma ve segmentasyon tahminlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sınıflandırma yapılırken genel özellikler, çıktı sonuçları için bir MLP'den geçirilmiştir. Segmentasyonda her noktanın sınıflandırılması ile küresel özelliklerin ve her noktadan farklı düzeylerde ara özelliklerin birleştirilmesi sonucu MLP'den geçirilmiştir. Bu adımlar güncel CNN

modellerinde ise nokta bulutlarını bir dizi evrişimli katmalardan geçirip farklı düzeylerdeki özelliklerini almıştır. Bu özelliklerden yola çıkarak yeni bir model PointNet ++ önerilmiştir. PointNet basit olmasına rağmen verimliliği yüksek ve etkili bir yöntemdir. PointNet temel alınarak elde edilen PointNet ++ [2] sürümü geliştirilmiş ve bu sürümler gelecekte önerilecek birçok çalışmaya referans sağlamıştır.

3B NB işleme üç ana başlık altında incelenmiştir: Nesne tanıma, kümeleme ve sınıflandırma adımlarıdır. Bu yöntemler ve algoritmalar gerçek hayatta farklı alanlarda kullanılan nesnelere, iç ve dış mekânları; tanıma sınıflandırma ve kümeleme üzerinde önemli bir yere sahip olmuştur.



Şekil 2. Nesnelere nokta bulutu ile temsil edilmesi [1].

Gerçek hayatta güvenlik analizleri ve trafik gürültüsü seviyeleri hakkında güncel bilgiler sağlama için, çok sayıda özel yazılımlarda artışa neden olmuştur [3].

Güncel modellerden ShapeNet ve ModelNet, düzenli 3B modellerden oluşan veri kümeleridir [4] [5]. Bununla birlikte, sağlam modeller geliştirmek amacıyla gürültülü ve eksik noktalar dikkate alınarak ScanNet ve KITTI gibi veri kümeleri gerçek ortam taramalarından elde edilmiştir [6] [7]. Bunun yanında NuScenes ve Lyft gibi otonom araç görevleri için tasarlanmış veri kümelerine farklı zaman ve ortamlar dâhil edilerek oluşturulmuştur [8].

Tüm bunları özetlemek gerekirse PointNet ve PointNet ++ uygulamaları gelecekte kullanılacak birçok çalışmaya temel olmuştur. Örneğin PointNet ++ 'dan PointWeb [9] SRN (Yapısal İlişki Ağı) [10] yöntemleri önerilmiştir. SRN, PointNet ++ donatmak için önerilmiş ve sonuç olarak PointNet ++'tan daha iyi performans elde etmiştir.

3 Boyutlu veri kümeleri oluşturma

Günümüzde 3B boyutlu Lidar ve Microsoft Kinect gibi tarayıcıların yaygın olarak kullanılması ile 3B NB verileri kolaylıkla oluşturulmaktadır. NB yapısız ve yoğun olması noktaları işleyecek bir model veya bir NB kütüphanesine ihtiyaç olduğunu göstermiştir. NB Kütüphanesi (Point Cloud Library (PCL)) [11] 3B nesnelere sınıflandırmak ve algılamak için en güncel algoritmaları içermektedir.

3B NB işleme aşamalarında toplanan nokta bulutlarının ön ve arka plana ayrılması gerekmektedir. Bu aşamalarda farklı NB'leri segmentlere ayırma, benzer özelliklere sahip noktaları ise anlamlı ve homojen olarak kümelemeyi hedeflemiştir. Segmentasyon, bir alan ya da mekândaki nesnelere bulma, tanıma, sınıflandırma ve özelliklerini çıkarma gibi çeşitli yönlerden analiz etmek

için yardımcı olmuştur [12]. 3B NB'yi anlamlı homojen kümelere ayırmak için girdi açısından grafik oluşturma, sınırları belirleme, pürüzsüzlük veya içbükey bilgileri ile bölümlenme yapmaktadır.

Shamir, bölümlenme tekniklerini sınır ağları üzerindeki segmentasyon problemini, bir optimizasyon problemi olarak formüleştirmiştir [13]. İki farklı ağ segmentasyonu tanımlamış: Bunlar parça ve yama segmentasyonudur. Segmentasyon, optimizasyon kriterlerine, farklı özellik ve tekniklere göre sınıflandırılmıştır. Segmentasyon, temel teknikler için genel algoritmalar, geometrik şekil işleme, anlamsal temelli şekil temsilini geliştirmek, 3B ağ ile şekil özelliklerini ve yapısını çıkarmıştır. Bu algoritmalar yaklaşım türlerine göre sınıflandırmış ve genel kümeleme algoritmasını kullanarak bağlantı sağlamıştır. Bu yaklaşımlar yaygın olarak, bölge tabanlı yöntemlerde özellikle NB işlerken noktaları bölümlere ayırmak ve geometrik ağ oluşturmak için kullanılmıştır [13, 14]. Bu yaklaşımların temel amacı 3B NB'yi bölümlere ayırmak olmuştur. Xu vd., göre 3B NB segmentasyon algoritmasının üç önemli özelliği vardır [15]. İlk olarak algoritma, nesnelere birbirinden ayırt etmeli ve niteliksel birçok farklı özelliklerden ayarlanabilmelidir. Özelliklerin sayısı arttıkça, algoritma bu özellikleri otomatik olarak nasıl değiştireceğini öğrenmelidir. İkincisi, bölümlenme algoritması, komşuluk bilgilerine göre seyrek bölgelerdeki noktaların etiketini çıkarmalıdır. Üçüncüsü, segmentasyon algoritması belirli 3B tarayıcıya uygulanmalıdır çünkü farklı lazer tarayıcılar farklı özelliklerde NB üretir ve aynı sahne bile farklı özelliklere sahip olabilirler. Sonuç olarak nesnelere ait 3B NB, birçok parçanın birleştirilmesi ve ön-arka planın birbirinden ayrılması ile nesnenin 3B verisi elde edilmiştir.

Yaygın kullanılan veri kümeleri

Bu bölümde, 3B nesnelere sınıflandırma, bölümlenme ve nesne algılama-tanıma için en sık kullanılan 3B NB veri kümeleri sunulmuştur. Açık kaynak veri kümelerinin kullanılma nedeni, farklı yaklaşımların performanslarını değerlendirmek, avantajlarını, dezavantajlarını belirtmek, uygulanan modelin yapısı hakkında bilgi almak ve önerilecek yeni yaklaşımlara kaynak olmasıdır.

ShapeNet 3B ham model verileri, halka açık çevrimiçi havuzlardan ve mevcut araştırma veri kümelerinden toplamıştır. Popüler ve herkese açık Trimble 3B ve Yobi3 iki depodaki 3B çokgen modellerden toplanmıştır. Trimble 3B Depo 2,4 milyon kullanıcı tarafından tasarlanmış, 3B modeller ve sahnelerden oluşmuştur. Yobi3D, çok çeşitli diğer çevrimiçi depolardan toplanan 350 bin ek modelden oluşmaktadır. Bu veri kümesi çok geniş bir nesne sınıfı, sahne kategorisi ve çok çeşitli şekillerden meydana gelmiştir. ShapeNet, 55 kategoride 51300 3B model içeren geliştirilebilir halka açık bir veri kümesidir [16]. Ek olarak ShapeNet farklı alt kümelere sahiptir. ShapeNetSem, 270 kategoriye ve 12000 model sahip ShapeNet alt kümesinden oluşturulmuştur. Bu düzenli ve küçük veri kümesi temel modelin kapasitesini değerlendirmek için kullanılmıştır. ShapeNetCore, tek düzenli 3B modeller ve manuel olarak doğrulanan

kategori ve hizalama notları içeren ShapeNet veri kümesinin bir alt kümesidir. Bu veri seti tahmini 51.300 3B model ve 55 ortak obje grubundan oluşmaktadır. ShapeNetCore PASCAL 3D + [17] veri setine ait 12 nesne grubunu da içermektedir.

ModelNet projesi üç bölüm sunmaktadır: ModelNet10, ModelNet40 ve Aligned40. ModelNet40 karşılaştırması en yaygın kullanılan modellerdir [16]. En yaygın nesne kategorilerini bulmak için Sun [18] veri tabanından elde edilen istatistiklerden yararlanmıştır.

Stanford Büyük Ölçekli 3B Kapalı Alanlar (S3DIS) veri kümesi, mimari tarz ve görünüm açısından çeşitliliği korumak için üç bina ve beş büyük ölçekli iç mekân sahnesinden oluşur. NB otomatik oluşturulmuş ve yapısal elemanlar (zemin, duvar) ortak mobilyalar dâhil olmak üzere 12 anlamsal nesne tespit edilmiş. Anlamsal bölümlenme için S3DIS [19], 6.000 m²'nin üzerinde, 215 milyon noktaya 271 odaya sahip birkaç binadan oluşan yeni bir veri kümesi oluşturulmuştur.

Semantic3D [20] dış mekân sahne bölümlendirmesi için lidar ile 110000 m² alandan ve 4 milyar noktadan oluşmaktadır. Bu veri kümesi şimdiye kadar kullanılan en büyük 3B NB veri kümesidir.

ScanNet, 3B kamera ile 1000'den fazla tarama yapılmış 1513 sahneden 2,5 M(milyon) kareden oluşan bir görünüme sahiptir. ScanNet kamera pozları, yüzey yapısı ve örnek düzeyinde semantik segmentasyon ile açıklanmış bir RGB-D video veri kümesidir [6]. Bu veri kümesi, sınıflandırma, semantik voksel etiketleme ve CAD (computer aided design) modeli gibi çok sayıda 3B sahne anlama görevleri içinde kullanılmaktadır.

Kitti veri seti çoklu görüntü verileri, yüksek çözünürlüğe sahip renkli ve gri kamera, Velodyne lazer tarayıcı ve bir GPS yerleştirme sistemi içeren otonom bir sürüş platformu ile arabalar, yayalar ve bisikletlilerden oluşmaktadır. Bu veriler nesne tespiti/takibi ve sahne akış tahminleri yapma imkanı sunulmuştur [22, 23].

Cornell RGBD veri kümesi iç mekân sahnelerinden oluşmuş; 24 ofis ve 28 ev olmak üzere toplamda 52 etiketli iç mekân sahneleri RGB değerlerine sahiptir. NB verileri, RGB-D SLAM kullanılarak [24] orijinal RGB-D görüntülerinden oluşturulmuştur. Veri kümesi, 27 nesne sınıfıyla etiketlenmiş 2495 segmente sahip olup yaklaşık olarak da 550 görünümünden meydana getirilmiştir.

VMR-Oakland veri kümesi, CMU kampüsü etrafında hareket ederek, 360 derecelik görüş alanına sahip bir karasal lazer tarama aracı ile toplanan noktaların metin tabanlı kaydedilmesi sonucu oluşturulmuştur. Her bir satıra her bir noktanın üç gerçek koordinat değeri(x,y,z) yazılmıştır [25].

Tablo 1. Yaygın kullanılan 3B NB veri kümeleri.

Tüm bu veri kümeleriyle beraber araştırmaları ve yapılacak pratik uygulamaları kısa sürede değerlendirmek için farklı Oakland [26], iQmulus [27] gibi birçok kaliteli fakat yaygın kullanılmayan veri kümeleri bulunmaktadır.

3 Boyutlu Sınıflandırma modelleri

3B nokta bulutları üç boyutlu koordinat sisteminde(x,y,z) sayısal temsil edilen noktaların geometrik özellikleri, yerel komşuluk değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. 3B NB sınıflandırma modellerinde genellikle farklı formatta kayıt edilen verilerin sınıflandırılması yapılmaktadır. Aşağıda belirtilen tabloda 3B nokta bulutları ve özellikleri verilmiştir.

3B nesnelere 3B NB modelleri ile test edilmiştir. NB yöntemleri, sınıflandırma yöntemlerine bağlı olarak iki sınıfta incelenmiştir: projeksiyon tabanlı yöntemler ve nokta tabanlı yöntemlerdir.

Projeksiyon tabanlı yöntemler

Genellikle düzensiz bir yapıya sahiptir ve belirlenen bir yöntemle 3B NB özelliklerini çıkarmaktadır. Çoklu görünüm ve hacimsel tabanlı olarak ikiye ayrılabilir.

Çoklu görünüm yöntemi

Görünüme dayalı yöntemler, 3B nesne tanıma işlemleri üzerinde önemli bir başarıya ulaşmıştır. Su vd., nokta bulutlarının çoklu gösterimine dayalı MvCNN (Multi-View CNN) yöntemini sunmuştur [28]. Bu yöntem 3B NB'yi 2B farklı açılardan elde edilmiş anlık görüntülerden elde etmiştir. Görünüm arasında yoğun bir tanımlayıcı oluşturmak için görüntü özellikleri başka bir CNN ağından geçirilmiştir. MvCNN, nesnelere farklı görünümdeki ilişkiler dikkate alınarak ayrılmıştır. Görünüm farklarını nicel olarak eşleştirilip fark değerlerine göre görünüm kümelerini gruplamıştır. Ayrıca görünüm tanımlayıcıların tahmin yapabilmesi için grup içi havuzlama ve gruplar arası yoğunluk değerleri alınmıştır. 3B nesnelere temsil ederken farklı görüntüler arasındaki ilişkilerin göz ardı edilmesi problemleri meydana getirmiştir. Problemleri çözmek için karşılıklı bölgeleri değişik yönlerden bağlamak ve bireysel görüntü bilgilerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Yang ve Wang bu probleme karşı bir ilişki Ağı (Relation Network) önermişlerdir [29].

Yu vd., görünüm tabanlı özellikleri birleştiren yöntemlerin, diğer yöntemlerden farkı, parçalar arası benzerlik olduğunu iddia etmişlerdir. Polinom çekirdeği ve çift doğrusal (bilinear pooling) havuzlama arasındaki ilişkiden yararlanarak [30] çift doğrusal havuzlama yoluyla yerel evrişimli özelliklerini bir araya getirip etkili bir 3B nesne gösterimi elde etmiştir.

Hacimsel tabanlı gösterim

Hacimsel gösterim yöntemleri; kapalı alana karşılık gelen hacimler, Öklid mesafesi ve hacimsel alanlar voksel haline getirilerek gösterilmiştir. Özellikle giriş değerleri nesnelere iç kısımlarına ait geometrik bilgileri elde edecek şekilde hedeflenmiştir. Hacimsel yöntemler genellikle girdi değerlerini voksel haline getirmektedir.

Veri Kümesi	Yapılan işlem	Sınıf	Veri Ölçeği
ShapeNet	Sınıflandırma	55	51300 model
ModelNet40	Sınıflandırma	44	12311 model
S3DIS	Segmentasyon	12	215 milyon nokta
Semantic3D	Segmentasyon	8	4 milyar nokta
ScanNet	Segmentasyon	20	2.5 milyon çerçeve
KITTI	Algılama-takip	3	802.56 nesne
Cornell RGBD	Rgb-d Sem. Seg	17	52 sahne
VMR-Oakland	Segmentasyon	27	550 görünüm.

VoxNet hacimsel gösterimi kullanan ilk NB işleyen yöntemdir. VoxelNet hacimsel gösterime sahip bir doluluk ızgara temsillerini denetimli 3B Evrişimli bir Sinir Ağı (3D CNN) ile birleştirerek 3B lazer ve sensörlerden alınan bilgileri tam olarak kullanmak için yeni bir mimari olan VoxNet'i önermiştir [31]. VoxNet, tahmin için CNN kullanır, mekânlara ait ayrıntılı bilgilerin kaybına yol açmıştır.



Şekil 3. ShapeNet 3B nesne örnekleri [16].

ShapeNet, insanlar tarafından doğrulanmış ve özelliklerin açıklamalarını sunan büyük ölçekli 3B modeller sunmuş ve bu modeller NB dağılımını öğrenmek için derin inanç ağlarını kullanmıştır. Bu yöntem, nesnelere ait 3B şekiller ve ızgaralar üzerindeki ikili değişkenleri olasılık dağılımları ile temsil etmiştir. Hacimsel yöntemler ile başarılı performans elde edilmiş; fakat bu yöntemlerin çoğu hesap karmaşası ve bellekte fazla yer kaplamasından dolayı ızgaraların çözünürlüğü sınırlı kalmıştır.

OctNet nokta bulutunu, normal ızgaralar boyunca sekiz bitlik bir dizi olarak kodlamış ve havuzlanan özellikleri aritmetik olarak hesaplamıştır. Seyrek 3B veriler üzerinde DÖ'nün bir temsili olan OctNet sunulmuştur [32]. Bu yöntem derin ve yüksek çözünürlüğe sahip 3B CNN etkinleştirmiş NB'yi hiyerarşik bölümlere ayırmak için karma bir ızgara-oktree yapısı sunarak verimliliği artırmıştır. OctNet, 3B nesne sınıflandırma, yön tahmini ve NB etiketleme dahil olmak üzere 3B görevler üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve avantajları belirtilmiştir. 3B şekilleri analizi etmek için Octree tabanlı Evrişimli Sinir Ağı olan O-CNN sunmuştur [33]. O-CNN 3B yüzeylerin kapladığı oktant hesaplamalarını kısıtlamış, bellek ve hesaplama maliyetini oktree derinliği artırdıkça büyütülmüştür. Bu da 3B CNN'yi yüksek çözünürlüklü 3B modeller için uygun hale getirmiştir. Bu bölümde anlatıldığı gibi hacimsel temsillerle ifade edilen yöntemler kalitesiz olabilir; çünkü voksellerin sadece küçük bir kısmı boş değildir ve her voksel içindeki ayrıntılı durumlar neredeyse hiç toplanmamıştır. O-CNN ise OctNet üzerine kurulan bu modelin eksik yanlarını tamamlamak için geliştirilmiştir.

Noktasal Tabanlı Yöntemler

Noktasal yöntemlerin, nokta komşuluklarına göre noktaları birleştiren projeksiyon tabanlı yöntemlerden farklı her bir noktaya ait özelliği bireysel noktalardan öğrenmiş olmasıdır.

Çoklu katman tabanlı yöntemleri

PointNet MLP oluşturulmuş ilk nokta tabanlı mimardır. Girdi ilk olarak, geometrik dönüşümler altında değişmezliği sabit tutmak için T-Net tarafından tahmin edilen afin (öteleme-döndürme-ölçeklendirme) dönüşüm matrisi ile çarpılmaktadır. Nokta kümesi bir MLP'den ve ortak hizalama ağından sonra genel özellikleri elde etmek için maksimum havuz katmanından geçirilmiştir. Bu temel yapı hem sınıflandırma hem de segmentasyon tahmini için kullanılmıştır. Sınıflandırmada, genel özellikler çıktı değerleri için bir MLP'den geçirilmiştir. Geleneksel CNN'ler, bir dizi evrişim katmanı ile farklı özellikleri temel alarak PointNet ++ geliştirilmiştir.

PointWeb önceki çalışmalardan esinlenerek bir bölgeyi daha iyi temsil etmek için her noktanın özelliklerini yerel bölge özelliklerine göre belirlemiş yerel bir komşuluk ile her noktayı yoğun bir şekilde birbirine bağlamıştır [34]. PointWeb, Point-Net ++ 'dan uyarlanmış ve yerel komşulukların bağlam bilgisini kullanmak için Uyarlanabilir Özellik Ayarı (AFA) ile özelliklerin kalitesini iyileştirmiştir.

Duan vd., yerel bölgelerindeki NB'nin yapısal bağımlılıkları arasında bağlantı kurmak için yapısal ilişki ağını (structural relation network/SRN) önermiştir [35]. PointNet ++ gibi nokta kümelerindeki ağ mimarileri, yerel yapıların iç etkileşimlerini dikkate almadan ayrı ayrı yakalamış; fakat SRN modülü insanların 3B nesnelere anlamasında kritik roller oynayan geometrik ve konuma bağlı ilişkilerini modelleyerek yerel bilgilerini eş zamanlı olarak kullanmıştır. Önerilen SRN modülü basit, yorumlanabilen diğer ağlarla kolayca uyum sağlayan bir ek denetim gerektirmemektedir. Bunlara ek olarak SRN, PointNet ++ donatmak için geliştirilen SRN daha başarılı bir performans göstermiştir.

Evrişimli tabanlı yöntemler

Genellikle CNN ile yapılan çalışmalarda 2B görüntüler üzerindeki evrişim çekirdeklerini, 3B NB üzerinde de çalışmak üzere genişletilmiştir. Makalede önceden belirtildiği gibi VoxNet doğrudan 3B evrişim uygulamıştır.

A-CNN, nokta bulutlarında tıkanık bölgelerdeki gürültüleri önlemek için, A-CNN ile küreler yerine halka tabanlı bir şema önermiştir [36]. 3B NB geometrik ve anlamsal özelliklerini derin ağlar aracılığıyla analiz etmek, geometrik yapılarının düzensizliğini, seyrekliğini önerilen A-CNN ile halka şeklindeki evrişim sayesinde doğrudan 3B NB'ye evrişimi tanımlamış ve hesaplama yapmıştır. Bu yeni evrişim işleminde hesaplama halka şeklindeki yapıları ve yönleri belirleyerek her noktanın yerel komşuluk geometrisini daha başarılı bir şekilde yakalamıştır.

Liu & Fan NB verilerinde istenilen şekli yakalamak ve NB analizini yapmak için normal ızgara CNN'i düzensiz konfigürasyonla genişleten RS-CNN (Relation-Shape

CNN) önermiştir [37]. RS-CNN ağının öğrenmedeki temel mantığı noktalar arasındaki geometrik kısıtlamadan gelmiştir. Bir RS-Conv çekirdeği, girdi olarak belirli bir nokta etrafındaki komşuları yakın noktasal ilişkilerden, noktalar arasındaki üst düzey ilişkileri eşlemeyi öğrenmiş ve öğrenilen haritalama ile komşuluğundaki mekânsal yapıyı kodlamıştır. RS-CNN, NB analizini bağlamsal şekillerden öğrenmek için hiyerarşik bir mimari geliştirmesi ile sinyal işleme düzeyinde geometrik değişkenliğe, ölçeklenebilirliğe uyum sağlayan büyük ölçekli sahneler üzerinde sınıflandırma ve segmentasyon yapmak için uygulamıştır.

Evrişim çekirdeklerinden oluşan bir başka ağ olan PointCov, ağırlık ve yoğunluk fonksiyonlarından meydana gelen 3B noktaların yerel koordinatlarının doğrusal olmayan fonksiyonlardan oluşan evrişim çekirdeklerinden oluşur [38]. PointConv evrişim işleminde önemli olan sürekli gizli bir 3B evrişimin Monte Carlo tahminini bulmasıdır. Bu adım belirlenen noktaya göre MLP'den, evrişim çekirdeklerinden, yoğunluk tahmininden ve ağırlıklandırma işlemlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, 3B evrişim, hafıza, hesaplama verimliliği ve kolay dağıtım için matris çarpımlarına ve 2B evrişime indirgenmiştir. PointCov'un en önemli katkısı, ağırlık fonksiyonlarının verimli bir şekilde hesaplanması için önerilen yeni bir formülün performansı önemli ölçüde iyileştirmesidir. Diğer yandan önerilen evrişim çekirdeği, 3B uzayda herhangi bir noktadaki dönüşüm ve permutasyon ile değişmeyen evrişimi hesaplamak için kullanılmıştır. PointConv, alt örneklenmiş özellikler bir nokta bulutundan orijinal çözünürlüğüne geri yaymak için ters evrişim operatörleri kullanmıştır. Buradaki fark evrişimi yoğunluk fonksiyonuna dayalı olarak almış ve Monte Carlo tahmini ile değiştirmiştir.

Lan vd., yerel bir bölgedeki komşu noktaların geometrik ilişkilerini modellemek için, GeoConv olarak adlandırılan kapsamlı evrişim benzeri bir işlemi her noktaya ve yerel komşusuna uygulayan Geo-CNN önerilmiştir [39]. Geo-CNN altı ortogonal baz ile alanı sekiz bölüme ayırıp ve belirli bir kadrantdaki (çemberin dörtte biri) tüm vektörleri üç bazla oluşturmuştur. Özellikler, ağırlık matrislerine karşılık gelen yöne ait matrisler boyunca bağımsız olarak çıkarılır ve geometrik vektör ile tabanlar arasındaki açıya göre toplanmıştır.

SFCNN (spherical fractal cnn) girdi NB ayrık küre koordinatlarına sahip düzenli ikozahedral kafesler üzerine yansıtılmıştır. Bu nedenle evrişim, küresel kafeslerden ve komşularından gelen birleştirilmiş özellikler üzerinde maksimum paylaşım yoluyla uygulanmıştır [40]. SFCNN, dönme değişmezliğini korur ve bozulmalara karşı dayanıklıdır. Nokta bulutlarını tanımak için küresel simetriye dayalı genel, esnek ve 3B dönüşle değişmeyen bir küreyi yaklaştırmak ve ayırmak için düzenli ikosahedral (yirmi yüzlü eşkenar üçgen) bir kafes ve fraktallerini (kırılma noktaları) tanıtarak, 3B noktaları işlemek için bir çerçeve sunmuştur [40]. Sunulan çerçeve, görüntü tanıma için evrişimli sinir ağlarından güçlü temsil özelliklerini ve

genelleme kabiliyetini miras alarak CNN'e benzer özellikler gösterir; fakat rotasyon ve bozulmalara karşı SFCNN sağlam özellikleri öğrenmek için CNN'i genişletmiştir. Küresel Fraktal Evrişimli Sinir Ağları ile (SFCNN) NB özelliklerini etkili ve sağlam bir şekilde öğrenmeyi gerçekleştirmiştir.

Grafik tabanlı yöntemler

Grafik ağları nokta bulutlarını grafik olarak algılar, grafiğin köşelerini noktasal değerlerden belirler ve grafiğin kenarlarını ise belirlenen her noktanın yakın komşuluğuna göre oluşturur.

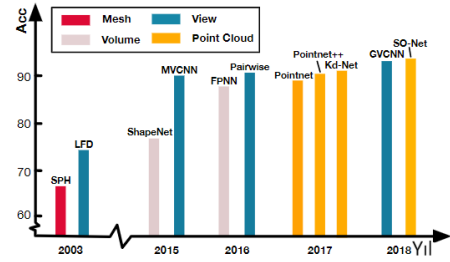
Simnovsky ve Komodakis her bir noktayı grafiğin tepe noktası olarak alıp komşu noktalar arasındaki bağlantılı kenarları bir MLP ağ filtresinden geçirdikten sonra kenar koşullu bir evrişim ağı önermiştir (EdgeCont) [41]. EdgeCont yerel komşuluk bilgilerini içerir; küresel şekil özelliklerini öğrenmek için kümeleme yapar, çok katmanlı sistemlerin özellik uzayındaki noktaların durumuna göre anlamsal özellikleri yakalar, VoxelGrid algoritması ile grafik oluşturmuştur. Sonrasında, DGCNN (Dynamic Graph CNN) ve EdgeConv'u uygulamak için bir MLP kullanılır ve her noktaya ait komşuların kenar özelliklerini simetrik olarak toplamıştır. Bu da grafik ağının her bir katmandan sonra dinamik olarak güncellenmesini sağlamıştır.

ClusterNet, nokta bulutlarındaki noktalardan değişmeyen özellikler oluşturmak için rotasyonla kesin değişmeyen bir dönüş (Rigorous Rotation-Invariant /RRI) modülü ve bir NB hiyerarşik yapılarını oluşturmak için denetimsiz ve derin bir hiyerarşik küme ağ yöntemi önermiştir [42]. Sunulan bu yöntem DGCNN'den referans alınarak nokta bulutları üzerindeki nokta ve şekil özelliklerini öğrenmek için denetimsiz eğitilmiştir.

Örgü tabanlı yöntemler

Nokta bulutları arasında ilişki bulunan noktaların birleştirilmesiyle örgü (mesh) yapısı oluşturmaktadır [43]. NB verileri ile oluşturulan nesnelere bu örgü yapılarının üçgenel olarak birleştirilmesi ile oluşturulur. Ayrıca nesnelere 3B NB olarak ifade edilen verilerin örgü yapısı yüzey bilgisi olarak ta kullanılmaktadır.

Genel anlamda 3B iki tür veri kümesi vardır: iç mekân sahneleri [6], [44] ve dış mekân kentsel sahneleri [8]. İç mekân sahnelerindeki NB ya yoğun derinlik haritalarından dönüştürülür ya da 3B noktasal örgülerden elde edilir. Dış mekân sahneleri, NB seyrek olduğu otonom sürüşler için tasarlanmıştır. Dış mekân sahnelerinden toplanan NB için hareketli ve sabit platform üzerinde kinematik ve geometrik parametrelerin konumları ve açıları eniyileme yapılarak [45] daha başarılı veri kümeleri elde edilebilir.



Şekil 4. Mesh dağılımı[49].

Benzer noktaları birleştirmek için oluşturulan benzerlik matrisi büyük bellek tüketimine neden olmuştur. Liu vd., her bir vokselin anlamsal puanını ve yakın voksellerin tahmini [45] için alt manifold seyrek evrişim ağından faydalanmıştır [46]. Son olarak, tahmini yakınlığa göre ve ağ yapısına göre gruplamak için bir kümeleme algoritması sunmuştur.

PointNet++, noktanın anlamlı etiketini ve ayrık maskelerini oluşturmak için temel bir yapı olmuştur [2]. Liang vd., ayırıcı kısımları öğrenmek için bu yapıya duyarlı bir kayıp önermiştir [47]. Bu öneri, benzer özellikleri ve noktalar arasındaki geometrik ilişkileri esas almıştır. Ayrıca dikkate duyarlı bir grafik CNN, yakın noktasal bilgiler ile eğitilerek iyileştirme yapılmıştır. VRMesh Studio NB otomatik sınıflandırma, özellik çıkarma ve düz yüzey örgü çıkarmayı sağlamıştır.



Şekil 5. a) NB b) Voksel c) Üçgen ağ(mesh) [48].

Analiz

Bu çalışmada incelenen makalelerden, NB verilerinin birçok zorluğuna rağmen başarılı çevrimici ve çevrimdışı olarak çalışan uygulamaların gelişime açık olduğu gösterilmiştir. NB'yi gerçek zamanlı ve doğru bir şekilde gruplara ayırmak için yeni modeller geliştirilmiştir. Yeni model ve algoritmaların gelişimine katkı sağlamak 3B NB'yi DÖ yöntemleri ile sınıflandırmak için kapsamlı bir araştırma makalesi sunulmuştur. Araştırılan yöntemlerin nokta bulutlarını sınıflandırılırken başarılı tahmin yöntemleri ile beraber bölge büyütme, model geliştirme, matematiksel model ve geometrik tekniklerin özellikleri ile analiz edilmiştir. NB sınıflandırma işlemlerinde nesnelere yerleştirilirken model seçim boyutunun zorluğu, gürültüye duyarlılığı ve karmaşık sahnelerdeki çalışmaları incelenmiş en iyi sonuçlar tartışılmıştır.

Tablo 2. 3B veri kümelerinin sınıflandırma sonuçları (% ortalama doğruluk) gösterilmiştir.

Model	ModelNet-40	ShapeNet	ScanNet
PointNet	89.2	83.7	73.9
PointNet++	90.7	-	84.5
PointWeb	92.3	-	85.9
SRN-PointNet++	91.5	-	-

PointConv	92.5	82.8	-
RS-CNN	93.6	86.1	-
DGCNN	92.2	86.2	-
So-Net	90.9	84.6	-

3B NB'ye ait özellikler sınıflandırmada DÖ tekniklerinin karmaşık sahnelerde hazır makine öğrenme algoritmalarından daha başarılı olduğu görülmüştür. Hazır makine öğrenimi teknikleri genellikle yavaş ve sonuçlar seçilen öznel çıkarma işlemine dayanmaktadır. Sonuç olarak 3B nokta bulutlarını sınıflandırmada DÖ yöntemlerinden PointConv, DGCNN ve ClusterNet önerilmiştir. Zengin bir kaynakça içeriğine sahip 3B NB sınıflandırma araştırmasının bu önemli konu hakkında değerli bilgiler sağlayacağına ve yeni araştırmalar için yol gösterici bir araştırma olacağına inanıyorum.

Sonuç

3B NB işleme alanında makale sayılarının yetersiz olduğu araştırılmış ve bu alanda literatürü zenginleştirmek için; Özellikle 3B NB ile 3B verilerin sınıflandırılma yöntemleri detaylı olarak araştırmacılar sunulmuştur. Bu çalışmada verilerin 3B bir ortamda noktasal olarak temsil edilmesi ve bu yapılandırılmamış noktaların eğitilmesi bu alanı diğer alanlardan ayırmıştır. Ek olarak bu alana özgü derin öğrenme tabanlı yeni modellerin geliştirilmesi ile 3B bir uzayda nesnelerin farklı yöntemlerle sınıflandırılması literatüre yeni kaynaklar sağlamıştır. Gelecek çalışmalarda yapılandırılmamış noktaların doğru bir şekilde nokta tabanlı yeni modül ve uygun yöntemlerle birleştirilmesi sonucunda bellek kullanımı ve hızlı performansa sahip modeller oluşturulabilir.

Standart bir DÖ mimarisinde, evrişim tabanlı ağlar, 3B nokta bulutlarında üstün performans gösterebilir. Düzensiz verileri işlerken ayırık ve sürekli evrişim ağlarını kullanırken dikkat edilmelidir. Düzensiz NB verilerinin güçlü yapısı nedeniyle, grafik tabanlı ağlar son zamanlarda daha fazla dikkat çekmiştir. Bununla beraber, alandaki grafik tabanlı ağların 3B alanda farklı özelliklere sahip grafik yapılarını genişletmek ve geliştirmek hala zordur.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Yazılan derleme makalesinde özellikle nokta bulutu alanında geliştirilen modellerin katkıları ve özellikleri kıyaslanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, saygıdeğer danışman hocam; Dr.Öğr.Üyesi A. Burak İNNER'e, teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Qi, C. R., Su, H., Mo, K., & Guibas, L. J. (2017'a). PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January*, 77–85. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.16>
- [2] Qi, C. R., Yi, L., Su, H., & Guibas, L. J. (2017). PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. *ArXiv, (Nips)*.
- [3] Mccarthy, T., Fotheringham, A. S., Charlton, M., Winstanley, A., & Malley, V. O. (2007). Integration of LiDAR and stereoscopic imagery for route corridor surveying. *ANational Centre for Geocomputation, National University of Ireland, Maynooth*.
- [4] Chang, A. X., Funkhouser, T., Guibas, L., Hanrahan, P., Huang, Q., Li, Z., ... Yu, F. (2015). *ShapeNet: An Information-Rich 3D Model Repository*. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1512.03012>.
- [5] Wu, Z., Song, S., Khosla, A., Yu, F., Zhang, L., Tang, X., & Xiao, J. (2015). 3D ShapeNets: A deep representation for volumetric shapes. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 07-12-June, 1912–1920*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298801>.
- [6] Dai, A., Chang, A. X., Savva, M., Halber, M., Funkhouser, T., & Nießner, M. (2017). ScanNet: Richly-annotated 3D reconstructions of indoor scenes. *ArXiv*.
- [7] Geiger, A., Lenz, P., Stiller, C., & Urtasun, R. (2013). Vision meets robotics: The KITTI dataset. *International Journal of Robotics Research, 32(11)*, 1231–1237.
- [8] Kesten, R., Usman, M., Houston, J., Pandya, T., Nadhamuni, K., Ferreira, A., ... Shet, V. (2019). Lyft Level 5 AV Dataset 2019. Retrieved from <https://level5.lyft.com/dataset/2020>.
- [9] Zhao, H., Jiang, L., Fu, C. W., & Jia, J. (2019). Pointweb: Enhancing local neighborhood features for point cloud processing. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019-June*, 5560–5568. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00571>.
- [10] Duan, Y., Zheng, Y., Lu, J., Zhou, J., & Tian, Q. (2019). Structural relational reasoning of point clouds. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019-June*, 949–958. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00104>
- [11] Rusu, R. B., & Cousins, S. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, (May)*. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980567>

- [12] Nguyen, A., & Le, B. (2013). 3D point cloud segmentation: A survey. *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM - Proceedings*, 225–230. <https://doi.org/10.1109/RAM.2013.6758588>
- [13] Shamir, A. (2006). Segmentation and shape extraction of 3D boundary meshes. *Eurographics*, (September), 137–149.
- [14] Pu, S., & Vosselman, G. (2006). Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 36.
- [15] Xu, Danfei ; Anguelov, Dragomir; Jain, A. (2018). PointFusion: Deep Sensor Fusion for 3D Bounding Box Estimation. (arXiv:1711.10871v2 [cs.CV] UPDATED). *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 244–253. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1711.10871>
- [16] Chang, A. X., Funkhouser, T., Guibas, L., Hanrahan, P., Huang, Q., Li, Z., ... Yu, F. (2015). *ShapeNet: An Information-Rich 3D Model Repository*. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1512.03012>
- [17] Xiang, Y., Mottaghi, R., & Savarese, S. (2014). Beyond PASCAL: A benchmark for 3D object detection in the wild. *2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2014*, 75–82. <https://doi.org/10.1109/WACV.2014.6836101>
- [18] Xiao, J., Hays, J., Ehinger, K. A., Oliva, A., & Torralba, A. (2010). SUN database: Large-scale scene recognition from abbey to zoo. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3485–3492. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5539970>
- [19] Armeni, I., Sener, O., Zamir, A. R., Jiang, H., Brilakis, I., Fischer, M., & Savarese, S. (2016). 3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces Supplementary Material. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1534–1543
- [20] Hackel, T., Savinov, N., Ladicky, L., Wegner, J. D., Schindler, K., & Pollefeys, M. (2017). Semantic3D.Net: a New Large-Scale Point Cloud Classification Benchmark. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(1W1), 91–98. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-91-2017>
- [21] Fritsch, J., Kuhn, T., & Geiger, A. (2013). A new performance measure and evaluation benchmark for road detection algorithms. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (Itsc), 1693–1700. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728473>
- [22] Geiger, Andreas, Lenz, P., & Urtasun, R. (2012). Are we ready for autonomous driving? the KITTI vision benchmark suite. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3354–3361. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2012.6248074>
- [23] Schoenberg, J. R., Nathan, A., & Campbell, M. (2010). Segmentation of dense range information in complex urban scenes. *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 2033–2038. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651749>
- [24] Xiong, X., Munoz, D., Bagnell, J. A., & Hebert, M. (2011). 3-D scene analysis via sequenced predictions over points and regions. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2609–2616. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980125>
- [25] Munoz, D., Bagnell, J. A., Vandapel, N., & Hebert, M. (2009). Contextual classification with functional max-margin markov networks. *2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPR Workshops 2009, 2009 IEEE*, 975–982. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2009.5206590>
- [26] Vallet, B., Brédif, M., Serna, A., Marcotegui, B., & Paparoditis, N. (2015). TerraMobilita/iQmulus urban point cloud analysis benchmark. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 49, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.03.004>
- [27] Su, H., Maji, S., Kalogerakis, E., & Learned-Miller, E. (2018). GVCNN: Group-View Convolutional Neural Networks for 3D Shape Recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 264–272. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00035>
- [28] Yang, Ze, & Wang, L. (2019). Learning relationships for multi-view 3D object recognition. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019-October*, 7504–7513. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00760>
- [29] Yu, T., Meng, J., & Yuan, J. (2018). Multi-view Harmonized Bilinear Network for 3D Object Recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2, 186–194. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00027>
- [30] Maturana, D., & Scherer, S. (2015). VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for real-time object recognition. *IEEE International Conference on*

- Intelligent Robots and Systems, 2015-Decem, 922–928. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353481>.
- [31] Riegler, G., Osman Ulusoy, A., & Geiger, A. (2017). Octnet: Learning deep 3d representations at high resolutions. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 3577-3586).
- [32] Wang, Y., Fathi, A., Kundu, A., Ross, D. A., Pantofaru, C., Funkhouser, T., & Solomon, J. (2020). *Pillar-Based Object Detection for Autonomous Driving. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12367 LNCS, 18–34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58542-6_2
- [33] Zhao, H., Jiang, L., Fu, C. W., & Jia, J. (2019). Pointweb: Enhancing local neighborhood features for point cloud processing. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019-June*, 5560–5568. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00571>
- [34] Duan, Y., Zheng, Y., Lu, J., Zhou, J., & Tian, Q. (2019). Structural relational reasoning of point clouds. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019-June*, 949–958. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00104>
- [35] Komarichev, A., Zhong, Z., & Hua, J. (2019). A-cnn: Annularly convolutional neural networks on point clouds. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 7421-7430)*.
- [36] Liu, Y., Fan, B., Xiang, S., & Pan, C. (2019). Relation-shape convolutional neural network for point cloud analysis. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 8895-8904)*.
- [37] Wu, W., Qi, Z., & Fuxin, L. (2019). Pointconv: Deep convolutional networks on 3d point clouds. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 9621-9630)*.
- [38] Lan, S., Yu, R., Yu, G., & Davis, L. S. (2019). Modeling local geometric structure of 3d point clouds using geo-cnn. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 998-1008)*.
- [39] Rao, Y., Lu, J., & Zhou, J. (2019). Spherical fractal convolutional neural networks for point cloud recognition. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 452-460).
- [40] Simonovsky, M., & Komodakis, N. (2017). Simonovsky, Komodakis - 2017 - Dynamic Edge-Conditioned Filters in Convolutional Neural Networks on Graphs.pdf. *Cvpr*, 3693–3702.
- [41] Hassani, K., & Haley, M. (2019). Unsupervised multi-task feature learning on point clouds. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 8160-8171).
- [42] Bischoff, B.S., et al. 2002. OpenMesh—a generic and efficient polygon mesh data structure. In *OpenSG Symposium*.
- [43] S. Song, S. P. Lichtenberg, and J. Xiao, “Sun RGB-D: A RGB-D scene understanding benchmark suite,” in *CVPR*, 2015.
- [44] İnnner, A. Burak (2013). *Sweart Platform Benzetim ve Eniyileme Yazılımının Gerçekleştirilmesi*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli
- [45] C. Liu and Y. Furukawa, “MASC: Multi-scale affinity with sparse convolution for 3D instance segmentation,” *arXiv preprint arXiv:1902.04478*, 2019.
- [46] B. Graham, M. Engelcke, and L. van der Maaten, “3D semantic segmentation with submanifold sparse convolutional networks,” in *CVPR*, 2018.
- [47] Z. Liang, M. Yang, and C. Wang, “3D graph embedding learning with a structure-aware loss function for point cloud semantic instance segmentation,” *arXiv preprint arXiv:1902.05247*, 2019.
- [48] Hoang, L., Lee, S. H., Kwon, O. H., & Kwon, K. R. (2019). A Deep Learning Method for 3D Object Classification Using the Wave Kernel Signature and A Center Point of the 3D-Triangle Mesh. *Electronics*, 8(10), 1196.
- [49] Feng, Y., Feng, Y., You, H., Zhao, X., & Gao, Y. (2019, July). Meshnet: Mesh neural network for 3d shape representation. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 33, No. 01, pp. 8279-8286).



Araştırma Makalesi / Research Article

Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemleri için Farklı Transformatör Modellerinin Tasarımı ve Analizi

Design and Analysis of Different Transformer Models for Wireless Power Transfer Systems of Electric Vehicles

Yıldırım Özüpak*

Dicle Üniversitesi, Silvan MYO, Elektrik ve Enerji Programı, yildirim.ozupak@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1780-3152>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Şubat 2022
Revizyon 26 Mart 2022
Kabul 27 Mart 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

KGA Transformatör,
Manyetik Rezonans,
SEY.

ÖZ

Kablosuz güç aktarımı, elektrikli araçların, implante edilmiş tıbbi cihazların vb. kablosuz şarjın geniş uygulamaları nedeniyle gelişmekte olan bir teknolojidir. Tasarımcıların kablosuz güç aktarımını (KGA) daha verimli ve kullanıcı dostu haline getirebilmeleri için bu uygulamaların önemli noktalarını bilmeleri gerekmektedir. KGA sisteminin tasarımı için yüksek frekanslı bir transformatörün uygun tasarımı en önemli adımdır. Bu yüksek frekanslı transformatörlerden güç aktarımı sırasında minimum kayıpları elde etmek için endüktif güç aktarım ilkesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araç şarjı için tasarlanmış yüksek frekanslı bir transformatörün tasarımı ve analizi sunulmuştur. Bu tasarımda, primer ve sekonder bobinler arasındaki farklı mesafelere sahip çeşitli transformatör konfigürasyonları, bağlantı katsayısı ve karşılıklı endüktans gibi kablosuz güç aktarım parametreleri için analiz edilmiştir. Tasarımlar, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı çözüm gerçekleştiren ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak bu çalışmada, KGA sistemi için dairesel ve dikdörtgen tip transformatör tasarımlarının analiz sonuçları karşılaştırılmış ve optimum tasarım belirlenmeye çalışılmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 February 2022
Received in revised form 26 March 2022
Accepted 27 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

WPT Transformer,
Magnetic Resonance,
FEM

ABSTRACT

Wireless power transmission, electric vehicles, implanted medical devices, etc. It is an emerging technology due to the wide applications of wireless charging. Designers need to know the key points of these applications in order to make wireless power transmission (WPT) more efficient and user-friendly. Appropriate design of a high frequency transformer is the most important step for the design of the WPT system. The principle of inductive power transfer is used to obtain minimum losses during power transfer from these high frequency transformers. In this study, the design and analysis of a high-frequency transformer designed for electric vehicle charging is presented. In this design, various transformer configurations with different distances between primary and secondary coils are analyzed for wireless power transfer parameters such as coupling coefficient and mutual inductance. The designs are simulated using ANSYS Maxwell software, which performs solutions based on the Finite Element Method, and the results are obtained. Finally, in this study, the analysis results of circular and rectangular type transformer designs for the WPT system were compared and the optimum design was tried to be determined.

Doi: 10.24012/dumf.1079729

* Sorumlu Yazar

Giriş

Kablosuz güç aktarımı (KGA), otomobil sektöründe çalışan araştırmacıların merak ve ilgi oldağı haline gelen konulardan biridir. KGA sistemi araç ile güç kaynağı arasında iletken olmadan elektrik gücünü aktarmak için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu sistem, biyomedikal implantlar (Zeng ve diğerleri 2018), elektrikli araçlar, sensör ağları ve endüstriyel otomasyon dahil olmak üzere çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Ulaşım ve biyomedikal alanlarında da son on yılda yapılan araştırmalar, kablosuz şarjın kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır [1-3].

KGA sistemi genel olarak endüktif güç aktarımı (EGA) ve kapasitif güç transferi (KGT) olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir [4]. EGA'nın çalışma prensibi, elektrik prizinden alınan enerjinin manyetik rezonans yoluyla araçların akülerine aktarılması şeklindedir. Şarj cihazındaki güç dönüştürme aşaması, düşük frekanslı besleme gücünü yüksek frekanslı alternatif akıma (AC) dönüştürür. Alıcı olarak belirlenen sekonder bobin, verici olarak belirlenen primer bobinden yüksek frekanslı AC'yi alıp AC doğrultucu tarafından doğru akıma (DC) dönüştürülür. DC güç, akünün şarj edilmesi için kullanılır. KGT sistemi gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu teknolojiye güç aktarımı için çift kuplaj kapasitörü kullanılmaktadır. Kapasitörler haricinde diğer güç dönüştürme sistemleri, doğrultucu ve evirici dahil olmak üzere, EGA sistemi le aynı özelliklere sahiptir. KGT sisteminin boyutu ve maliyeti nispeten düşük olsa da bu sistem yalnızca düşük güçlü uygulamalar için uygundur [5]. Bundan doolayı dört tekerlekli araçların çoğu şarj cihazları EGA sismine dayanmaktadır.

Bir EGA sistemli şarj cihazında fiziksel temasın olmamasından dolayı, verici ve alıcı sargılarının şekli, boyutu ve konumu verimli bir güç aktarımında hayati bir rol oynamaktadır. KGA transformatörlerinde kullanılan U-nüveleri ve E-nüveleri daha önceki çalışmalarda yüksek kuplaj katsayısı elde etmek için kullanılmıştır. Ancak bu nüve şekillerinin kalın olmaları KGA sistemlerinde uyumsuzluk meydana getirmekteydi. Birçok araştırmacı, elektrikli araçlar şarj sisteminin verimliliğini artırmak için farklı bobin şekillerini kullanmaktadır. Bir çalışmalarında kablosuz şarj için tek ve çift taraflı EGA transformatör sargı tasarımı karşılaştırılmıştır [6]. Çift taraflı sargılı transformatörlerin boyut olarak kompakt olduğunu, daha az ağırlığa sahip olduğunu ve transformatör bobinlerinin yanlış hizalanmasına karşı iyi bir esnekliğe sahip olduğunu öne sürmüşlerdir. Aynı yazar farklı farklı bir çalışmalarında EGA transformatörleri için dairesel ve dikdörtgen tasarım gibi iki farklı bobini kullanmışlardır. Dairesel bobinin primer ve sekonder bobinler arasında daha iyi bir kuplaj katsayısı olduğu sonucuna varmışlardır. Kablosuz güç aktarımı için tek taraflı ve çift taraflı dikdörtgen çekirdekli transformatör tasarımı yapılmıştır [7]. Çift taraflı sargılı dikdörtgen çekirdekli bir transformatörün kompakt olduğunu ve bobinlerin yanıl yönlerde yanlış hizalanmasına karşı daha az duyarlı olduğunu öne sürmüşlerdir. Onar ve ark. 2016 yılında Toyota RAV4 aracı için uyumlu ve benzersiz transformatör bobini ile yüksek

güçlü KGA tabanlı bir şarj şeması önermişler [8]. Eşleştirilmiş bobinli KGA'nın daha yüksek bir bağlantı faktörü ve verimlilik ile sonuçlandığını öne sürmüşlerdir. Chinthavali ve ark. KGA sisteminde bobinleri enerjiyi iletmek ve almak için çift izole bir sargı önermişler ve sistemim maksimum %85 verimlilikle çalıştığı sonucunu elde etmişler [9].

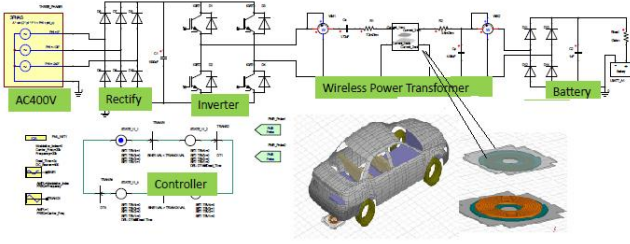
Genel olarak, KGA sistemlerinde, artan hava boşluğu ve bobinlerin yanlış hizalanması ile sistemin güç aktarım verimliliği hızla azalır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, rezonans yöntemi ve çoklu alıcıların kullanımı gibi bazı yeni teknikler önerilmiştir [10]. Kompanzasyon ağları ve çift yönlü güç akışı kontrol yöntemleri sistem verimliliğini arttırmak için kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmada, kablosuz güç aktarım sistemi için EGA transformatörünün tasarımı yapılmıştır. Aynı sargı yapısına sahip dairesel nüveli transformatör, farklı sargı yapısına sahip dairesel nüveli transformatör ve dikdörtgen dilimli ferit nüveli transformatör gibi çeşitli tasarım konfigürasyonları ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, kablosuz güç aktarım teknolojisinde ve kablosuz şarjdaki uygulamalarda ilerleme kaydedildiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, Ansys-Maxwell ortamında modelleme yapılarak KGA sisteminin yapısıyla ilgili hususlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elektrikli araçlar ve bileşenleri için KGA'nın blok şeması, EGA'nin modellenmesi ilgili matematiksel denklemleri, simülasyon sonuçlarını ve dikdörtgen bobinin performansı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

Materyal ve Metot

Transformatörün Modellenmesi Elektrikli Araçlar için KGA Sisteminin Blok Şeması

KGA sisteminin temel yapı taşı ve kablosuz şarj sisteminin devre şeması Şekil 1'de sunulmuştur. Şekillerden de görüleceği üzere şebekeden gelen AC beslemesi, kontrolsüz bir doğrultucu tarafından DC'ye dönüştürülmektedir. DC gücü, tam köprü izoleli bir DC-DC dönüştürücü aracılığıyla aküye aktarılmaktadır. Tam köprü izoleli DC-DC dönüştürücü, evirici, yüksek frekanslı transformatör ve doğrultucu gibi üç bloğun bir araya gelmesi ile elde edilmiştir. Yüksek frekanslı KGA transformatörlerinde, primer sargı şarj istasyonunda, sekonder sargı ise elektrikli araçta bulunmaktadır. DC kaynağı, bir invertör kullanılarak yüksek frekanslı AC'ye dönüştürülmüş ve transformatörün primerine verilmiştir. Transformatörün sekonder tarafında bulunan yüksek frekanslı AC çıkışı, elektrikli aracın aküsünü beslemek için DC'ye dönüştürülmüştür. Kontrolör, inverterin giriş parametrelerini değiştirerek sürekli bir güç akışı sağlamaktadır.

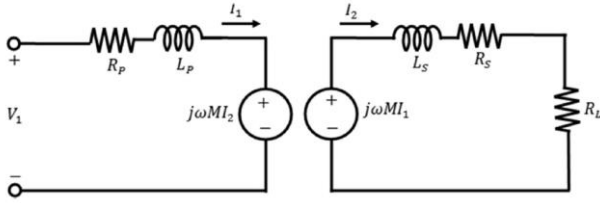


Şekil 1. KGA sisteminin temel yapısı ve kablosuz şarj sisteminin devre şeması.

EGA sistemine dayanan KGA transformatörünün modellemesi Şekil 2'de verilen eşdeğer kuplajlı devre modeli dikkate alınarak yapılmıştır. Primer sargı verici, sekonder sargı alıcı olarak tanımlanmıştır. EGA trafo modelinin eşdeğer devresinde primer taraf öz endüktansı ve direnci L_p ve R_p olarak belirtilmiştir. Sekonder tarafın öz endüktansı ve direnci sırasıyla L_s ve R_s olarak gösterilmiştir. Sargılar arasındaki karşılıklı endüktans M olarak ifade edilmiştir. M ile kuplaj katsayısı k arasındaki ilişki denklem (1)'de verilmiştir.

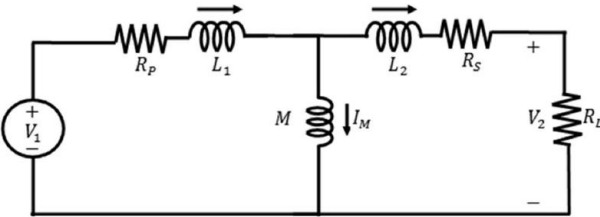
$$M = k\sqrt{L_p L_s} \quad (1)$$

Burada k , transformatörün kuplaj katsayısıdır.



Şekil 2. EGA transformatörünün kuplaj devre modeli

Yukarıdaki eşdeğer devrenin kuplaj devre çalışmasına dayanarak, Şekil 3'te gösterildiği gibi EGA transformatörünün iletken olarak kuplajlı eşdeğer devresi elde edilmiştir. I_M , mıknatıslanma akımını, L_1 ve L_2 verici ve alıcı taraflardaki kaçak endüktansları, M ise karşılıklı endüktansı ifade etmektedir.



Şekil 3. İletkenle bağlanmış bir EGA transformatörünün eşdeğer devresi

L_1 ve L_2 parametreleri şu Denklem (2) ve (3)'te verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$L_1 = L_p - M \quad (2)$$

$$L_2 = L_s - M \quad (3)$$

Genel olarak, EGA sistemine dayalı transformatörün güç çıkış performansı, açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımından (I_{sc}) elde edilmektedir. Açık devre gerilimi, yük direnci R_L devreden çıkarıldığında verici bobin akımından dolayı alıcı bobinde indüklenen gerilimdir [12]. Bu değerler aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$V_{oc} = j\omega M I_1 \quad (4)$$

$$I_{sc} = \frac{M I_1}{L_2} \quad (5)$$

I_{sc} , yük direnci R_L kısa devresi sırasında transformatör tarafından sağlanan maksimum kısa devre akımını temsil etmektedir. Bu akım, alıcı bobin endüktansının ωL_2 empedansı ile sınırlandırılmıştır. Transformatörün sekonder bobininin kompanze edilmemiş VA cinsinden güç değeri (PT) I_{sc} ve V_{oc} parametrelerinin çarpımı ile elde edilmektedir [13].

$$P_T = V_{oc} * I_{sc} = \omega I_1^2 (M^2 / L_2) \quad (6)$$

Maksimum güç aktarımı için alıcı bobinin endüktans etkisi bir kapasitör kullanılarak telafi edilebilir. LC kombinasyonu, maksimum güç aktarımı sırasında besleme frekansında rezonansa girmektedir. Genel olarak, kompanzasyon kondansatörü (C) seri veya paralel olarak bağlanabilir. Seri kompanzasyonda, alıcı tarafının akımı alıcı bobinin kalite faktörü (Q) ile artırılır, ancak paralel kompanzasyon için alıcı bobin voltajı artırılır.

$$Q = \omega L_s / R_s \quad (7)$$

Bir EGA'nın kompanzasyon üzerindeki güç çıkışı (P_o) şu şekilde ifade edilebilir [14]:

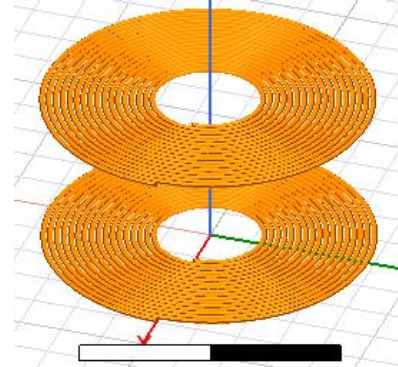
$$P_o = P_T * Q = V_{oc} * I_{sc} * Q = \omega I_1^2 M^2 Q / L^2 \quad (8)$$

Ayrıca güç çıkışı Denklem (9) ile de ifade edilebilir.

$$P_o = V_{in} I_1 k^2 Q \quad (9)$$

Burada V_{in} , verici bobin tarafındaki terminal gerilimi, I_1 ise besleme akımıdır.

Denklem (8), güç çıkışının, besleme tarafı parametrelerine (ωI_1^2), karşılıklı bobinler kuplaj katsayısına (M^2/L^2) ve alıcı taraf bobininin kalite faktörüne (Q) bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Denklem (9) sekonder güç çıkışının kuplaj katsayısının karesiyle orantılı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, transformatörün uygun tasarımı seçilerek kuplaj katsayısı optimal bir değere yükseltilebilir. Bobinin kayıpları, transformatörün çekirdeği ve çevresel faktörler nedeniyle ideal bir kuplaj katsayısı elde etmek çok zordur. Transformatör tasarımında kuplaj katsayısının etkisi, çeşitli transformatörler incelenerek gerçekleştirilir. Bu nedenle, bu çalışmada optimum kablosuz güç aktarım parametreleri elde etmek için farklı bobin düzenlemelerine sahip dairese ve dikdörtgen transformatör modelleri analiz edilmiştir.



Şekil 4. Aynı şekilde tasarlanan bobinlere sahip sargılı dairese transformatör modeli

Araştırma Sonuçları ve Tartışım

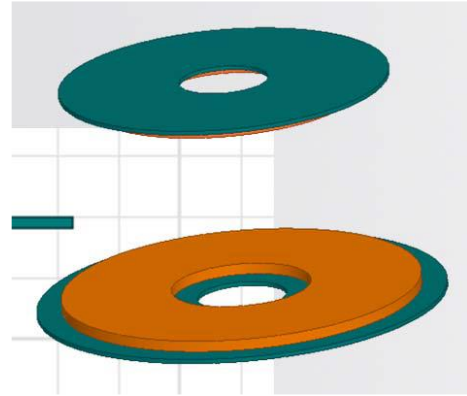
Dairesel Transformatörün Analizi

Transformatör Üç boyutlu sonlu eleman yöntemine (SEY) dayanan ANSYS Maxwell ile dairese bobinli transformatör modelleri tasarlanmıştır. Bu çalışmada üç farklı tasarım düzeni ile optimal kablosuz güç aktarım parametrelerine ulaşmak için dairese bir bobin transformatörü incelenmiştir. Dairesel bobin transformatörü ANSYS Maxwell kullanılarak modellenmiş ve transformatörün boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

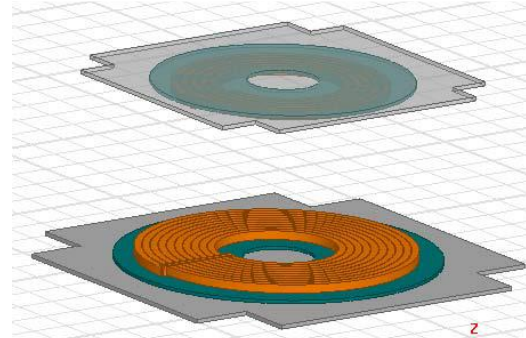
Tablo 1. KGA transformatörünün boyutları

Sargı Parametreleri	Primer tarafı	Sekonder tarafı
Sarım sayısı	55	37
İç kalınlık	55 mm	30 mm
Dış kalınlık	220 mm	140 mm
İletken kalınlığı	2.2 mm	2.2 mm
Demir nüve yarıçapı	222.5 mm	139 mm
Demir nüve kalınlığı	2.2 mm	2.2 mm
Alüminyum plak yarıçapı	231 mm	149 mm
Alüminyum plak kalınlığı	2.2 mm	2.2 mm

Şekil 4, 5 ve 6'da verilen dairese bobin modelleri ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak belirtilen malzeme ve ölçülere göre oluşturulmuştur. Şekil 4'te, düzgün sargılı dairese transformatör modeli verilmiştir. Bobin bakırdan yapılmıştır ve tek tip bobin tasarımındaki primer ve sekonder bobinlerin boyutları aynıdır. Şekil 5'te, farklı bobinlere sahip dairese transformatör modeli ve Şekil 6'da ferrit çekirdekli dairese bobin modeli ile tasarlanan KGA transformatörü sunulmuştur



Şekil 5. Farklı boyutlarda tasarlanan bobinlere sahip dairese transformatör modeli



Şekil 6. Ferrit çekirdekli dairese transformatör modeli

Ferrit çekirdekli alan yapısı, manyetik akıyı sınırlar ve bobinler arasındaki bağlantıyı iyileştirir. Kaçak manyetik akı en aza indirilerek enerji kaybı önlenmiş olur. Genel olarak, ferrit plaka, U-şekli nüve, ferrit diskler vb. gibi farklı tiplerde tasarımlar kullanılmaktadır. Bu tasarımlar, akıyı dengede tutabilmek için kullanılan ferrit parçalarının boyutları nedeniyle kırılğan ve maliyetlidirler [14].

Dairesel Transformatörlerin Analizi

ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak Şekil 5, 6, 7'de gösterilen transformatör modelleri simüle edilerek sonuçlar Tablo 2, 3 ve 4'te sunulmuştur. Burada d, primer ve

sekonder bobin arasındaki hava boşluğu mesafesi, L_p primer bobinin öz endüktansı ve L_s sekonder bobin öz endüktansı, M karşılıklı endüktans, k ise bağlantı katsayısıdır. Başlangıçtaki iki bobin arasındaki mesafe 55 mm olarak alınıp, bu mesafe kademeli olarak 110 mm'ye yükseltilmiştir. Bu analiz, elektrikli araçların şarj edilmesi sırasında kuplaj katsayısı ile uzaklık mesafesi arasındaki ilişkiyi doğrulamak için yapılmıştır.

Tablo2. Nüvesiz ve boyutları aynı olan bobinlerle tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayı sı (k)	Primer dndükta nsı L_p (μH)	Ortak dndükta nsı M (μH)	Sekonder dndükta nsı L_s (μH)
55	0.461	503.61	230.13	480.63
65	0.398	505.81	199.62	480.71
75	0.321	507.12	172.85	480.72
85	0.296	508.01	149.83	480.69
95	0.259	508.98	131.68	480.65
110	0.199	510.15	112.17	480.56

Tablo3. Nüvesiz ve boyutları farklı olan bobinlerle tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayı sı (k)	Primer dndükta nsı L_p (μH)	Ortak dndükta nsı M (μH)	Sekonder dndükta nsı L_s (μH)
55	0.340	137.12	86.61	480.73
65	0.289	137.43	74.83	480.82
75	0.246	138.05	64.76	480.79
85	0.213	138.16	55.62	480.89
95	0.189	138.23	48.01	480.93
110	0.158	138.67	41.71	480.96

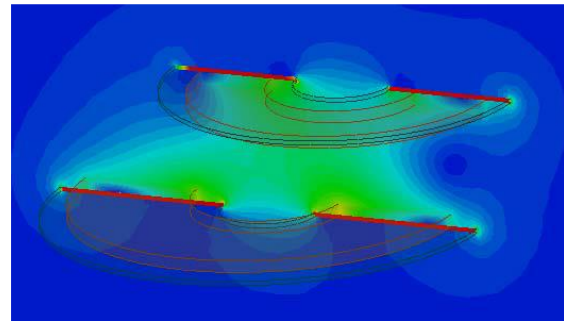
Tablo 4. Ferrit nüve ile tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayı sı (k)	Primer dndükta nsı L_p (μH)	Ortak dndükta nsı M (μH)	Sekonder dndükta nsı L_s (μH)
55	0.489	287.62	259.32	949.46
65	0.488	269.11	215.63	924.31
75	0.489	260.81	180.89	908.91
85	0.312	253.23	152.01	898.12
95	0.269	247.51	127.63	889.61
110	0.229	243.18	107.26	883.15

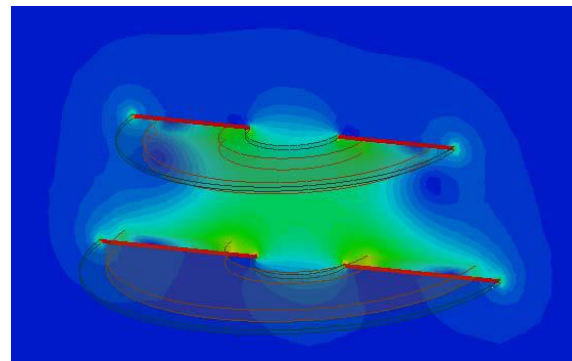
Tablo 2'de verilen simülasyon sonuçlarından, mesafe değiştiğinde, karşılıklı endüktanstaki (M) değişimin, öz endüktans L_p ve L_s 'nin değişimine oranla daha yüksek olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Tablo 2, 3, 4'te sunulan sonuçlardan her üç durum için de, verici ve alıcı bobinler arasındaki hava boşluğu azaldığında M ve k değerlerini yükseldiği görülmektedir. Eşit çaplı bobinlerde k değeri nispeten daha yüksek olmasına rağmen, verici bobine oranla daha küçük bir alıcı bobin kullanılması tercih edilebilir.

M ve k 'nin daha yüksek değerleri, alıcı bobine daha fazla güç aktarımı sağlayan denklemler (8) ve (9) ile sonuçlandırılmıştır. Simülasyon sonuçları, ferrit çekirdekli transformatör tasarımında M ve k 'nin ferrit çekirdek nedeniyle çekirdeksiz transformatörden daha büyük olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, çekirdeksiz transformatör ağırlık olarak daha hafiftir ve maliyeti daha ucuzdur. Ancak yüksek verimle güç aktarımında belirli sınırlamaları vardır. Çekirdeksiz transformatörün sınırlaması, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısının düşük değerinden kaynaklanmaktadır.

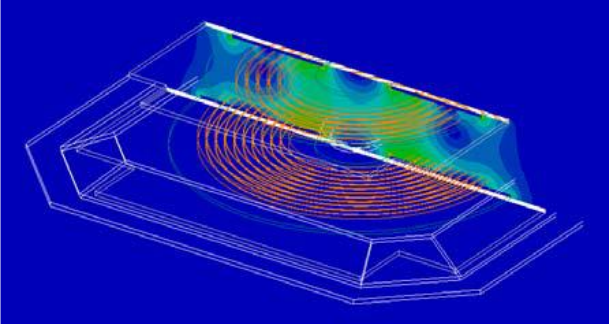
Şekil 7, 8 ve 9'da primer ve sekonder bobinler arasında 55 mm'lik bir aralıkta manyetik alan yoğunluğu (B) verilmiştir. Manyetik alan yoğunluğu grafiğinde gösterilen ölçek, manyetik alan aralığı yoğunluğunun gücünü gösterir. Altta mavi renk, en düşük değeri temsil ederken üstteki kırmızı renkle gösterilen bölgeler manyetik alanın yoğunluğunun en yüksek değerini temsil etmektedir. Şekil 9'da elde edilen en güçlü manyetik alan yoğunluğu, bobinin konsantre bir manyetik alan oluşturduğu ferrit çekirdeğin dahil edilmesine bağlanabilir. Yukarıdaki grafikler, uç bobinin manyetik akısını alma uç bobini ile gönderme etkileşimini gösterir. Şekil 8, çekirdeksiz transformatör manyetik akı yoğunluğu grafiğini göstermektedir ve şekilden manyetik akının bobinlerin ötesine uzandığı görülmektedir. Bununla birlikte, ferrit çekirdekli transformatörde, akı bobinlerin ötesine geçmez. Şekil 7-9, transformatörün bir ferrit çekirdek ile tasarlanması durumunda kaçak akının azaltılabileceğini açıkça göstermektedir.



Şekil 7. Farklı bobinlere sahip dairesel nüvesiz transformatörün manyetik akı dağılımı



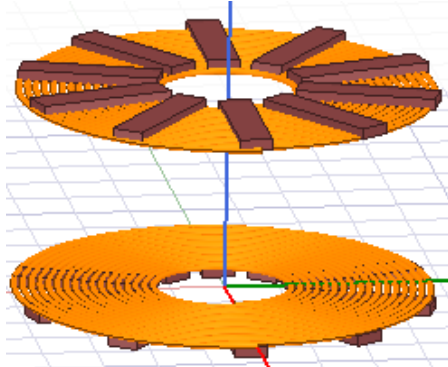
Şekil 8. Aynı bobin boyutlarıyla tasarlanan dairesel nüvesiz transformatörün manyetik akı dağılımı



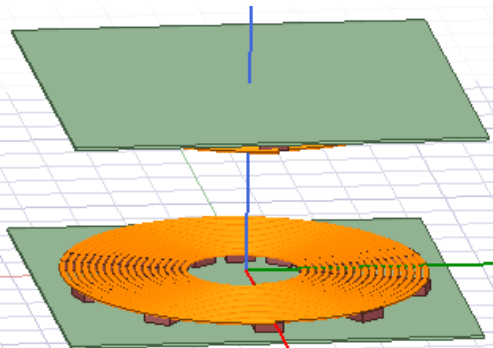
Şekil 9. Alüminyum kalkan ve ferrit çekirdekli dairesel transformatör tasarımının manyetik akı dağılımı

Dikdörtgen Nüve Dilimli Trafo Modelinin Analizi

Bu bölümde, 3-D SEY'e dayalı ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak dikdörtgen dilimli ferrit nüveli transformatörlerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 10 ve 11'de sunulan dikdörtgen dilimli ferrit nüveli transformatör modeli ele alınmıştır. Bu transformatör modelinin genişliği dairesel transformatör modelinin çapına eşit alınmıştır. Dikdörtgen transformatörün primer ve sekonderdeki sarım sayısı dairesel transformatör modeli ile aynıdır.



Şekil 10. Dikdörtgen dilimli ferrit nüveli transformatör modeli



Şekil 11. Dikdörtgen dilimli ferrit nüveli alüminyum kalkanlı transformatör modeli

KGA sistemine ait transformatörlerin Tablo 5 ve 6'da verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde hava boşluğu değişimi sırasında bobinin karşılıklı endüktansındaki (M) değişime oranla L_p ve L_s değişimlerinin küçük olduğunu anlaşılmaktadır. İki durumda da verici bobin ile alıcı bobin arasındaki hava boşluğu mesafesi azaldıkça M ve k değeri artmıştır.

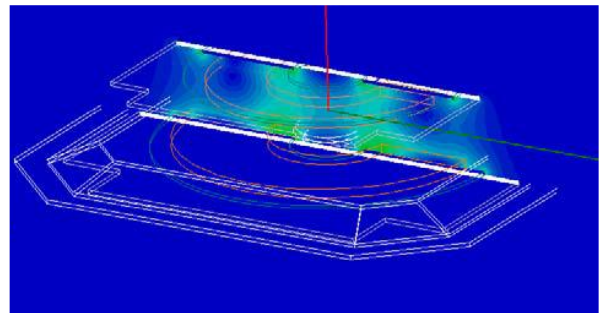
Tablo 5. Dikdörtgen dilimli Ferrit nüve ile tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(mm)	Kuplaj katsayısı (k)	Primer dndüktansı L_p (μH)	Ortak dndüktansı M (μH)	Sekonder dndüktansı L_s (μH)
55	0.490	336.21	297.23	1.021
65	0.412	316.79	248.01.	0.965
75	0.379	304.12	209.65	0.942
85	0.315	293.24	178.52	0.934
95	0.278	288.61	151.03	0.912
110	0.244	284.47	128.89	0.901

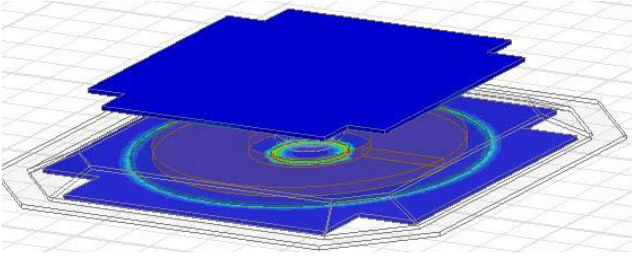
Tablo 6. Dikdörtgen dilimli Ferrit nüve ve alüminyum kalkan ile tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayısı (k)	Primer dndüktansı L_p (μH)	Ortak dndüktansı M (μH)	Sekonder dndüktansı L_s (μH)
55	0.489	335.41	295.31	0.982
65	0.402	315.02	247.23	0.979
75	0.371	301.62	208.89	0.973
85	0.310	294.21	177.56	0.961
95	0.285	287.63	150.98	0.958
110	0.239	283.04	127.87	0.942

Denklem (8) ve (9)'daki M ve k 'nin değerlerinin büyük olması, alıcı bobine daha fazla güç aktarılması anlamına gelmektedir. Tasarımda ferrit çekirdeğin bulunması nedeniyle karşılıklı endüktans (M) ve kuplaj katsayısı (k) değerleri çekirdeksiz transformatöre göre daha büyük olmuştur. Ferrit çekirdek tasarımı, manyetik alanı uygun şekilde yoğunlaştırır. Böylece daha yüksek M ve k değerleri elde edilebilir. Alüminyum kalkan, bobinler arasında meydana gelen manyetik alanı sınırlamak için transformatör tasarımında kullanılmaktadır. Dört farklı trafo tasarım tipi için Şekil 12 ve 13'te transformatörlerin manyetik alanın yoğunluğu (B) dağılımları verilmiştir.



Şekil 12. Ferrit çekirdekli dikdörtgen bir bobinin transformatör modeli



Şekil 13. Ferrit çekirdekli ve Alüminyum ekranlı dikdörtgen bir bobinin transformator modeli

Farklı KGA Transformator Konfigürasyonlarının Sonuçlarının Karşılaştırılması

Farklı KGA transformator tasarım modelleri için kuplaj katsayısının ve karşılıklı endüktansın simülasyon sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Aynı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator için M ve k'nin değerinin, maksimum manyetik akıdan dolayı farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformatörden daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı sargı özelliklerine sahip dairesel transformatorün en büyük eksikliği, bakır bobininin uzunluğu ve akı dağılımıdır. Bu eksiklik, sekonder bobinin tamamen primer bobin etrafındaki manyetik alan küresi içinde yer aldığı, farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator kullanılarak aşılmıştır. Ayrıca ferrit çekirdekli tasarımlarda M ve k değerlerinin farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformatöre göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum kaplamalı ve kaplamasız simülasyon sonuçlarında ihmal edilebilir bir fark meydana gelmiştir.

Sonuç

Bu çalışmada, elektrikli araçların şarj sisteminde kullanılan kablosuz güç aktarım (KGA) sistemleri için bir transformator tasarımı sunulmuştur. Farklı transformator tasarımları ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Transformatorlerin farklı tasarım konfigürasyonları için ayrıntılı manyetik alan yoğunluğu değerleri, endüktans ve kuplaj katsayısı değerleri elde edilmiştir. Tasarım sonuçları, öz endüktansın KGA üzerindeki etkisinin, sistemde doğal olarak bulunan hava boşluğundan dolayı tolere edilebildiğini ortaya koymaktadır. Simülasyon sonuçları, hava boşluğu mesafesi

Kaynakça

- [1] Ahmad A, Alam MS, Chabaan R (2018) A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. IEEE Trans Transp Electrifi 4(1):38–63
- [2] Bosshard R, Kolar JW (2016) Inductive power

Tablo 7. Farklı KGA transformator tasarım modelleri için kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans değerleri

Transformatorün tasarım yapısı	Kuplaj katsayısı (k)	Ortak endüktans(M)
Aynı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator	0.468	230.12
Farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator	0.340	86.31
Farklı sargı özelliklerine sahip dairesel ferrit nüveli transformator	0.489	258.99
Dikdörtgen dilimli nüve yapısına sahip transformator	0.498	297.28
Dikdörtgen dilimli nüve ve alüminyum kalkan yapısına sahip transformator	0.499	294.98

Ferrit çekirdekli dikdörtgen bobin daha iyi karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı değerlerine sahip olsa da, dairesel bobin tasarımı bakır bobinin uzunluğu, ferrit çekirdek hacmi, alüminyum kalkanın hacmi ve taban alanı parametreler dikkate alındığında daha iyi olduğu görülebilmektedir. Genel olarak, dikdörtgen bir çekirdek, dairesel bir çekirdekten daha az mekanik desteğe sahiptir. Bu nedenle, transformatorün dairesel bobin tasarımı, kablosuz güç aktarım uygulamaları için daha elverişlidir.

azaldıkça iki bobin arasındaki kuplajın arttığını göstermektedir. Dairesel nüveli ve dikdörtgen dilimli nüveli transformator modellerinin sonuçları karşılaştırıldığında, dikdörtgen dilimli nüveli trafo parametre varyasyonlarının farklı konfigürasyonlar için dairesel bobin parametrelerine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bakır bobinin uzunluğu, ferrit çekirdeğin hacmi, alüminyum kalkanın hacmi ve taban alanı gibi faktörler göz önüne alındığında, dairesel nüveli transformatorün performansının benzer boyutlardaki dikdörtgen dilimli nüveli transformatörden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

transfer for electric vehicle charging: technical challenges and trade-offs. IEEE Power Electron Mag 3(3):22–30

- [3] Chinthavali M, Onar OC, Campbell SL, Tolbert LM (2015) Integrated charger with wireless charging and boost functions for PHEV and EV

- applications. Oak Ridge National Laboratory Contract with the US Department of Energy, No. DE-AC05-000R22725
- [4] Daniel Ongayo, Moin Hanif (2015a) An overview of single-sided and double-sided winding inductive coupling transformers for wireless electric vehicle charging. IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)
- [5] Gati E, Kampitsis G, Manias S (2017) Variable frequency controller for inductive power transfer in dynamic conditions''. IEEE Trans Power Electron 32(2):1684-1696
- [6] Hashemi Z, Zohrabi F, Mardaneh M (2019) A multi-objective optimization of switched reluctance motor using a hybrid analytic-ANFIS model considering the vibrations. Iran J Sci Technol - Trans Elect Eng 43(2):361-371
- [7] Houran MA, Yang X, Chen W (2021) Two-degree-of-freedom WPT system using cylindrical-joint structure for applications with movable parts. IEEE Trans Circuits Syst II: Express Briefs 68(1):366-370
- [8] Huang X, Gao Y, Zhou J, Ma J, Zhang J, Fang Y (2016) Magnetic field design for optimal wireless power transfer to multiple receivers''. IET Power Electron 9(9):1885-1893
- [9] Joseph PK, Devaraj E, Gopal A (2019) Overview of wireless charging and vehicle-to-grid integration of electric vehicles using renewable energy for sustainable transportation''. IET Power Electron 12(4):627-638
- [10] Khan-ngern W, Zenkner H (2014) Wireless power charging on electric vehicles. International Electrical Engineering Congress (IEECON), 2014. Chonburi, pp 1-4
- [11] Zhong W, Hui SYR (2017) Charging time control of wireless power transfer systems without using mutual coupling information and wireless communication system''. IEEE Trans Industr Electron 64(1):228-235
- [12] Zeng Y, Qiu D, Meng X, Zhang B, Tang SC (2018) Optimised design of coils for wireless power transfer in implanted medical devices. IEEE J Electromagn, RF Microwav Med Biol 2(4):277-285
- [13] Yi Z, Li M, Muneer B, Zhu Q (2019) High-efficiency mid-range inductive power transfer employing alternative-winding coils''. IEEE Trans Power Electron 34(7):6706-6721
- [14] Yang S, Deng X, Lu J, Wu Z, Du K (2020) light-load efficiency optimization for an LCC-parallel compensated inductive power transfer battery charger. Electron (Switz) 9(12):1-13
- [15] Wang X, Xu J, Ma H, Zhang Y (2020) A reconstructed S-LCC topology with dual-type outputs for inductive power transfer systems. IEEE Trans Power Electron 35(12):12606-12611
- [16] Trung NK, Minh TT (2020) Wireless charging system for electric bicycle application. Int J Power Electron Drive Syst 11(4):1926-1935
- [17] Tian X, Chau KT, Liu W, Lee CHT (2021) Selective wireless power transfer using magnetic field editing. IEEE Trans Power Electron 36(3):2710-2719
- [18] Rasekh N, Mirsalim M (2018) Evaluation study on an integration method for a DDQP using LCC and series compensation topologies for inductive power transfer. IET Electr Power Appl 12(9):1320-1327
- [19] Raj U, Shankar R (2020) Deregulated automatic generation control using novel opposition-based interactive search algorithm cascade controller including distributed generation and electric vehicle. Iran J Sci Technol - Trans Elect Eng 44(3):1233-1251
- [20] Prasad Jayathurathnage A (2017) Review on wireless power transfer technology. IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC).
- [21] Onar OC, Campbell SL, Seiber LE, White CP, Chinthavali M (2016) A high-power wireless charging system development and integration for a toyota RAV4 electric vehicle. Oak Ridge National Laboratory Contract with the US Department of Energy No. DE-AC05-000R22725
- [22] Patil D, McDonough MK, Miller JM, Fahimi B, Balsara PT (2018) Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges. IEEE Trans Transp Electrification 4(1):3-37
- [23] Moghaddami M, Sundararajan A, Sarwat AI (2018) A powerfrequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems. IEEE Trans Ind Appl 54(2):1773-1783
- [24] Lu J, Zhu G, Lin D, Zhang Y, Wang H (2021) Realizing constant current and constant voltage outputs and input zero phase angle of wireless power transfer systems with minimum component counts. IEEE Trans Intell Transp Syst 22(1):600-610



Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitin farklı matkap uçlarıyla delinmesinde işleme parametrelerinin delaminasyon hasarına etkisinin değerlendirilmesi

Evaluation of the effect of machining parameters on delamination damage in drilling of carbon fiber reinforced polymer composite with different drill bits

Meltem Altın Karataş^{1*}

¹ Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Gerede Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, meltemaltin@ibu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1628-1316>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Aralık 2021
Revizyon xxx
Kabul 18 Ocak 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Karbon elyaf takviyeli polimer, delme, delaminasyon, Taguchi metodu.

ÖZ

Bu çalışmada, 0°/90° fiber oryantasyon açısında üretilmiş olan karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) kompozit malzemenin farklı matkap uçlarıyla 5 eksen CNC kontrollü dik işleme merkezinde delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (F_d) değerleri analiz edilmiştir. Taguchi yöntemi ile deneysel tasarım uygulanmıştır. Delme deneyleri, Minitab 19 yazılımı kullanılarak Taguchi L_{18} ortogonal dizinine göre yapılmıştır. Deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranı esas alınarak değerlendirilmiştir. Kontrol faktörleri olarak iki farklı matkap ucu (HSS ve karbür), üç farklı iş mili devri (750, 1000, 1500 dev/dak) ve üç farklı ilerleme değeri (0.05, 0.10, 0.15 mm/dev) seçilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) uygulanarak kontrol faktörlerinin F_d üzerindeki etki seviyeleri bulunmuştur. ANOVA analizi ile %94.85 güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir. En düşük F_d değeri karbür matkap ucu kullanılarak, 1500 dev/dak iş mili devri ve 0.05 mm/dev ilerleme değeri 1.3905 olarak tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 December 2021
Received in revised form xxx
Accepted 18 January 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Carbon fiber reinforced polymer, drilling, delamination, Taguchi method.

ABSTRACT

In this study, the delamination factor (F_d) values obtained as a result of drilling the carbon fiber reinforced polymer (KETP) composite material produced at the fiber orientation angle of 0°/90° with different drill bits in a 5-axis CNC controlled vertical machining center were analyzed. Experimental design was applied with the Taguchi method. Drilling experiments were performed according to Taguchi L_{18} orthogonal array by using Minitab 19 software. The test results were evaluated on the basis of the signal to noise (S/N) ratio. Two different drill bits (HSS and carbide), three different spindle speeds (750, 1000, 1500 rpm) and three different feed rates (0.05, 0.10, 0.15 mm/rev) were chosen as control factors. The effect levels of control factors on F_d were found by applying analysis of variance (ANOVA). A confidence level of 94.85% was obtained with ANOVA analysis. The lowest F_d value was determined as 1.3905 at a spindle speed of 1500 rpm and a feed rate of 0.05 mm/rev using a carbide drill bit.

Doi: 10.24012/dumf.1037211

*Sorumlu Yazar

Giriş

Kompozit malzemeler, günümüzde özellikle otomotiv, uzay, denizcilik, demiryolu taşımacılığı ve spor malzemeleri gibi endüstriyel sanayi alanlarının birçoğunda kullanılmakta ve düşük özgül ağırlıklarına karşı sergiledikleri mükemmel dayanım özellikleri nedeniyle geleneksel malzemelerin (demir, çelik, alüminyum, pirinç, bakır, ahşap, plastik, vb.) yerine kullanımları gün geçtikçe artarak devam etmektedir [1]. İleri kompozit malzemelerden biri olan karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) kompozit malzemeler, düşük yoğunluğa sahip olmalarına karşın titanyuma göre daha sert malzemelerdir. Bununla birlikte; KETP kompozitlerin iyi yorulma dayanımına, sürünme direnci ve aşınma direncine, kimyasal ve boyutsal kararlılığa, düşük sürtünme katsayısına, yüksek tokluk değerine, korozyon direncine, düşük elektrik direnci ile titreşim sönümlenme yeteneklerine sahip olması bu malzemenin tercih edilme sebeplerindedir [2]. KETP kompozit malzemeler, ilk olarak balık oltaları, golf sopaları ve diğer spor malzemelerinde kullanılmış olsa da son yıllarda daha geniş olarak uçak malzemelerinde ve tıbbi malzeme gibi endüstriyel amaçlar için kullanılmaktadır [3]. Kompozit malzemelerin Airbus 350 ve Boeing 787 uçaklarında kullanılması yaklaşık olarak ağırlıkça %50 ve hacimce % 90'dır [4].

Delme işlemi, imalat işlemleri arasından perçinli, cıvatalı vb. parçaların montajı sırasında en çok kullanılan işleme yöntemlerinden biridir [5]. El-Sonbaty ve ark., küçük motorlu bir uçakta bağlantı elemanları için yüz binden fazla, büyük uçaklarda ise milyonlarca deliğin bulunduğunu bildirmişlerdir [6]. Kompozit malzemelerin anizotropik (her yönde farklı özelliklere sahip olması) ve homojen olmayan yapısı nedeniyle bu tür malzemelerin işlenmesinde matris çatlamaları, kabarma, fiber çekilmesi, fiber itilmesi, ve delaminasyon gibi hasar türleri oluşmaktadır [7]. Bu tür farklı hasar çeşitlerinin oluşması birçok iş parçasının reddedilmesine neden olmaktadır [8]. Uçak endüstrisinde, delaminasyon hasarından dolayı parçaların montajı sırasında %60'ı gibi büyük bir oranının kullanılmadan reddedildiği bildirilmektedir [1, 8]. İşlenen malzeme yüzeyinde meydana gelen bu tür hasarlar, ürün kalitesi üzerinde çok büyük etkiye sahiptir ve bu tür yüzey hasarlarını engellemek/azaltmak için çalışmalar yapılmaya devam etmektedir [5, 7, 9-18].

Literatürde; Durão ve ark., takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde, düşük ilerleme oranı kullanılmasıyla delaminasyon başlama riskinin azaldığını, bu durumun aksel kuvveti de azaltması nedeniyle kompozit tabakaların delinmesi için uygulanabileceğini belirtmişlerdir [19]. Gaitonde ve ark., KETP kompozit malzemenin delme işlemi sonucunda delaminasyonun kesme hızı artışı ile azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca delaminasyon hasarını azaltmak için düşük ilerleme oranı ve matkap uç açısı kombinasyonunun kullanılmasını önermişlerdir [7]. Kılıçkap, yapmış olduğu delme işlemleri sonucunda cam elyaf takviyeli plastik (CETP) malzemelerin delinmesinde delik çıkışında oluşan delaminasyonun delik girişinde oluşan delaminasyondan fazla (%13-30 oranında) olduğunu tespit etmiş olup en

düşük delaminasyon faktörünü düşük kesme hızı ve düşük ilerleme oranında elde etmiştir [20]. Abrão ve ark., CETP kompozit malzemenin delinmesinde, malzemedeki delaminasyon hasarına uğrayan alanın ilerleme değeriyle önemli ölçüde arttığını tespit etmişlerdir [5]. Fernández-Pérez ve ark., KETP kompozit malzemenin delinmesinde, yüksek kesme hızlarının itme kuvvetini arttıracaklarını ve bunun da delaminasyon ile sonuçlanacağını belirtmişlerdir [21]. Eneyew ve Ramulu, KETP kompozit malzemenin delinmesinde minimum delaminasyon faktörü değerini, 0.064 mm/dev ilerleme değeri ve 4500-6000 dev/dak kesme hızında tespit etmişlerdir [9]. Miller ve ark., KETP kompozit malzemenin delinmesinde çoğunlukla delaminasyonun katmanların arasındaki bölgede görüldüğünü belirtmişlerdir. Tabaka çıkışındaki delaminasyon oluşumunda ilerleme değerinin (kesme hızına göre) daha etkili olduğu; ilerleme değerinin artmasıyla delaminasyonun arttığını, kesme hızının artmasıyla da azaldığı sonucuna varmışlardır. Düşük ilerleme değeri ve yüksek kesme hızı kombinasyonunun kullanılmasıyla daha düşük delaminasyon elde edileceğini belirtmişlerdir [22]. Gaugel ve ark., zayıf mikroyapısal kaliteye sahip KETP kompozit malzemenin delinmesinde delaminasyon hasarının önemli ölçüde yüksek olacağını, kaplamasız matkap uçları kullanıldığında doğrusal bir delaminasyon hasarı gelişimi gözlemleneceğini ifade etmişlerdir [23]. Wang ve Jia, KETP kompozit malzemenin daha küçük kesici kenar uzunluğuna sahip matkap kullanılarak daha düşük ilerleme değerinde yapılan delme işlemi sonucunda delaminasyonun azaltılacağını belirtmişlerdir [24]. Rahme ve ark., KETP kompozit malzemenin delinmesinde delik yüzey çıkışındaki delaminasyonu azaltmak için deliğin çıkışına bir cam dokuma kumaş katı eklemişlerdir ve bu yöntem ile (yani; deliğin çıkışına bir cam dokuma kumaş katının eklenmesinin) kritik itme kuvvetinin arttığını ve ardından delaminasyon etkisinin azaldığını gözlemlemişlerdir [25]. Kwon ve ark., KETP kompozit malzemenin delinmesinde daha küçük itme kuvvetinin daha düşük delaminasyon hasarına neden olduğu belirterek, delaminasyonun ve kesilmemiş elyafın en aza indirilmesi için kademeli matkap tasarımı yapmışlardır. Geliştirdikleri kademeli matkap ile 0.1 mm/dev ilerleme değerinde delaminasyonsuz delme işlemi gerçekleştirmişlerdir [26]. Ayrıca; birçok araştırmacı kompozit malzemelerin işlenmesinde büyük önem teşkil eden delaminasyon faktörünü azaltmaya yönelik farklı çalışmalar yapmışlardır [27-29].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; KETP kompozit malzemenin delinmesi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda delaminasyon hasarı gözlenmeden delik yüzeyi elde edebilmek için çeşitli alternatif yöntemler geliştirilmeye ve işleme parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip iki farklı matkap ucu, üç farklı iş mili devri ve üç farklı ilerleme değeri kullanılarak KETP kompozit malzemenin delinmesi sonucunda delaminasyon hasarının en aza indirgenebilmesi için işleme parametrelerinin optimum olanı belirlenmeye çalışılmıştır.

Materyal ve Metot

İş Parçası

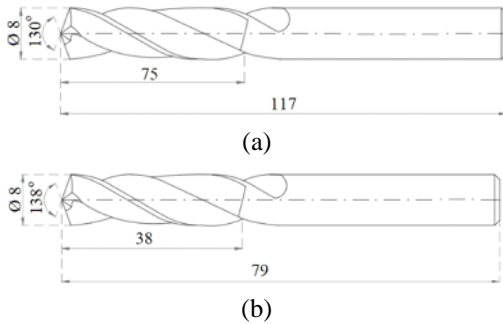
Delme deneylerinde, iş parçası olarak uzay ve havacılık sektöründe sıklıkla tercih edilen KETP kompozit malzeme kullanılmıştır. Kompozitteki karbon fiberin oryantasyon açısı $0^\circ/90^\circ$, ağırlığı 245 gr/m^2 ve dokuma tipi twill (2×2) 'dir. Kompozit malzeme, 40 kat prepreg malzeme ile epoksi reçine kullanılarak %50 fiber hacim oranında vakum torbalama yöntemiyle $150 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ boyutunda üretilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. KETP kompozit malzeme.

Kesici Takım

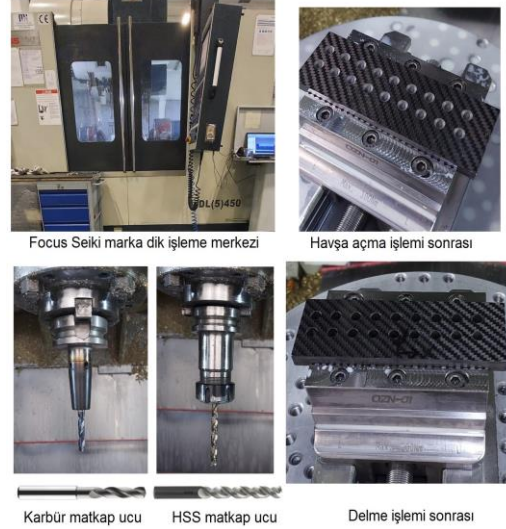
Deneylerde kullanılan matkap uçlarının özellikleri ve boyutları Şekil 2'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan matkap uçlarından HSS matkap ucu Ruko marka, DIN 338, VA tipi, HSSE-Co 5 helisel matkap ucu. Karbür (elmas) matkap ucu olarak ise; Karcan marka, DIN 6535, HA tipi matkap ucu kullanılmıştır.



Şekil 2. (a) HSS (b) Karbür matkap ucu geometrisi.

Deneysel Çalışma

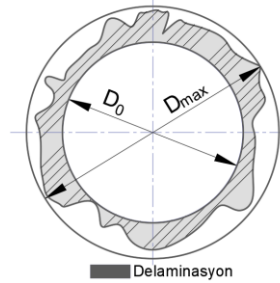
KETP kompozit malzemenin delme işlemleri Focus Seiki marka 2010 model 5 eksen CNC kontrollü dik işleme merkezinde uygulanmıştır (Şekil 3). Çalışmada; 8 mm çapında iki farklı matkap ucu (HSS ve karbür), üç farklı iş mili devri (750, 1000, 1500 dev/dak) ve üç farklı ilerleme değeri (0.05, 0.10, 0.15 mm/dev) kullanılarak delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Delme işlemi öncesinde malzemede hasar oluşmaması için $2 \times 90^\circ$ havşa açılmıştır. Deneyler, soğutma sıvısı kullanılmadan kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Matkap ucu her delik delme işlemi sonrasında değiştirilmiştir.



Şekil 3. KETP kompozit malzemenin delme işlemi aşamalarının görüntüsü.

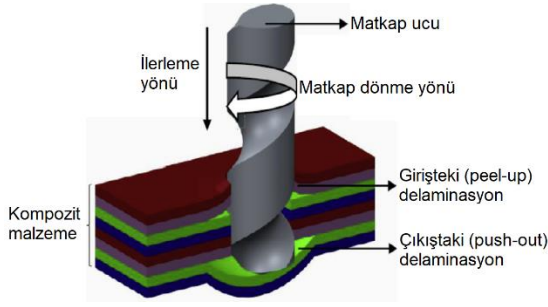
Delaminasyon, yani tabakalar arası çatlama, tabakalı kompozitlerde en yaygın ve kritik hasar biçimlerinden biridir [30]. Delaminasyon hasarı önemli sertlik ve mukavemet kayıplarına yol açarak yapısal bütünlük ve güvenlik için büyük tehdit oluşturmaktadır [24, 31]. Denklem 1'de verilmiş olan delaminasyon faktörü (F_d), deliğin çevresindeki en büyük çap (D_{max}) ile delik çapı (D_o) arasındaki oran olarak ifade edilmiştir (Şekil 4) [10].

$$\text{Delaminasyon faktörü: } F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (1)$$



Şekil 4. Delaminasyon faktörünün gösterimi [10].

Tabakalı kompozit malzemelerin delinmesinde, tabaka girişi ve çıkışında hasar miktarı farklılık gösterecektir. Oluşabilecek bu farktan dolayı görüntüler tabaka girişinden (üst) ve tabaka çıkışından (alt) olacak şekilde malzemenin iki yönünden alınmıştır. Delaminasyon faktörü, ya delik girişinde (liflerin soyulduğu yer) ya da delik çıkışında (liflerin aşağı itildiği yer) değerlendirilebilir (Şekil 5). Delik girişinde, bitişik katlar, matkap ucu oluklarının eğimi nedeniyle bir soyuma kuvveti ile ayrılabilir. Delik çıkışında, matkabın altındaki kesilmemiş katlar, azaltılmış kalınlıkları nedeniyle deformasyondan etkilenebilir. Dışarı iterek oluşan (push-out) delaminasyon, özellikle matkap tarafından uygulanan itme kuvveti, katlar arası bağlanma mukavemetinden daha büyük olduğunda, sıyrılarak (peel-up) delaminasyondan daha sık gözlenmektedir [12].



Şekil 5. Delaminasyon oluşumunun gösterimi [32].

Bu çalışmada; KETP kompozit malzemenin 5 eksen-CNC kontrollü dik işleme merkezinde delme işlemi sonrası malzemede oluşabilecek delaminasyon oluşumunu görebilmek ve böylece delaminasyon faktörünü hesaplamak için tabaka girişi ve tabaka çıkışındaki deliklerin görüntüleri max. 200x büyütme Dino Capture 2.0 optik mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir.

Optimizasyon işlemi için Taguchi metodu kullanılmıştır. KETP kompozit malzemenin delinmesinde etkileri araştırılacak işleme parametreleri olarak; matkap türü, iş mili devri ve ilerleme değeri seçilmiş ve Tablo 1’de verilen seviyelerde delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Optimum delme parametrelerini belirlemek ve bunların F_d ’ye etkilerini tespit etmek için L_{18} ortogonal dizisi seçilmiştir (Tablo 2). Taguchi deney tasarımı ile farklı işleme parametrelerinde, farklı seviyeler arasından delme parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Taguchi metoduna göre yapılan analizler Minitab 19 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. En etkili işleme parametresinin tespiti Varyans analizi (ANOVA) ile elde edilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri.

Sembol	Parametre	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
M	Matkap türü		Karbür	HSS	-
N	İş mili devri	(dev/dak)	750	1000	1500
F	İlerleme hızı	(mm/dev)	0.05	0.10	0.15

Tablo 2. Taguchi L_{18} ortogonal dizisi.

Deney No	Matkap türü			İş mili devri			İlerleme değeri		
	M	N	F	M	N	F	M	N	F
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	1	1	1
3	1	1	1	1	3	3	1	1	1
4	1	1	2	2	1	1	1	1	1
5	1	1	2	2	2	2	1	1	1
6	1	1	2	2	3	3	1	1	1
7	1	1	3	3	1	1	1	1	1
8	1	1	3	3	2	2	1	1	1
9	1	1	3	3	3	3	1	1	1
10	2	2	1	1	1	1	1	1	1
11	2	2	1	1	2	2	1	1	1
12	2	2	1	1	3	3	1	1	1
13	2	2	2	2	1	1	1	1	1
14	2	2	2	2	2	2	1	1	1
15	2	2	2	2	3	3	1	1	1
16	2	2	3	3	1	1	1	1	1
17	2	2	3	3	2	2	1	1	1
18	2	2	3	3	3	3	1	1	1

Bulgular ve Tartışma

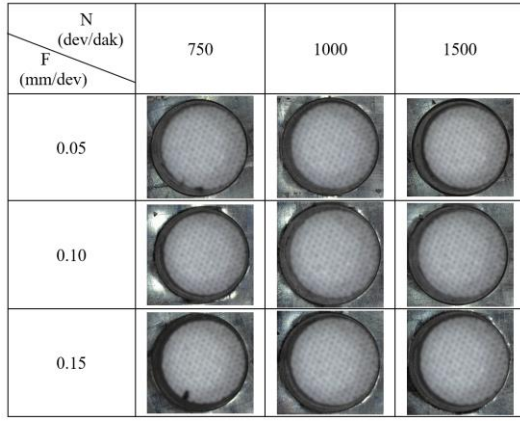
Bu çalışmada; geleneksel yöntemle yapılan delme işleminden dolayı delaminasyon oluşumunu görebilmek ve böylece delaminasyon faktörünü hesaplamak için tabaka girişi ve tabaka çıkışındaki deliklerin görüntüleri alınmıştır. Tabaka girişindeki delaminasyonu önlemek için malzemenin üst yüzeyine 2 mm derinliğinde havşa açılmıştır. Havşa açma işlemi sonrasında HSS matkap ucuyla ve karbür matkap ucuyla delinen deliklerin üst yüzeyinde herhangi bir delaminasyon hasarına rastlanmamıştır (Şekil 6).

Tabaka çıkışındaki delaminasyon hasarını tespit etmek için çıkış yüzeyindeki delik görüntüleri alınarak Denklem 1’de verilen eşitliğe göre 18 delik için delaminasyon faktörü hesaplanmıştır (Tablo 3). Çalışmada; optimizasyon yöntemi olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde, ortogonal diziler kullanılarak test sayısı önemli ölçüde azalmakta ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkileri en aza indirgenmektedir. Taguchi metodunda, daha yüksek sinyal-gürültü (S/N) oranı daha iyi kalite özelliklerine karşılık geldiğinden kalite karakteristiği olarak S/N oranı tercih edilmiştir. Bu çalışmada, en düşük delaminasyon hasarını elde etmek için uygun olan S/N oranını hesaplamada Denklem 2’de verilen "daha küçük daha iyidir" yaklaşımı seçilmiştir. Denklem 2’de “ y_i ” delme parametrelerinin sonuçlarını, “ n ” tekrar sayısını ifade etmektedir.

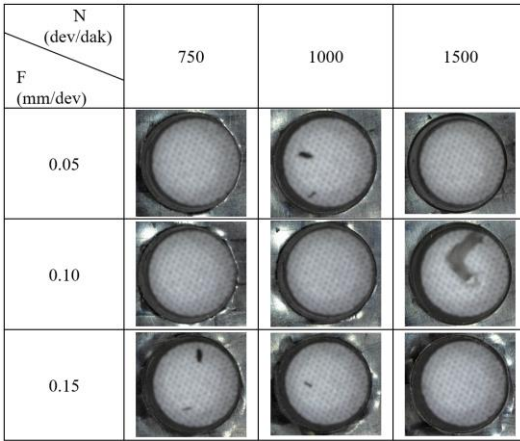
$$\text{Daha küçük daha iyidir} : S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

Tablo 3. Taguchi L_{18} deney tasarımına göre elde edilen deneysel sonuçlar ve S/N oranları.

Deney No	M	N (dev/dak)	F (mm/dev)	F_d	S/N F_d (dB)
1	HSS	750	0.05	1.7903	-5.0583
2	HSS	750	0.10	1.8028	-5.1187
3	HSS	750	0.15	1.9320	-5.7201
4	HSS	1000	0.05	1.6543	-4.3720
5	HSS	1000	0.10	1.6593	-4.3982
6	HSS	1000	0.15	1.6623	-4.4139
7	HSS	1500	0.05	1.5520	-3.8178
8	HSS	1500	0.10	1.6030	-4.0987
9	HSS	1500	0.15	1.6170	-4.1742
10	Karbür	750	0.05	1.6640	-4.4231
11	Karbür	750	0.10	1.7225	-4.7232
12	Karbür	750	0.15	1.7545	-4.8831
13	Karbür	1000	0.05	1.5700	-3.9180
14	Karbür	1000	0.10	1.5908	-4.0320
15	Karbür	1000	0.15	1.6298	-4.2424
16	Karbür	1500	0.05	1.3905	-2.8634
17	Karbür	1500	0.10	1.4815	-3.4140
18	Karbür	1500	0.15	1.5393	-3.7462
				En düşük	1.3905 -5.7201
				En yüksek	1.9320 -2.8634
				Ortalama	1.6453 -4.3010



(a)

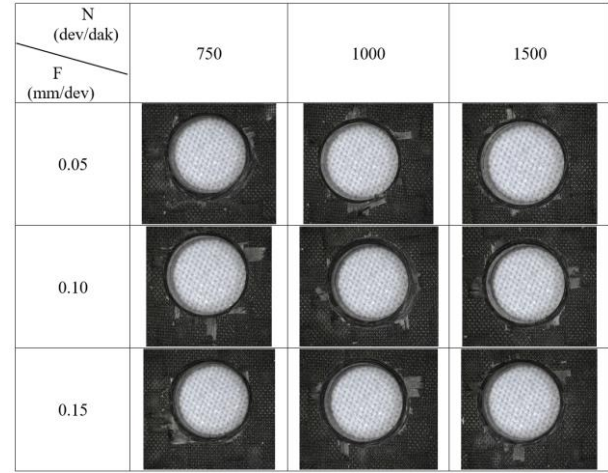


(b)

Şekil 6. Karbür matkap ucu (a) ve HSS matkap ucu (b) ile elde edilen deliklerin üst yüzey görüntüsü.

Tablo 3 incelendiğinde; 7 numaralı deneyde en düşük F_d değerinin elde edildiği görülmektedir. En düşük F_d yüksek iş mili devri ve düşük ilerleme değerinde elde edilmiştir [9, 11, 22]. En düşük F_d değeri karbür matkap ucu kullanılarak, 1500 dev/dak iş mili devri ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde 1.3905 olarak tespit edilmiştir. Karbür matkap ucunun HSS matkap ucuna göre daha düşük delaminasyon hasarına sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir [11]. Karbür matkap ucuyla delinmiş deliklerin çıkış yüzey görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Delaminasyon genellikle yapının gücünü azaltabilen delik çıkışında meydana gelmektedir [18]. Rahme ve ark., kompozitlerin delinmesinde delik yüzey çıkışındaki delaminasyonu azaltmak için deliğin çıkışına bir cam dokuma kumaş katının eklenmesinin kritik itme kuvvetini arttırdığını ve ardından delaminasyon etkisinin azaldığını belirtmişlerdir [25]. Delaminasyonun önlenmesinde itme kuvvetini azaltmak için uygun delme parametrelerinin seçilmesi esastır. Bunu başarmak için, bazı araştırmacılar itme kuvvetine odaklanarak delaminasyonu azaltmak için çalışmalar yapmışlardır [29, 33, 34]. Jia ve ark., delaminasyonu azaltmak için, itme kuvvetinin kritik değeri aşmayacak şekilde sınırlandırılması gerektiğini bildirmiştir. [18]. Bununla birlikte, delme sıcaklığının da kompozitin özelliklerini etkileyebilen önemli bir faktör olduğunu belirten araştırmacılar, delaminasyon koşulları üzerinde termal etki ile delaminasyonu analiz etmek

gerektiğini vurgulamışlardır [18, 35]. Delaminasyon faktörünün değişimi bunlarla sınırlı değildir. Yardımeden ve ark., delme işleminde kullanılan matkap uç açısının delaminasyon faktörünü etkilediğini ve delaminasyonu azaltmak için uygun uç açısına sahip matkapların kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir [28]. Ayrıca Çelik ve ark., KETP kompozitlerin üretiminde, kompozite ilave edilen nano takviyelerinin de delaminasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [27].



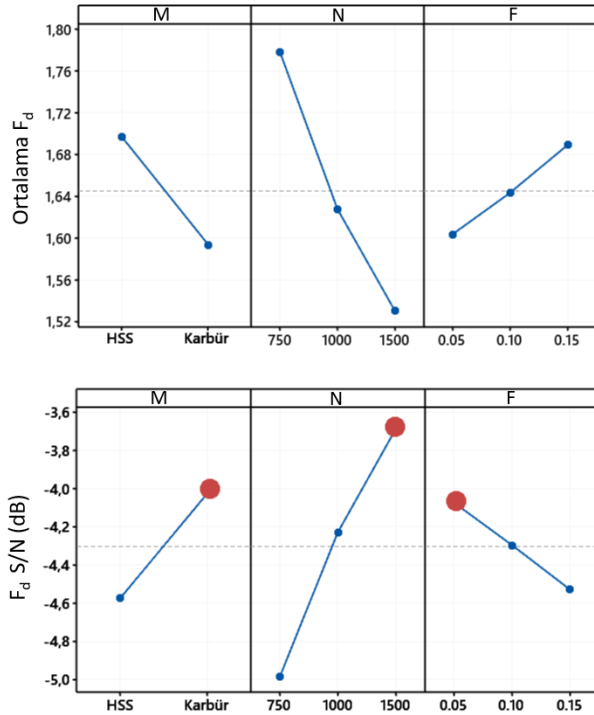
Şekil 7. Karbür matkap ucu ile elde edilen deliklerin alt yüzey görüntüsü.

Ayrıca; M, N ve F kontrol faktörlerinin delaminasyon hasarına etkisi, S/N oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir. Delaminasyon hasarı için optimum seviye $M_2N_3F_1$ olarak elde edilmiştir (Tablo 4) (Şekil 8).

Tablo 4. F_d 'ye ait (a) ortalama değerler ve (b) S/N oranları için tepki tablosu.

	Seviye	M	N	F
	Ortalama	1	1.697	1.778
2		1.594*	1.628	1.643
3			1.531*	1.689
Fark		0.103	0.247	0.086
	Sıralama	2	1	3
	Seviye	M	N	F
	S/N Oranı (dB)	1	-4.575	-4.988
2		-4.027*	-4.229	-4.297
3			-3.686*	-4.530
Fark		0.547	1.302	0.455
	Sıralama	2	1	3

KETP kompozit malzemenin farklı matkap uçlarıyla farklı işleme parametreleri altında dik işleme merkezinde delme işlemi sonrası işleme parametrelerinin değişken faktörler üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA, P 0.05 anlamlılık ve %95 güvenilirlik seviyesinde gerçekleştirilmiştir. F_d için yapılan ANOVA sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. F_d üzerinde, matkap ucu türünün, iş mili devrinin ve ilerleme değerinin etkisi sırasıyla %17.80, %68.89 ve %8.16 olarak elde edilmiştir.



S/N: Daha küçük daha iyidir

Şekil 8. F_d için ortalama ve S/N oranı grafikleri.

Tablo 5. F_d için ANOVA sonuçları.

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı (%)
M	1	0.0481	0.0481	41.49	0.000	17.80
N	2	0.1860	0.0930	80.31	0.000	68.89
F	2	0.0220	0.0110	9.51	0.003	8.16
Hata	12	0.0139	0.0012			5.15

Kaynaklar

- [1] M. A. Karataş and H. Gökkaya, "A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials," *Defence Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 318-326, 2018.
- [2] D. D. Chung, *Composite materials: science and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [3] H. Arisawa, S. Akama, and H. Niitani, "High-Performance Cutting and Grinding Technology for CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 49, no. 3, p. 3, 2012.
- [4] M. Hashish, "Trimming of CFRP Aircraft Components," *2013 WJTA-IMCA Conference and Expo, Houston, Texas, 2013*.
- [5] A. Abrao, J. C. Rubio, P. Faria, and J. Davim, "The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite," *Materials Design*, vol. 29, no. 2, pp. 508-513, 2008.
- [6] I. El-Sonbaty, U. Khashaba, and T. J. C. s. Machaly, "Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites," vol. 63, no. 3-4, pp. 329-338, 2004.
- [7] V. Gaitonde, S. Karnik, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. Abrao, and J. P. Davim, "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites," *Journal of materials processing technology*, vol. 203, no. 1, pp. 431-438, 2008.
- [8] A. Alberdi, T. Artaza, A. Suárez, A. Rivero, and F. Giro, "An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-14, 2015.
- [9] E. D. Eneyew and M. Ramulu, "Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 354-362, 10// 2014.
- [10] M. A. Karataş, A. R. Motorcu, and H. Gökkaya, "Study on delamination factor and surface roughness in abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composites with different fiber orientation angles," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 1-29, 2021.
- [11] D. Kumar, K. Singh, and R. Zitoune, "Experimental investigation of delamination and surface roughness in the drilling of GFRP composite material with different drills," *Advanced Manufacturing: Polymer Composites Science*, vol. 2, no. 2, pp. 47-56, 2016.

Toplam	17	0.2700	100.00
S =	0.03403	R ² = 94.85%	R ² (adj) = 92.71%

Sonuç ve Öneriler

Bu deneysel çalışmada, karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) kompozit malzemenin farklı matkap uçlarıyla farklı işleme parametreleri altında dik işleme merkezinde delinmesi sonucunda delaminasyon hasarı üzerinde delme parametrelerinin etkisi araştırılmış ve minimum delaminasyon hasarı için delme parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Yüksek iş mili devri ve düşük ilerleme değerinde delaminasyon hasarının azaldığı tespit edilmiştir. Karbür matkap ucunun kullanılmasıyla HSS matkap ucuna göre daha düşük delaminasyon hasarı elde edilmiştir. KETP kompozit malzemenin delik yüzeyinde en düşük delaminasyon hasarı 1.3905 olarak ölçülmüştür. Delaminasyon hasarı için optimum seviye $M_2N_3F_1$ olarak tespit edilmiştir. ANOVA analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde F_d üzerinde, matkap ucu türünün, iş mili devrinin ve ilerleme değerinin etkisi sırasıyla %17.80, %68.89 ve %8.16 olarak elde edilmiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Makaledeki tüm katkı yazara aittir.

- [12] R. Melentiev, P. C. Priarone, M. Robiglio, and L. Settineri, "Effects of tool geometry and process parameters on delamination in CFRP drilling: an overview," *Procedia Cirp*, vol. 45, pp. 31-34, 2016.
- [13] P. Rahme, Y. Landon, F. Lachaud, R. Piquet, and P. Lagarrigue, "Delamination-free drilling of thick composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 72, pp. 148-159, 2015.
- [14] D. Rajkumar, P. Ranjithkumar, and M. Jenarathanan, "Experimental investigation and analysis of factors influencing delamination and thrust force during drilling of carbon-fibre reinforced polymer composites," *Pigment & Resin Technology*, 2017.
- [15] C. Tsao, H. Hocheng, and Y. Chen, "Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force," *CIRP annals*, vol. 61, no. 1, pp. 91-94, 2012.
- [16] E. Kılıçkap, Y. H. Çelik, and A. Yardımeden, "Karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etki eden parametrelerin araştırılması," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 175-180, 2017.
- [17] M. Kıyak, "Investigation of the Effect of Drill Bit Feature on Hole Surface Quality and Tool Wear," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 12, no. 4, pp. 661-667, 2021.
- [18] Z. Jia, C. Chen, F. Wang, and C. Zhang, "Analytical study of delamination damage and delamination-free drilling method of CFRP composite," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 282, p. 116665, 2020.
- [19] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, A. Aguiar Vieira, and A. Torres Marques, "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates," *Composite Structures*, vol. 92, no. 7, pp. 1545-1550, 6// 2010.
- [20] E. Kılıçkap, "CETP Kompozitlerin Delinmesinde Oluşan Deformasyona Delme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi," *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, p. 77, 2010.
- [21] J. Fernández-Pérez, J. Díaz-Álvarez, M. Miguelez, and J. Cantero, "Combined analysis of wear mechanisms and delamination in CFRP drilling," *Composite Structures*, vol. 255, p. 112774, 2021.
- [22] J. Miller, E. D. Eneyew, and M. Ramulu, "Machining and Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites," *SAMPE Journal, Volume 49, No.2*, 2013.
- [23] S. Gaugel *et al.*, "A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)," *Composite Structures*, vol. 155, pp. 173-183, 2016.
- [24] Q. Wang and X. Jia, "Analytical study and experimental investigation on delamination in drilling of CFRP laminates using twist drills," *Thin-Walled Structures*, vol. 165, p. 107983, 2021.
- [25] P. Rahmé, P. Moussa, F. Lachaud, and Y. Landon, "Effect of adding a woven glass ply at the exit of the hole of CFRP laminates on delamination during drilling," ed: Elsevier, 2020.
- [26] B.-c. Kwon, N. D. D. Mai, E. S. Cheon, and S. L. Ko, "Development of a step drill for minimization of delamination and uncut in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 3, pp. 1291-1301, 2020.
- [27] Y. H. Çelik, E. Kilickap, and N. Koçyiğit, "Evaluation of drilling performances of nanocomposites reinforced with graphene and graphene oxide," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 9, pp. 2371-2385, 2019.
- [28] A. Yardımeden, E. Kilickap, and Y. H. Celik, "Effects of cutting parameters and point angle on thrust force and delamination in drilling of CFRP," *Materials Testing*, vol. 56, no. 11-12, pp. 1042-1048, 2014.
- [29] E. Kılıçkap, A. Yardımeden, and Y. H. Çelik, "Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 22, no. 1, pp. 89-95, 2015.
- [30] S. Samborski, "Prediction of delamination front's advancement direction in the CFRP laminates with mechanical couplings subjected to different fracture toughness tests," *Composite Structures*, vol. 202, pp. 643-650, 2018.
- [31] X. Chao, L. Qi, W. Tian, K. Yang, and H. Li, "Evaluation for interfacial fracture of fiber-reinforced pyrocarbon matrix composites by using a zero-thickness cohesive approach," *Journal of Alloys Compounds*, vol. 820, p. 153378, 2020.
- [32] S. O. Ismail, H. N. Dhakal, I. Popov, and J. Beaugrand, "Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 2043-2052, 2016.
- [33] N. Guibert, H. Paris, and J. Rech, "A numerical simulator to predict the dynamical behavior of the self-vibratory drilling head," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol. 48, no. 6, pp. 644-655, 2008.
- [34] A. A. A. Nasir, A. I. Azmi, T. C. Lih, and M. S. A. Majid, "Critical thrust force and critical feed rate in drilling flax fibre composites: A comparative study of various thrust force models," *Composites Part B: Engineering*, vol. 165, pp. 222-232, 2019.
- [35] S. O. Ismail, S. O. Ojo, and H. N. Dhakal, "Thermo-mechanical modelling of FRP cross-ply composite laminates drilling: delamination damage analysis," *Composites Part B: Engineering*, vol. 108, pp. 45-52, 2017.



Araştırma Makalesi / Research Article

Süperelastik Nikel-Titanyum şekil hafızalı alaşımların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisi

The effect of high temperature and aging heat treatment on the mechanical properties of superelastic Nickel-Titanium shape memory alloys

Sedat Güven^{1*}, Meltem Altın Karataş², Hasan Gökkaya³, Yüksel Akınay⁴

¹ Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, sedat.guven@gibtu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8891-5421>

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, meltemaltin@ibu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1628-1316>

³ Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, hgokkaya@karabuk.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7103-0616>

⁴ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, yukselakinay@yyu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6171-6307>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 29 Aralık 2021
Revizyon 18 Ocak 2022
Kabul 18 Şubat 2022
Online 30 Mart 2021

Anahtar Kelimeler:

Akıllı malzemeler,
Mekanik özellikler,
Nikel-Titanyum (NiTi),
Şekil Hafızalı Alaşımlar (SHA),
Yaşlandırma

ÖZ

Bu deneysel çalışmada; yüzeyi elektro polisaj ile parlatılmış süperelastik Nikel-Titanyum (NiTi) Şekil Hafızalı Alaşım (SHA) tel numunelerin yüksek sıcaklık (130 °C) altında çekme testleri sonrası gerilme kaynaklı meydana gelen deformasyon yapıları araştırılmıştır. NiTi SHA'ların sertlik ve mukavemet değerlerini artırmak amacıyla çekme testleri öncesinde numunelere yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış ve bu işlemin mekanik özellikler üzerinde etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda NiTi SHA tel numuneleri çekme testleri ile tek eksen ve sabit bir hızda koparıncaya kadar çekmeye maruz bırakılmıştır. Süperelastik NiTi SHA tel numunelerin çekme testleri sonrası kırılma yüzeylerinde gerçekleştirilen deformasyon analizlerinde; çatlak oluşumları, kimyasal bileşimdeki değişimler ve mekanik özellikler incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX) cihazları kullanılarak deformasyon analizi yapılmıştır. Ayrıca, numunelerin deformasyon yüzeylerinde aktif faz yapısının analizi ve sertlik değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Faz analizlerinde, Ni₄Ti₃ ve Ti₂Ni intermetalik faz yapıları gözlemlenmiştir. Mikro-Vickers sertlik deneylerinde numunelerin deformasyon yüzeylerinde sertlik değeri açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. En yüksek akma gerilmesi (361 MPa) ve çekme gerilmesi (948 MPa) değerleri; yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunede elde edilmiştir. En düşük akma gerilmesi (232 MPa) ve çekme gerilmesi (737 MPa) değerleri ise ısıl işlem uygulanan deney numunesine ait çekme testi sonucunda tespit edilmiştir. Çekme deneyleri öncesinde çok düşük oranda mevcudiyetine rastlanılan Karbon (C) elementinin yaşlandırma ısıl işlemi ve çekme deneyleri sonrasında önemli artışlar gösterdiği tespit edilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerde faz dönüşüm sıcaklıklarının, mekanik özelliklerin ve süperelastik etkinin kimyasal bileşimdeki değişimler nedeniyle olumsuz olarak etkilendiği belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 December 2021
Received in revised form 18 January 2022
Accepted 18 February 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Smart materials,
Mechanical properties,
Nickel-Titanium (NiTi),
Shape memory alloys (SMA),
Aging

Doi: 10.24012/dumf.1038109

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this experimental study; After tensile tests under high temperature (130 °C) of superelastic Nickel-Titanium (NiTi) Shape Memory Alloy (SMA) wire samples, the surface of which is polished by electropolishing, the deformation structures caused by stress were investigated. In order to increase the hardness and strength values of NiTi SMAs, aging heat treatment was applied to the samples before the tensile tests and the effect of this process on the mechanical properties was investigated. In experimental studies, NiTi SMA wire samples were subjected to pull until they were plucked on a single axis and at a constant speed. In the deformation analyzes performed on the fracture surface of the superelastic NiTi SMA wire samples after the tensile tests; crack formations, changes in chemical composition and mechanical properties were investigated. The analysis of the resulting deformations was made using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) devices. In addition, analysis of active phase structures and measurement of hardness values in the deformation surfaces of the samples were carried out. In phase analysis, Ni₄Ti₃ and Ti₂Ni intermetallic phase structures were observed. In micro-Vickers hardness tests, no significant difference was observed on the deformation surfaces of the samples in terms of hardness value. The highest yield stress (361 MPa) and tensile stress (948 MPa) values; It was obtained in the sample without aging heat treatment. The lowest yield stress (232 MPa) and tensile stress (737 MPa) values were determined as a result of the tensile test of the test sample to which the heat treatment was applied. It was determined that the Carbon (C) element, which was present at a very low rate before the tensile tests, showed significant increases after the aging heat treatment and tensile tests. It was determined that the phase transformation temperatures, mechanical properties and superelastic effect were negatively affected by the changes in the chemical composition of the aging heat-treated samples.

1. Giriş

Günümüzde, yüksek teknoloji gerektiren uygulamalarda akıllı malzemelerin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Akıllı malzemeler; gerilme, sıcaklık, elektrik ya da manyetik alanlar gibi harici olarak uygulanan uyaranlara karşı bir veya daha fazla özelliğini kontrollü bir şekilde değiştirebilecek şekilde tasarlanmış malzemelerdir [2]. Bu yönleriyle endüstrinin çeşitli alanlarında benzersiz şekil değişimi ve enerji dönüşümleri sağlayan akıllı malzemeler; piezoelektrikler, elektrostriktifler, manyetostriktifler, elektroaktif polimerler, şekil hafızalı polimerler, ŞHA ve ferromanyetik ŞHA olarak gruplandırılmaktadır [3].

ŞHA'lar, uygun ısıl ve mekanik prosedürlere maruz kaldığında önceden tanımlı şekil veya boyutuna geri dönebilen malzemelerdir [4]. Bu alaşım grubu kendi içerisinde Şekil Hafıza Etkisi (SHE) ve Süper Elastisite (SE) olmak üzere iki farklı davranış sergilemektedir [5, 6]. ŞHA'lar, otomotiv [7], havacılık ve uzay sektörü [8] ile medikal endüstrisinde [9] sıkça kullanılmakta, bununla birlikte inşaat ve giyim [10] gibi sektörlerde de son yıllarda kullanımları artmaktadır. Korozyon direnci, yorulma ömrü, biyouyumluluk, SHE, SE ve yüksek mukavemet gibi mekanik özellikleri ŞHA'ları ön plana çıkarmaktadır [11, 12].

ŞHA'larda mikroskobik seviyedeki martenzitik faz dönüşümleri, makroskobik seviyede şekil değişimiyle sonuçlanmaktadır. Martenzitik dönüşüm, östenit faz olarak adlandırılan dönüşüm öncesi kristal yapının, sıcaklık ve uygulanan gerilmenin ayrı ayrı veya birlikte etkisiyle martenzit yapıya dönüşmesi olayıdır [13]. ŞHA'ların martenzitik dönüşümleri sonucu meydana gelen deformasyonlar, atomların hareket etmesi neticesinde ikizlenme ile gerçekleşmektedir. Bu dönüşümde yüksek sıcaklıkta kararlı olan faz östenit, düşük sıcaklıkta ise martenzittir [14]. Demir-Karbon (Fe-C) alaşımlarında martenzitik faz dönüşümü soğuma hızları parametre değerlerine bağlı olarak zaman-sıcaklık dönüşüm diyagramları ile verilebilmektedir. Bunun aksine, NiTi, Bakır-Nikel-Alüminyum (CoNiAl) ve Çinko-Bakır-Alüminyum (ZnCuAl) gibi ŞHA'ların belirli kimyasal bileşimlerinde oluşan martenzitik dönüşüm tersinir bir denge fazı olarak meydana gelmektedir. Çok düşük soğuma hızlarında dahi martenzitik faz dönüşümü sonucu doğal olarak martenzitik mikroyapı oluşmaktadır. Oluşan bu martenzit yapı, termoelastik martenzit yapı adı verilmektedir [15].

Martenzitik dönüşüm birçok alaşım grubunda gerçekleşiyor olsa da NiTi alaşımları mekanik özellikleri bakımından ŞHA'ları en iyi temsil eden alaşım türüdür [16, 17]. NiTi alaşımların işlenebilirlik, yüksek sönümleme, aşınma direnci, SE ve SHE özelliklerinin diğer ŞHA'lara kıyasla daha iyi olması, bu alaşımın üstün özelliğidir [18]. NiTi alaşımlarında SE, martenzitik dönüşümlere ihtiyaç duymaksızın dönüşüm sıcaklığının üzerinde, ŞHA'ların östenitik faz yapısında gerçekleşmektedir [19, 20]. Süperelastik özellik sergileyen ŞHA'lar, sergiledikleri üstün dönüşüm davranışları ile deformasyon öncesi şekil veya boyutlarına büyük oranda geri dönüş gerektiren uygulamalara örnek malzemelerdir.

Araştırmacılar, üretim teknikleri ve ısıl işlem parametreleri üzerine araştırmalar gerçekleştirerek NiTi ŞHA'ların farklı koşullarda sergiledikleri mekanik özellikleri ve işlenebilirliği iyileştirmeye yönelik çalışmalar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Araştırmalardan elde edilen bulgular neticesinde NiTi ŞHA'ların gündün güne kullanım alanları genişlemektedir. Diğer ŞHA'lara kıyasla üstün SHE, korozyon direnci, yorulma ömrü sergileyen ve bu nedenle endüstrinin çeşitli kollarında ticari olarak kullanımları oldukça yaygınlaşan NiTi alaşımları, işlenebilirliklerini aşırı ölçüde zorlaştıran mekanik özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [21]. İşlenebilirliği geliştirmek, mekanik özellikleri ve faz dönüşüm sıcaklıklarını düzenlemek amacıyla araştırmacılar, üretimi tamamlanmış NiTi ŞHA'lara yaşlandırma ısıl işlemi uygulamaktadır. NiTi ŞHA'lara uygulanan yaşlandırma ısıl işlemiyle mekanik özelliklerin ve faz geçiş sıcaklıklarının önemli ölçüde düzenlenebilir olduğu ispat edilmiştir [15, 22, 23].

Bu çalışmada; ŞHA'ların kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan biri olan kararlılık özelliğinden yola çıkılarak, östenit faz yapısında bulunan NiTi ŞHA'ların çekme testleri sonrası kırılma mekanizmaları, gerilme kaynaklı kimyasal kompozisyondaki değişimleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu doğrultuda deneysel çalışmalar, tel formunda süperelastik NiTi ŞHA numunelerin kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel numuneleri, 800 °C sıcaklıkta 15 dakika yaşlandırma ısıl işlemine maruz bırakılmış, ardından suda soğutulmuştur. Yaşlandırma ısıl işleminin östenit fazdaki süperelastik malzeme üzerinde etkisini belirlemek amacıyla eşit uzunluklarda hazırlanan numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testlerinde süperelastik NiTi ŞHA'lar 130 °C'de (süperelastik NiTi ŞHA'lar için "yüksek sıcaklık" fazı olarak değerlendirilen östenit faz yapısında) çekme testleri ile kopma gerçekleşinceye kadar çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır. Çekme deneylerinin ardından numunelerin kırılma yüzeylerinden; SEM cihazı vasıtasıyla yüzey mikroyapı görüntüleri, x-ışını kırınım (XRD) analizleri ile aktif faz yapıları ve Vickers sertlik deneyleri ile mikro sertlik ölçüm sonuçlarına ulaşılmıştır. Çekme testi deneyleri öncesinde ve sonrasında numunelere ait kimyasal kompozisyon EDX cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma, süperelastik NiTi ŞHA'ların östenit faz yapısında sergilediği mekanik davranışları ve yaşlandırma ısıl işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Östenit faz sıcaklığında çekme testlerine maruz bırakılan numunelerin mekanik özelliklerinde yaşlandırma ısıl işleminin de etkisiyle meydana gelen değişimlerin tespiti sağlanmıştır. Özellikle östenit faz yapısında kullanılması planlanan NiTi ŞHA'ların mekanik özellikleri, deformasyon gerçekleşen bölgede oluşan yapılar ve yaşlandırma ısıl işleminin mekanik özellikler üzerindeki etkileri üzerine önemli sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen mikro yapı görüntülerinin, kimyasal kompozisyon değerlerinin, faz yapılarının ve sertlik değerlerinin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. İş parçası malzemesi

Bu çalışmada; deneysel numunesi olarak havacılık, uzay ve medikal endüstrilerinde yaygın ticari kullanıma sahip süperelastik NiTi ŞHA tel malzeme kullanılmıştır. Temini

sağlanan NiTi ŞHA tel 2 mm çap ölçüsünde olup, genel görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir. Süperelastik NiTi ŞHA tel numunenin kimyasal kompozisyonunu belirlemek için EDX element analizi gerçekleştirilmiş olup; kimyasal bileşiminde ağırlıkça %55,92 Ni, %44 Ti, %0015 Fe ve %0.008 C tespit edilmiştir. NiTi ŞHA tel üretimi sonrasında, korozyon dayanımını artırmak ve yüzey yapısını iyileştirmek amacıyla elektro polisaj ile yüzeyler parlatılmıştır [24].



Şekil 1. Süperelastik NiTi ŞHA tel malzeme.

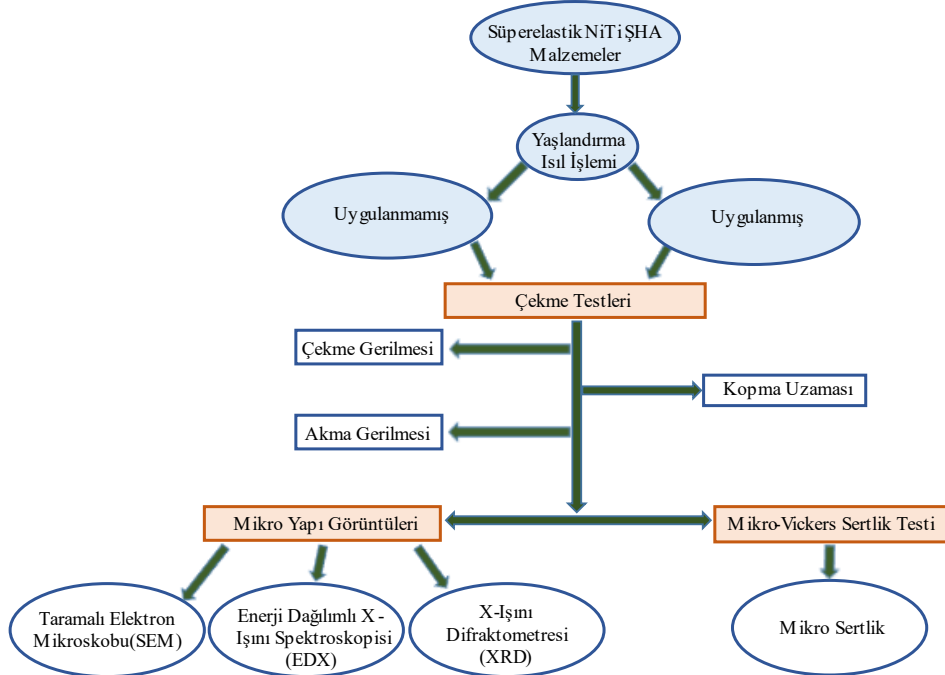
2.2. Metot

Deneylerde kullanılmak üzere eşit uzunluk (100 mm) ve çap ölçüsüne (2 mm) sahip süperelastik NiTi ŞHA tel numuneler hazırlanmıştır. Süperelastik NiTi ŞHA’lara yaşlandırma ısıl işlemi etkisinin incelenmesi amacıyla 3 adet deney numunesi (M2), 800 °C sıcaklıkta 15 dakika yaşlandırma ısıl işlemine maruz bırakılmış, ardından suda soğutulmuştur. Numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi Protherm marka ısıl işlem cihazında gerçekleştirilmiştir. Diğer deney numuneleri (M1) ise herhangi bir ısıl işleme maruz bırakılmamıştır. Yaşlandırma ısıl işlemi sonrası kimyasal kompozisyonda meydana gelen değişimlerin tespiti için EDX analizi yapılmıştır. Çalışmada, östenit faz yapısındaki özellikler değerlendirilmek istendiğinden süperelastik NiTi ŞHA’lar için yüksek kabul edilebilecek bir sıcaklık değerinde (130 °C) çekme testi deneylerinin gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

Oda sıcaklığının üzerinde östenit faza geçişin söz konusu olduğu süperelastik NiTi ŞHA numunelerin belirlenen çekme testi sıcaklığında kararlı bir yapıda olması sağlanmıştır. Çekme testi sırasında ölçülen 130 °C sıcaklık değeri, parçaya yakın bir bölgeden (çevresel) elde edilmiştir. Deney numunelerinin yaşlandırma ısıl işleminin etkisiyle sergilediği mekanik özellikleri incelenmiş, sertlik değerleri ölçülmüş ve mikro yapı görüntüleri alınmıştır. Deneylere ait işlem basamakları Şekil 2’de şematik olarak verilmiştir.

Süperelastik NiTi ŞHA’ların mekanik özelliklerinde ve faz dönüşüm sıcaklıklarında gerilme kaynaklı meydana gelebilecek deformasyon oluşumlarının incelenebilmesi için uygulanan çekme testi deneyleri; 130 °C sıcaklık değerinde, sabit çekme hızında (5 mm/dak), MTS marka 100 kN servohidrolik dinamik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi deneyleri 3 tekrarlı olmak üzere gerçekleştirilmiş ve elde edilen akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma uzaması değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak mekanik özellik verileri ile gerilim-gerinim grafiği elde edilmiştir.

Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış/uygulanmamış süperelastik NiTi ŞHA tel numunelerin yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen çekme testi deneyleri sonrasında kırılma mekanizmasının incelenmesi, kimyasal kompozisyonda meydana gelebilecek muhtemel değişikliklerin gözlenmesi için gerilmeden etkilenen kopma bölgelerinin görüntüleri alınmıştır. Kopma bölgelerinden elde edilen görüntüler TESCAN marka SEM cihazında elde edilmiştir. Çekme testi deneyleri ile kopma gerçekleşinceye kadar çekme kuvvetine maruz kalan numunelerde kırılma bölgelerinin element tanımlaması ve dağılımı analizi de TESCAN marka EDX cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerdeki aktif faz yapılarını incelemek amacıyla Bruker marka XRD cihazı, sertlik değerlerinin ölçümü için ise QNESS marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneylere ait işlem basamaklarının şematik gösterimi.

Tablo 1. NiTi ŞHA tel numunelerden çekme testleri sonrası elde edilen akma ve çekme gerilmesi ile kopma uzaması değerleri.

Yaşlandırma Isıl İşlemi	Numuneler	Uygulanan Maksimum Yük (kN)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Uygulanmamış	M1	2.979	948.2	361.7	36.8
Uygulanmış	M2	2.316	737.3	232.6	64.4

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Çekme ve Sertlik Testleri

Her biri eşit uzunluk (100 mm) ve çap ölçüsüne (2 mm) sahip yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış/uygulanmamış (her birinden 3'er adet olmak üzere toplam 6 adet) numunelerin çekme testi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen akma ve çekme gerilmesi ile kopma uzaması değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak Tablo 1'de yer alan veriler elde edilmiştir.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde; M2 numunesinin çekme ve akma gerilmesi değerleri, M1 numunesine ait deney verileri ile kıyaslandığında daha düşük değerlerde elde edilmiştir. En yüksek akma gerilmesi (361.721 MPa) ve çekme (948.2 MPa) gerilmesi değerleri; M1 numunesinde elde edilmiştir. En düşük akma gerilmesi (232.617 MPa) ve çekme gerilmesi (737.3 MPa) değeri ise M2 numunesinin çekme testi deneyleri sonucunda tespit edilmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda çekme testi deneyi gerçekleştirilen süperelastik NiTi ŞHA tel numunelerde östenit fazına tam dönüşüm gerçekleşmektedir. Süperelastik NiTi ŞHA'ların östenit faz yapısında akma gerilmesi değerlerinin yüksek olduğu (~535 MPa) bilinmektedir [25, 26]. Fakat, elde edilen deney sonuçları incelendiğinde, M2 numunesinde ölçülen akma gerilmesi (232.6 MPa) değerinin düşük değerlerde elde edildiği tespit edilmiştir. Akma gerilmesindeki düşüşün nedenini araştırmak için yaşlandırma ısıl işleminin uygulandığı numuneye ait kopma bölgesi SEM görüntüleri alınmış, EDX analizleri yapılmıştır. Kopma bölgesinden alınan EDX analizlerinde, yaşlandırma ısıl işlemi sonrası ölçülen Ni ve C oranlarına kıyasla önemli bir artış (sırasıyla %7 ve %79) gözlenmiş, Ti oranının ise düşüş gösterdiği (%41) belirlenmiştir (Tablo 2). Deney numunelerine ait yüzeylerden alınan EDX analizi verilerinin homojen bir dağılıma sahip olmaması nedeniyle numunelerin yüzeyi

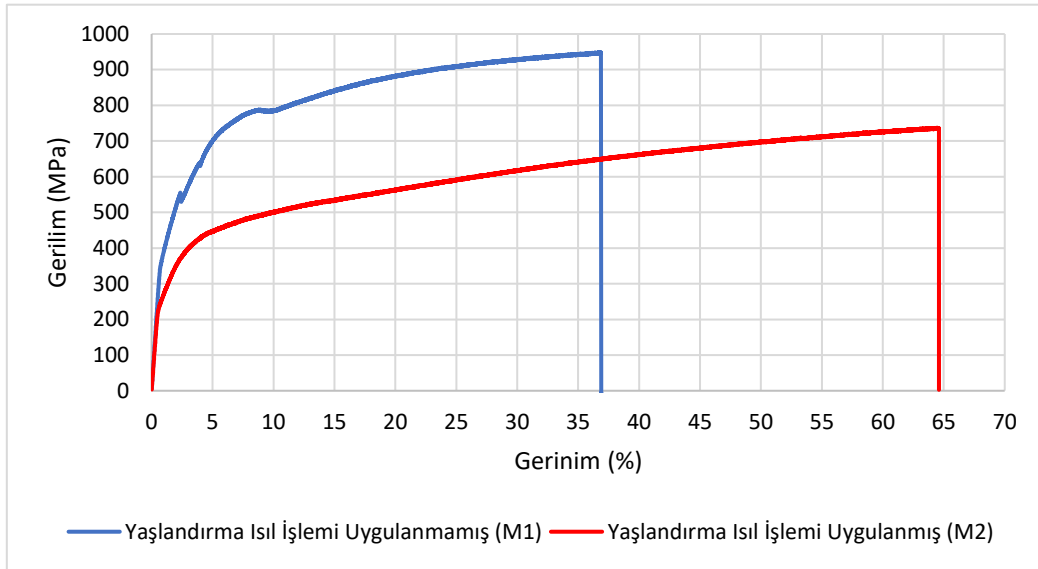
parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi sonrası yapılan EDX analizinde, numunelerin herhangi bir deneye tabi tutulmamış hali olan yaşlandırma ısıl işlemi öncesi kimyasal kompozisyonuna kıyasla Ni ve Ti oranlarında düşüş (sırasıyla %6,8 ve %6,52), C değerinde ise artış olduğu (%6,8) gözlemlenmiştir.

Parlatma işlemi sonrası kimyasal kompozisyon oranında tespit edilen önemli değişimlerin; numune yüzeyinde Ti ve C atomlarının belirgin bir afiniteye sahip olmasından [27], yaşlandırma ısıl işlemi ile çevresel etkenlerden kaynaklandığı [28] düşünülmektedir. ŞHA'ların Ni oranındaki %1 değişim dahi alaşımın özelliklerini etkilemekte, numunedeki düşük Ni faz dönüşüm sıcaklığını önemli ölçüde arttırmakta ve östenitik durumda akma dayanımını azaltmaktadır [29]. C gibi safsızlıklar, faz dönüşüm sıcaklığını değiştirdiği ve mekanik özellikleri zayıflattığı için NiTi alaşımları içerisinde bulunması istenmemektedir. Çekme testi deneyleri sonucunda elde edilen akma ve çekme gerilmelerindeki düşüşün, Ni ve Ti oranındaki önemli düşüş ve C oranındaki artışa bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen tahribattan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deney numunelerine ait gerilim-gerinim grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Gerilim-gerinim grafiği incelendiğinde; M1 numunesinin kopma uzaması değeri %36,8 ölçülürken, M2 numunesinde kopma uzaması değeri %64,4 olarak tespit edilmiştir. M1 numunesinin kopma uzamasının düşük değerlerde elde edilmesinin nedenini araştırmak için kırılma bölgelerinden SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 4a). Kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü incelendiğinde, numunenin gevrek kırılma modeli sergilemiş olduğu ve kopmanın düşük plastik deformasyon sonucunda gerçekleşmesi nedeniyle kopma uzaması değerinin düşük değerlerde elde edildiği tespit edilmiştir [30].

Tablo 2. Deney numunelerine ait ağırlıkça EDX elementel analiz sonuçları.

Yaşlandırma Isıl İşlemi	İşlem	Ni	Ti	C
Uygulanmış (M2)	Yaşlandırma Isıl İşlemi Öncesi	55,92	44	0,008
	Yaşlandırma Isıl İşlemi Sonrası	43,18	42,26	14,56
	Çekme Testi Sonrası	46,20	24,98	26,03
	Çekme Testi Sonrası (Parlatılmış)	52,07	41,13	6,80
Uygulanmamış (M1)	Çekme Testi Öncesi	55,92	44	0,008
	Çekme Testi Sonrası	53,13	42,27	4,43
	Çekme Testi Sonrası (Parlatılmış)	53,04	41,84	5,13



Şekil 3. Deneysel numunelere ait gerilim-gerinim grafiği.

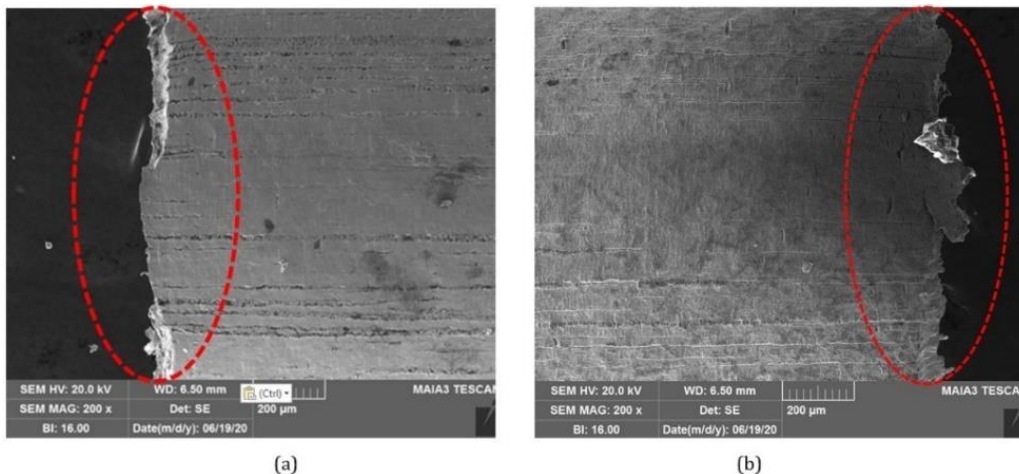
M2 numunesinin kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü (Şekil 4b) incelendiğinde de benzer şekilde, gevrek kırılma modelinin oluştuğu ve düşük plastik deformasyon sonucunda kopmanın gerçekleştiği gözlenmiştir. Kopma uzaması değerleri karşılaştırıldığında, M2 numunesinde kopma uzaması değeri yaklaşık %75 oranında daha fazla elde edilmiştir. Genel olarak NiTi ŞHA'lara uygulanan yaşlandırma ısıl işlemlerinin gerinim değerini artırdığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [31, 32]. M2 numunesine ait EDX analizi elementel sonuçları incelendiğinde, kopma uzaması değerindeki %75 artışın yalnızca yaşlandırma ısıl işlemine atfedilemeyeceği sonucuna varılmıştır. EDX analizinde, kopmanın gerçekleştiği yüzeylerde gerilme kaynaklı C elementi oranının arttığı tespit edilmiştir. C oranındaki artış ile Ni ve Ti oranlarındaki düşüşe bağlı olarak NiTi ŞHA'ların mekanik özellikleri (kopma uzaması) olumsuz olarak etkilenmektedir [33]. NiTi alaşımlarında C varlığının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği, dönüşüm sıcaklıklarını değiştirdiği ve sonucunda faz dönüşümlerinin gerçekleşmemesi gibi olumsuzluklara neden olduğu bilinmektedir [34]. Numuneler üzerindeki üç farklı noktada ölçülen sertlik değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Tablo

incelendiğinde, M1 numunesinde sertlik değeri (344 ± 6 HV) M2 numunesine (335 ± 6 HV) kıyasla daha yüksek değerde ölçülmüştür. Literatürde yer alan çalışmaların (~ 500 HV) aksine deney numunelerinde ölçülen sertlik değerleri belirgin bir düşüş sergilemiştir.

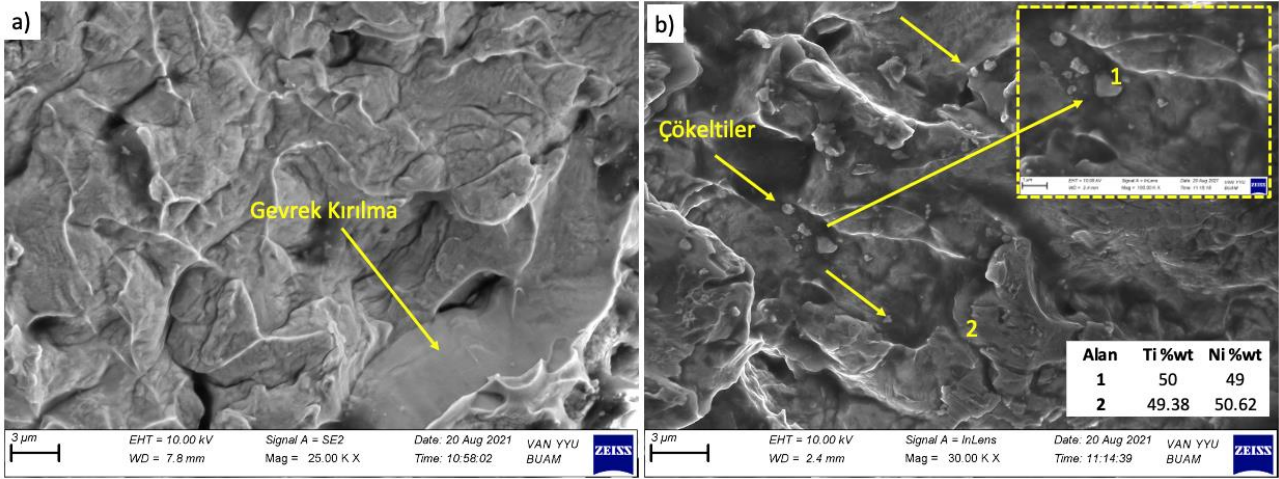
Tablo 3. Numunelere ait kırılma yüzeylerinde ölçülen sertlik değerleri.

Numuneler	HV10 Sertlik Sonuçları		
	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3
M1	350	342	339
M2	340	329	335

Numunelerde ölçülen düşük değerde sertliğin, yaşlandırma ısıl işlemi ve çekme testi deneyleri sonrası numunelerin Ni ve Ti oranlarında gerçekleşen değişimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. NiTi alaşımlarında maksimum sertliğe ulaşmak için %55-56 mertebesinde Ni içeriği gerekmektedir. Daha düşük ve daha yüksek Ni içeriğinde sünekliliğin artması sonucu düşük sertlik değerleri elde edilmektedir [35].



Şekil 4. Numunelere ait kırılma bölgesi SEM görüntüleri. (a) M1 numunesi (b) M2 numunesi.



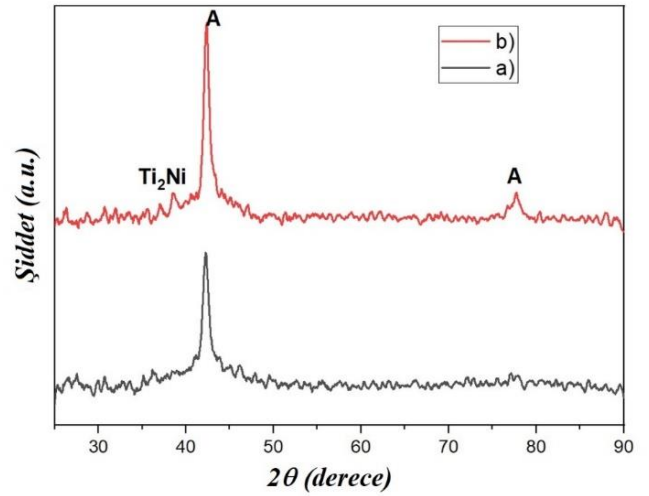
Şekil 5. Numunelerde kırılma yüzeyleri ve çökelti oluşumlarına ait SEM görüntüsü. (a) M1 numunesi (b) M2 numunesi.

3.2. Kırılma yüzeylerinde SEM, EDX ve XRD sonuçları

Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış/uygulanmamış süperelastik NiTi ŞHA tellerin yüksek sıcaklıkta sergiledikleri mekanik özellikleri incelemek amacıyla deney numunelerinin kırılma görüntüleri SEM cihazı ile görüntülenmiştir. M1 numunesine ait kırılma bölgesi SEM görüntüsü Şekil 5a'da gösterilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, plastik deformasyonun daha az olduğu ve bölgesel gevrek kırılmaların olduğu tespit edilmiştir. NiTi alaşımlarında gevrek kırılma modeli, kırılma tokluğu değeri martenzit tane yapısının genişlemesi için gerekli olan kritik gerilim yoğunluğundan daha az olan numunelerde kırılma bölgesindeki çatlak uçlarının genişlemesi sonucu meydana gelmektedir [30].

M2 numunesine ait kırılma bölgesi SEM görüntüsü Şekil 5b'de gösterilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, kırılmanın gevrek olarak gerçekleştiği ve kırılma bölgelerinde yoğun olarak kararmaların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kırılma bölgesinde yaşlandırma ısıl işleminin etkisiyle Ni₄Ti₃ çökelti oluşumlarının varlığı görülmüştür. Numune üzerinde iki farklı bölgeden (1 ve 2) alınan EDX analizi verileri, çökelti bölgesinde nikel oranının nispeten arttığını göstermektedir. Bu durum, Tablo 2'de yer alan EDX analizi verilerini doğrular nitelikte olup, kimyasal kompozisyonun kırılma yüzeyinde homojen bir dağılıma sahip olmadığını göstermektedir.

Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış ve uygulanmamış süperelastik NiTi ŞHA'ların faz yapıları XRD analizleriyle belirlenmiş ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde, A olarak gösterilen NiTi östenit fazına ait büyük pik $2\theta = 43,6^\circ$ 'da gözlemlenmiştir. Numunelerde NiTi fazına ek olarak Ti₂Ni intermetalik yüzey merkezli kübik yapı $2\theta = 41,4^\circ$ ortaya çıkmıştır. NiTi alaşımlarının Ti içeriğindeki artışla Ti₂Ni ikinci fazının hacim oranı artış göstermektedir. Ti₂Ni fazının varlığı matris fazının NiTi oranını değiştirmekle birlikte faz dönüşüm sıcaklıklarında değişikliklere yol açmaktadır [36]. Faz dönüşüm sıcaklıklarında kontrolsüz gerçekleşen değişimler NiTi alaşımları diğer metallerden ayıran en belirgin özellik olan ŞHE ve SE davranışlarını olumsuz etkilemektedir.



Şekil 6. Numunelere ait kırılma yüzeylerinde XRD sonuçları. (a) M2 numunesi (b) M1 numunesi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada; yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış/uygulanmamış, yüzeyi elektro polisaj ile parlatılmış, süperelastik özellik sergileyen NiTi ŞHA tel numunelere 130 °C altında uygulanan çekme testi deneyleri sonrası numunelerin mekanik özelliklerindeki değişim ve kırılma bölgesinin deformasyonları araştırılmıştır. Deneysel çalışmada; süperelastik NiTi ŞHA'ların çekme testi deneyleri sonrasında kopma bölgelerinde meydana gelen deformasyon modelleri SEM, EDX ve XRD cihazları ile incelenmiş, kimyasal kompozisyondaki değişimler, kırılma modelleri, çökelti oluşumları ve mekanik özelliklerdeki meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Çalışmalar sonucu elde edilen bulgular;

- ✓ M2 numunesinin çekme ve akma gerilmesi değerleri, M1 numunesine kıyasla düşüş göstermiştir.
- ✓ En yüksek akma (361.721 MPa) ve çekme (948.2 MPa) gerilmesi değerleri; M1 numunesinde elde edilmiştir.
- ✓ En düşük akma gerilmesi değeri (232.617 MPa) ve çekme gerilmesi değeri (737.3 MPa) ise M2 numunesine uygulanan çekme testi deneyi sonucunda tespit edilmiştir.

- ✓ Kimyasal kompozisyonda meydana gelen değişimler incelendiğinde, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numune yüzeyinde Ni ve Ti oranının belirgin bir düşüş sergilediği gözlemlenmiştir. Çekme testi sonrası yapılan ölçümlerde de düşüş eğiliminin sürdüğü, C oranında artışların olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ M1 numunesinden alınan elementel EDX analizi verilerinde çekme testi deneyleri öncesi ve sonrasında yüzeyde ölçülen Ni değerinin maksimum %5 oranında değişiklik gösterdiği (%55,92 > %53,04 Ni) tespit edilmiştir.
- ✓ Çekme testi deneyleri öncesi numune yüzeyinde %0.008 oranında ölçülen C elementi oranı, yaşlandırma ısıl işlemi ve çekme testi deneyleri sırasında meydana gelen gerilmelerin etkisiyle önemli değişimler göstermiştir. Çekme testi deneyleri sonrasında M1 numunesinin kırılma bölgesi yüzeyinde düşük (%4,43), M2 numunesinin kırılma bölgesi yüzeyinde ise yüksek (%26,03) C elementi oranı tespit edilmiştir.
- ✓ M1 ve M2 numunelerinin çekme testi deneyleri sonucunda düşük plastik deformasyon gözlenmiş, gevrek kırılma modeli tespit edilmiştir.
- ✓ Mikro-Vickers sertlik deneylerinde numunelerin deformasyon yüzeylerinde sertlik değeri açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.
- ✓ Numunelerde NiTi fazına ek olarak Ti₂Ni intermetalik yüzey merkezli kübik yapı ortaya çıkmıştır.
- ✓ M2 numunesinin kırılma yüzeylerinde Ni₄Ti₃ çökelti oluşumlarının varlığı görülmüştür.

Genel olarak; numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi çekme ve akma gerilmesi değerlerinde belirgin bir düşüşe, kopma uzaması değerinde ise önemli artışlara neden olmuştur. Gerçekleştirilen sertlik analizlerinde, numuneler arasında sertlik değerleri açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerde C oranı önemli ölçüde artış göstermiştir. Süperelastik NiTi ŞHA'ların kırılma yüzeylerinde yapılan XRD analizlerinde Ni₄Ti₃ ve Ti₂Ni çökelti oluşumlarının varlığına rastlanmıştır. Numunelerde gözlemlenen kimyasal kompozisyondaki değişimlerin ve çökelti varlığının mekanik özellikler ile faz dönüşüm sıcaklıklarını olumsuz etkileyecek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 kaynak ve malzemelerin temini, veri toplama, literatür taraması, deneylerin yapılması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Yazar 2, yazım ve eleştirel inceleme başlıklarında; Yazar 3 yazım denetimi, içerik ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Yazar 4 deneylerin yapılması ve verilerin elde edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

Teşekkür

Bu çalışmayı FYL-2020-2163 numaralı proje kapsamında finansal olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Yönetim Koordinatörlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] F. Calkins, J. Mabe, R. Ruggeri, "Overview of Boeing's Shape Memory Alloy based Morphing Aerostructures," in *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, vol. 43314, pp. 885-895, Jan. 2008.
- [2] W. G. Drossel, H. Kunze, A. Bucht, L. Weisheit, K. Pagel, "Smart3-Smart Materials for Smart Applications," in *Procedia CIRP*, vol. 36, pp. 211-216, 2015.
- [3] W. G. Drossel, F. Meinel, A. Bucht, H. Kunze, "Smart Materials for Smart Production-A Cross-Disciplinary Innovation Network in the Field of Smart Materials," in *Procedia Manufacturing*, vol. 21, pp. 197-204, Jan. 2018.
- [4] C. Naresh, P. Bose, C. Rao, "Shape Memory Alloys: A State of Art Review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 149, pp. 1-13, 2016.
- [5] C. Yang, S. Abanteriba, A. Becker, "A Review of Shape Memory Alloy based Filtration Devices," in *AIP Advances*, vol. 10, no. 6, pp. 1-12, Jun. 2020.
- [6] C. Wen, X. Yu, W. Zeng, S. Zhao, L. Wang, G. Wan, S. Huang, H. Grover, Z. Chen, "Mechanical behaviors and biomedical applications of shape memory materials: A review," in *AIMS Materials Science*, vol. 5, no. 4, pp. 559-590, Jun. 2018.
- [7] A. Bellini, M. Colli, E. Dragoni, "Mechatronic Design of a Shape Memory Alloy Actuator for Automotive Tumble Flaps: A Case Study," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2644-2656, Apr. 2009.
- [8] D. J. Hartl, D. C. Lagoudas, "Aerospace Applications of Shape Memory Alloys," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 221, no. 4, pp. 535-552, Apr. 2007.
- [9] K. Dai, C. Q. Ning, "Shape Memory Alloys and Their Medical Applications," in *Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics*, 2nd ed., D. G. Poutout, Ed., London, England, 2016, pp. 179-184.
- [10] C. Menna, F. Auricchio, D. Asprone, "Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering," in *Shape Memory Alloy Engineering For Aerospace, Structural and Biomedical Application*, 1st ed., L. Lecce, A. Concilio, Ed., 2015, pp. 369-403.
- [11] B. Yuan, M. Zhu, C. Y. Chung, "Biomedical Porous Shape Memory Alloys For Hard-Tissue Replacement Materials," in *Materials*, vol. 11, no. 9, pp. 1-53, Sep. 2018.
- [12] G. M. Simsek, Y. K. Sayinbas, M. Uysal, G. G. Yapici, "Effect of Heat Treatment on the Corrosion-Fatigue of NiTi Shape Memory Alloy," in *AIP conference proceedings*, vol. 2146, no. 1, pp. 1-6, Aug. 2019.
- [13] M. Kaya, O. Cakmak, T. Y. Saygili, K. C. Atli, "Şekil Hafızalı Alaşımarda Martensitik Faz Dönüşümü ve Şekil Hafıza Mekanizması," in *Journal of Selcuk-Technic*, vol. 15, no. 3, pp. 157-172, Dec. 2016.
- [14] N. Babacan, I. Gunel, I. B. Ozsoy, "Martensitic Phase Transformations in CuAlNi Shape Memory Alloys," in *Advanced Materials Research*, vol. 445, pp. 1076-1081, Jan. 2012.

- [15] S. Dilibal, "Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımların Süperelastik Davranışına Isıl İşlemin Etkisi," in *Journal of Polytechnic*, vol. 20, no. 3, pp. 623-627, Sep. 2017.
- [16] C. Velmurugan, V. Senthilkumar, S. Dinesh, D. Arulkirubakaran, "Machining of NiTi-Shape Memory Alloys-A Review," in *Machining Science and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 355-401, 2018.
- [17] Z. Zhu, D. Guo, J. Xu, J. Lin, J. Lei, B. Xu, X. Wu, X. Wang, "Processing Characteristics of Micro Electrical Discharge Machining for Surface Modification of TiNi Shape Memory Alloys Using a TiC Powder Dielectric," in *Micromachines*, vol. 11, no. 11, pp. 1-15, Nov. 2020.
- [18] T. Nakahata, "Industrial Processing of Titanium-Nickel (Ti-Ni) Shape Memory Alloys (SMAs) to Achieve Key Properties," in *Shape Memory and Superelastic Alloys*, K. Yamauchi, I. Ohkata, K. Tsuchiya, S. Miyazaki, Ed., Woodhead Publishing, 2011, pp. 53-62.
- [19] D. Kapoor, "Nitinol for Medical Applications: A Brief Introduction to the Properties and Processing of Nickel Titanium Shape Memory Alloys and their Use in Stents," in *Johnson Matthey Technology Review*, vol. 61, no. 1, pp. 66-76, Jan. 2017.
- [20] L. Machado, M. Savi, "Medical Applications of Shape Memory Alloys," in *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, vol. 36, no. 6, pp. 683-691, Jun. 2003.
- [21] A. T. Güner, C. Meran, "Ortopedik İmplantlarda Kullanılan Biyomalzemeler," in *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 26, no. 1, pp. 54-67, 2020.
- [22] T. Segreto, A. Caggiano, R. Teti, "Neuro-Fuzzy System Implementation in Multiple Sensor Monitoring for Ni-Ti Alloy Machinability Evaluation," in *Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 193-198, Dec. 2015.
- [23] I. Kaya, E. Karaca, M. Nagasako, R. Kainuma, "Effects of Aging Temperature and Aging Time on the Mechanism of Martensitic Transformation in Nickel-Rich NiTi Shape Memory Alloys," in *Materials Characterization*, vol. 159, pp 1-8, Jan. 2020.
- [24] A. Shamimi, B. Amin-Ahmadi, A. Stebner, T. Duerig, "The Effect of Low Temperature Aging and the Evolution of R-Phase in Ni-Rich NiTi," in *Shape Memory and Superelasticity*, vol. 4, no. 4, pp. 417-427, Sep. 2018.
- [25] Xian Ocean Material Technology Co. "Nitinol Products", Available: <https://xaocean.en.alibaba.com/> (26.12.2021).
- [26] M. C. Tanzi, S. Fare, G. Candiani, "Mechanical Properties of Materials," in *Foundations of Biomaterials Engineering*, 1st ed. Academic Press, 2019, pp. 105-136.
- [27] M. Ghassemieh, M. Mostafazadeh, M. Saberdel, "Seismic Control of Concrete Shear Wall using Shape Memory Alloys," in *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, no. 5, pp. 535-543, Mar. 2012.
- [28] B. N. K. Reddy, "Aging Time Correlation for Near-Equiatomic Niti Thin Films Deposited through Direct Current Magnetron Sputtering," in *Results in Physics*, vol. 17, pp. 1-13, Mar. 2020.
- [29] J. C. Chekotu, R. Groarke, K. O'Toole, D. Brabazon, "Advances in Selective Laser Melting of Nitinol Shape Memory Alloy Part Production," in *Materials*, vol. 12, no. 5, pp. 1-20, Mar. 2019.
- [30] A. Akdogan, M. Nurveren, "Şekil Hafızalı Alaşımlar," in *Engineer and Machinery*, vol. 521, no. 44, pp. 35-45, 2010.
- [31] J. Luo, J. He, X. Wan, T. Dong, Y. Cui, X. Xiong, "Fracture Properties of Polycrystalline NiTi Shape Memory Alloy," in *Materials Science and Engineering: A*, vol. 653, pp. 122-128, 2016.
- [32] B. C. d. Almeida, C. N. Elias, "Influence of Heat Treatment on Color and Flexibility of Nickel-Titanium Endodontic Instruments," in *Revista Gaucha de Odontologia*, vol. 68, 2020.
- [33] P. Salvetr, J. Dlouhy, A. Skolakova, F. Prusa, P. Novak, M. Karlik, P. Hausild, "Influence of Heat Treatment on Microstructure and Properties of NiTi46 Alloy Consolidated by Spark Plasma Sintering," in *Materials*, vol. 12, no. 24, pp. 1-17, Dec. 2019.
- [34] A. Ziolkowski, "Pseudoelasticity of Shape Memory Alloys," 1st ed. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [35] J. Frenzel, Z. Zhang, C. Somsen, K. Neuking, G. Eggeler, "Influence of Carbon on Martensitic Phase Transformations in NiTi Shape Memory Alloys," in *Acta Materialia*, vol. 55, no. 4, pp. 1331-1341, Feb. 2007.
- [36] M. Kılıç, I. Kırık, B. Kurt, N. Orhan, "Ön Isıtma Sıcaklığının Ni3Al/NiAl/NiTi Bileşiklerinden Oluşan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin Yapısına Etkisinin İncelenmesi," in *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 21, no. 8, pp. 358-364, May. 2015.
- [37] J. Bhagyaraj, K. V. Ramaiah, C. N. Saikrishna, S. K. Bhaumik, Gouthama. "Behavior and Effect of Ti2Ni Phase During Processing of NiTi Shape Memory Alloy Wire from Cast Ingot," in *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 581, pp. 344-351, Dec. 2013.



Sleipner Çeliğinin Yüzey Finiş Modellemesinde Takım Yolu Stratejisinin ve Kesme Parametrelerinin MRR ve Ra Üzerine Etkisi

The Effect of Tool Path Strategy and Cutting Parameters on MRR and Ra in Surface Finish Modeling of Sleipner Steel

Hasan Ballıkaya^{1*}

¹ İnönü Üniversitesi, Malatya OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri bölümü, hasan.ballikaya@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5484-0214>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 30 Aralık 2021
Revizyon 19 Ocak 2022
Kabul 21 Ocak 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

*Yüzey Pürüzlülüğü Sleipner,
ANOVA, Taguchi, Takım Yolu
Stratejisi, MRR*

ÖZ

Bu çalışmada içerdiği alaşım elementi ve karbon oranına bağlı olarak yüksek sertlik, aşınma dayanımı ve tokluk özelliklerinden dolayı kalıpcılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Sleipner soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Frezeleme yöntemleri ile yapılan deneysel çalışmalarda kesme parametreleri ve takım yolu stratejisinin, yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve malzeme kaldırma oranı (MRR) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kesme parametreleri olarak, takım yolu hareketleri, kesici takım devri ve ilerleme hızı parametreleri farklı seviyelerde kullanılmıştır. Finiş frezeleme deneylerinde kesme derinliği sabit tutulmuştur. Deneysel tasarımı, Taguchi L_{16} ortogonal dizine göre yapılmıştır. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar, S/N oranlarına dönüştürülerek ideal kesme parametre seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca Minitab 17 paket programında ANOVA analizi ile yüzey pürüzlülük ve malzeme kaldırma oranı sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile ANOVA tabloları oluşturulmuş ve kesme parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca yanıt yüzey yöntemi kullanılarak işleme parametrelerine bağlı Ra ve MRR sonuçlarının matematiksel modellemesi yapıldı ve Genetik algoritma yöntemi kullanılarak optimum işleme parametreleri belirlendi. Sonuçlar değerlendirildiğinde oluşturulan matematiksel modelin deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirlendi.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 December 2021
Received in revised form 19 January 2022
Accepted 21 January 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

*Surface Roughness, Sleipner,
ANOVA, Taguchi, Tool Path
Strategy, MRR*

ABSTRACT

In this study, Sleipner cold work tool steel, which is widely used in the molding industry, was used due to its high hardness, wear resistance and toughness properties depending on the alloying element and carbon ratio it contains. In experimental studies with milling methods, the effects of cutting parameters and tool path strategy on surface roughness (Ra) and material removal rate (MRR) were investigated. As cutting parameters, tool path movements, cutting tool speed and feed rate parameters were used at different levels. The depth of cut was kept constant in the finish milling experiments. Experimental design was made according to Taguchi L_{16} orthogonal array. In addition, the results obtained in the experimental studies were converted to S/N ratios and ideal cutting parameter levels were determined. In addition, the results of surface roughness and material removal rate were evaluated statistically by ANOVA analysis in Minitab 17 package program. ANOVA tables were created with the results obtained and the effects of cutting parameters on the results were determined. In addition, mathematical modeling of Ra and MRR results depending on processing parameters was performed using the surface response method, and optimum processing parameters were determined using the genetic algorithm method. When the results were evaluated, it was determined that the mathematical model created was compatible with the experimental results.

Doi: 10.24012/dumf.1051243

* Sorumlu Yazar

Giriş

Sleipner çeliğinin genel kullanım amacı, soğuk iş takım çeliğinin kullanıldığı birçok alanda kullanılabilir olmasıdır. Bu çelik yüksek aşınma dayanımı, ağız dökülmesine karşı yüksek direnç, yüksek tokluk, yüksek basma dayanımı, yüksek sertlik olanağı, kaplamaya uygunluk, iyi tel erozyon özellikleri, ısıl işlemlerde yüksek boyutsal kararlılık, yüzey işlemlerine uygunluk, özelliklerine sahiptir. Sleipner sert ve katkılı plastikler ile çok yüksek baskı ömrü beklenen enjeksiyon kalıplarında ve kalın sacların kesiminde, yüksek sertliği ve tokluğu nedeni ile sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. PVD yüzey kaplama yöntemi ile TiN, CrN gibi yüzey kaplama tekniklerine de uygundur [1]. Özlü (2021), Sleipner soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenlerine, Ra'ya ve talaş oluşumuna etkilerini deneysel olarak incelemiştir. İlerleme miktarının artması ile kesme kuvvetlerinin ve Ra değerinin arttığını belirtmiştir. Ayrıca kesme hızının artması ile birlikte bileşke kesme kuvvetinin azaldığını ifade etmiştir [1]. Aldaş ve diğ. (2013), farklı değişkenlerle ilişkili kesme parametreleri kullanarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için Adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanan bir yöntem üzerine çalışmışlardır. Tel erozyon imalat yönteminde Sleipner soğuk iş takım çeliğini kullanmışlardır. İki farklı yöntemle yapılmış olan ANFIS model tahmini; ortalama hata oranları göz önüne alındığında, %5.53'teki Gauss üyelik tipi, %13.23'lük çan şeklindeki üyelik fonksiyonundan daha iyi olduğunu açıklamışlardır [2].

Ra, yaygın olarak kullanılan bir ürün kalitesi endeksidir ve çoğu durumda mekanik ürünler için teknik bir gerekliliktir. İstenen yüzey kalitesinin elde edilmesi, bir parçanın fonksiyonel davranışı için büyük önem taşımaktadır [3]. Yüzey özellikleri, nihai parça performansını etkiler ve kalite göstergeleri olarak kullanılır. Talaş kaldırma işlemlerinde yüzey oluşumu, birbiriyle karmaşık şekilde ilişkili ve birçok faktörden etkilenir [4]. Talaşlı imalat süreçlerinde optimal kesme parametrelerinin belirlenmesi Ra için önemli bir araştırma konusudur. Bununla birlikte, Ra kesici yol stratejilerinden etkilenir. Ra'yı en aza indirmek için kesici yol stratejilerinin doğru seçimi çok önemlidir. Frezeleme işlemlerinde parmak frezelerle farklı takım yolları kullanılabilir. Yüzey frezelemenin verimliliğini artırmak için üreticiler tarafından farklı metodolojiler ve CAM araçları geliştirilmiştir. Uygun takım yolu stratejilerinin ve frezeleme koşullarının belirlenmesi, yüksek verimlilik oranı, daha iyi yüzey dokusu değerlerinin karşılanması ve daha düşük kesme kuvvetleri, takım sapması ve yüzey hataları için çok önemlidir. Yao ve Gupta (2004), cep frezeleme işlemlerinde yeni bir kesici yolu oluşturma algoritması uygulamışlardır. Bu algoritma ile geometrinin farklı bölgelerinde farklı desenler kullanarak ve bunları sorunsuz bir şekilde birbirine dönüştürerek bir kesici yolu oluşturmuşlardır. Karmaşık ceplerin işlenmesinde, algoritma ile oluşturulan takım yolu stratejisinin tek bir takım yolu modelinden daha üstün olduğunu belirtmişlerdir [5]. Edem ve diğ. (2019), AISI 1080 çeliğinin cep frezeleme işleminde HyperMill CAM programı kullanarak gerçek spiral, dikdörtgen spiral ve kare kontur takım yolları ile enerji verimli takım yolunu belirlemek için çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak teorik, yazılım ve deneysel analizler, gerçek spiral takım yolunun en düşük

toplam elektrik enerjisi talebine ve işleme süresine sahip olduğunu ifade etmişlerdir [6].

Kalite ve üretkenlik, herhangi bir işleme operasyonunda iki önemli ancak birbiriyle çelişen kriterleridir. Yüksek verimliliği sağlamak için kaliteden ödün verilmelidir. Bu nedenle, kalite ve üretkenliği aynı anda optimize etmek çok önemlidir. Verimlilik, işleme operasyonunda talaş kaldırma oranı olarak yorumlanabilir. Kalite ise, müşterilerin istediği gibi ürün özellikleri açısından tatmin edici verimi temsil eder. Boyutsal doğruluk, form kararlılığı, Ra ve öngörülen uygulama alanında fonksiyonel gereksinimlerin karşılanması ürünün önemli kalite özellikleridir. Parmak frezelemede, yüzey kalitesi ve malzeme kaldırma oranı hem endüstri personelinin hem de araştırma ve geliştirmenin dikkat etmesi gereken iki önemli husustur, çünkü bu iki faktör işleme performanslarını büyük ölçüde etkiler. MRR, işleme operasyonları gerçekleştirirken birim zaman başına (genellikle dakika başına) kaldırılan malzeme miktarıdır. Dakikada ne kadar fazla malzeme çıkarılırsa, malzeme kaldırma oranı o kadar yüksek olur. Modern endüstri trendlerinden biri, kısa sürede düşük maliyetli, yüksek kaliteli ürünler üretmektir [7]. Tunç ve diğ. (2017), robotik frezeleme yönteminde MRR için mevcut CAM paketleri tarafından sunulan takım yolu modellerini değerlendirmek ve seçmek için araştırma yapmışlardır. MRR için işleme takım yolu modellerinin seçiminin çok önemli olduğunu ifade etmişlerdir [8]. Lu ve diğ. (2019), Inconel 718'in mikro frezelemede MRR ve Ra için çok amaçlı optimizasyon tekniğini kullanmışlardır. Çalışmalarını Taguchi deney tasarımı yöntemi L_9 ortogonal dizin ile gerçekleştirmişlerdir. Ra ve MRR arasında çok amaçlı optimizasyon uygulamak için genetik algoritma kullanmışlardır. Sonuç olarak talaş miktarı Ra'yı, ilerleme ise MRR'i etkilenen en önemli parametre olduğunu ifade etmişlerdir [9]. Bağcı ve diğ. (2017), kavisli yüzeylerin frezelemesi yönteminde, takım yolu stratejilerinin anlık malzeme kaldırma oranı (IMRR) ve işleme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Takım yolu stratejisi olarak çeşitli açılara sahip zigzag, profil işleme ve spiral takım yollarını kullanmışlardır. Kesme yolu stratejilerinin işleme süreleri üzerindeki etkisini ve bunların gereken süreyi ve dolayısıyla maliyetleri azaltmadaki önemini açıklamışlardır. Sonuç olarak, 90° zigzag takım yolu stratejisinin en düşük kesme kuvvetlerini, takım sapmasını ve yüzey hatası değerlerini gösterdiğini belirtmişlerdir [10]. Rad (2011), frezeleme işleminde, işleme verimliliğini artırmak için optimum takım yolu planlaması için birleşik bir matematiksel-grafik yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır. Frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetlerini sınırlar içinde tutarken MRR'yi ayarlayarak işleme operasyonlarını stabilize eden bir metodoloji kullanmışlardır. Sonuç olarak bu yaklaşımın uygulanmasının işleme süresinde hafif bir artışla sonuçlanabileceğini, ancak daha iyi bir yüzey kalitesi üretmenin yanı sıra takım maliyetinde, işleme titreşiminde ve gürültüde önemli bir azalma sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır [11].

Mühendislik uygulamalarında ürün ve süreç gelişiminde deneysel çalışmaların önemi büyüktür. Deneysel çalışmaların zaman aldığı ve uygulama maliyetlerinin ise yüksek olduğu bilinir. Bu nedenle deneysel çalışma hatalarının minimize edilmesi gerekir. Taguchi yöntemi, kontrol dışında olan faktörlerin etkisini en alt seviyeye indirmesini sağlayan bir

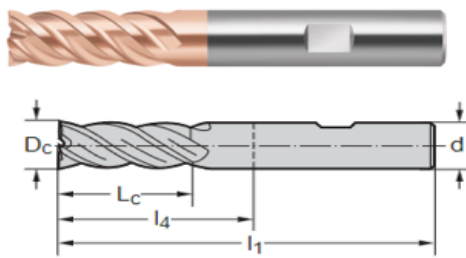
deneysel bir tasarım tekniğidir. Ayrıca deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları ANOVA analizi ile değerlendirilerek en etkin parametre ve seviyeleri belirlemede yardımcı olmaktadır. Ayrıca parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkileri % olarak belirlenebilir [12–14]. Göloğlu ve Sakarya (2008) yüksek hızlı çelik parmak frezeler kullanarak DIN 1.2738 kalıp çeliğinin optimum kesme özellikleri ve kesici yol stratejilerinin etkilerini araştırmışlardır. Taguchi parametre tasarımı kullanılarak her iki araştırmanın sonuçlarını incelemişlerdir. Tek yönlü ve zigzag takım yolu stratejilerinin tahmin edilen değerden daha iyi bir sonuç verdiğini ifade etmişlerdir [15]. Sunil ve diğ. AISI 1005 çeliğini TiN kaplı kesici takım kullanılarak yüzey frezeleme işleminde optimal kesme parametrelerini bulmak için Taguchi tekniği kullanılmıştır. L_9 ortogonal dizisine dayalı olarak deneyler yapılmıştır. Parametrelerin etkisini belirlemek için ANOVA analizini kullanmışlardır. Sonuç olarak, talaş derinliği ve ilerleme hızı parametreleri Ra ve MRR üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir [16].

Ra değerini etkileyen kesme parametrelerini optimize etmek için geleneksel olmayan yaklaşımlar olarak sınıflandırılacak birkaç optimizasyon tekniği etkin bir şekilde uygulanabilir. Genetik algoritma (GA), çoğu araştırmacı tarafından üretim maliyetini en aza indirmeyi ve malzeme kaldırma oranını en üst düzeye çıkarmayı ve ürün kalitesini iyileştirmeyi içeren optimizasyon hedefleri için yaygın olarak kullanılmaktadır [17]. Özyay (2020), tornalama-frezeleme yönteminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinde, Zain (2010), takımın radyal eğim açısının, kesme hızı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinde, Palanisamy (2007), frezeleme operasyonları için kesme kuvvetini belirlemek için, Imani (2019), deneysel sonuçlara dayalı olarak frezeleme kuvvetlerini ve Ra' yı tahmin etmek için GA ve yanıt yüzey yöntemi ile optimize etmişlerdir [18–21].

Tablo 2. Deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri

Sembol	Parametreler	Seviyeler			
		I	II	III	IV
A	Kesici takım devri (dev/dak)	3500	4000	4500	5000
B	İlerleme miktarı (mm/dak)	250	500	750	1000
C	Takım yolu şekli	Zig Zag	Paralel Spiral	Gerçek Spiral	Morf Spiral

Deneylerde çalışmalarda $\varnothing 10$ mm 4 ağızlı 50° helis açısına sahip uç yarıçapı olmayan Walter marka MC388-10.0W4B-WB10TG kesici takım kullanılmıştır. Kesici takım 48 ile 63



Açıklama	Sembol	Değer
Takım çapı (h10)	D_c	10 mm
Kesme uzunluğu	L_c	22 mm
Toplam uzunluk	I_1	72 mm
Fonksiyonel uzunluk	I_4	32 mm

Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan kesici takım geometrisi.

Sleipner soğuk iş takım çeliğinin deneysel çalışmaları için 80×80 mm ölçülerine sahip iş parçası kullanılarak finiş

Bu çalışmada endüstrinin birçok alanında oldukça yaygın kullanılan Sleipner soğuk iş takım çeliği, CNC freze tezgâhında finiş talaş kaldırma işlemi yapılmıştır. Deneylerde hem kesme parametreleri hemde takım yolu stratejisinin yüzey pürüzlülüğüne ve malzeme kaldırma oranına etkisi incelenmiştir. Taguchi L_{16} ortogonal deney tasarımı kullanılarak elde edilen sonuçlar S/N oranına dönüştürülmüş ve ANOVA analizi uygulanmıştır. Ayrıca yanıt yüzey yöntemi ile matematiksel model oluşturularak genetik algoritma yöntemi ile optimum işleme parametreleri belirlenmiştir.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada kalıp endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılan Sleipner soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Sleipner çeliğinin kimyasal birleşimi (%).

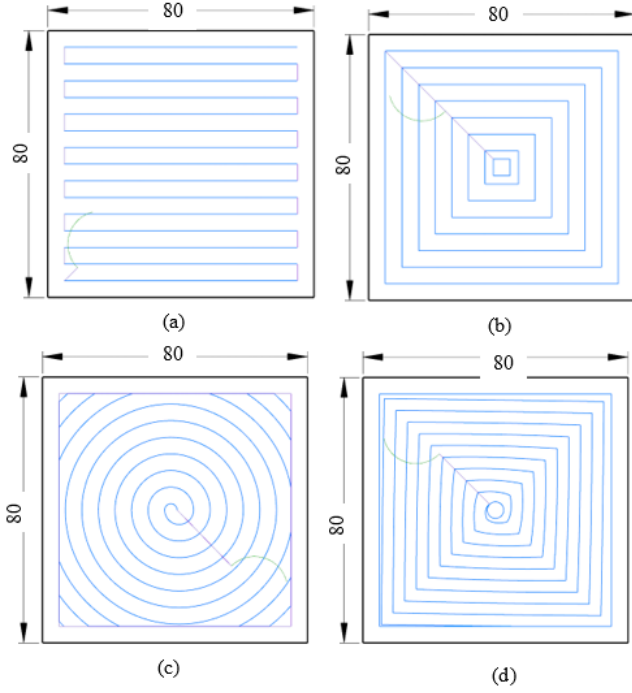
Malzeme	Elementler					
	C	Cr	Si	Mo	Mn	V
Sleipner	0.90	7.80	0.90	2.5	0.50	0.50

Finiş frezelemede hangi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranını etkilediğini değerlendirmek için kesici yol stratejilerinin her biri için bir dizi deney yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için Taguchi deney planı hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar L_{16} ortogonal dizine göre belirlenmiştir. Talaş kaldırma işlemi EMCO CONCEPT MILL 450 CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri ve parametre seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda finiş frezeleme yapıldığı için talaş derinliği 0.1 mm olarak sabit tutulmuştur.

HRC arasındaki sertliğe sahip iş parçalarında kullanılan özel kaplamaya sahip bir takımdır. Şekil 1’de kesici takıma ait şekil ölçüleri gösterilmiştir.

frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Takım yolu stratejilerinin belirlenmesi için MASTER CAM 2021 paket

programı kullanılmıştır. Takım yolu kesme şekilleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, Mitutoyo SJ-210 profilometresi ile iş parçasının orta noktası referans alınacak şekilde, x eksenı yönde üst ve alt, y eksenı yönde sağ ve sol olmak üzere dört farklı noktada, 2.5x4 mm, ölçüm uzunluğu 10 mm ISO 1997 standardında olacak şekilde ölçülmüştür.



Şekil 2. Takım yolu stratejisi a) Zig zag, b) Paralel spiral
c) Gerçek spiral d) Morf spiral

Deneyisel çalışmalarda talaş derinliği sabit alındığı için kaldırılan talaş hacimleri de eşit olduğu kabul edilmiştir. Malzemenin yoğunluğunu belirlemek için 10x10x10 mm ölçülerinde iş parçası hazırlanıp hassasiyeti 10^{-4} olan SHIMADZU ATX224R marka hassas terazi ile ağırlığı ölçülmüştür. Malzemelerin yoğunluğu denklem 1’de verilen yoğunluk formülü ile belirlenmiştir. Çalışmalarda MRR belirlenmesi için denklem 2’den yararlanılmıştır [7].

$$d = \frac{m}{v} \quad (1)$$

$$MRR = \frac{W_i - W_s}{\rho \cdot t} = mm^3 / dak \quad (2)$$

Denklem 1’de verilen d malzemenin yoğunluğu, m kütlesi, v ise hacmi belirtir. Denklem 2’de verilen W_i iş parçasının ilk ağırlığı (gr), W_s iş parçasının son ağırlığı (gr), t işleme süresini (dak), ρ ise yoğunluğu (7.70×10^{-3} gr/mm³) ifade etmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Kesme parametrelerinin Ra ve MRR üzerindeki etkilerini belirlemek elde edilen sonuçlar MİNİTAB 17 paket programı kullanılarak S/N oranına dönüştürülmüştür. Deneyisel çalışmaların gerçekleştirildiği deney tasarımı ile elde edilen Ra ve MRR sonuçları ile bunlara ait S/N oranları Tablo 3’de verilmiştir.

Takım yolu stratejisi Ra ve MRR üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Farklı takım yolu stratejilerinde kaldırılan talaş miktarı aynı hacimde olmasına rağmen işleme süreleri ve elde edilen Ra değerleri farklılık göstermektedir.

Tablo 3. L_{16} deney tasarımı, sonuçları ve S/N oranları.

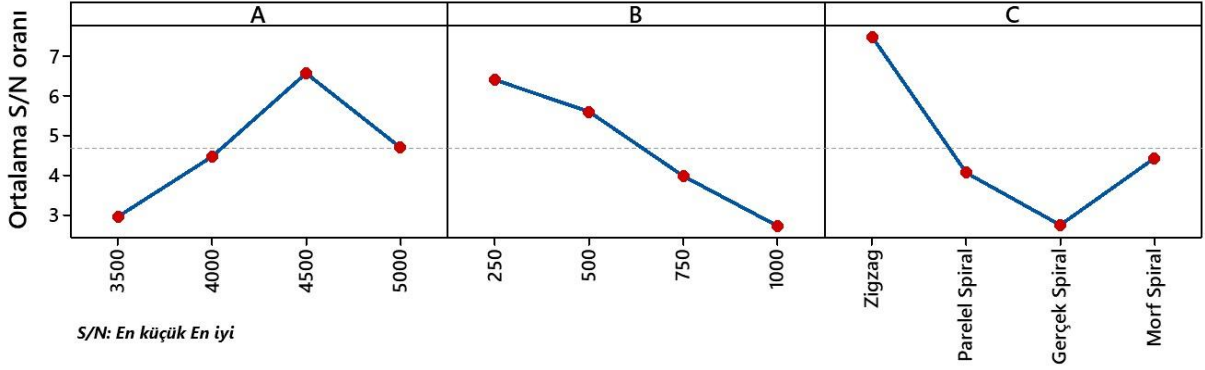
Deney no	Kesici takım devri (dev/dak)	İlerleme miktarı (mm/dak)	Takım yolu şekli	Ra (μ m)	S/N	MRR (mm ³ /dak)	S/N
1	3500	250	Zig Zag	0.409	7.766	147.015	43.374
2	3500	500	Paralel Spiral	0.714	2.926	321.938	50.155
3	3500	750	Gerçek Spiral	0.998	0.017	345.444	50.768
4	3500	1000	Morf Spiral	0.877	1.140	418.356	52.431
5	4000	250	Paralel Spiral	0.505	5.934	141.28	43.002
6	4000	500	Zig Zag	0.401	7.937	292.237	49.315
7	4000	750	Morf Spiral	0.686	3.274	390.909	51.842
8	4000	1000	Gerçek Spiral	0.917	0.753	421.052	52.487
9	4500	250	Gerçek Spiral	0.494	6.125	88.765	38.965
10	4500	500	Morf Spiral	0.423	7.473	195.121	45.806
11	4500	750	Zig Zag	0.356	8.971	474.074	53.517
12	4500	1000	Paralel Spiral	0.651	3.728	497.99	53.944
13	5000	250	Morf Spiral	0.512	5.185	78.159	37.860
14	5000	500	Gerçek Spiral	0.625	4.082	187.134	45.443
15	5000	750	Paralel Spiral	0.656	3.662	439.95	52.868
16	5000	1000	Zig Zag	0.545	5.272	503.015	54.032

Şekil 3’de deneysel çalışmalarda elde edilen Ra değerlerinin S/N oranı ile işleme parametreleri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde S/N oranının en büyük değeri o parametrenin en iyi değeri olduğunu belirtir. Devir sayısının üçüncü seviyeye (4500 dev/dak) kadar artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinde iyileşmenin olduğu görülmektedir.

Ancak son seviyesinde Ra değerinde tekrar artma eğilimi olduğu görülmektedir. Kesici takım devrinde ki artışın belirli bir değerden sonraki durumda çevresel hızın arttığı ve buna bağlı olarak titreşimin oluşması ve Ra’yı olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bu nedenle benzer sonuçlara literatürde de rastlanır [22]. İlerleme miktarının artması ile

talaş kesit miktarının artmasına ve dolayısı ile kesme kuvvetlerinde artışa sebep olmaktadır [1]. İlerleme miktarının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlük değerinde de artış meydana gelmiştir. Takım yolu stratejileri arasında en iyi yüzey pürüzlülük değeri zigzag işleme yönünde elde edilmiştir ve literatür ile benzerlik sağlamıştır [10].

Parametrenin diğer seviyelerinde işleme yapıldığı anda tezgâh hem x hemde y yönünde hareket etmektedir. Zigzag işleme yönteminde ise tezgâh sadece yana kayma miktarını gerçekleştirdikten sonra düzgün doğrusal bir hareket sağlamaktadır. Şekil 1’de verilen grafiğe göre parametrelerin optimum seviyeleri A3B1C1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Parametre seviyelerinin Ra üzerindeki S/N oranı etkisi.

Parametrelerin Ra üzerindeki etkisini belirlemek için ANOVA analizi yapılmıştır. Bütün parametrelerin her birinin bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Tablo 4 incelendiğinde Ra üzerindeki en etkin parametre

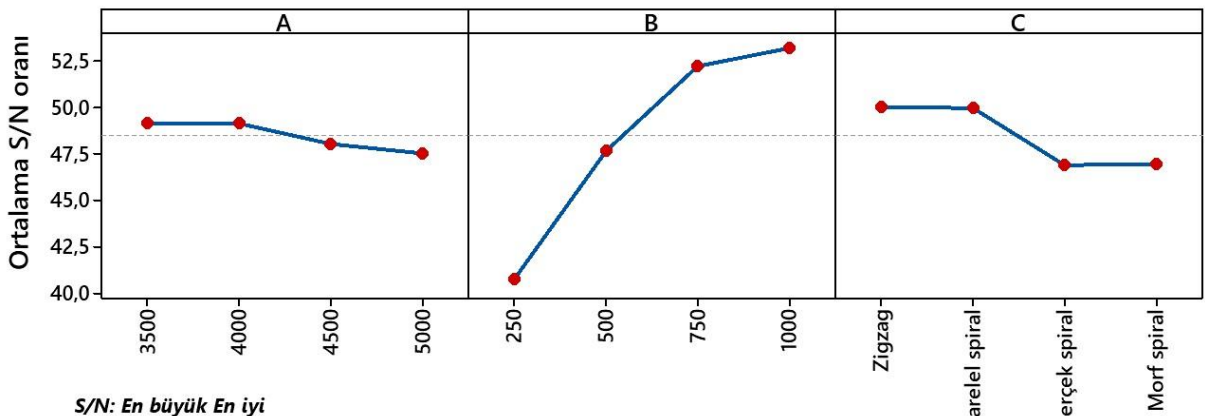
%43.755 ile takım yolu parametresi etki etmektedir [5]. Ayrıca kesici takım devri %23.569, ilerleme miktarı ise %29.392’lik bir etkiye sahiptir. İşlemin hata oranı ise %3.284 dir.

Tablo 4. Ra değeri için ANOVA sonuçları.

Parametreler	Serbestlik dereceleri	Toplam kareler	Varyans	F değeri	(%) Dağılım
Kesici takım devri (dev/dak)	3	26.33166	8.7772	36.8828	23.569
İlerleme miktarı (mm/dak)	3	32.66081	10.8869	45.748058	29.392
Takım yolu şekli	3	48.27337	16.0911	67.616595	43.755
Hata	6	1.428	0.238		3.284
Toplam		108.964			100

Şekil 4’de işleme parametrelerinin MRR üzerindeki S/N oranı etkileri gösterilmiştir. Kesici takım devrenin artması ile birlikte MRR miktarının azaldığı görülmektedir. İlerleme miktarının artmasına bağlı olarak MRR’ın arttığı literatür ile bir paralellik sağlamıştır [9, 16]. Çeşitli takım yolu şekilleri farklı kesme uzunlukları olmasına rağmen, aynı hacimde

talaş kaldırırlar [10]. Takım yolu şeklinde zigzag işleme yöntemi aynı talaş hacmine bağlı olarak en kısa sürede bir işlem gerçekleştirdiğinden dolayı optimum seviye olarak belirlenmiştir. Ayrıca zigzag işleme modeli daha kısa kesme süresi, daha fazla işleme verimliliği anlamına gelir. MRR için optimum kesme şartları A1B4C1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Parametre seviyelerinin MRR üzerindeki S/N oranı etkisi.

MRR üzerindeki etkin parametrelerin % değerlerini belirlemek için ANOVA analizi kullanılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 5’de gösterilmiştir. İlerleme miktarı parametresi, MRR üzerinde %88.473 değeri ile en etkili parametre olmuştur. Takım yolu şekli parametresi ise %9.220

değeri ile ikinci etkin parametre olduğu belirtilmiştir. Kesici takım devri parametresinin MRR üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Deneysel çalışmanın istatistiksel hata oranı ise %1.309 olması çalışmanın oldukça uygun olduğu gösterilmiştir.

Tablo 5. MRR değeri için ANOVA sonuçları.

Parametreler	Serbestlik dereceleri	Toplam kareler	Varyans	F değeri	(%) Dağılım
Kesici takım devri (dev/dak)	3	5.65611	1.8854	4.8091	0.997
İlerleme miktarı (mm/dak)	3	398.64065	132.8802	338.941958	88.473
Takım yolu şekli	3	42.59894	14.1996	36.219508	9.220
Hata	6	2.352	0.392		1.309
Toplam		449.248			100

İşleme parametrelerine bağlı Ra ve MRR’ın matematiksel modelin oluşturulması için MİNİTAB 17 paket programında yüzey yanıt yöntemi kullanılarak denklem 3-4 oluşturulmuştur. İkinci dereceden bir denklem oluşturulmuştur. Denklemin uygunluk değeri $R^2 = 0.99$ tir. İşleme parametrelerinin en küçük ve en büyük değerleri sınırlayıcı olarak belirlenmiştir. Çalışmada iterasyon sayısı 2000, popülasyon sayısı 16, çaprazlama tipi iki noktadan çaprazlama, çaprazlama olasılığı 0.99, mutasyon oranı ise 0.005 olarak literatüre uygun bir şekilde seçilmiştir [18].

Tablo 6-7’de genetik algoritma yönteminin kullanıldığı optimum Ra ve MRR değerlerini veren işleme parametreleri verilmiştir. Optimum parametre değerleri ve bu değerleri veren seviyelerin birbiri ile uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Tablo 6-7 incelendiğinde S/N oranı, yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma yöntemi ile elde edilen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Genetik algoritma optimizasyon yönteminin en ideal Ra ve MRR sonuçlarını veren optimum işleme parametreleri verilmiştir.

Denklem;

$$Ra = 4.58 - 0.00209 * A + 0.000089 * B + 0.4911 * C + 0.000000227 * A^2 + 0.00000021 * B^2 + 0.08514 * C^2 \quad (3)$$

$$MRR = -104.4 + 0.0002 * A + 1.382 * B + 0.21 * C - 0.000342 * B^2 - 0.000067 * A * B - 0.0694 * B * C \quad (4)$$

Sınırlayıcılar;

$$3500 \leq A \leq 5000$$

$$250 \leq B \leq 1000$$

$$1 \leq C \leq 4$$

$$Zigzag = 1, \quad Parelal Spiral = 2, \quad Gerçek Spiral = 3, \quad Morf spiral = 4$$

Tablo 6. Slepner çeliğinin işlenmesinde Ra optimizasyon değerleri.

Optimizasyon Yöntemi	Parametreler			Sonuç
	A	B	C	Ra
S/N oranı	4500	250	Zigzag	0.278
Genetik Algoritma	4603	256	Zigzag	0,211
Yanıt Yüzey Yöntemi	4500	250	Zigzag	0.213
Kontrol deneyi	4500	250	Zigzag	0,265

Tablo 7 . Slepner çeliğinin işlenmesinde MRR optimizasyon değerleri.

Optimizasyon Yöntemi	Parametreler			Sonuç
	A	B	C	MRR
S/N oranı	3500	1000	Zigzag	594.209
Genetik Algoritma	3500	998.53	Zigzag	631.20
Yanıt Yüzey Yöntemi	3500	1000	Zigzag	630.79
Kontrol deneyi	3500	1000	Zigzag	589.365

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Sleipner soğuk iş takım çeliğinin finiş frezeleme yöntemi ile işlenmesinde kesme parametreleri ve takım yolu şekillerinin Ra ve MRR üzerindeki etkisi incelenmiştir. Taguchi L₁₆ deney tasarım yöntemi ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma parametreleri kesici takım devri, ilerleme miktarı ve takım yolu şekli olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler MİNİTAB 17 paket programında S/N oranına dönüştürülerek optimum işlem parametreleri belirlenip ANOVA analizi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yanıt yüzey yöntemine göre Ra ve MRR değerlerinin parametrelere bağlı olarak matematiksel formülü oluşturulmuştur. Genetik algoritma yöntemi ile minimum Ra ve maksimum MRR değeri için en uygun parametre değerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kesici takım devri, Ra'yı %23.569 oranında etkilemiştir. Bu parametrenin en uygun seviyesi 4500 dev/dak ile dördüncü seviye olmuştur.
- İlerleme miktarının artması ile Ra artmıştır.
- Takım yolu şekli %43.755 etki değeri ile Ra üzerinde en etkin parametre olmuştur. Zigzag takım yolu şekli ise en uygun seviye olmuştur.
- MRR üzerinde kesici takım devri parametresinin etkisi %0.997 gibi bir değerde yok denecek kadar az olmuştur.
- İlerleme miktarı, MRR etkileyen ana kesme parametresidir. MRR ilerlemenin artması ile artmıştır.
- Takım yolu şekli parametresinde en kısa zamanda aynı talaş miktarını kaldıran zigzag parametresi olmuştur.
- S/N oranları incelendiğinde Ra için optimum parametre seviyeleri A3B1C1, MRR için ise optimum parametre seviyeleri A1B4C1 olarak belirlenmiştir.
- Optimum değerlerin belirlenmesinde, deney sonuçlarından elde edilen S/N oranları, Genetik algoritma ve matematiksel modelin sonuçları arasında çok yakın bir uyum sağlanmıştır.

Teşekkür

Kesici takımın temini için WALTER kesici takımlar firmasında görev yapan Hayati ATLI beye teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

- [1] B. Özlü, "Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleipner cold work tool steel," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 36, no. 3, pp. 1241–1251, 2021, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.668169>
- [2] K. Aldaş, İ. Özkul, A. Akkurt, "An ANFIS-Based

Approach for Predicting the Surface Roughness of Cold Work Tool Steel in," *TEM J.*, vol. 2, no. 3, pp. 234–240, 2013,

- [3] P. G. Benardos and G. C. Vosniakos, "Predicting surface roughness in machining: A review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
- [4] G. Quintana, J. De Ciurana, and J. Ribatallada, "Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 25, no. 6, pp. 386–398, 2010, <https://doi.org/10.1080/15394450902996601>
- [5] Z. Yao and S. K. Gupta, "Cutter path generation for 2.5D milling by combining multiple different cutter path patterns," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42, no. 11, pp. 2141–2161, 2004, <https://doi.org/10.1080/00207540310001652879>
- [6] I. F. Edem, V. A. Balogun, B. D. Nkanang, and P. T. Mativenga, "Software analyses of optimum toolpath strategies from computer numerical control (CNC) codes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 103, no. 1–4, pp. 997–1007, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03604-6>
- [7] S. Moshat, S. Datta, A. Bandyopadhyay, and P. Pal, "Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 92–102, 2010, <https://doi.org/10.4314/ijest.v2i1.59096>
- [8] L. T. Tunc and D. Stoddart, "Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 9–12, pp. 2907–2918, 2017, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9896-2>
- [9] X. Lu, F. R. Wang, L. Xue, Y. Feng, and S. Y. Liang, "Investigation of material removal rate and surface roughness using multi-objective optimization for micro-milling of inconel 718," *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 71, no. 6, pp. 787–794, 2019, <https://doi.org/10.1108/ILT-07-2018-0259>
- [10] E. Bagci and E. U. Yüncüoğlu, "The effects of milling strategies on forces, material removal rate, tool deflection, and surface errors for the rough machining of complex surfaces," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 63, no. 11, pp. 643–656, 2017, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2017.4450>
- [11] M. Tolouei-Rad, "Efficient CNC Milling by Adjusting Material Removal Rate," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 5, no. 10, pp. 342–346, 2011, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1079140>
- [12] Ç. Özay, "Investigating the surface roughness after tangential cylindrical grinding by the Taguchi method," *Mater. Test.*, vol. 56, no. 4, pp. 306–311,

- 2014, <https://doi.org/10.3139/120.110561>
- [13] A. K. Gür, T. Yıldız, and B. İçen, "Theoretical evaluation of abrasive wear behavior of B₄C/FeCrC coating layer evaluated by a Taguchi approach," *Mater. Test.*, vol. 62, no. 7, pp. 733–738, 2020, <https://doi.org/10.3139/120.111540>
- [14] A. K. Gür, Ç. Özay, and B. İçen, "Evaluation Of B₄C/Ti Coating Layer, Investigation Of Abrasive Wear Behaviors Using Taguchi Technique And Response Surface Methodology. *Surf. Rev. Lett.*, vol. 1950225, pp. 1–17, 2020, <https://doi.org/10.1142/S0218625X19502251>
- [15] C. Gologlu and N. Sakarya, "The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 206, no. 1–3, pp. 7–15, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.300>
- [16] S. Kumar, I. Saravanan, and L. Patnaik, "Optimization of surface roughness and material removal rate in milling of AISI 1005 carbon steel using Taguchi approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 654–658, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.039>
- [17] A. M. Zain, H. Haron, and S. Sharif, "An overview of GA technique for surface roughness optimization in milling process," *Proc. - Int. Symp. Inf. Technol. 2008, ITSIM*, vol. 3, 2008, <https://doi.org/10.1109/ITSIM.2008.4631925>
- [18] Ç. Özay and Z. Küçük, "AISI 1040' in tornalama-frezeleme ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün genetik algoritma yöntemi ile optimizasyonu," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 11, no. 3, pp. 1081–1091, 2020, <https://doi.org/10.24012/dumf.685119>
- [19] A. M. Zain, H. Haron, and S. Sharif, "Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 4650–4659, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.043>
- [20] P. Palanisamy, I. Rajendran, and S. Shanmugasundaram, "Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 32, no. 7–8, pp. 644–655, 2007, <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0384-3>
- [21] L. Imani, A. Rahmani Henzaki, R. Hamzeloo, and B. Davoodi, "Modeling and optimizing of cutting force and surface roughness in milling process of Inconel 738 using hybrid ANN and GA," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 234, no. 5, pp. 920–932, 2020, <https://doi.org/10.1177/0954405419889204>
- [22] V. Savas, C. Ozay, and H. Ballikaya, "Experimental investigation of cutting parameters in machining of 100Cr6 with tangential turn-milling method," *Adv. Manuf.*, vol. 4, no. 1, pp. 97–104, 2016, <https://doi.org/10.1007/s40436-016-0134-9>



The effect of mullite addition on wear properties of titania doped zirconia ceramics

Mehmet Akif HAFIZOĞLU^{1*}, Tahsin BOYRAZ², Ahmet AKKUŞ³

¹ Dicle University, Mechanical Engineering Department, makif.hafizoglu@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9689-3004

² Sivas Cumhuriyet University, Metallurgical and Materials Engineering Department, tahsinboyraz@cumhuriyet.edu.tr, Orcid No 0000-0003-4404-6388

³ Sivas Cumhuriyet University, Mechanical Engineering Department, aakkus@cumhuriyet.edu.tr, Orcid No 0000-0002-6881-9333

ARTICLE INFO

Article history:

Received xxx
Received in revised form xxx
Accepted xxx
Available online xxx

Keywords:

Wear, Zirconia, Titania, Mullite,
Mechanical Alloying, Conventional
Ceramic Production Route.

Doi: 10.24012/dumf.1053347

* Corresponding author

ABSTRACT

In this study, whether there is a phase change in the zirconia-titania mixture at high sintering temperatures and the effect of mullite additive on the mechanical and especially wear properties of this mixture was investigated. We synthesized mullite and 8 mol % titania added zirconium dioxide (8 mol % titania - 92 mol % zirconia) powders by conventional ceramic production route. The mixtures were prepared by mechanical alloying method using zirconia ball mill in acetone environment. To synthesize mullite, Al₂O₃ and SiO₂ powders mixture was prepared with stoichiometric proportions and fired it in the air at 1600 °C for 3 h. And the titania added zirconia composites were fired at 1300 °C for 2 h. Thus, titania - zirconia and mullite composite phases were obtained and grinding and sieving processes were carried out. Then, mullite-free and 10% by weight mullite reinforced titanium oxide added zirconia mixtures were prepared by powder metallurgy method. The powders were pressed by uniaxial pressing after drying. The formed samples were sintered in a high temperature furnace in air conditions for 1 and 5 h at 1500 and 1600 °C sintering temperatures. Finally, microstructure examinations of the composites with SEM, phase analysis with XRD, hardness, three-point bending and wear tests were performed. In addition, the results of water absorption, porosity and density from physical properties were investigated. It was founded that with titania and mullite adding to zirconia matrix, there was not define a new phase in the composite microstructure. But mullite additive increased the wear resistance, hardness and three-point bending strength of the titania-zirconia composites.

Introduction

Among ceramics, zirconia (ZrO₂) and its composites have become very popular for technological and many scientific studies because of their good mechanical properties, corrosion resistance, low thermal conductivities, higher temperature stabilities and higher chemical stabilities [1-3]. They are preferred as significant materials for refractory materials, high temperature furnaces, components that are resistant to wear, various cutting tools, dental studies and a lot of fields [1-4]. High-purity zirconia (ZrO₂) exhibits three polymorphs depending on temperature: monoclinic (m-ZrO₂) phase is stable at temperatures up to 1170 °C. After this temperature, the conversion from the monoclinic phase to the tetragonal phase begins and the tetragonal zirconia (t-ZrO₂) phase is stable up to 2370 °C temperatures. From this temperature to the melting temperature of 2680 °C, it is in the cubic zirconia phase (c-ZrO₂) [1,4]. Depending on the cooling processes, conversion from the t-ZrO₂ phase to the m-ZrO₂ phase takes place. Transformation is very important as it causes volumetric changes of around 3% to 5% and thus cracks. Due to preventing this transformation and stabilizing the zirconia, it is common to use stabilizers. Addition of stabilizers to zirconia, lowers temperature of the

transformations, reduces volumetric growth or shrinking and blocks the polymorphic transformations. By using stabilizers, it is possible to make stable the high-temperature phases at low temperatures too [1-3]. Different stabilizers, such as, Al₂O₃ [4,5], CaO [6], CeO₂ [7,8], MgO [9], SiO₂ [10,11], TiO₂ [12,13], Y₂O₃ [14-17] and even a combination of them [18,19], stabilize and hold stable the zirconia in the t-ZrO₂ and/or c-ZrO₂ forms at low temperatures. It is possible to produce materials including only t-ZrO₂ or c-ZrO₂ or a mixture of these with m-ZrO₂ phases by adding different quantities of stabilizer. If less than sufficient stabilizing oxide is added, partially stabilized zirconia (PSZ) is obtained instead of fully stabilized zirconia. PSZ usually consists of two or more closely mixed phases. As a result of using stabilizers and obtaining fully or partially stabilized zirconia, could be achieved superb mechanical properties for example bending strength, hardness, fracture toughness [1,3,16].

Zirconia exhibits better mechanical properties than other ceramics. However, like all other ceramics, it is fragile and cannot be formed at room temperature. Therefore, it is desirable to increase the toughness of these materials. So, some energy absorbing mechanisms such as transformation toughening and fiber reinforcement are used in ceramic matrices [17]. In the ceramic - ceramic mixed structure

formation process, which is a method of increasing the fracture toughness, the strength and toughness are increased by adding ceramic whiskers, fibers or particles to the main phase. This method is based on creating a physical barrier to the progressive crack. With higher tensile strength than polycrystalline material, whiskers are a good barrier to propagation cracking. So, the fracture toughness of zirconium dioxide can be increased more by adding some secondary phases for example nano particles, nano sized fibers or nano sheets into zirconia matrix [20]. For the last decades, improvement of nanomaterials offers new alternatives to reinforce ceramic composites. Carbon nanotubes have attracted important caution as reinforcement materials because of their superior properties. However, at high temperatures, they are prone to react with oxide matrixes leading to reduction in some mechanical properties of carbon nanotubes and limited the reinforcing effect on the composites [21]. So, it is stated that incorporation of mullite which is another type of ceramic toughening method with its high temperature oxidation and corrosion resistance and the other superior properties, might be preferred [17]. In the literature, mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) is described as the matchless stable middle crystalline phase for Al_2O_3 - SiO_2 binary system, cost-friendly and exhibiting good refractory ability [22-25]. Mullite has received significant attention for technological applications because of its well properties like low coefficient of thermal expansion, high melting temperature, good resistance to creep, good chemical stability and satisfactory hardness [22-25]. In short, fracture toughness of zirconia can be advanced with mullite reinforcement as the secondary phase into the ZrO_2 matrix and so, the other mechanical properties can be improved too [17]. In addition, the temperature of sintering is also important, because of affecting some properties of ceramics through changing of the crystalline phases and microstructure [14,15,26]. Studies continue on the effect of different sintering temperatures on the microstructure and mechanical properties of mullite-zirconia ceramics [17].

Various studies have been carried out on the wear properties of ceramics. For example, Boyraz and Akkuş [27] investigated the wear properties of the samples they produced by sintering the mixtures they prepared with porcelain, aluminum titanate and mullite powders in different compositions and ratios at various temperatures and times. They reported that the wear rate of the samples increased too with increasing the wear time and load for all of the samples. Huang et al [28] stated that the hardness, porosity, density and bending strength of the samples have significant effects on the wear properties in their study to examine the wear properties of the composites they produced by adding mullite additives at 0-10 mole ratios to zirconia. They indicated that especially adhesive and abrasive wear were observed in the samples.

In this study, we synthesized mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) and 8 mol % titanium dioxide doped zirconium dioxide powders by conventional ceramic production method. We examined whether there are phase differences in the TiO_2 - ZrO_2 mixture depend on sintering temperatures and times and the

effect of mullite on the physical, mechanical and microstructural properties of these mixtures.

Materials and Methods

Mullite and titania doped zirconia powders were produced by conventional ceramic production method in this study. All precursor powder materials were obtained from Company Eczacıbaşı (Al_2O_3 and SiO_2 powders), Refsan (TiO_2) and Chemicals of Handan Yaxiang Trading Co. (ZrO_2). The powders were mixed in acetone environment by mechanical alloying method. The powders were heated for 24 hours in oven at 110 °C before and after mixing. Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) and 8 mol% titanium dioxide doped zirconium dioxide (TiO_2 - ZrO_2) powders were synthesized by sintering from the prepared powders with stoichiometric ratios of Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 and ZrO_2 powders after homogenized in ball mill. Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) was synthesized for 3h at 1600 °C and 8 mol% titania doped zirconia (TiO_2 - ZrO_2) composite powders were synthesized for 2 h at 1300 °C. Thus, titania - zirconia and mullite composite phases were obtained and grinding and sieving processes were carried out. Then, mullite-free and 10% by weight mullite reinforced titanium dioxide added zirconium oxide composites were prepared with powder metallurgy technique (these mixtures were coded as TiZ00M and TiZ10M). The sample was coded as TiZ10M16005 (TiZ: Titania doped zirconia; 10M: 10% Mullite addition and 16005: 1600 °C sintering temperature and 5 hours sintering time). After the composite powders were milled for 24 h in acetone environment with zirconia ball mill, sieved and dried. Then, the composite mixtures were pressed to 56x12 mm sizes mold gap by uniaxial pressing machine at 200 MPa load. The pressed samples were sintered in a high temperature oven (Protherm) and in air conditions for 1-5 h sintering times and 1500-1600 °C temperatures. The heating rate was 5 °C/min. Then, with SEM, microstructure investigations, phase analysis with XRD, 3-point bending, hardness and wear tests, absorption of water, porosity, shrinkage and density results were examined on the composites.

The three-point flexural strength tests were executed with 0.5 mm/min (crosshead speed) in a Shimadzu brand tensile-compression device. For each sample, measurements were taken five times and their average were taken as the bending strength results of the samples. The strength calculations were made with the formula (1):

$$\sigma = \frac{3}{2} PL / (bh^2) \quad (1)$$

(In (1) the letters mean that, P: maximum force, L: the distance of between supports, b: width of samples, h: height of samples).

After 180, 320, 600, 1200 and 2500 grit sanding process, polishing is done for each sample. With Vickers hardness tester that was Mitutoyo brand, the measurements of hardness were executed by 1 kg load for 10 seconds. For each sample, measurements were taken five times and their average were taken as the hardness results of the samples

[29,30]. The wear tests of samples were executed with Plint brand wear tester. For wear tests, steel discs were used. For each sample, wear tests were executed at 400 rpm rate, 5, 10 and 15 min wear durations and 50 N, 100 N and 150 N forces. The samples were weighted with a precision scale of 10^{-4} g. After the assigned wear times, the samples were scaled again and the wear amounts were calculated [31-33]. To determine the phases, XRD with Cu $K\alpha$ radiation (Bruker AXS D8 Advance; 20kV-60kV, 6mA-80mA and $\theta = 10^{\circ}$ - 90° , 0.002°) was used. The phases of the samples seen in XRD patterns were defined with the Panalytical X'Pert program. The microstructural characterization of the samples was done with the Mira3XMU FE-SEM (Tescan, Czech Republic) brand scanning electron microscope machine and energy dispersion spectrum. The results were presented in various graphics and tables and some comments on these results were made.

Results and Discussion

Physical (shrinkage, water absorption, density and porosity tests) and mechanical (wear, 3-point bending and hardness) tests, SEM, EDS and XRD analysis results were included in this section. Calculations and measurements were repeated 5 times and arithmetic averages were taken.

Table 1. Physical test results of TiZ00M and TiZ10M samples.

Samples	Bulk Den.	R.D (%)	WA (%)	Por. (%)	Shr. (%)
TiZ00M15001	5.24	93.65	1.52	6.35	12.72
TiZ00M15005	5.43	97.08	0.85	2.92	13.10
TiZ00M16001	5.48	97.86	0.78	2.14	13.54
TiZ00M16005	5.39	96.36	1.01	3.64	13.51
TiZ10M15001	4.51	85.54	3.06	14.46	9.93
TiZ10M15005	4.79	90.85	1.48	9.15	11.78
TiZ10M16001	4.90	92.88	0.91	7.12	12.42
TiZ10M16005	4.92	93.38	0.86	6.62	12.60

The shrinkage, porosity, water absorption, relative density and bulk density results are shown in Table 1, and also Figure 1. In Figure 1, the relative density values were taken at the rate of 1/3 of the actual values for the graph.

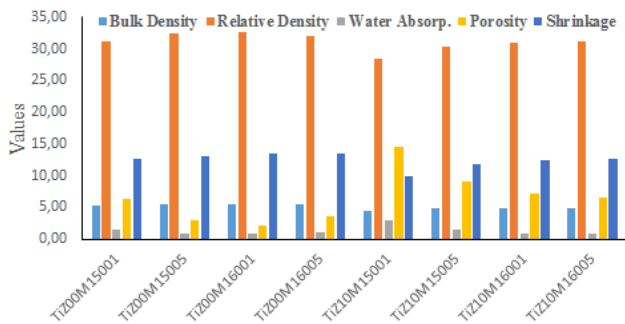


Figure 1. Physical test results graph of TiZ00M and TiZ10M samples.

When the results were examined, it was found that with increasing sintering temperature and time, the shrinkage values increased in general, and accordingly the water

absorption and porosity values decreased; It is seen that experimental density and relative density values increase. It is thought that the decrease in the density value of the 16005 sample without mullite additives is caused by defects such as excessive grain growth and formation of large pores in the microstructure depending on the sintering time.

Table 2, Figure 2 and Figure 3 indicated hardness and 3-point bending strength values of TiZ00M and TiZ10M samples.

Table 2. Hardness and 3-point bending strength values of TiZ00M and TiZ10M samples.

Samples	Hardness (HV)	3-Point bending strength (MPa)
TiZ00M15001	159.72	15.87
TiZ00M15005	202.38	11.91
TiZ00M16001	275.13	11.12
TiZ00M16005	260.33	8.78
TiZ10M15001	171.53	17.37
TiZ10M15005	215.60	24.25
TiZ10M16001	280.21	37.26
TiZ10M16005	293.62	46.71

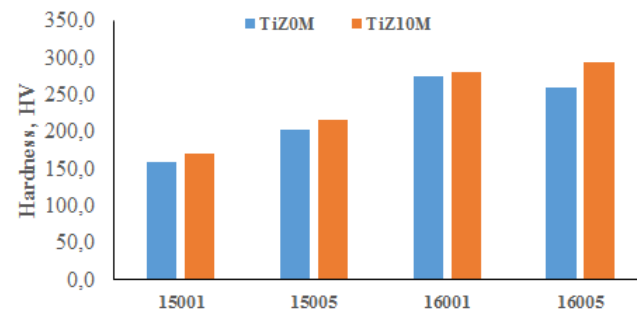


Figure 2. Micro hardness graph of samples.

When the results are examined, it is seen that the hardness values generally increase with increasing sintering temperature and time, and there is a decrease in the hardness value of the 16005 sample without mullite additives. It is thought that this situation is related to the decrease in density and therefore the defects that occur in the microstructure. In addition, it is seen that the hardness values of the mullite added samples are higher.

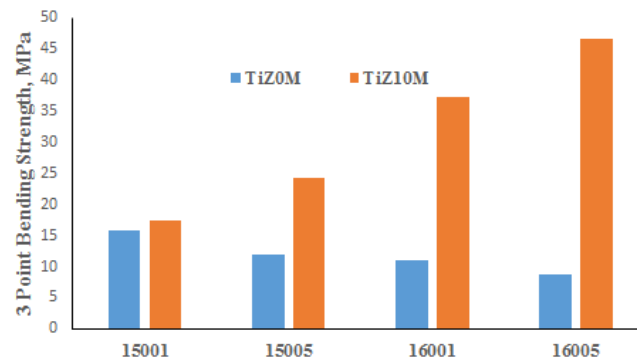


Figure 3. 3-Point bending strength graph of samples.

When the three-point bending results were examined, it was found that the three-point bending strength values decreased with increasing sintering temperature and time in mullite-free samples; on the other hand, it is seen that it increases in mullite added samples. In addition, it is seen that the three-point bending strength values of the mullite added samples are higher. This indicates that the mullite additive improves the microstructure and functions as a toughening mechanism.

The wear tests of samples were executed with Plint brand wear tester. For wear tests, steel discs were used. For each sample, wear tests were executed at 400 rpm rate, 5, 10 and 15 min wear durations and 50 N, 100 N, 150 N loads. The samples were weighed with a precision scale of 10^{-4} g. After the assigned wear times, the samples were scaled again and the wear amounts were calculated. Wear results are seen in Table 3, 4, 5 and Figure 4, 5, 6. In addition, graphs showing the load-dependent wear volume of 16005 samples are also presented in Figure 7.

Table 3. Wear results of TiZ00M and TiZ10M samples at 50 N load.

Samples	Wear Volume (mm ³), 50 N		
	5 min.	10 min.	15 min.
TiZ00M15001	7.54	16.13	25.82
TiZ00M15005	6.80	13.57	19.86
TiZ00M16001	3.63	5.33	9.71
TiZ00M16005	5.51	8.44	13.10
TiZ10M15001	7.12	15.41	20.21
TiZ10M15005	6.45	11.39	15.12
TiZ10M16001	3.21	5.14	9.17
TiZ10M16005	2.88	4.24	7.03

Table 4. Wear results of TiZ00M and TiZ10M samples at 100 N load.

Samples	Wear Volume (mm ³), 100 N		
	5 min.	10 min.	15 min.
TiZ00M15001	13.25	28.32	45.95
TiZ00M15005	10.86	18.36	32.25
TiZ00M16001	7.25	12.55	16.53
TiZ00M16005	8.41	14.41	19.14
TiZ10M15001	14.04	24.26	33.42
TiZ10M15005	10.12	17.81	26.56
TiZ10M16001	5.15	11.49	14.74
TiZ10M16005	4.18	6.75	10.63

Table 5. Wear results of TiZ00M and TiZ10M samples at 150 N load.

Samples	Wear Volume (mm ³), 150 N		
	5 min.	10 min.	15 min.
TiZ00M15001	19.85	38.54	65.33
TiZ00M15005	16.12	28.17	52.32
TiZ00M16001	10.64	19.58	30.53
TiZ00M16005	12.47	22.13	36.51
TiZ10M15001	18.31	27.46	43.21
TiZ10M15005	14.44	21.98	35.66
TiZ10M16001	9.19	15.71	21.38
TiZ10M16005	6.21	10.57	16.18

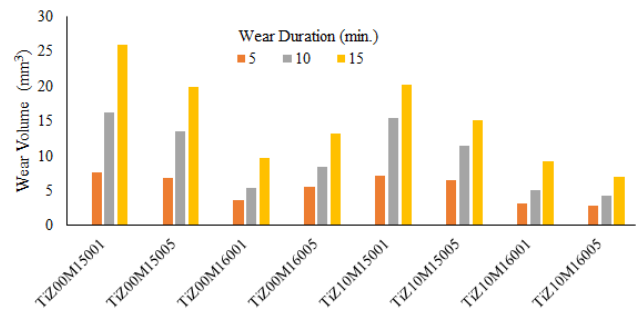


Figure 4. Wear test results graph for 50 N load.

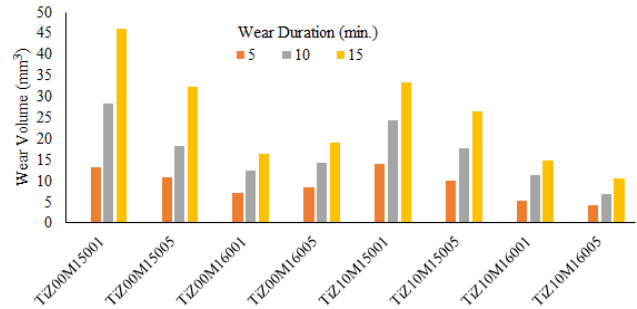


Figure 5. Wear test results graph for 100 N load.

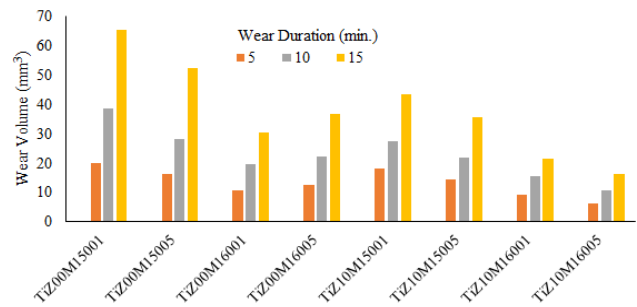


Figure 6. Wear test results graph for 150 N load.

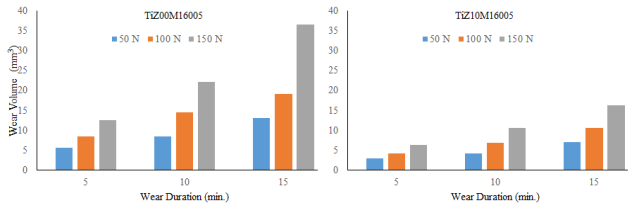


Figure 7. Wear results graphs of TiZ00M16005 and TiZ10M16005 samples.

When the wear test results are examined, it is seen that the wear volume values vary depending on the hardness, bending strength and wear time of the samples. In addition, it is seen that the wear volume values of the mullite-added samples are lower and therefore their wear resistance is higher. In general, it is understood that the wear amount of the samples increases as the wear time increases, the wear resistance of the samples with high hardness and bending strength is higher, and the mullite additive improves the wear resistance of these samples. Although adhesive type wear is observed in the samples in general, it has been observed that with the increase of the wear time in some samples, cracks occur on the worn surface and very small pieces break off and cause abrasive wear.

The phase changes in the sample structure depending on the sintering temperature and time of TiZ00M and TiZ10M samples were analyzed and the basic phases that emerged in the structure were shown in Figure 8 and Figure 9.

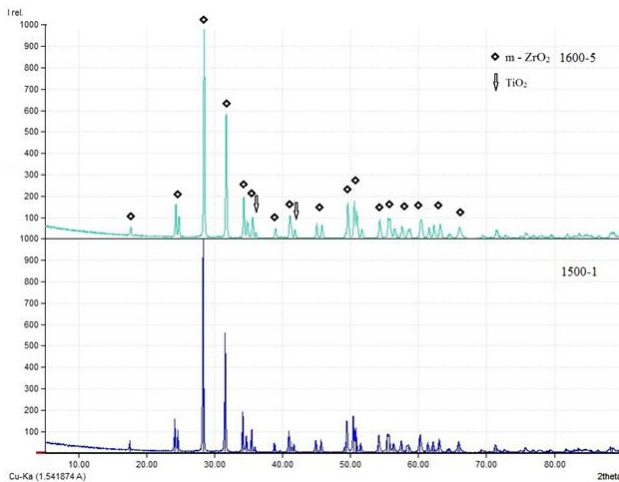


Figure 8. XRD patterns of TiZ00M samples.

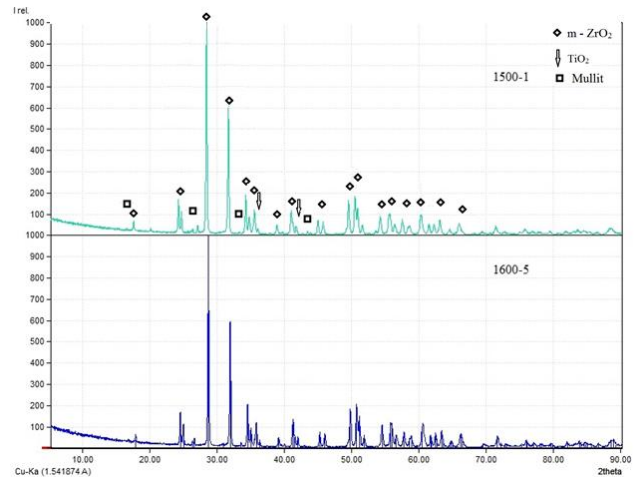


Figure 9. XRD patterns of TiZ10M samples.

As can be seen from Figure 8 and Figure 9, while m-ZrO₂ and TiO₂ phases are detected in samples without mullite additives, it is seen that there is a mullite phase in addition to these phases in samples with mullite additives. It is understood that different phases or t-ZrO₂ or c-ZrO₂ are not formed in the structure and the mullite additive improves the bending strength and other properties of the samples with the second phase toughening mechanism.

The microstructure image of TiZ00M16005 and TiZ10M16005 samples is given in Figure 10.

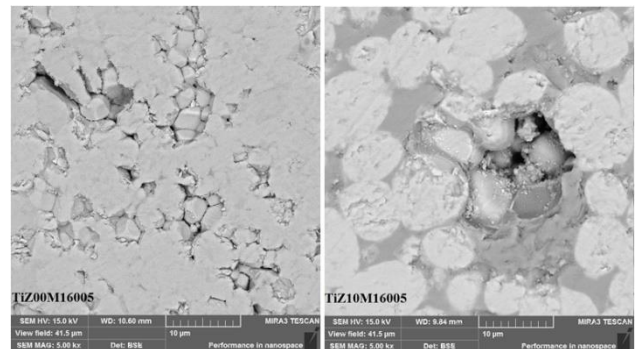


Figure 10. SEM images of TiZ00M16005 and TiZ10M16005 samples.

As can be seen from the SEM image given in Figure 10, the grain boundaries of the mullite-free sample appear to be separated from each other and the deep slit appearances show that there are cracks on the surface and internal structure of these samples, which will adversely affect the microstructure and mechanical properties. On the other hand, since a more homogeneous structure is obtained in the mullite-added sample despite the significantly larger grain size, it can be predicted that the mullite additive can improve the mechanical properties. As a matter of fact, in the experimental results, the hardness and bending strength values of the TiZ10M16005 sample were found to be higher than the hardness and bending strength values of the TiZ00M16005 sample.

Elemental analyzes of TiZ00M16005 and TiZ10M16005 samples with EDS are given in Figure 11 and Figure 12.

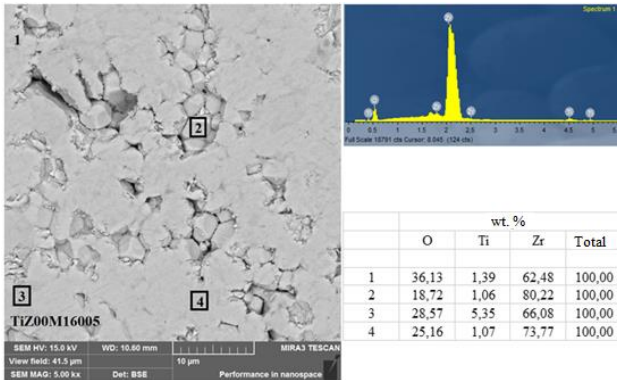


Figure 11. EDS analyses of TiZ00M16005 sample.

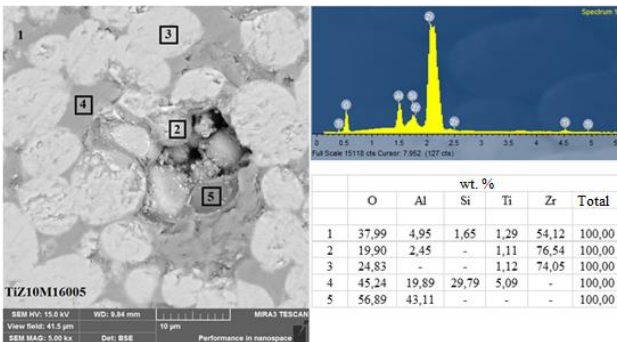


Figure 12. EDS analyses of TiZ10M16005 sample.

According to the EDS analyzes given in Figure 11 and Figure 12, the evaluation of the EDS analysis results on the TiZ00M16005 and TiZ10M16005 samples was made from general (1) and parts 2, 3, 4, 5. It has been observed that the results of the EDS elemental analysis made from the general field survey (1) and other parts are compatible with the contribution rates and XRD results made to the samples.

Conclusion

In this study, utilization of mullite in the manufacturing of titania doped zirconia and the effect of mullite addition on wear and other some properties of these ceramics were investigated.

With increasing sintering temperature and time in TiZ00M coded samples, generally shrinkage, experimental and relative density, hardness values and wear resistance increased; It was observed that water absorption, porosity and three-point flexural strength values decreased. Shrinkage, experimental and relative density, hardness values and wear resistance values of the 16005 sample without mullite additives were less than the 16001 sample. It is thought that this is due to defects such as excessive grain growth and formation of large pores in the microstructure depending on the sintering time.

In TiZ10M coded samples, with increasing sintering temperature and time, generally shrinkage, experimental and relative density, hardness, three-point bending strength values and wear resistance increased; It was observed that the water absorption and porosity values decreased. Whereas the mullite additive decreased the shrinkage, experimental density and relative density values of the samples; It increased the water absorption, porosity, hardness and three-point bending strength values and wear resistance.

While m-ZrO₂ and TiO₂ phases were detected in the samples without mullite additives, it was determined that there was mullite phase too in addition to these phases in the samples with mullite additives. The absence of t-ZrO₂, c-ZrO₂ or other phases in the structure shows that the mullite additive improves the microstructure and improves the bending strength and other properties of the samples with the secondary phase toughening mechanism.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for this article prepared.

There is no conflict of interest with any person in this article prepared. All authors declare that they have no conflict of interest.

Authors' Contributions

All authors contributed equally.

Acknowledgement

This work is supported by the Scientific Research Project Fund of Sivas Cumhuriyet University under the project number M-767. Authors would like to acknowledge Scientific Research Project Fund of Sivas Cumhuriyet University.

References

- [1] T. Boyraz, "An investigation on physical and electrical properties of CaO/MgO-stabilized zirconia ceramics formed with different methods," Ph.D. dissertation, Dept. Metallurg. and Mat. Eng., Istanbul Technical Univ., İstanbul, 2008.
- [2] A. D. Pekdemir, "Preparation and characterization of boron carbide at low-temperature from boric acid and polyols," Ph.D. dissertation, Dept. Chem., Ankara Univ., Ankara, 2018.
- [3] C. B. Abi, "An investigation on fracture toughness of traditional and technical ceramics," Ph.D. dissertation, Dept. Metallurg. Eng., Afyon Kocatepe Univ., Afyon, 2009.
- [4] S. Bhaduri, and S. B. Bhaduri, "Enhanced low temperature toughness of Al₂O₃-ZrO₂ nano/nano composites," *Nanostructured Materials*, 8(6), pp. 755-763, 1997.

- [5] G. T. Dahl, S. Döring, T. Krekeler, R. Janssen, M. Ritter, H. Weller and T. Vossmeier, "Alumina-doped zirconia submicro-particles: Synthesis, thermal stability, and microstructural characterization," *Materials*, 12(18), 2856, 2019.
- [6] C. Chen, Q. Shen, J. Li and L. Zhang, "Sintering and phase transformation of 7wt% calcia-stabilized zirconia ceramics," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 24(2), pp. 304-307, 2009.
- [7] S. C. Sharma, N. M. Gokhale, R. Dayal and R. Lal, "Synthesis, microstructure and mechanical properties of ceria stabilized tetragonal zirconia prepared by spray drying technique," *Bulletin of Materials Science*, 25(1), pp. 15-20, 2002.
- [8] K. Tsukuma and M. Shimada, "Strength, fracture toughness and Vickers hardness of CeO₂-stabilized tetragonal ZrO₂ polycrystals (Ce-TZP)," *Journal of materials science*, 20(4), pp. 1178-1184, 1985.
- [9] D. Chandra, G. Das and S. Maitra, "Comparison of the Role of MgO and CaO Additives on the Microstructures of Reaction-Sintered Zirconia-Mullite Composite," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12(4), pp. 771-782, 2015.
- [10] D. H. Aguilar, L. C. Torres-Gonzalez, L. M. Torres-Martinez, T. Lopez and P. Quintana, "A study of the crystallization of ZrO₂ in the sol-gel system: ZrO₂-SiO₂," *Journal of Solid State Chemistry*, 158(2), pp. 349-357, 2001.
- [11] S. Vasanthavel, P. Nandha Kumar and S. Kannan, "Quantitative analysis on the influence of SiO₂ content on the phase behavior of ZrO₂," *Journal of the American Ceramic Society*, 97(2), pp. 635-642, 2014.
- [12] V. C. Pandolfelli, J. A. Rodrigues and R. Stevens, "Effects of TiO₂ addition on the sintering of ZrO₂-TiO₂ compositions and on the retention of the tetragonal phase of zirconia at room temperature," *Journal of materials science*, 26(19), pp. 5327-5334, 1991.
- [13] C. L. Lin, D. Gan and P. Shen, "Stabilization of zirconia sintered with titanium," *Journal of the American Ceramic Society*, 71(8), 624-629, 1988.
- [14] H. L. Chu, C. L. Wang, H. E. Lee, Y. Y. Sie, R. S. Chen, W. S. Hwang, and H. H. Huang, "Effect of sintering process parameters on the properties of 3Y-PSZ ceramics. In *Advanced Materials Research* (Vol. 749, pp. 44-48), 2013.
- [15] B. Stawarczyk, M. Özcan, L. Hallmann, A. Ender, A. Mehl and C. H. Hammerlet, "The effect of zirconia sintering temperature on flexural strength, grain size, and contrast ratio," *Clinical oral investigations*, 17(1), 269-274, 2013.
- [16] R. K. Govila, "Strength characterization of yttria-partially stabilized zirconia," *Journal of materials science*, 30(10), pp. 2656-2667, 1995.
- [17] P. F. Liu, Z. Li, P. Xiao, H. Luo and T. H. Jiang, "Microstructure and mechanical properties of in-situ grown mullite toughened 3Y-TZP zirconia ceramics fabricated by gelcasting," *Ceramics International*, 44(2), pp. 1394-1403, 2018.
- [18] J. Moon, H. Choi, H. Kim, C. Lee, "The effects of heat treatment on the phase transformation behavior of plasma-sprayed stabilized ZrO₂ coatings," *Surface and Coatings Technology*, 155(1), pp. 1-10, 2002.
- [19] Zhang, Y. L., Jin, X. J., Rong, Y. H., Hsu, T. Y., Jiang, D. Y., & Shi, J. L., "On the t→m martensitic transformation in Ce-Y-TZP ceramics. *Acta materialia*, 54(5), 1289-1295, 2006.
- [20] A. Duszová, J. Dusza, K. Tomášek, G. Blugan, and J. Kuebler, "Microstructure and properties of carbon nanotube/zirconia composite," *Journal of the European Ceramic Society*, 28(5), pp. 1023-1027, 2008.
- [21] J. Sun, L. Gao, M. Iwasa, T. Nakayama and K. Niihara, "Failure investigation of carbon nanotube/3Y-TZP nanocomposites," *Ceramics International*, 31(8), pp. 1131-1134, 2005.
- [22] R. El Ouatib, S. Guillemet, B. Durand, A. Samdi, L. E. Rakho and R. Moussa, "Reactivity of aluminum sulfate and silica in molten alkali-metal sulfates in order to prepare mullite," *Journal of the European Ceramic Society*, 25(1), pp. 73-80, 2005.
- [23] I. Kucuk and T. Boyraz, "Structural and mechanical characterization of mullite and aluminium titanate reinforced yttria stabilized zirconia ceramic composites," *Journal of Ceramic Processing Research*, 20(1), pp. 73-79, 2019.
- [24] P. Kumar, M. Nath, A. Ghosh and H. S. Tripathi, "Enhancement of thermal shock resistance of reaction sintered mullite-zirconia composites in the presence of lanthanum oxide," *Materials Characterization*, 101, pp. 34-39, 2015.
- [25] J. Roy, S. Das and S. Maitra, "Solgel-processed mullite coating—a review. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12, pp. E71-E77, 2015.
- [26] Denry and J. R. Kelly, "State of the art of zirconia for dental applications," *Dental materials*, 24(3), pp. 299-307, 2008.
- [27] T. Boyraz and A. Akkuş, "Investigation of wear properties of mullite and aluminium titanate added porcelain ceramics," *Journal of Ceramic Processing Research*. Vol. 22, No. 2, pp. 226-231, 2021.
- [28] Y. Q. Huang, Z. Li, P. F. Liu, T. X. Huang, Y. Li, and P. Xiao, "Tribological properties of Mullite/3Y-TZP ceramics with different content of mullite fabricated by gel-casting," *Applied Surface Science* 476, pp. 232-241, 2019.
- [29] T. Boyraz, "Thermal Properties and Microstructural Characterization of Aluminium Titanate (Al₂TiO₅)/La₂O₃-Stabilized Zirconia (ZrO₂)

- Ceramics,” *Cumhuriyet Science Journal* 39.1: pp. 243-249, 2018.
- [30] E. Çitak and T. Boyraz, “Microstructural characterization and thermal properties of aluminium titanate/YSZ Ceramics,” *Acta Physica Polonica A*, 125(2), pp. 465-468, 2014.
- [31] M. A. Hafizoğlu, T. Boyraz, A. Akkuş, “Fabrication, characterization and wear properties of mullite reinforced silica-doped zirconia ceramic composites”, in *Proc. IMSMATEC'21*, Nevşehir, Turkey, 2021, pp. 175-180.
- [32] M. A. Hafizoğlu, A. Akkuş, T. Boyraz, “Fabrication, characterization and wear properties of mullite reinforced Al₂O₃-doped ZrO₂ ceramic composites,” in *Proc. GLOBCEP'21*, Bandırma, Balıkesir, Turkey, 2021, pp. 673-686.
- [33] M. A. Hafizoğlu, T. Boyraz, A. Akkuş, “Fabrication and characterization of mullite reinforced TiO₂ added ZrO₂ ceramics,” in *Proc. ISCMP'21*, Burdur, Turkey, 2021, p. 61.



Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1020/RAMOR 500 çelik çiftinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the microstructural and mechanical properties of AISI 1020/RAMOR 500 steel couple joined by friction welding

Derya Abak¹, Anıl İmak², İhsan Kırık^{3*}

¹ Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, dabak902@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9862-7888>

² Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, aimak@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6091-1584>

^{3*} Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Bölümü, ikirik@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8361-319X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ocak 2022
Revizyon 18 Ocak 2022
Kabul 21 Ocak 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Sürtünme Kaynağı,
AISI 1020,
Ramor 500

ÖZ

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip AISI 1020 ve Ramor 500 çelik çiftinin sürtünme kaynağı metodu ile birleştirme işlemi incelenmiştir. Üretim parametreleri olarak üç farklı sürtünme süresi (6 sn, 8 sn, 10 sn) kullanılarak birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin, mikro-yapı analizleri için optik, SEM, EDS analizleri yapılmış, ayrıca Mekanik özellikler içinde sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Maksimum çekme gerilmesi 537.2 MPa, en yüksek sertlik değeri ise BB bölgesinde 500-595 HV aralığında tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde sürtünme süresinin kaynak kalitesi üzerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Farklı özelliklere sahip zırh çeliği ve orta karbonlu çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesiyle daha mukavemetli birleştirmelerin yapılabildiği görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 January 2022
Received in revised form 18 January 2022
Accepted 21 January 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Friction welding,
AISI 1020,
Ramor 500

ABSTRACT

In this study, the joining process of AISI 1020 and Ramor 500 steel pairs with different properties by friction welding method was investigated. The connections to be produced were joined by applying three different friction times (6 sec, 8 sec, 10 sec). Optical, SEM, EDS analyzes of the joined samples were made for microstructure analysis, and hardness and tensile tests were applied for mechanical properties. The maximum tensile stress was 537.2 MPa, and the highest hardness value was found in the BB region in the range of 500-595 HV. As a result of the examinations, it was determined that the friction time plays an important role on the quality of the friction joint. It has been observed that stronger joints can be made by combining armor steel and medium carbon steels with different properties by friction welding method.

Doi: 10.24012/dumf.1053846

* Sorumlu Yazar

Giriş

Endüstri ve savunma sanayisindeki hızlı gelişim ile birlikte kullanılan metalik malzemelerin birleştirilme işlemi de bir o kadar önem kazanmıştır. Geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilen metalik malzemelerde çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir[1]. Yeni ve özellikli malzemelerden olan zırh çelikleri geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirildiğinde bazı metalürjik problemler ortaya çıkmaktadır. Ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilen çeliklerde oluşan olumsuzlukları azaltmak amacıyla minimum kaynak kusurları içeren ve kaynak sonrası en az iç gerilmeler oluşturan katı hal kaynak türlerinden biri olan sürtünme kaynağı tekniği kullanılabilir. Böylece ergitme kaynak yöntemlerindeki olumsuzluklar azaltılmış olmaktadır.

Katı hal kaynak teknikleri içinde yeni bir yöntem olan sürtünme kaynağı, endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu birleştirme tekniği, mekanik enerjinin birleşme arayüzünde termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısı yardımıyla plastik deformasyon ve ekstrüzyonla gerçekleştirilen bir kaynak tekniğidir[2], [3], [4], [5].

Zırh çelikleri, yüksek enerji emici özellikleri nedeniyle askeri ve sivil araçların korunmasında kullanılmaktadır[6],[7]. Savunma sanayisi açısından önemli olan bu malzemelerin diğer çelikler ile birlikte kullanıldıkları düşünüldüğünde, birleştirilmelerinin zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Zırh çelikleri ile diğer çeliklerin birleştirme işlemleri yaygın bir şekilde araştırma konusu olmaktadır. Bu bağlamda yapılan literatür incelemelerinde;

Merzalı, zırh çeliğinin kaynaktan sonra ısı etkisi altında bulunan bölgelerde, hemen hemen değişmemiş ve temperlenmiş bölgelerin faz özelliklerinin homojenizasyonu ve mekanik özelliklerin uygunluğu ile ilgili çalışmıştır[8]. Bekçi, Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakalarının 7.62 mm mermiler karşısındaki balistik performansı farklı koşullarda deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Ramor 550'nin önde Ramor 500'ün arkada kullanıldığı yapı, alternatif sıralamalı yapıya nazaran daha yüksek balistik dayanım sergilediğini gözlemlemiştir[9]. Sarsılmaz vd., Armor 500 çelik ve AISI 2205'in sürtünme kaynaklı birleştirme özelliklerini incelemiş ve farklı kaynak parametrelerinde kaynağın özelliklerini karşılaştırmıştır. Mikroyapısal ve mekanik özelliklerin, seçilen koşullar aralığında değişen kaynak parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmiştir[10]. Örenler, yapmış olduğu çalışmada Armox 500T zırh çeliğinin ergitme kaynak yöntemlerinde kaynakları yapılmış olan bağlantının mekanik özellikleri, sertliği, makro ve mikro-yapı özellikleri ve tokluk değerlerini incelemiştir. Test parçalarının kaynakları yapılırken aynı koruyucu gaz kompozisyonunu kullanmış beraber farklı amper değerlerine göre kaynak parametreleri farklılık göstermiştir. Bunun yanında imalatı yapılan parçalara test sonuçlarının sağlıklı olması için tahribatsız muayene yöntemlerinden görsel muayene, penetrant muayene ve radyografik muayene yöntemleriyle olası kaynak hatalarına karşı test etmiş ve herhangi bir kaynak kusuruna rastlamamıştır[11]. Taskaya, Ramor 500 zırh çeliğinin toz altı kaynağı ile birleştirmiş ve numunelerin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir[12]. Erdoğan, metal malzemelerin ara tabaka kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılmasını incelemiştir. Sürtünme kaynağında Ti6Al4V ile AISI 310, AISI 304, AISI 316, AISI

316Ti, AISI 316L, AISI 430, Inconel 600 numunelerini kaynak etmiştir. Kaynaklı numunelerin mekanik ve metalürjik incelemelerini yapmıştır. Kaynaklı numunelere çekme testi, mikro sertlik, optik mikroskobu ve SEM analizleri yapmıştır. Sonuç olarak yapılan sürtünme kaynağı çalışmaları başarılı sonuç vermiştir[13]. Kırık vd., sürtünme kaynağı ile bir araya gelen AISI 1040/Duplex paslanmaz çelik ikilisinde sürtünme zamanının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişler ve sürtünme zamanının bağlantılar üzerine önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir[14].

Farklı özelliklere sahip metalik malzemeleri ergitme kaynak metotları ile birleştirmek bazı olumsuz sonuçlar meydana getirmektedir. Özellikle zırh görevi gören Ramor çeliklerinin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri durumunda kaynak bölgesi ve ITAB'da zırh özelliklerini kaybedebilmektedirler. Bu amaçla savunma sanayisinde farklı türleri bulunan ve birçok zırhlı araçta kullanılan Ramor 500 ile kaynak kabiliyeti iyi olan AISI 1020 çeliği üstün avantajlar sağlayan sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir.

Materyal ve Metot

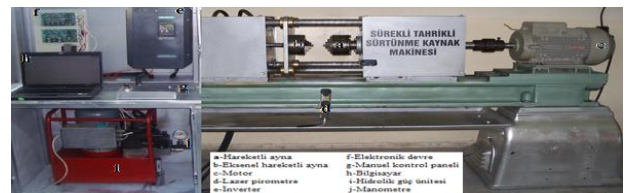
Bu çalışmada kullanılan AISI 1020 12 mm çapında çelik çubuk ve 100x300 mm plaka halinde Ramor 500 çelikleri ticari olarak temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

Malzeme	AISI 1020	RAMOR 500
<i>Element</i>		
C	0,207	0,35
Mn	0,441	1,50
Si	0,102	0,70
P	0,007	0,015
S	0,006	0,010
Cr	0,095	1,00
Mo	0,019	0,70
Ni	0,078	2,00
Al	0,017	-
Cu	0,1	-
B	-	0,005
Fe	Kalan	Kalan

Kaynak işleminden önce, ticari olarak levha halinde alınan Ramor 500 çeliği 12 mm çapında çubuk haline getirildikten sonra AISI 1020 çeliğiyle birlikte şerit testerede soğutma sıvısı kullanılarak Ø12x72 mm ebatlarında kesilmiştir. Kesilen numuneleri birleştirilmek için eşleştirilen alın yüzeyleri; kir, pas ve oksit tabakasından arındırmak için asetonla temizlenmiştir.

Sürtünme kaynakları Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan PLC kontrollü bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde yapılmıştır (Şekil 1).



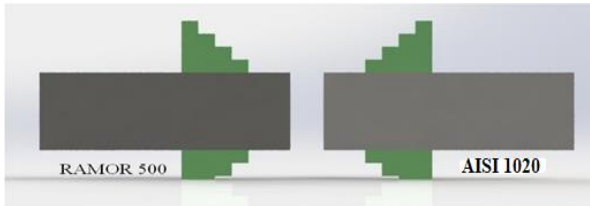
Şekil 1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi[15]

Tablo 2. Kaynak bağlantılarının üretiminde kullanılan sürtünme kaynak parametreleri

Numune No	Devir Sayısı (rpm)	Sür. Süresi (sn)	Sür. Basıncı (MPa)	Yığma Basıncı (MPa)	Yığma Süresi (sn)	Boyca Kısalma 1020 (mm)	Flanş Boyu 1020 (mm)	Boyca Kısalma Ramor 500 (mm)	Flanş Boyu Ramor 500 (mm)
S1	2200	6	40	100	12	7,80	16,90	2,00	16,00
S2	2200	8	40	100	16	6,10	18,35	5,15	17,20
S3	2200	10	40	100	20	11,85	20,00	6,45	18,80

Literatür incelemeleri sonucunda; sürtünme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde mikroyapı ve mekanik davranışlar üstünde büyük etkiye sahip olan sürtünme süresi parametreleri değişken olarak seçilmiş olup, bu değişkenler Tablo 2’ de verilen düzende deneysel programda incelenmiş ve veriler bulunmuştur.

Birleştirilmek üzere eşleştirilen AISI 1020/Ramor 500 çelik çifti, Şekil 2’deki düzende, tezgâha bağlanmış ve Şekil 3’teki gibi numuneler elde edilmiştir.



Şekil 2. Parçaların bağlanma şekli



Şekil 3. Kaynak sonrası elde edilen S1, S2 ve S3 no’lu numuneler

Kaynak işlemi ardından, numunelerin birleşme alanında oluşan yapısal değişimi gözlemlemek için; numuneler birleşme yüzeyine dik olacak şekilde kesilip yüzeyleri 80-1200 mesh’lik zımpara ile zımparalanmasının ardından 3 µm’ lik Elmas pasta ile parlatılmıştır. Şekil 4’ te kesilmiş numunenin şematik resmi verilmiştir.

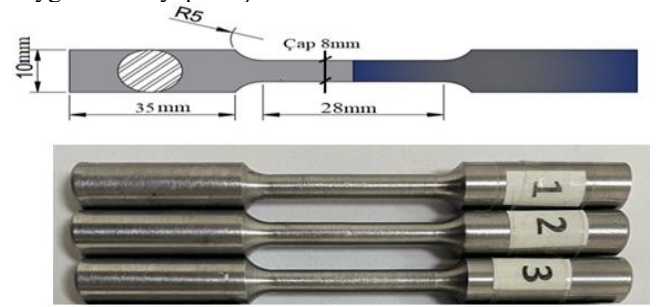


Şekil 4. Kesilmiş numunenin şematik resmi

Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde oluşan sertlik değişimini ölçmek için mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, Bingöl Üniversitesi, Merkezi Laboratuvarı’ nda bulunan AOB marka mikrosertlik cihazında 20 gr yük altında 0.5 mm

aralıklarla Vickers (HV) biriminde ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler, bilgisayar ortamına yüklenerek mikrosertlik grafikleri oluşturulmuştur.

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin mekanik davranışlarını incelemek için çekme testi yapılmıştır. Çekme numuneleri TSE 138 standartlarına göre Şekil 5’te gösterilen ebatlarda CNC torna tezgâhında işlenmiştir. Çekme deneyleri, 50000 N yük kapasitesine sahip SHIMADZU marka çekme cihazında, 1 mm/dak çekme hızı uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 5. Çekme numunesi

Bulgular Ve Tartışma

Kaynaklı Bağlantıların Makroskopik Değerlendirilmesi

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların, ara yüzeyinden dışarı çıkan malzeme yüzeyindeki değişim resmi Şekil 6’ da verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantıların birleşme alanlarından alınan makroskopik inceleme fotoğrafları değerlendirildiğinde; sürtünme süresine göre ara yüzeyden dışarı çıkan malzeme miktarında artış gözlemlenmektedir. Kaynak sonrası numunelerden alınan boyca kısalma miktarı, dışarı çıkan malzeme miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 6. Sürtünme kaynaklı numunelerinde birleşme ara kesitinin resmi

Birleştirilen Numunelerin Makroskopik İncelemeleri

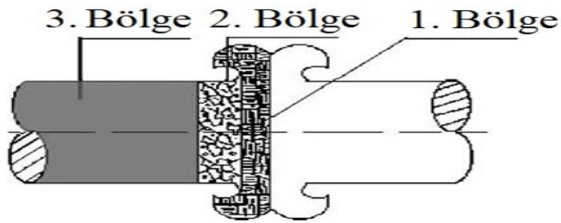
2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı, üç farklı sürtünme süresi (6, 8, 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 no'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası makro fotoğrafları Şekil 7'de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; artan sürtünme zamanına göre dışarı taşan malzeme miktarında artış görülmektedir. Kaynak sonrası yapılan boyca kısalma ölçümleri sonucunda, en çok kısalma S3 nolu numunede 11,85 mm olarak bulunmuştur. Boyca kısalma en çok AISI 1020 çelik tarafında olmuştur. AISI 1020 tarafında boyca kısalmanın daha fazla olmasının temel nedeni AISI 1020 sertliğinin zırh çeliğine göre düşük ve ısı iletim kat sayısının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. S1, S2 ve S3 no'lu numunelerin makroskopik incelenmesi

Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı bileşime sahip iki metal çifti birleştirilmiş olduğundan birleşme ara yüzeyinin hem sağında ve hem de solunda farklı yapıların ortaya çıktığı açıktır. Bu nedenle, mikroyapı değerlendirilmesi yapılırken Şekil 8'de verilen tanımlama esas alınarak 1. bölge, 2. bölge ve 3. bölge şeklinde adlandırılmıştır. Bölgesel olarak üç farklı bölgeye; 1. bölge birleşme bölgesi (BB), 2. bölge deformasyon bölgesi (DB) ve 3. bölge esas malzeme (EM) olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan bu bölgeler artan sürtünme süresine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür.

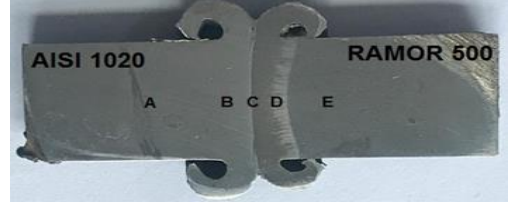


Şekil 8. Kaynaklı bağlantıların mikroyapı fotoğrafı[16]

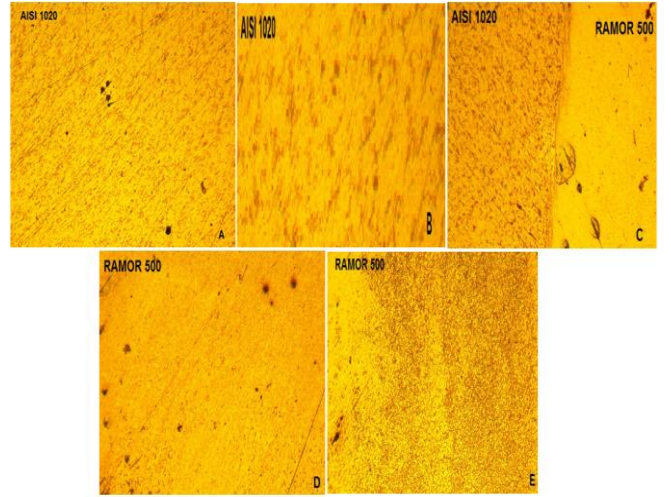
Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilen Zırh Çeliği ve AISI 1020 Çeliğinin Optik İncelemeleri

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numuneye ait mikroyapı fotoğrafı Şekil 9'da, optik görüntüleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Burada harflerle gösterilen bölgeler; A ve E bölgeleri esas malzeme, B ve D bölgeleri deformasyon bölgeleri ve C bölgesi birleşme bölgesini

göstermektedir. Bu gösterilen bölgelerin optik incelemelerinde, A bölgesi dediğimiz esas malzeme kısmında bir deformasyon gözlemlenmemiş olup B ve D bölgelerinde deformasyona rastlanırken malzeme yapısında değişim gözlemlenmiş ve C kısmında malzemelerin ergitme kaynak yöntemlerine nazaran daha düzgün ve daha dar bir ısı tesiri altındaki bölgelere (ITAB) sahip birleşmelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen Ramor 500/ AISI 1020 çeliklerinin mikroyapı fotoğrafı

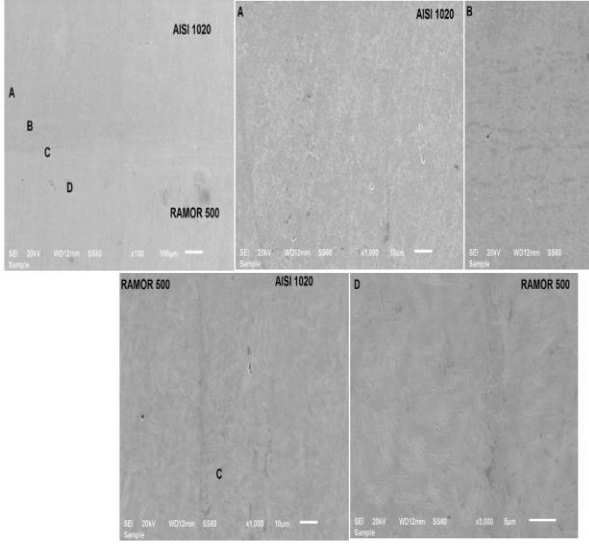


Şekil 10. a) Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü, b) AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü, c) C bölgesi optik görüntüsü, d) RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü, e) RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü

Birleştirilen Numunelerin SEM Analizi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin SEM fotoğrafları Şekil 11'de gösterilmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesi üstünde gerçekleştirilen analiz sonuçlarından, literatüre uygun üç farklı bölgenin olduğu gözlemlenmektedir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; kaynaklı bağlantının birleşme ara yüzeyinde boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir. Kaynaklı bağlantıların ara yüzey çizgisinin AISI 1020 tarafına doğru gömüldüğü görülmektedir. Bu numuneye ait boyca kısalma miktarı toplam 9.80 mm olarak ölçüldü. Sürtünme süresinin diğer numunelere göre az olduğundan boyca kısalmanın daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, birleşme bölgesine bitişik deformasyon bölgelerinde (B, D) oluşan sıcaklık ve eksenel basıncın etkisi ile malzemenin dışarı taşma rejimi ve kayma bantları açıkça görülmektedir.

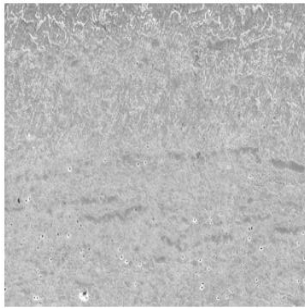
Deformasyonun etkili olduğu bölgeden uzaklaştıkça kayma bantlarının yoğunluğu azalmaktadır.



Şekil 11. Birleştirilen numunelerin SEM görüntüsü, a) AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü, b) AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi SEM görüntüsü, c) C bölgesi SEM görüntüsü, d) RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü

EDS Analizi

S1 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları Şekil 12'de verilmiştir. Numune EDS analizleri açısından incelendiğinde; AISI 1020 tarafında kısmen dönüşüme uğrayan bölgede krom ve nikel miktarı yükselmiştir.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
C	Ka	11.42	2.315	1.366	wt.%
Cr	Ka	22.24	4.000	0.233	wt.%
Mn	Ka	31.40	4.065	0.648	wt.%
Fe	Ka	3,635.69	22.286	97.549	wt.%
Ni	Ka	4.98	2.859	0.204	wt.%
				100.000	wt.%

Şekil 12. S1 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları

Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Kaynaklı bağlantıların sertlik değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu numuneye ait sertlik profili incelendiğinde; sertlik BB bölgesinde 500-595 HV aralığında olduğu ve ara bölgeden Ramor 500 çeliğine doğru düştüğü görülmektedir. Ölçülen minimum sertliğin AISI 1020 tarafında olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 3. Üç numuneye (S1, S2, S3) ait mikrosertlik değerleri

Numune No	EM AISI 1020	DB AISI 1020	BB (HV)	DB RAMOR 500	EM RAMOR 500
S1	200	510	595	450	350
S2	198	540	580	410	360
S3	200	560	500	400	400

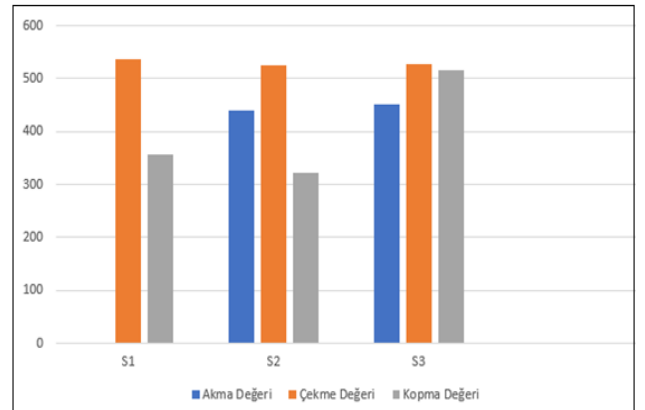
	(HV)	(HV)	(HV)	(HV)	(HV)
S1	200	510	595	450	350
S2	198	540	580	410	360
S3	200	560	500	400	400

Kaynaklı Bağlantıların Çekme Testi Sonuçları

2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığıma basıncı, üç farklı sürtünme süresi (6, 8, 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 no'lu kaynaklı bağlantılara ait çekme sonrası yüzey görüntüleri Şekil 13'te verilmiştir. Yüzey fotoğrafları incelendiğinde S1 nolu numune dışındaki bütün numunelerin ara yüzeyinin AISI 1020 tarafında DB bölgesinde kırıldığı görülmektedir. Bu durumun sürtünme süresinin düşük tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen çekme grafikleri Şekil 14'te verilmiştir. Bu grafiklerden, artan sürtünme süresine bağlı olarak maksimum çekme değerleri sırasıyla 537.2, 525.7 ve 527.4 MPa olarak kaydedilmiştir. Maksimum çekme değerindeki bu farklılık, DB'nin genişliği ile doğrudan ilişkilidir. İki metal çifti ara yüzeyindeki bağlantısız bölge, çatlak ve boşlukların varlığı ve büyüklükleri de çekme testlerinin kırılma davranışları üzerine önemli rol oynamaktadır.



Şekil 13. Çekme sonrası S1, S2 ve S3 nolu numunelere ait yüzey görüntüleri



Şekil 14. S1, S2, S3 numaralı numunelerin gerilme grafikleri

Sonuçlar

Farklı özelliklere sahip Ramor 500 zırh çeliği ile AISI 1020 çeliği sürekli tahrikli sürtünme kaynağıyla başarılı bir şekilde birleştirilebildiği görülmüştür. Kaynak

bölgesinde herhangi bir çatlak, boşluk veya bağlantısız bölgenin varlığına rastlanmamıştır.

Kaynaklı bağlantıların mikro-yapısında temelde üç farklı bölgenin var olduğu görülmüş. Bunlar literatür ışığında DB, BB ve EM olarak tanımlanmıştır.

Yapılan mikrosertlik incelemelerinde Ramor 500 tarafında meydana gelen DB bölgesinde sertliğin 400-450 HV bandında olduğu ancak AISI 1020 tarafında BB bölgesine yakın olan DB bölgesinde 510-560 HV bandında olduğu görülmüştür. Ancak en yüksek sertlik BB bölgesinde 500-595 HV aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Sürtünme kaynaklı bağlantıların dayanımlarını tespit etmek için yapılan çekme testi sonuçlarından bağlantı dayanımları artan sürtünme süresine bağlı olarak azalmıştır. Ayrıca, S1 nolu numune dışındaki diğer numuneler kaynak bölgesi dışında DB bölgesinde boyun vererek sünek kırılma davranışı sergilemiştir.

Kaynakça

- [1] E. Cetkin, Y.H. Çelik, and S. Temiz, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 alloys joined by TIG and MIG welding methods," *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng.*, vol. 42, pp. 1-12, 2020.
- [2] S. Celik and I. Ersozlu, "Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and 1050 steels," *Mater Des*, vol. 30, pp. 970-976, April 2009.
- [3] I. Kirik, "Effect of temperature on microstructure and mechanical behavior of diffusion bonded Armor 500 and AISI 1040 steels," *Materials Testing*, vol. 57, no. 4, pp. 296-300, April 2015.
- [4] S. Batı, M. Kılıc, and I. Kırık, "Friction welding of dissimilar AISI 304 and AISI 8640 steels," *EJT*, vol. 6, pp. 79-86, 2016.
- [5] A. Imak, I. Kırık, and E. Cetkin, "Sürtünme karıştırma saplama kaynak metodu ile birleştirilen AISI 5140 çeliği ile AISI 316 paslanmaz çeliğin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi," *Bingöl Üni.Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 1, pp.41-48, 2020.
- [6] J. Nowacki and A. Lukojc, "Structure and properties of the heat-Affected zone of duplex steels welded joints," *J Mater. Process Technol.*, vol. 164, pp. 1074-1081, May 2005.
- [7] F. Ade, "Ballistic qualification of armour steel weldments," *Weld J*, vol. 70, pp. 53-54, 1991.
- [8] C. Merzalı, "Zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölgenin özelliklerinin ısı işlem ile iyileştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.
- [9] M. Bekçi, "Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin balistik performanslarının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2019.
- [10] F. Sarsılmaz, I. Kirik, and S. Batı, "Microstructure and mechanical properties of armor 500/AISI2205 steel joint by friction welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 28, pp. 131-136, August 2017.
- [11] A. Örenler, "Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyetinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2018.
- [12] S. Taşkaya, "Ramor 500 çeliğinin tozaltı kaynağıyla birleştirilmesi ve Ansys paket programıyla değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2017.
- [13] A. Erdoğan, Metal malzemelerin ara tabaka kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli Üniversitesi, Tunceli, 2015.
- [14] I. Kırık and N. Özdemir, "Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş AISI 1040/Dublex paslanmaz çelik çiftinde sürtünme süresinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 16, no. 2, pp. 69-75, 2012.
- [15] I. Kırık, "Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 1040/AISI 304L çelik çiftinin elektrokimyasal korezyon davranışının araştırılması," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2012.
- [16] N. Ozdemir and N. Orhan, "Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, pp. 63-70, July 2005.



Experimental and Numerical Modal Analysis of a Bladed Rotor

Gözde SARI^{1*}, Ahmet Fatih AK², Ahmet Alper AKIŞ³, Engin AYDINOĞLU⁴

¹ Manisa Celal Bayar University, Mechanical Engineering Department, gozde.deger@cbu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0046-9090

² Manisa Celal Bayar University, Mechanical Engineering Department, ahmetfatihak@gmail.com, Orcid No 0000-0003-0742-6672

³ Manisa Celal Bayar University, Mechanical Engineering Department, ahmetalperakis@gmail.com, Orcid No: 0000-0001-7458-6671

⁴ Polat Makina A.Ş., e.aydinoglu@polatas.com.tr, Orcid No 0000-0001-6435-8149

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 January 2022

Received in revised form 16

January 2022

Accepted 3 March 2022

Available online 30 March 2022

Keywords:

Bladed Rotor; Experimental Modal Analysis (EMA); Finite Element Analysis (FEM); Natural Frequency Analysis

Doi: 10.24012/dumf.1058639

* Corresponding author

ABSTRACT

The behavior of an asymmetric bladed rotor was investigated in this study. The bladed rotor which performs solid-solid, liquid-liquid, liquid-solid separation processes is part of the decanter machine and named as screw conveyor. The purpose of this study is to determine the dynamics of the rotor on the free conditions for future development of the asymmetric and blade assembled rotors. It is important for the designer to determine the natural frequencies of the bladed asymmetric rotor so that some precautions can be taken during the design of the machine and in the operating conditions of the machine. This study consisted of two parts. In the experimental one, the modal test of the bladed rotor was performed and in the numerical part, the modal analysis of the rotor was carried out under free-free boundary conditions using a simulation program based on the finite-element method. The natural frequencies of the blades and the rotor were obtained experimentally and numerically. It was found that the experimental results and numerical results were in good agreement. Besides, it was concluded that the two mode shape was equal to the transverse mode frequency of the rotor and blades and the following mode shapes correspond to the bending and torsion mode frequencies of the blades. Since the shape properties of the rotor and blades are different, it has been observed experimentally and numerically that their natural frequencies also differ.

Introduction

The decanter is used in various fields to separate components of different densities. The machine consists of a bowl rotating at high-speed, a scroll conveyor rotating at a different speed on the same axis with the bowl, a drive group adjusting the speed difference, and a body carrying rotating elements. The present work focused on the dynamic characteristic properties of the screw conveyor which was composed by a rotor with a large number of blades assembled in its circumference. Ewins carried out the pioneering experiments related to the bladed disk and presented the frequency response functions of it in 1969 [1]. Srinivasan presented an in-depth study to improve our understanding of the vibratory behavior of gas turbine blades in 1997 [2]. Rzakowski *et al.* (2013) investigated free vibration analysis of mistuned aircraft engine bladed disks numerically. They showed mistuned mode shapes of the bladed disk using a simulation program [3]. Kaneko *et al.* (2013) studied the frequency response analysis of a bladed disk for the symmetric and asymmetric vane spacing [4]. Fernandes *et al.* (2016) studied a 3-D static fracture analysis of the gas turbine compressor blade. They determined the natural frequencies and mode shapes for both a single blade and a bladed disk system [5]. Repetckii

et al. (2018) presented the results of experimental and numerical vibration analysis of the bladed disk. They investigated the effects of various types of mistuning on the free vibrations of the bladed disk [6]. In this paper, this investigation presented the modal properties of the decanter screw conveyor. Many experimental investigations have been carried out and mathematical models have been proposed for the dynamics of the screw conveyor. Jin *et al.* (2004) analyzed the first three modal parameters of the centrifuge and screw conveyor under different support conditions. They presented comparisons between the experimental results and the numerical results [7]. Yang *et al.* (2008) carried out the numerically static analysis and prestress modal analysis for the different diameter, rotational speed, leaf thickness, and other design parameters of the scroll conveyor by a numerical method. They showed the effects of design parameters on the natural frequencies of the conveyor [8]. Wang *et al.*, (2010) analyzed the horizontal decanter centrifuge conveyor using a commercial program. They showed the effects of spiral leaves and conical angles on the dynamics of design [9]. Donohue (2014) investigated the dynamics of decanter's rotors. They presented that the effects of the velocity difference between the bowl and the screw conveyor on the dynamics of the decanter [10]. Hua *et al.* (2015) analyzed the effect of the

relative speed and the frictional force on the bearing of the rotor system. The nonlinear effects of bearing stiffness were taken into account [11]. Liu *et al.* (2015) simulated the fluid-solid interaction for decanter using a numerical method. They presented the effects of the centrifuge and hydrostatic pressure on the scroll conveyor and as a result of this effect, critical regions in design were obtained [12]. Tan *et al.* (2015) examined numerically the vibration characteristic properties of the decanter, which was a dual-rotor system. Their target was to simulate decanter working conditions. They performed the harmonic and transient analysis by simulating a ball bearing connection with the commercial program [13]. Jiayi and Luo (2018) carried out experimentally and numerically the dynamic analysis of the turbine disk under free-free conditions. They presented the results of the natural frequencies [14]. There are many experimental and numerical studies examining the vibrations of asymmetric rotors and decanter screws. However, the effects of the blades on the decanter on the response of the system are discussed for the first time in this study.

In the present study, the modal parameters of the bladed rotor of the decanter experimentally and numerically were investigated. In the experimental analysis, the modal analysis of the bladed rotor was carried out and the modal parameters such as natural frequencies were presented under free-free boundary conditions. In the numerical analysis, the natural frequencies and the mode shapes of the rotor were presented. The natural frequencies of the rotor and blades obtained numerically and experimentally were compared. The numerical and experimental results obtained were in good agreement.

Experimental Modal Analysis of the Bladed Rotor

The principal equipment of the experimental setup consists of a data collector (Bruel & Kjaer-3050-B-040), an impact hammer (Bruel & Kjaer-type 8202), an accelerometer (Bruel & Kjaer-Type 4533-B), a decanter screw conveyor and a computer is presented in Figure 1. The shape of the freely supported conveyor produced commercially by the private company can be seen in Figure 2. The rotor is constituted of a main pipe and blades bonded to the pipe. The pipe and blades are joined helically by the welding method. The main geometrical parameters of the rotor are listed in Table 1. The bladed rotor is hanged on the frame elastically to provide free-free boundary conditions. The accelerometer is rigidly connected to the rotor surface and the acceleration is measured on the y direction of the rotor. The bladed rotor is excited by means of the impact hammer from a total of 34 points marked in the x direction from each blade surface to a point and three points on the rotor surface between the blades, in the y direction. The hammer is hit five times in the same spot to verify the test. There are different tips for the impact hammer to excite the system, from soft rubber to metal. The appropriate tip should be chosen for the impact hammer so that the accelerometer can measure on the structure. While making this decision, the design and material of the structure should be taken into

consideration. Since the rotor considered in this study is made of metal and has thick sections, the metal tip is chosen for the impact hammer. The generated analog data is transferred to the Brüel & Kjaer data collector operating with the Pulse LabShop software, which converts it to a digital signal. The frequency analyzer properties, response signal and excitation signal properties are written in Table 2 and the schematic diagram of the experimental analysis is presented in Figure 3. The frequency-response functions (FRFs) of the measurement points are presented. The modal parameters of the rotor and blades are determined from the FRFs of the points based on "PolyMAX" or polyreference leastsquares complex frequency-domain method. This method provides clean stabilization diagrams from the FRFs [15]. The experimental natural frequencies are presented in the results section.

Table 1. Structure geometrical dimensions for the bladed rotor

Parameter	Value(mm)
Pipe inner radius	89
Pipe outer radius	128
Scroll pitch	60
Blade angle	3~5 degree
Total Length of pipe	566

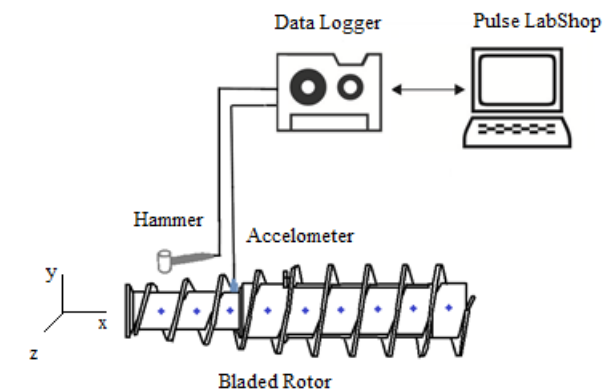


Figure 1. Experimental Setup of the Digital Measurement System



Figure 2. The Asymmetric Bladed Rotor with Free-Free Boundary Conditions

Table 2. The Technical Set-up Properties of Experimental Modal Analysis

Frequency analyzer properties	
Lines:	3200
Span:	3.24kHz
Averaging domain:	Spectrum averaging
Averaging mode:	baseband
Analysis mode:	Linear-5 averages
Time weighting window	uniform
Response signal	
Sensitivity:	982.7 μ V/m/s ²
Filters:	7 Hz (High pass)
Max peak input	10V-10.18 km/s ²
Excitation signal	
Time weight:	Uniform (window)
Channel sensitivity:	2.27mV/N
Max peak input:	10V 4.405 kN
Filters:	7 Hz (0.1dB)

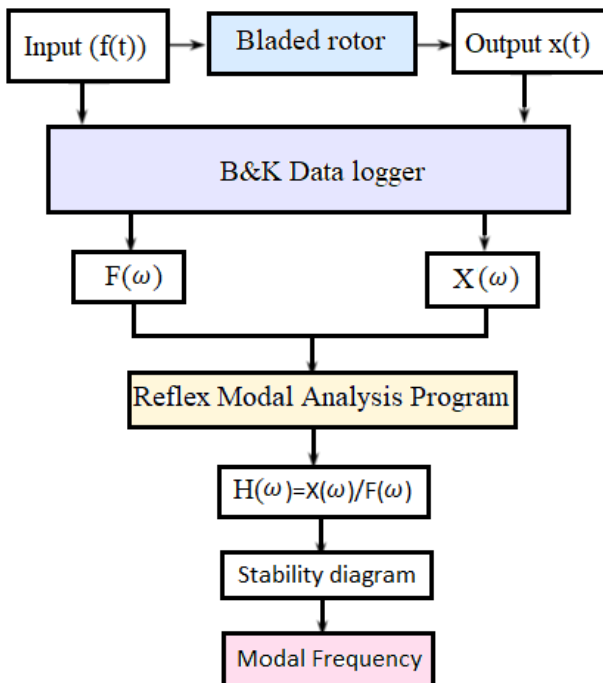


Figure 3. Schematic diagram of Experimental Modal Analysis

Numerical Modal Analysis of the Rotor

The modal analysis of the rotor is performed under free-free conditions using a commercial program (ANSYS). The three-dimensional geometry of the bladed rotor is shown in Figure 4. The mechanical properties of the rotor are given in Table 3. The rotor and blades are meshed by quadratic elements that have 20 nodes and the model is consisted of 770558 nodes and 1203906 elements to achieve grid convergence (Figure 5). Since the screw conveyor under investigation has oval and circular lines, modeling with the quadratic elements represents the structure better than the linear elements. In similar studies in the literature [16-17], in which experimental and numerical analyzes of modal analysis are compared, it is seen that the results are compatible with quadratic element modeling. In the light of references, the conveyor is modeled and analyzed with quadratic elements in this study. Since the minimum thickness of the leaf parts of the structure is 4mm, the element size in the finite element mesh has not been reduced below this size.

Each node has three degrees of freedom in the directions of x, y and z. The bonded contacts of the geometry are modeled by MPC (multi-point constraint) formulation. The Block Lanczos algorithm is used to solve the natural frequency problem. The natural frequencies and mode shapes of the bladed rotor are determined and presented in the results section.

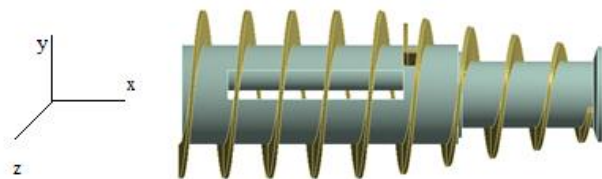


Figure 4. The Geometry of the Bladed Rotor



Figure 5. The Asymmetric Bladed Rotor Meshed Model

Table 3. Physical and Mechanical Properties for the Rotor

Sample	Value
Materials	AISI 304
Young's Modulus	193 GPa
Poisson's Ratio	0.25
Density	8.00 g/cc
Yielding Stress	205 MPa

Experimental Results

The results of the FRF analysis obtained from 34 measurement points on the rotor are presented in Figure 6. This function presents the acceleration values corresponding to the frequency values of the conveyor.

The stability diagram is obtained to determine physically mode frequencies. The PolyMAX estimator is one of the modal parameter estimators and this estimator yields very clear stabilization diagrams [18]. The estimator is applied

to determine modal parameters from stability diagram provided by using Reflex Modal Software, and parameter estimation results are shown in Figure 7, where the symbol '∇' stands for frequency and eigenvector stable, '×' for frequency stable, '*' for frequency and damping stable, and '◇' for all stable for frequency estimation under the stability criteria [19].

The experimental natural frequencies and damping ratio of the bladed rotor are determined from this diagram. The first nine natural frequencies of the bladed rotor obtained experimentally by the PolyMax method are written in Table 4. The damping ratio of the rotor for the first mode determined by the PolyMax method is 0.088. The first two peaks marked in Figure 7 (a) represents the first two-mode frequencies of the rotor, while the following peaks marked in Figure 7 (b) represent the mode frequencies of the blades. Further, it is observed that the vibration peaks of the blades have high amplitudes and they are close to each other in Figure 7 (b). These peaks are caused by differences of blades' properties which are physical properties and boundary conditions. In the literature, the problem of feature differences in bladed structures is commonly called mistuning behavior [20]. This behavior has an important effect on the vibration behavior of the system. It can cause the spatial location of vibration energy around a limited number of blades and the system's amplitude and stress increase.

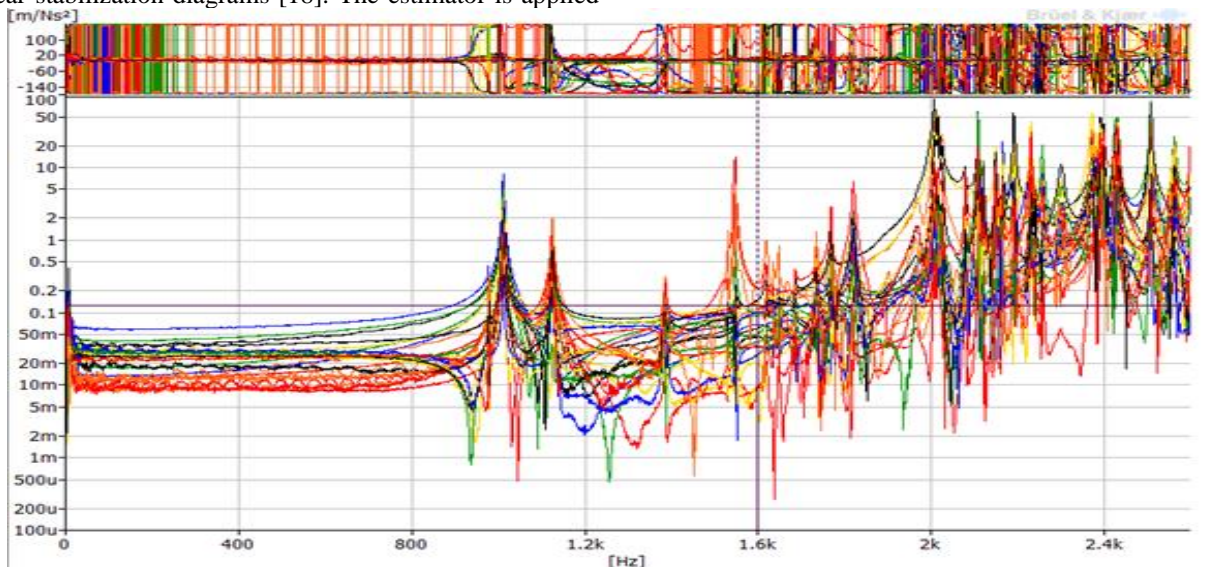


Figure 6. Frequency Response Functions for the Bladed Rotor

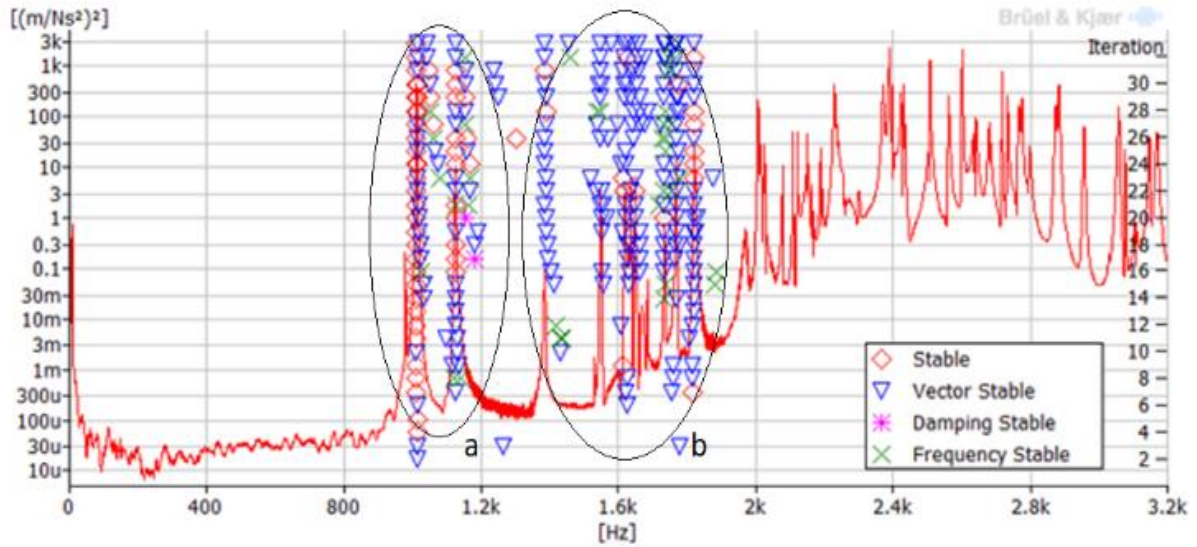


Figure 7. Stability Diagram of the Bladed Rotor
 (a)The Natural Frequencies of the Rotor, (b) The Natural Frequencies of the Blades

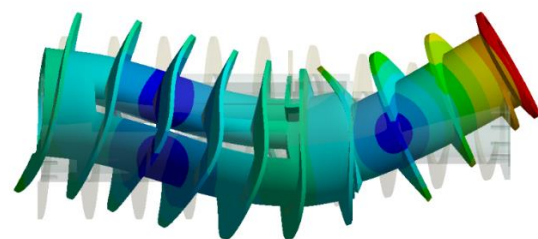
Table 4. The Experimental Natural Frequencies of the Bladed Rotor

Mode Number	Experimental Natural Frequencies (Hz)
1	1012
2	1124
3	1385
4	1548
5	1648
6	1686
7	1740
8	1761
9	2006

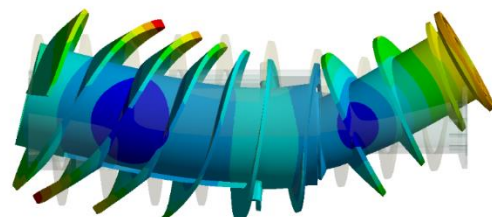
are shown. Since each of the blades has slightly different physical properties, each of the blades has slightly different amplitudes. It is observed that the blades vibrate at higher frequencies, as the widths of the blades at the right end of the rotor are smaller. The designer needs to determine the nature of the bladed asymmetric rotor so that some precautions can be taken. As seen from the numerical and experimental results, many blade structures that resonate over a wide frequency range. The designer must determine the rotational frequency of the machine taking into account the resonance frequencies of the system. Moreover, during the design phase of the blades, optimization studies can be carried out to shift the resonance frequencies. Thus, safe working areas where the machine can work can be provided.

Numerical Results

The numerical modal analysis is presented, including the natural frequencies and mode shapes of the bladed rotor. The mode shapes of natural frequencies of the bladed rotor are given in Figures 8-9. The behavior of the rotor is considered between 0 and 2100 Hz. In Figure 8 (a) and (b), the bending mode shape and natural frequency of the rotor are shown. The blades do not vibrate at 1018.6 Hz (Figure 8 (a)), while, both the rotor and the blades vibrate at 1127.7 Hz (Figure 8 (b)). In Figure 9, the mode shapes and natural frequencies of the bladed rotor are shown. When the mechanical properties of the blades are slightly different from each other, the resonance frequencies are also slightly different from each other. This phenomenon is referred to as the mistuning problem and there are theoretical and experimental studies on the mistuning problem of bladed systems in the literature [1, 3-6]. In Figure 9 (a) and (b), the first two blades vibrate only. In Figure 9 (c-g) the transverse mode shape and natural frequencies of the first five blades



(a) 1018.6 Hz



(b) 1127.7 Hz

Figure 8. The Mode Shapes of the Bladed Rotor

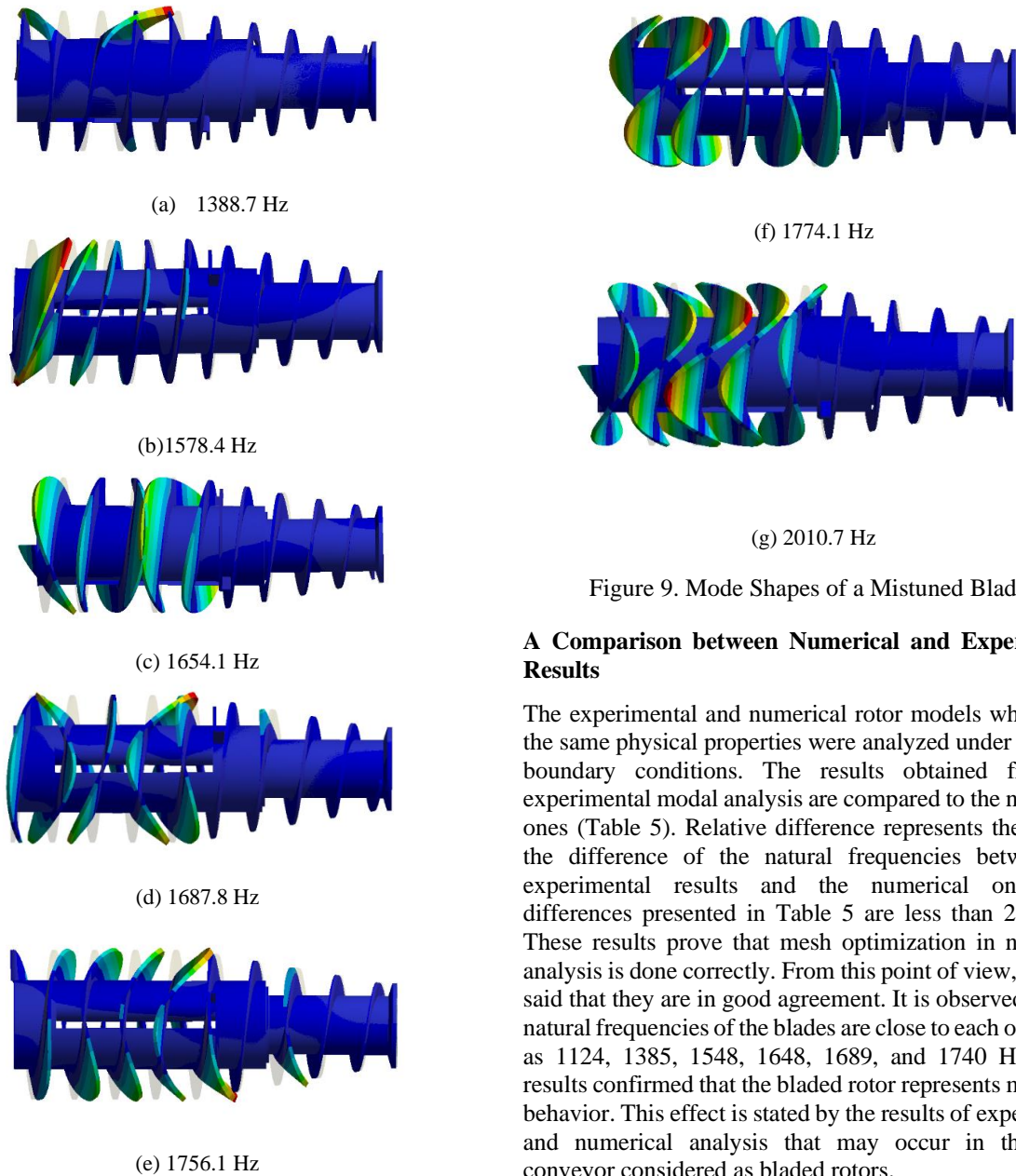


Figure 9. Mode Shapes of a Mistuned Blades

A Comparison between Numerical and Experimental Results

The experimental and numerical rotor models which have the same physical properties were analyzed under the same boundary conditions. The results obtained from the experimental modal analysis are compared to the numerical ones (Table 5). Relative difference represents the ratio of the difference of the natural frequencies between the experimental results and the numerical ones. The differences presented in Table 5 are less than 2 percent. These results prove that mesh optimization in numerical analysis is done correctly. From this point of view, it can be said that they are in good agreement. It is observed that the natural frequencies of the blades are close to each other such as 1124, 1385, 1548, 1648, 1689, and 1740 Hz. These results confirmed that the bladed rotor represents mistuning behavior. This effect is stated by the results of experimental and numerical analysis that may occur in the screw conveyor considered as bladed rotors.

Table 5. Comparison of Experimental and Simulation Results

Mode Number	Experimental Natural Frequencies (Hz)	Numerical Natural Frequencies (Hz)	Rate of Difference (%)	Mode Shapes
1	1012	1018.6	0.65	Rotor and Blade
2	1124	1127.7	0.33	Rotor and Blade
3	1385	1388.7	0.27	Blade
4	1548	1578.4	1.93	Blade
5	1648	1654.1	0.37	Blade
6	1686	1687.8	0.11	Blade
7	1740	1756.1	0.92	Blade
8	1761	1774.1	0.74	Blade
9	2006	2010.7	0.23	Blade

Conclusions

In summary, the dynamics of the bladed rotor under free-free boundary conditions were studied experimentally and numerically. In the experimental analysis, the FRFs of the bladed rotor were presented using the impact hammer test. In the numerical analysis, the mode shapes and the natural frequencies of the bladed rotor were obtained using the simulation program based on the finite element method. Various observations and findings have been obtained from the experimental and numerical analysis, as follows:

1. It can be considered as a screw conveyor consisting of a combination of a main pipe and blades.
2. It has been observed that the natural frequencies of the blades, which have slightly different mechanical properties from each other, are also close to each other.
3. There is a difference of 100 Hz between the first two bending modes due to the asymmetrical nature of the system consisting of blades and rotor.
4. It is observed that the mistuning effects on the response of the bladed rotor are realized and these effects increased as the width of the blade increased.
5. It is observed that participation in the mode shape increased as the width of the blade increased.
6. A FEA model has been developed for a decanter screw to calculate all nine modal frequencies and mode shapes.
7. The results of experimental modal frequencies obtained are within 2% error compared to the FEA prediction.

The present study presents the response of the screw conveyor considered as a bladed rotor experimentally and numerically.

Conflict of Interest- All authors declare no financial/commercial conflict of interest regarding the study.

References

- [1] D.J. Ewins, "The Effects of Detuning upon the Forced Vibrations of Bladed Disk", *Journal of Sound and Vibrations* 9 (1), 65-79, 1969.
- [2] A. V. Srinivasan, "Flutter and Resonant Vibration Characteristics of Engine Blades", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 119, 742-775, 1997.
- [3] R. Rzadkowski, A. Maurin, M. Drewczynski, "Multistage Coupling of Mistuned Aircraft Engine Bladed Disks in a Free Vibration Analysis", 11th International Conference on Vibration Problems, Lisbon, Portugal, 9-12 September 2013.
- [4] Y. Kaneko, R. Nakanishi, K. Mori, H. Ohyama, "Study on Vibration Characteristics of Mistuned Bladed Disk (Vibration Response Analysis by Reduced Model FMM)", *Journal of System Design and Dynamics*, 7(4), 2013.
- [5] R. Fernandes, S. El-Borgi, K. Ahmed, M. I. Friswell and N. Jamia, "Static Fracture and Modal Analysis Simulation of a Gas Turbine Compressor Blade and Bladed Disk System", *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 3(30), 2016.
- [6] O. Repetckii, I. Ryzhikov, T. Q. Nguyen, "Investigation of Mistuning Impact on Vibration of Rotor Bladed Disks", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 012097, 944, 2018.
- [7] Z. Jin, G. Tian-yu, C. Yi, X. Hong-hao, "Model Updating of Dual-Rotor Decanter Centrifuge with Dynamic Test", *Journal of ZheJiang University (Engineering Science)* 53.2, 241-249, 2004.
- [8] J. Yang, S. Preidikman, E. A. Balaras, "Strongly Coupled, Embedded-Boundary a Method for Fluid Structure Interactions of Elastically Mounted Rigid Bodies", *Journal of Fluid Structure*, 24(2):167-182, 2008.
- [9] L.Q. Wang, T. Chen, D.Z. Wu, "Structural Strength Parameterized Analysis of Horizontal Decanter Centrifuge Conveyor", *Journal of Mechanical Design*, 27(5):67-70, 2010.
- [10] B. Donohue, "The Transient Behavior of the Co-Axial Non-Synchronous Rotating Assembly of a Decanting Centrifuge", University of Canterbury, Department of Mechanical Engineering, New Zeland, 169 pages, Doctoral Thesis, 2014.
- [11] C. Hua, Z. Rao, T. Na, "Nonlinear Dynamics of Rub-Impact on a Rotor-Rubber Bearing System with the Stribeck Friction Model", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29 (8):3109-3119, 2015.
- [12] H. Liu, P. Li, H. Xiao, W. Mu, "The Fluid Solid Coupling Analysis of Screw Conveyor in Drilling Fluid Centrifuge Based on Ansys". *Petroleum*, 1(3):251-256, 2015.
- [13] W. Tan, L. Huai-min, H. Wu, Z. Li, H. Lou, "Numerical Study on the Coupled Vibration Characteristics of the Dual-Rotors System with Little Rotation Speed Difference", *Journal of Vibroengineering* 17(4), 1719-1730, 2015.
- [14] G. Jiayi, G. Luo, "Modal Test and Finite Element Analysis of a Turbine Disk," *Vibroengineering PROCEDIA* 20, 108-112, 2018.
- [15] B. Peetersa, H.V. Auweraera, P. Guillaumeb and J. Leuridana, "The Polymax FrequencyDomain Method: A New Standard for Modal Parameter Estimation?", *Shock and Vibration* 11, 395-409, 2004.
- [16] M. Yaman, Hafif ticari bir araç jantının, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve doğrulanması. Y. Lisans, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2012.
- [17] Y.N. Aydın, Lastikli Jant İçin Sönümleyici Kompozit Tasarımı, Deneysel ve Nümerik Analizi, Y. Lisans, MCBÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2021.
- [18] G. Bin, G. Wang, H. L. and X. Li, "Modal Testing Method for Finite Element Validation in Small and Axial Asymmetric Rotors, 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 9 - 13 January 2017, Grapevine, Texas.
- [19] T. D. Troyer, P. Guillaume, B. Peeters, "Polyreference Frequency-Domain Least-Squares Estimation with Confidence Intervals, Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, February 2008.
- [20] M. P. Castanier, C. Pierre, "Modeling and Analysis of Mistuned Bladed Disk Vibration: Status and Emerging Directions, *Journal of Propulsion and Power*, 22(2), 2006.



Sürtünme kaynağı ile AA7075 alüminyum alaşımının kaynak edilebilirliğinin araştırılması

Investigation of weldability of AA7075 aluminum alloy by friction welding

Anıl İmak^{1*}, İhsan Kırık²

¹Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, aimak@bingol.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6091-1584>

²Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Bölümü, ikirik@bingol.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8361-319X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş: 23 Ocak 2022
Revizyon 21 Şubat 2022
Kabul: 22 Şubat 2022
Online: 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Sürtünme Kaynağı,
AA7075,
Çekme Testi,
Mikroyapı

ÖZ

Bu çalışmada, AA7075 alüminyum alaşımının sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Alüminyum alaşımlı çubukların, sürtünme kaynağı ile birleştirilmesinde üç farklı sürtünme süresi (4 sn, 6 sn ve 8 sn) uygulanarak birleştirilmiştir. Sürtünme kaynağı ile kaynak edilen numunelerin mikroyapıları incelenmiş ayrıca mekanik özellikleri için ise sertlik ve çekme mukavemetleri incelenmiştir. En yüksek çekme kuvveti 6 sn sürtünme süresi ile birleştirilen numunede 11522,95 N olarak elde edilmiştir. Çalışma sonunda, alüminyum alaşımı AA7075 çubukların sürtünme kaynak yöntemi ile sorunsuz bir şekilde kaynak edilebildiği gözlemlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 January 2022
Received in revised form 21 February 2022
Accepted 22 February 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Friction welding,
AA7075,
Tensile Testing,
Microstructure

ABSTRACT

In this study, the weldability of AA7075 aluminum alloy by friction welding method was investigated. Three different friction times (4 sec, 6 sec and 8 sec) were applied to join the aluminum alloy rods with friction welding. The microstructures of the samples welded by friction welding were examined, and their hardness and tensile strength were examined for their mechanical properties. The highest tensile force was obtained as 11522.95 N in the sample combined with 6 sec friction time. At the end of the study, it was observed that aluminum alloy AA7075 rods could be welded without any problems by friction welding method.

Doi: 10.24012/dumf.1062054

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yüksek dayanım, iyi şekillendirilebilme, hafiflik ve iyi ısı iletimlerinden dolayı uzay, gemicilik, demiryolları ve otomobil endüstrisi gibi birçok alanda vazgeçilmez metallerden bir tanesidir[1]. Alüminyum alaşımlarının TIG, MIG, lazer, elektron ışın kaynağı gibi ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirmelerinde meydana gelen beklenmeyen fazların ortaya çıkması, tane büyümesi ve bir dizi olumsuz metalürjik değişimlerinin olması bu alaşımların birleştirme yeteneklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu açıdan bakıldığında alüminyum alaşımlarının birleştirmelerinde aşırı dikkat ve kaynak öncesi ve sonrası ısı işlem gibi önlemler alınmalı ya da kaynak işlemi yüksek hızlarda yapılmalıdır. Bu problemler göz önüne alındığında çok farklı malzemeleri bile sorunsuz bir şekilde kaynak edebilen katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme kaynağı çözüm sunmaktadır[2]. Sürtünme kaynağı, silindirik iki malzemenin aynı eksen üzerinde alın alına temas ettirilerek bir parça dönerken diğerinin hidrolik basınç yardımıyla iki malzemenin sürtünmesi sonucu meydana gelen ısıdan faydalanarak yapılan bir katı hal kaynağıdır[3]. Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi oldukça yeni bir teknoloji olup birçok araştırmacı için araştırma konusu olmuştur[4],[5].

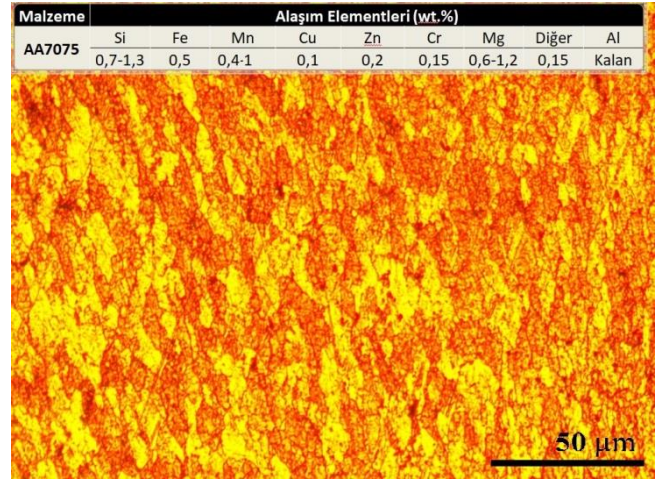
Çetkin, AISI 304/AISI 5140 çelik çiftlerini farklı devir (1500 dev/dak, 1700 dev/dak, 1900 dev/dak) ve sürtünme sürelerini (4 sn, 6 sn, 8 sn) baz alarak sürtünme kaynağı ile birleştirmiştir. Birleştirilen çelik çiftlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma neticesinde 1900 dev/dak devir ve 8 saniye sürtünme süresi ile birleştirilen numune en iyi sonucu vermiştir[6]. Torun vd., 17-4 PH paslanmaz çelik ve Al 7075 alaşımının sürtünme kaynağını çalışmıştır. Farklı sürtünme süreleri (6 sn, 9 sn, 12 sn, 15 sn) dikkate alınarak yapılan kaynakların mikroyapı ve mekanik davranışlarını incelemiştir. Sertlik bakımından bir birine yakın değerler tespit etmiş ve kesme mukavemeti bakımından ise en yüksek gerilmeyi 15 sn' de gözlemlemiştir[7]. Çetkin vd., sürtünme karıştırma kaynağı ile AA5182/AA7075 alaşımlarını kaynak edip bağlantıların mekanik özelliklerini incelemiştir. Uygun dönme devri, uç geometrisi ve ilerleme hızının kaynak kalitesini arttırdığını belirtmişlerdir[8]. Sarsılmaz, AA7075/AA6061 alaşımlarını sürtünme karıştırma yöntemiyle birleştirmiş kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. İlerleme hızı ve devir sayısının kaynak kalitesini arttırmada önemli bir parametre olduğunu belirtmiştir[9]. Kırık vd., AA 6061 alüminyum alaşımına sürtünme kaynaklı MMC'nin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine takviyenin parçacık boyutunun ve hacim oranının etkisini incelemiştir. Alüminyum matris kompozit ve AA 6061 alüminyum alaşımının birleştirilebileceğini, nihayetinde, takviyenin parçacık boyutunun ve hacim oranının, sürtünme kaynaklı bağlantıların çekme mukavemetinde önemli bir rol oynadığını gözlemlemiştir[10]. Çetkin vd., TIG ve MIG kaynağı ile birleştirilen AA7075/AA5182 alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerine kaynak parametrelerinin etkisini incelemiştir. İyi bir kaynak kalitesi için her iki kaynak yönteminin de uygulanabileceğini tek koşulun optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi olduğunu ifade etmişlerdir[11]. Sameer ve Anil, AZ91 magnezyum

alaşımı ve AA 6082-T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynaklı farklı bağlantılarının mekanik ve metalürjik özelliklerini incelemiştir. Mg/Al'nin birleşim ara yüzeyinde ince intermetalik katman ve alüminyum ve magnezyumun zayıf yapışmasına sahip kalın intermetalik katman, kenarları değişen farklı bağlantılarda gözlemlemiştir[12]. Radhakrishnan vd., Sürtünme kaynağı işlemi ile imal edilen C44300 borunun AA7075-T651 boru plakasına dişli ve dişli olmayan farklı bağlantıların mukavemet ve sertliklerini incelemiştir. Borunun plakaya dişli ile sürtünme kaynağının, dişli olmayan bağlantıya göre daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu sonucuna varmışlardır[13]. Yang vd., AA6061-T6 dairesel boru ve konik başlık için sürekli tahrik sürtünmeli kaynak işleminin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Dairesel boru ve konik boruların CDFW deneyleri ve çekme testleri sonucunda optimum kaynak parametrelerinin etkinliğini doğrulayan başlık yapmışlardır[14].

Yapılan literatür incelemelerinde AA7075 alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynağıyla birleştirilebilirliği konusunda yok denecek kadar az sayıda çalışmanın var olduğu görülmüştür. Bu çalışmada AA7075 alüminyum alaşımı sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve sürtünme süresinin mikroyapı ve mekanik üzerine olan etkisi araştırılmıştır.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan AA7075 alüminyum alaşımlı çubuklar 18 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda ticari olarak Byc E-Ticaret Sanayi ve Bilişim Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri ve mikroyapı optik resmi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri ve mikroyapı optik resmi

Sürtünme kaynakları yapılmadan önce AA7075 çubukların birleşme yüzeyi aseton ile temizlenmiştir. Sürtünme kaynakları Fırat Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında Tablo 1'de verilen kaynak parametrelerine göre sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde yapılmıştır. Şekil 2'de sürtünme kaynak işlemlerinin yapıldığı kaynak makinesi ve tezgâha bağlanma şekli verilmiştir.

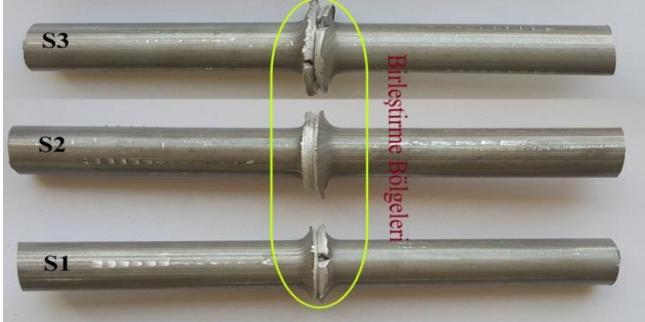
Tablo 1. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin parametreleri

Numune No	Devir Sayısı (dev/dak)	Sürtünme Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığılma Basıncı (MPa)	Yığılma Süresi (sn)
S1	2000	4	40	80	12
S2	2000	6	40	80	12
S3	2000	8	40	80	12



Şekil 2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi ve bağlanma şekli

Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde birleştirilen AA7075 alüminyum alaşımı numunelerin birleştirilmiş Şekil 3'te verilmiştir.

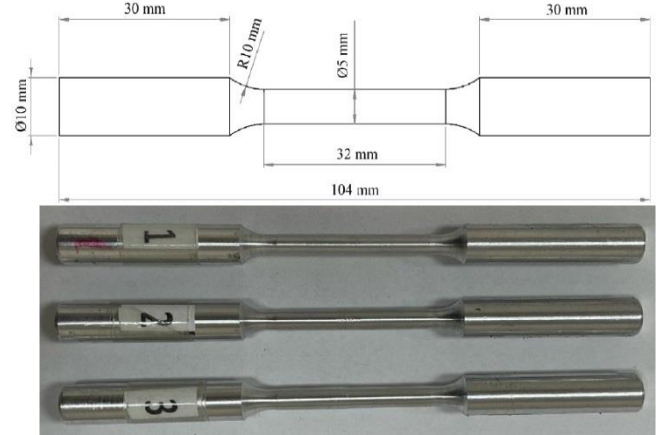


Şekil 3. Sürtünme kaynağında birleştirilen S1, S2 ve S3 nolu numuneler

Kaynak işleminin ardından, alüminyum alaşımlı numuneler birleşme yüzeyine dik kesilip birleşme yüzeyinde oluşan yapısal farklılıkları incelemek için, yüzeyleri 80-1200 mesh'lik zımpara ile zımparalanıp daha sonra 3 µm'lik Elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikroyapı analizleri için Keller kimyasal dağılayıcısı hazırlanarak dağılama yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların mikroyapı analizleri için optik ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Laboratuvarında AOB marka cihazda 20 gr yük altında 1 mm aralıklarla Vickers (Hv) biriminde ölçüm yaparak gerçekleştirilmiştir.

AA7075 kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini incelemek için numunelerin çekme testleri yapılmıştır. Birleştirilen numunelerin flanş bölgeleri taşlanarak temizlenmiş ve tornalama işlemi için hazır hale getirilmiştir. Çekme testi için numuneler Goodway marka iki eksenli CNC torna tezgâhında kesme hızı 200 m/dk, ilerleme 0,1 mm/dev, paso tek seferde 0,2 mm alınarak ASTM E8

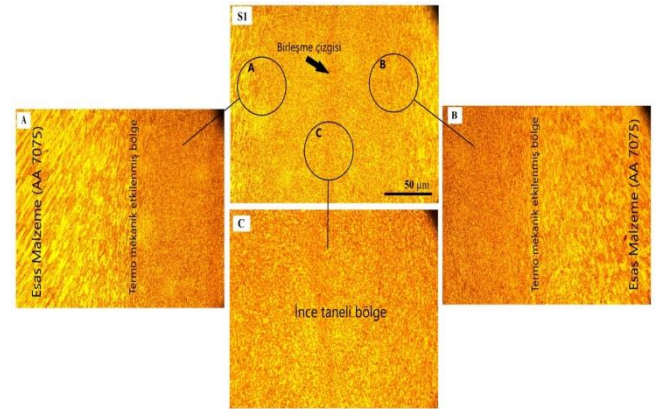
standartlarına göre işlenmiştir. İşlenen numunelerin makro görüntüleri ve teknik resmi Şekil 4'te verilmiştir. Çekme deneyleri, SHIMADZU marka çekme cihazında 50 kN yük kapasitesine sahip, 1 mm/dak çekme hızı uygulanarak yapılmıştır. Çekme testi sonrası numunelerin kırık yüzeyleri incelenip SEM analizleri yapılmıştır.



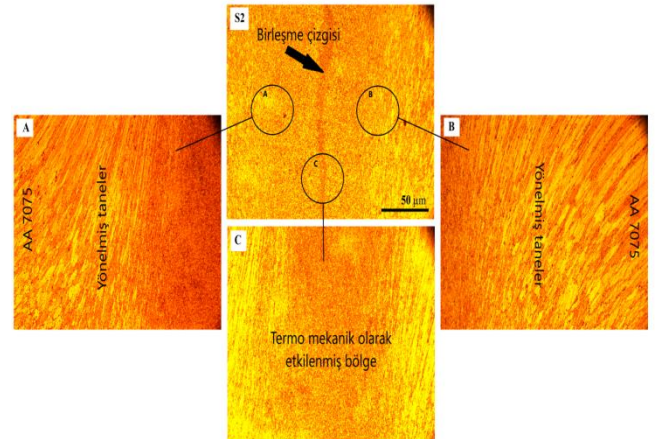
Şekil 4. CNC torna tezgâhında işlenmiş numunelerin makro görüntüsü ve teknik resmi

Bulgular ve Tartışma

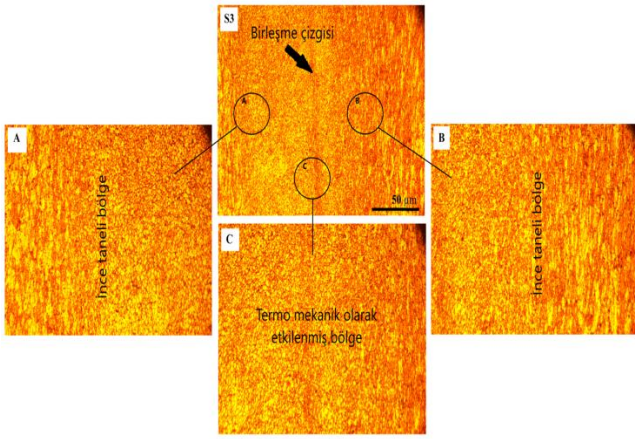
Mikroyapı İncelemeleri



Şekil 5. 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen numunenin optik resmi



Şekil 6. 6 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen numunenin optik resmi

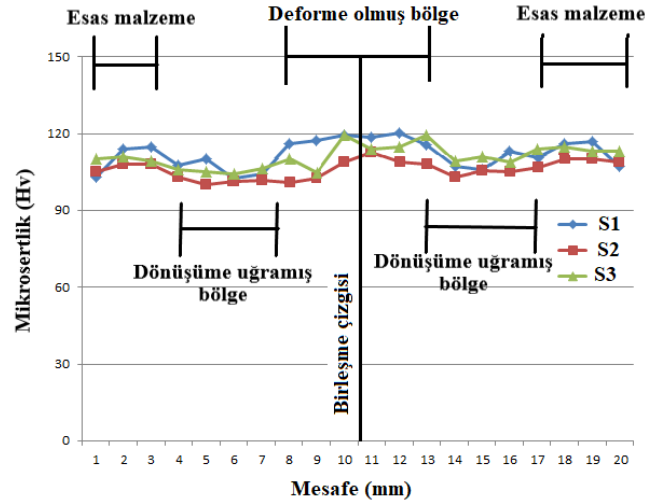


Şekil 7. 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen numunenin optik resmi

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen numunelere ait optik resimleri Şekil 5, 6 ve 7'de sırasıyla verilmiştir. Optik resimlerden de açıkça görüldüğü gibi herhangi bir boşluk, çatlak veya bağlantısız bölgenin olmadığı görülmektedir. Ayrıca her üç sürtünme sürelerinde de birleşmenin gerçekleştiği görülmüştür. Optik resimlerinden birleşme bölgesinde termo mekanik etki sonucu incelmış tanelerin varlığı görülmüş ayrıca aksenal basınç altında ve merkezkaç etkisinden kaynaklı tane yönelmelerinin de mevcut olduğu tespit edilmiştir. Birleşme ara kesitinde ince bir birleşme hattının var olduğu da resimlerden açıkça görülmektedir.

Mikrosertlik Analizi

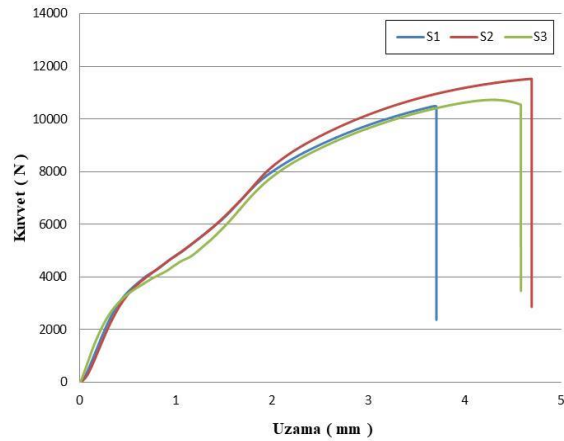
Farklı sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen numunelere ait mikrosertlik ölçümleri kaynak bölgesine dik bir doğru boyunca ölçülmüş ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde de açıkça görüldüğü gibi kaynak birleşme bölgesinde ve hemen bitişiğinde dönüşüme uğramış bölgede bir birinden farklı mikrosertlik değerleri tespit edilmiştir. Mikrosertlik esas malzemede ortalama 110 Hv civarlarındaiken, birleşme bölgesine hemen bitişik olan deforme olmuş bölgede ortalama 95 Hv civarlarına düşmüş ancak birleşme bölgesinde ortalama 120 Hv olarak gözlemlenmiştir. S1 ve S3 nolu numunelerin birleşme bölgelerinde ölçülen sertlik değerlerinde bir düzensizliğin olduğu görülmektedir. S2 nolu numnede ise sertlik değeri biraz daha istikrarlı seyrettiği görülmüştür. Mikrosertlik değerlerinden düşme olan bölgelerde mikroyapısal bir dönüşümün olduğu açıktır. Bu dönüşümün esas nedeni AA7075'in ara yüzeyinde sürtünmeden dolayı meydana gelen yüksek sıcaklıktan kaynaklı ve hızlı soğuma ile ilişkili yaşlanma olduğu düşünülmektedir. Demir vd., yapay yaşlandırılmış AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri isimli çalışmalarında artan sıcaklık ile AA7075 alaşımının sertliğinde bir artmanın olduğunu tespit etmişlerdir[15].



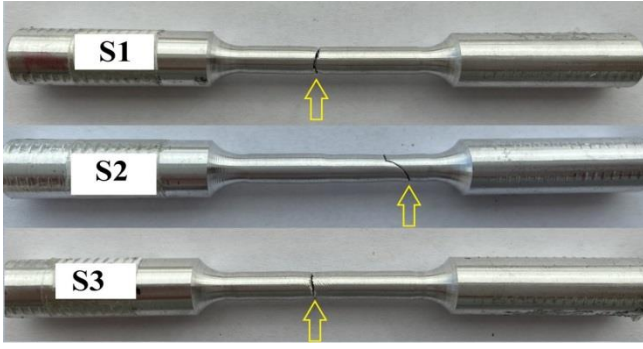
Şekil 8. S1, S2 ve S3 nolu numunelerin mikrosertlik sonuçları

Çekme Testi ve Kırık Yüzey Analizi

Sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilen AA7075 alüminyum alaşım numunelerin kuvvet-uzama diyagramı Şekil 9'da ve yapılan çekme testi sonrası numunelerin makro resimleri Şekil 10'da verilmiştir. Üç numune içerisinde en yüksek çekme kuvveti S2 nolu numunede 11522,95 N olarak elde edilmiştir. Çekme testleri sonrası makro fotoğrafları incelendiğinde S1 ve S3 nolu numuneler kaynak bölgesine yakın ve gevrek kırılma sergilemiştir. Ancak S2 nolu numunede kaynak bölgesi dışında karma klivaj kırılma davranışı sergilemiştir. Sonuçlar neticesinde sürtünme süresinin sürtünme kaynağında önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

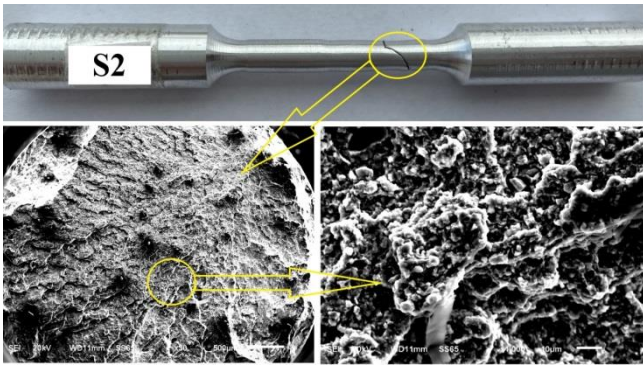


Şekil 9. Kaynaklı numunelerin kuvvet-uzama diyagramı



Şekil 10. Çekme testi sonrası numunelerin makro resimleri

2000 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 80 MPa yığıma basıncı, 6 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S2 nolu numunenin çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 11’de verilmiştir. Numunenin karma klivaj kırılma davranışı sergilediği ve SEM yüzeylerinde ani kopmalar olduğu gözlemlenmiştir[16]. Şekil 11’de de açıkça görüldüğü gibi çekme gerilmesine maruz kalan 6 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların neredeyse esas malzemeye yakın bir mukavemette olduğu görülmüştür. Ayrıca kopma sonrası çekilen SEM resminden de kopma yüzeyinin lifli bir görünüme sahip olduğu açıktır.



Şekil 11. S2 nolu numunenin kırık yüzey SEM görüntüleri

Sonuçlar

Bu çalışmada, AA7075 alüminyum alaşımlı çubukların sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilebilirliği incelenmiştir. AA7075 çubukları 4 sn, 6 sn ve 8 sn olmak üzere üç farklı sürtünme süresi parametrelerinde kaynak edilmiştir. Parametrelerin sürtünme kaynaklı birleştirmede etkilerini incelemek için mikroyapı analizleri ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar;

Farklı sürtünme süresi(4 sn, 6 sn ve 8 sn) kullanılarak sürtünme kaynağıyla birleştirilen AA7075 çubukların kaynak bölgelerinde herhangi bir boşluk, çatlak veya birleşmeme sorunuyla karşılaşmamıştır.

Optik resimlerinden birleşme bölgesinde termo mekanik etki sonucu incelmüş tanelerin varlığı görülmüş ayrıca aksenal basınç altında ve merkezkaç etkisinden kaynaklı tane yönelmelerinin de mevcut olduğu tespit edilmiştir.

Mikrosertlik esas malzemede ortalama 110 Hv, birleşme bölgesine hemen bitişik olan deforme olmuş bölgede ortalama 95 Hv’ ye düşmüş ancak birleşme bölgesinde ortalama 120 Hv olarak gözlemlenmiştir. S1 (4 sn) ve S3 (8 sn) nolu numunelerin birleşme bölgelerinde ölçülen sertlik değerlerinde bir düzensizliğin olduğu görülürken, S2 (6 sn) nolu numunede ise sertlik değerinin biraz daha istikrarlı seyrettiği görülmüştür.

Üç numune içerisinde en yüksek çekme kuvveti S2 (6 sn) nolu numunede 11522,95 N olarak elde edilmiştir. Çekme testleri sonrası makro fotoğrafları incelendiğinde S1 (4 sn) ve S3 (8 sn) nolu numuneler kaynak bölgesine yakın ve gevrek kırılma sergilerken, S2 (6 sn) nolu numune kaynak bölgesi dışında karma klivaj kırılma davranışı sergilemiştir.

Kaynaklar

- [1] C. Davis and J. Thomas, “W. M., ” *Welding Journal*, vol. 75, pp. 41, 1996.
- [2] F. Sarsılmaz, N. Özdemir, and I. Kırık, “ Evaluation of microstructure and fatigue properties of dissimilar AA7075/AA6061 joints produced by friction stir welding,” *Kovove Mater.*, vol. 50, pp. 259-268, 2012.
- [3] I. Kırık and N. Özdemir, “PLC kontrollü sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinin tasarım ve imalatı,” *International Conference on Welding Technologies and Exhibition*, 23-25 May 2012, Ankara
- [4] H. Uzun, “Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite,” *Materials and Design*, vol. 28, pp. 1140-1146, 2007.
- [5] P. Cavaliere, E. Cerri, and A. Squillace, “ Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by friction stir welding,” *Journal of Materials Science*, vol. 40, pp. 3669-3676, 2005.
- [6] E. Çetkin, “Farklı kaynak parametrelerinde sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI304/AISI140 çelik çiftlerinin mekanik ve mikroyapılarının araştırılması,” *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 9, pp. 1724-1733, 2020.
- [7] O. Torun, I. Çelikten, and B. Baksan, “17-4 PH paslanmaz çelik ve Al 7075 alaşımının sürtünme kaynağı,” *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 4, pp.201-208, 2017.
- [8] E. Çetkin, Y.H. Çelik, and Ş. Temiz, “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA5182/AA7075 alaşım bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi, ” *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol. 10, pp. 603-612, 2019.
- [9] F. Sarsılmaz, “ Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2008.
- [10] I. Kırık, N. Ozdemir, and U Caligulu, “Effect of particle size and volume fraction of the reinforcement on the microstructure and mechanical properties of friction welded MMC to AA 6061 aluminum alloy,” *Kovove Mater.*, vol. 51, pp. 221-227, 2013.

- [11] E. Çetkin, Y.H. Çelik, and Ş. Temiz, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 alloys joined by TIG and MIG welding methods," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, pp. 34, 2020.
- [12] M.D. Sameer and K.B. Anil, "Mechanical and metallurgical properties of friction stir welded dissimilar joints of AZ91 magnesium alloy and AA 6082-T6 aluminium alloy," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 7, pp. 264-271, 2019.
- [13] E. Radhakrishnan, L.A. Kumaraswamidhas, K. Palanikumar, and D. Muruganandam, "Strength and hardness studies of C44300 tube to AA7075-T651 tube plate threaded and unthreaded dissimilar joints fabricated by friction welding process," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, pp. 3424-3433, 2019.
- [14] D. Yang, X. Sun, G. Zhou, H. Jiang, L. Sun, T. He, C. Yu, Y. Wei, and P. Liu, "Optimization of continuous drive friction welding process for AA6061-T6 circular pipe and conical head," *Structures*, vol. 36, pp. 1068-1079, 2022.
- [15] M. Demir, O. Tekin, and A. Demir, "T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan ekstrude AA 7075 alüminyum alaşımlarının mekanik davranışları," *8th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 23-25 October 2020, Bursa
- [16] O. Dedeoğlu, "Otomotiv endüstrisinde kullanılan AL5754 malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2019.



Research Article

Thermal and Mechanical Properties of Building Stones Used in Some provinces in the Marmara Region

Ayşe BİÇER¹

¹ Malatya Turgut Ozal University, Bio Engineering Department, ayse.bicer@ozal.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4514-5644

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 January 2022
Received in revised form 28
February 2022
Accepted 2 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Lefke stone, Keşan stone, Çan
stone., Küfeki stone., building
stones, building material

ABSTRACT

In this study, some physical properties of Lefke (Bilecik), Keşan (Edirne), Çan (Çanakkale) and Küfeki (Istanbul) stones, which are used as building materials in their regions, were investigated. Samples were taken from two separate quarries for each stone, and after chemical analysis, thermal conductivity, compressive strength, water absorption, respiration ability and abrasion tests were performed. As a result of the tests, it has been revealed that *i*) Çan, Tüfekî and Lefke stones, among the ones examined, with low thermal conductivity coefficient values (0.342 W/mK, 0.564, 0.860 W/mK), can be used as briquettes, bricks or wall covering materials for thermal insulation and decoration purposes, *ii*) Keşan stone can be used in load-bearing wall material and wear-resistant flooring with 81.3 MPa compressive stress and 4.83% wear rate values and *iii*) four stones have rich reserves and low costs. The results were compared with other building materials especially in terms of energy saving, strength and comfort conditions.

Doi: 10.24012/dumf.1064683

Introduction

Stones that are prepared in certain shapes and sizes by being removed from the earth's crust and used for various purposes in construction works in different shapes and thicknesses are called building stones. Building stones have been used by humans from the beginning of civilization to the present day. Natural stones, BC. It was used in the construction of buildings and monuments around 600 BC, and in ancient Greece, it was first used in columns that replaced wooden columns, and then their use became widespread. While the Turkish-Seljuk-Ottoman culture was dominant in Anatolia, natural stone was used differently from Europe,

but at least as intensely and skillfully as the ones there [1].

Natural stones show different characteristics from each other due to their different internal structures resulting from their formation. For this reason, the properties sought in natural stones vary according to the place and purpose of use of the stone [2]. Not every stone in nature can be used as a building material. The stone to be used in the building should be homogeneous [3]. The largest historical buildings standing today are made of stone. Egyptian Pyramids, Greek Acropolises,

Ottoman fountains and mosques, Artemis Temple and Halicarnassus Mausoleum are typical examples. The structures in question were built with stones brought from hundreds of kilometers away, as a result of years of efforts. Today, natural building stones are widely used for coating, carrier and decorative purposes in buildings, as well as in a wide area such as building exterior surfaces, flooring, border and edge decoration or building stone dam construction and aggregate production. [4].

The use of natural stones as building and decoration materials has led to an increase in world natural stone production. Turkey is one of the countries rich in natural stone assets and has a great potential in terms of both reserves and diversity. Today, both the price increases in construction materials and the increase in the demand for housing bring the use of natural stones as carrier and filling elements, depending on the geological structure of each region.

In the literature, many studies have been done on building stones. Some of these studies are summarized below in two groups. The first group studies are the studies on the determination of natural stones used as building materials, their geological formation, determination of their properties and their geographical distribution, and Taşlıgil and Şahin [4], Pivko [5], Gevrek & Kazancı [6], Kazancı & Gürbüz [7], Dinçer et al. [8], Duran, [9], Kaygısız [10], Türkdönmez and Bozcu [11], Devencioglu [12] can be cited as an example to these studies.

The second group of studies is about the use of stones in the construction industry, which can be counted as an example of Bakış et al [13],

Bicer [14, 15, 16], Demir [17], Çavumirza et al [18]. Daloğlu & Emir [19], Kılıç [20], Kılıç & Gültekin [21].

In order to evaluate natural stones as building materials in the best way, their physico-mechanical properties should be well known. In this study,

Lefke stone (Bilecik), Kesan stone (Edirne), Çan stone (Çanakkale) and Küfeki stone (Istanbul), which are used extensively in their regions, were examined and some of their properties were investigated. Stones have been preferred by the local people until today and have been used in many buildings. This study reveals the reasons for preference with the features determined as a result of the tests applied to the stones.

Materials and Methods

Materials

Lefke Stone:

Lefke stone is a type of sandstone and is extracted in yellow color from the quarries located in the south of Osmaneli district of Bilecik province. While it is used as coating, ground stone and curbstone in public and private buildings in the construction sector, it is used in historical buildings and buildings to replace the worn, aging and worn parts of the natural building stones applied on the surface. The Lefke stone used for the restoration of Haydarpaşa train station is a good example (Fig 1-a). This sandstone has been widely used for centuries in the historical Eskişehir Government Office (Fig 1-b), Bebek and Bostancı mosques, and mosques, madrasas, churches and houses in and around Osmaneli town center (Fig 1-c). The hardness of the stone is 4.5-5 Mohs grade [22].

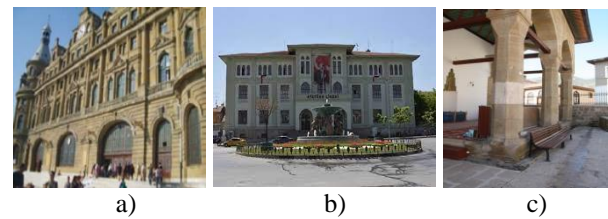


Fig 1. Lefke stone a) Haydarpaşa station building [21], b) historical Eskişehir government building [23], c) Rüstempaşa mosque (Osmaneli), [22].

Kesan Stone:

These are light gray, dirty green, sandstone type stones found in the Keşan district of Edirne province. Stones are generally used as building and covering materials. It is seen that it is frequently

used in columns as blocks, in load-bearing walls as masonry, and as facade and floor covering material in historical buildings (Fig. 2 -a, b, c). The hardness of Keşan sandstone is between 5-6 Mohs.

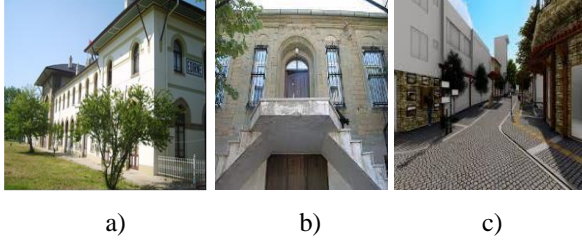


Fig 2. Keşan stone applications, a) Trakya Uni. historical rectorate building [20], b) Keşan municipality, c) Kunduracılar bazaar [24],

Çan Stone

Çan stones are rhyolitic tuffs, the pyroclastic product of the Biga Peninsula Oligocene volcanism, with widespread outcrops around the Çan district of Çanakkale. Its history goes back to the settlement history of the villages around the Çan district. Since people living in this region are close to this stone and can easily obtain it, they used it as a coincidence in their structures in the past.

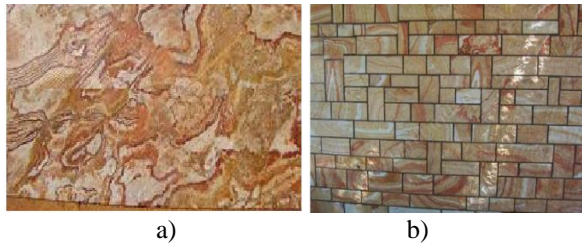


Fig 3. Application areas of Çan stone a) Patterned structure, b) Exterior cladding [11]

Çan stone is a stone with a high appeal with its patterned appearance (Fig 3-a). The production of the stone is made from the quarries around the villages of Söğütalan, Haliğa, Uzunalan, Göle, Bilaller and Dereoba in the district of Çan [11]. Due to their lightness, easy processing, and good thermal and sound insulation, they are used as capstone and decorative light building stone for building exterior covering (Fig 3-b). Stones have also been used on the walls of mosques, on the covering of historical artifacts and art structures since ancient times. The Çan stone has different motifs of light yellowish, cream, reddish, brown.

Küfeki Stone:

Küfeki stone is an organic sedimentary stone composed of limestone, silica and fossil (like oyster and mussel) sediments. It is a compact stone with fine-grained and sandy appearance, fossiliferous, void and crystalline, in light beige, light yellow, gray tones. It is soft before it comes off the stove. So it is very easy to process. Then it hardens by taking carbon dioxide gas from the air. This hardening continues for a long time. Over the years, its strength increases relative to concrete and its lifespan reaches up to 2,500 years. Küfeki stone, which has been used in many works throughout history, was used in many important structures such as city walls, aqueducts, Topkapı Palace, Süleymaniye Mosque during the Roman, Byzantine and Ottoman periods (Fig 4 a and b). Stone found a very rich usage area in the works of Mimar Sinan during the Ottoman period. In important structures that affect the silhouette of Istanbul, such as Edirne Selimiye Mosque, Şehzade Mosque, Süleymaniye Mosque and Mihrimah Sultan complexes. Küfeki stone blocks, which were prepared from dense and homogeneous layers extracted from the vicinity of Bakırköy, were used. Mimar Sinan used a wide range of limestone in his buildings, such as in the outer walls, bodywork and outer covering, in the interior as interior wall material and floor covering, in the carrier legs, arches, portals, altars and railings [25].

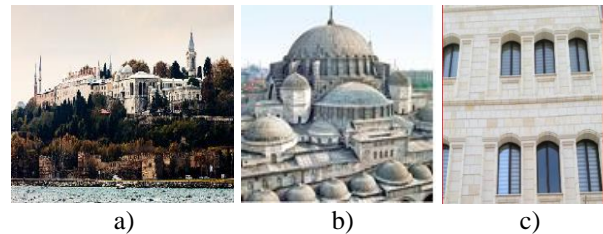


Fig 4. Küfeki stone applications a) Topkapı palace [26], b) Süleymaniye mosque [27], c) exterior covering [28].

Methods

Samples with dimensions of 150x60x20 mm for thermal tests and 100x100x100 mm for

pressure and abrasion tests were prepared from the stones obtained from the quarries. Chemical analyzes of the stones were determined and shown in Table 1. The following tests were applied to the stones.

The measurement procedures have been performed with “*Shotherm-QTM*”, conducting measurement in the temporary regime and running in the hot-wire method (Fig. 5). This device was used to perform measurements in accordance with the DIN 510406 norm from 3 different spots on each sample under the room temperature of between 22 °C and 25 °C, taking the calculations of the arithmetic mean of these 3 values. The device's thermal conductivity coefficient has a tolerance of 5% between 0.02 and 6 W/mK [29, 30]. The outcome of the measurements is provided in Table 2.



Fig 5. Thermal conductivity meter unit

Endurance tests have been conducted on the samples as per TS 699 standard [31]. Compressive strength tests have been conducted on the samples with the device of the brand Ele International, offering the following features: 3000 kN loading capacity; digital control panel; adjustable loading rate; applying uniaxial force. Volume loss abrasion outcome for 88 rpm within the scope of the frictional abrasion tests are provided in the Table 2.

The aim of water absorption test (WAR) is to identify the dry volume, in where the ice crystals within can expand, as the building materials freeze in direct contact with the water [32]. This feature provides an assurance for the material against freezing. Each sample's dry weight (W_k) has been identified. Then level of water is increased gradually within the water tank hosting the samples, water is added into the tank

in a manner to ensure the samples to be submerged. The change of the weight of samples based on time is provided in Figure 3. Upon maintaining the samples within the water for 48 hours, they have been removed out of the water and wiped accordingly, revealing the water-absorbed weight (W_d), while on the other hand, calculating the water absorption ratio with the Eq. 1.

$$\text{WAR} = \{[W_d - W_k] / W_k\} \cdot 100 \quad (1)$$

Dry weights of the samples have been taken with the weighing machine with a tolerance of 1%, while the levels of density levels have been calculated by determining the volumes of the samples.

Results and Discussions

In this study, which was conducted to investigate the thermal and mechanical properties of some stones with large reserves and used in the provinces and districts of Bilecik, Edirne, Çanakkale and Istanbul in the Marmara Region, the following findings were determined.

Lefke stone:

It is a sandstone type building material used as coating, ground stone and curbstone in buildings in Bilecik and its surrounding provinces. The average density of the stone is 2.18 g/cm³, its porosity is 10.38 %. The water absorption rate is 5.93 %. Compressive strength was determined as 74.4 MPa and wear rate as 10.34 %. Lefke stone seems to have a thermal conductivity coefficient of 0.860 W/mK, which can be considered low in its class. Also, when compared to some of the building materials given in Table 3, granite looks better than marble and limestone, but has about the same value as concrete. For this reason, if it is used as a wall covering material in buildings, it will provide heat and sound insulation. In addition to these, the compressive strength value of Lefke stone seems to be approximately the same as its class materials. Lefke stone seems to be suitable for both the carrier (limit value

68.7 MPa) and coating (limit value 39.2 MPa) in the building with a pressure value of 74.4 MPa (according to TS 11145 [33]). It is also used as a floor covering material with a wear loss value of 10.34 %.

Keşan Stone:

Keşan stone is from the sandstone class like Lefke stone and is generally used as a building and covering material. However, since it has a hardness between 5-6 Mohs, 4.83 % volume abrasion and 81.3 MPa compressive stress, in addition to its usage area, it is widely used in bearing walls and flooring as floor covering material and for decorative purposes. As seen in Table 2, the compressive stress of Keşan stone appears to be better than materials other than granite. Although the thermal conductivity value (1.204 W/mK) is higher among the examined stones, it is smaller than granite and marble, and about the same as limestone (Table 3). With its porosity rate of 7.7 %, it is smaller than the stones of its class (sandstones).

Çan Stone:

Among the stones examined, this stone has the smallest thermal conductivity coefficient (0.342 W/mK). For this reason, it is very advantageous in terms of energy saving to be used as a facing stone in building exterior cladding, as it is very good for heat insulation and sound insulation. Due to the light weight (1.45 kg/m³), patterned structure and easy processing of the Çan stone, it is also used extensively for decorative purposes. For this reason, the stones do not disperse at temperatures of 1.175 °C. Commonly used in fireplaces. With 9.65 % water absorption value indicates that it can be used in humid environments. Move thermal conductivity coefficient (0.342 W/mK) and compressive strength (13.2 MPa) values. They are smaller than the materials shown in Table 3, For this reason, it does not seem appropriate to be used on load-bearing walls. Çan stone is not suitable for flooring with a volume abrasion value of 15.55 %.

Küfeki Stone:

Küfeki stone is an organic sedimentary stone and is very soft and easy to work when extracted from the quarry. It hardens over time and gains strength, so it is used for many years. The use of stone in many buildings during the Roman, Byzantine and Ottoman periods is an indication of this. This is why Mimar Sinan uses it as a material for exterior walls and exterior cladding, as interior wall material and floor covering for interiors, for carrier legs, as arch and altar material. The stone is important in terms of thermal insulation and sound insulation due to its 0.564 W/mK thermal conductivity coefficient. The Çan stone has a better appearance than the similar materials given in Table 3. Compressive strength value (13.2 MPa) is the value of the stone after 28 days of drying and this value will increase in the long run. Historical buildings are indicators of this fact.

In Figure 6, the thermal and mechanical properties of the examined stones are shown collectively to evaluate them together. The change in weights with respect to time in the water absorption test is shown in Figure 7, and the drying rates are shown in Figure 8. In the case of examining the drying rates, it can be said that the four local stones examined have breathing ability, albeit slightly.

Table 1.The chemical composition of the samples (%)

Component Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Loss of ignition	Undefined
Lefke stone:	58.12	16.31	9.62	-	1.21	0.45	8.52	5.86
Kesan stone	69.65	14.70	6.65	-	-	0.13	6.23	1.74
Çan stone	69.56	13.21	0.93	0.43	0.20	5.17	7.18	3.42
Küfeki stone	22.61	16.31	1.41	52.31	1.18	0.28	7.70	6.21

Table 2.Thermal and mechanical properties of stones

Materials	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mK)	Compressive strength (MPa)	Water absorption (%)	Volume abrasion (%)
Lefke stone	2.18	0.860	74.4	5.93	10.34
Kesan stone	2.42	1,204	81.3	18.63	4.83
Çan stone	1.45	0.342	13.2	9.65	15.55
Küfeki stone	1.68	0.564	10.4	5.7	18.13

Table 3.The physical properties of some building materials [34].

Materials	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/mK)	Compressive strength (MPa)
Concrete	1906	0.814	20
Granite	2643	1.73	120
Limestone	2483	1.16	35
Sandstone	2235	1.85	80
Marble	2603	2.77	50
Common brick	1602	0.692	16

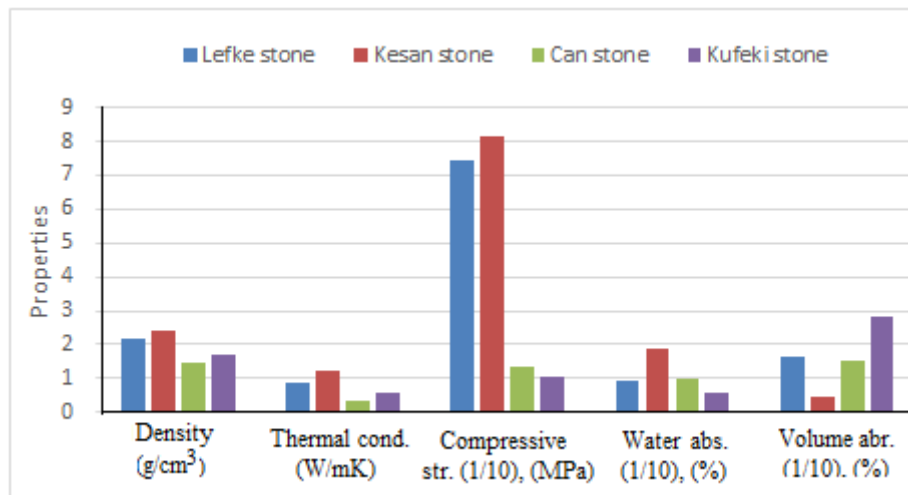


Fig.6. View of the physical properties of the stones together

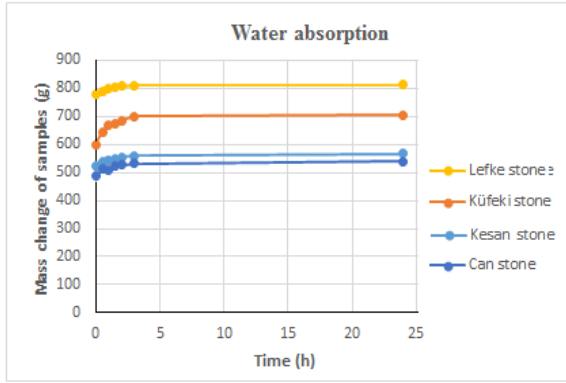


Fig 7. Mass change of stones based on time in water absorption test.

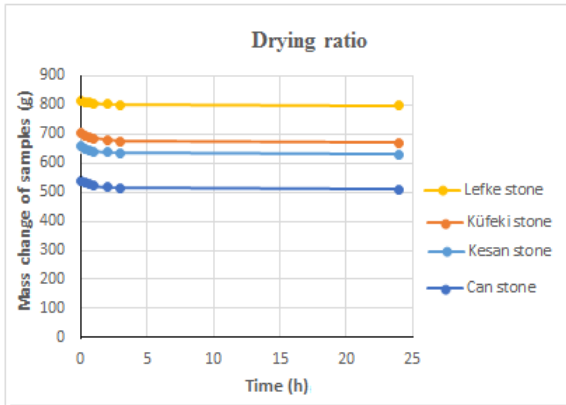


Fig 8. Mass change of stones based on time in drying test

Conclusions

The thermal and mechanical properties of the local stones used as building structural elements in the centers and districts of Bilecik, Edirne, Çanakkale and Istanbul were experimentally examined and the results are given below.

✓ Lefke stone, with its 0.860 W/mK thermal conductivity coefficient and 74.4 MPa compressive strength values, will provide heat and sound insulation and reduce building heating costs if it is used in the construction of load-bearing walls or as wall covering material in buildings. In addition, the low water absorption rate is an advantage in this respect.

✓ Keşan stone, like Lefke stone, is advantageous in terms of energy economy, with its compressive strength of 81.3 MPa and thermal conductivity of 1.2014 W/mK, being used instead of bricks in building load-bearing

walls or as wall covering material. In addition, with a wear rate of 4.83 %, it is preferred because it is used as a wear-resistant floor covering.

✓ Çan stone is the stone with the smallest thermal conductivity (0.342 W/mK) among the stones studied, and it is important in terms of thermal comfort. In addition to this feature, it is highly preferred to be used as briquettes or bricks in the wall construction of multi-storey buildings with its light weight (1.45 kg/m³) and 13.2 MPa compressive strength, as it will reduce the dynamic loads on the structure. The patterned structure of the stone and its ease of processing are the reasons why it is preferred for decorative purposes.

✓ When the küfeki stone is taken out of the quarry, it is very soft and easy to work, and the stone hardens over time. Because of this feature, it has been heavily preferred in historical works in the past. In addition, having a thermal conductivity value of 0.564 W/mK is an important reason for the preference of the stone in terms of energy economy.

✓ In addition to the characteristics of the stones examined, the fact that the quarry reserves are rich, easy to obtain, can be used directly by cutting and the cost is low are also accepted as an important reason for preference.

References

1. Vardar M. Mermerlerin uygarlık tarihindeki yeri, *Mermer Dergisi*, Sayı:12, 1990.
2. Yüzer E, Angı S, Nerede hangi doğaltaş, *Hanlar-Kervansaraylar Geleneksel ve Modern Mimaride Taş Sempozyumu*, 29-30 Kasım 2007, 155-164, Antalya.
3. Onargan T, Deliormanlı AH, Saydam S, Hacımustafaoğlu SR, Mermerlerde yüzey sertliğinin dayanıma olan etkilerinin araştırılması, *II. Mermer Sempozyumu*, 29-34, 2000 Afyon.
4. Taşlıgil N, Şahin G. Yapı malzemesi olarak kullanılan Türkiye doğal taşlarının iktisadi coğrafya odağında analizi", *Marmara Coğrafya Dergisi*, 33, 2016, 607-640
5. Pivko D. Natural stones in earth's history, *Acta Geologica*, 58, 2003, 3-86.

6. Gevrek Aİ, Kazancı N. İğnimbrit oluşumu ve özellikleri, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Ankara, 38, 1991, 39-42.
7. Kazancı N, Gürbüz A. Jeolojik miras nitelikli Türkiye doğal taşları, *Türkiye Jeoloji Bülteni*. 57: 1. 2014
8. Dinçer İ, Özvan A, Akın M, Tapan M, Oyan V. İğnimbritlerin kapiler su emme potansiyellerinin değerlendirilmesi. Ahlat taşı örneği, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17 (2), 2012, 64-71.
9. Duran F. Erciyes volkanizmasının oluşumu, Koççağız Köyü (Kayseri) dolayının stratigrafisi ve tüflerin yapı-kaplama taşı olarak kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 2009, Adana.
10. Kaygısız H. Kayseri yöresindeki yapıtaşlarının fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 2010, Adana.
11. Türkdönmez O, Bozcu M, The geological, petrographical and engineering properties of rhyolitic Tuffs (Çan stone) in Çan-Etili Area (Çanakkale), NW Turkey: Their Usage as Building and Covering Stones”, *Open Journal of Geology*, 2, 2012, 25-33.
12. Devecioğlu AG. An investigation on the heat conduction parameters of porous building stones, *Master Thesis*, 2001, Fırat University.
13. Bakış A, Işık E, Hattatoğlu F, Akıllı A. Jeolojik miras nitelikli Ahlat Taşı'nın inşaat sektöründe kullanımı, *III. Uluslararası Ahlat-Avrasya Bilim, Kültür ve Sanat Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (Editörler Doğru M. ve Aksoy E.), 46-59, 22-24 Eylül 2014, Ahlat- Bitlis.
14. Bicer A. Ahlat ve Malazgirt yapı taşlarının bazı fiziksel özellikleri, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 31(2), 2019, 301-307.
15. Bicer A. Some physical properties of the building stones from southeastern Anatolia region, *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 2(1), 2019, 9-15.
16. Bicer A. Some physical properties of the building stones from Elazığ-Nevşehir region, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 2019, 96-102.
17. Demir I., The usage properties of Kırşehir regional rocks as crushed stone aggregate”, *Journal of Polytechnic*, 8(1). 2005, 111-121.
18. Çavumirza M, Kılıç Ö, Anıl M. Mucur (Kırşehir) yöresi kireçtaşı mermerleri ve travertenlerinin fiziko-mekanik özellikleri, *Türkiye iv. Mermer Sempozyumu (mersem'2003) bildiriler kitabı* 18-19 Aralık 2003.
19. Daloğlu G, Emir E. The assessment of tuffs located at Eskisehir-Derbent region as the natural building stone , *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, Vol: XXIII, No:1, 2010
20. Kılıç I, Edirne (Keşan) Bölgesi Kumtaşlarının Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, 2009, Edirne.
21. Kılıç İ, Gültekin AH.. Sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak kumtaşı, *Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu (ISBS 2010)*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 26-28 Mayıs 2010, 51-54.
22. Selim HH, Karakaş A, Coruk Ö. Tarihi eserlerde doğal yapıtaşı olarak kullanılan Lefke taşının (Osmaneli/Bilecik) jeolojik ve mühendislik özellikleri, *DÜMF Mühendislik Dergisi* 10:(3), 2019), 1019-1032
23. URL1-<https://www.dogrulukpayi.com/dogrulama/aturk-un-eskisehir-valilik-binasini-liseye-tahsis-ettigi-iddiasi>
24. URL-2-
<https://www.kesan.bel.tr/projegoster/kunduracilar-carsisi.html>
25. Avsaroglu N. Anadolu'nun binlerce yıllık doğal taşları, “Küfeki taşı”, MTA Genel Müd., February-2020, 114-124
26. URL-3, <https://www.islamveihsan.com/topkapi-sarayi-tarihi.html>
27. Kolay İ, Çelik S. Ottoman stone acquisition in the Mid-Sixteenth Century: The Süleymaniye Complex in Istanbul”, *MUQARNAS*, .23, Brill Academic Pub., 2006, 251-272.
28. URL-4, <https://www.istanbultasi.com/istanbul-kufeki-tasi-kategori/dis-cephe-kufeki-tasi-kaplama>.
29. Vysniauskas VV, Zikas AA. Determination of the thermal conductivity of ceramics by the Hot-Wire Technique. *Heat Transfer Soviet Research*, 20 (1): 1988, 137-142.
30. Denko S. Shotherm Operation Manual No 125-2. K.K. Instrument products department, 13-9, Shiba Daimon, Tokyo, 105, 1990, Japan
31. TS 699, The test and experiment methods of natural building stones, *TSE*, 2009, Ankara
32. Biçer A., Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as aggregates, *Journal of Building Engineering*, Volume 42, October, 2021, 102472.
33. TS 11145, Konglomera Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan, *TSE*, 1993, Ankara
34. Toksoy M. Thermal conductivity coefficients of industrial materials, *Journal of Engineers and Machinery*, 347, 1988, 12-15.



Araştırma Makalesi / Research Article

Eskişehir Bastnasit Cevherinde Bulunan Lantanın Zenginleştirilmesi

*Enrichment of Lanthanum from Eskişehir Bastnaesite Ore*İbrahim Dolak^{1*}, Rüstem Keçili²¹Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojileri Bölümü, idolak@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2095-7614>²Anadolu Üniversitesi, Yunus Emre Sağlı Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler Bölümü, rkecili@anadolu.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8377-9042>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 4 Ocak 2022

Düzeltilme: 4 Şubat 2022

Kabul: 4 Şubat 2022

Online 30 Mart 2022

Anahtar kelimeler:

Lantan Zenginleştirme, Bastnaesit cevheri, Flotasyon,

ÖZ

Bu çalışmada, Eskişehir Sivrihisar'da yer alan ve ülkemize ekonomik getiri açısından çok önemli bir yere sahip bastnasit cevherindeki lantan elementinin flotasyon tekniği ile seçici olarak cevherden ayırımı gerçekleştirildikten sonra çözelti ortamında zenginleştirilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın ilk kısmında bastnasite bileşen analizi uygulanmış ve içeriğinde yer alan seryum, toryum ve lantan gibi nadir toprak elementlerinin miktarları belirlenmiştir. bastnasit cevherindeki lantan flotasyon tekniği ile kompleks cevher ayrılarak zenginleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın en önemli kısmı ise flotasyondan önce bastnasitin kristal yapısı değiştirilerek belirli bir tanecik boyutunda serbestleşme derecesi sağlanması ve daha sonra numunenin flotasyon tekniği ile lantanın etkili bir şekilde ve yüksek verimle ayrılmasıdır. Diğer taraftan, sülfürleme işlemi cevherin kristal yapısının değiştirilerek belirli bir boyutta serbestleşme derecesini arttırmak için yapılmıştır. Bunun için, gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda sülfürleme prosesine ortam sıcaklığı, zaman ve uygulanan H₂S derişiminin etkisi, flotasyon verimine ise ortam pH'ı, pülp yoğunluğu, toplayıcı miktarı ve canlandırıcı-bastırıcı reaktiflerin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, optimum koşullarda bastnasitin içeriğinde yer alan lantanın flotasyon verimi %95'tir. Aynı zamanda, elde edilen konsantrde lantan tenörü % 1,13'den % 11,03'lere kadar değiştiği belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 4 January 2022

Revised: 4 February 2022

Accepted: 4 February 2022

Available Online 30 March 2022

*Keywords:*Enrichment of Lanthanum,
Bastnaesite Ore, Flotation

ABSTRACT

This research was conducted for the enrichment of the lanthanum in bastnaesite ore having rare earth elements that is located in Sivrihisar district of Eskişehir. This ore sample has high importance for Turkey's economy. In the first step of the current research, the analysis of the components exist in ore was carried out and the amounts of rare earth elements (i.e. thorium, cerium and lanthanum) in the ore samples were determined. In next stage of this research, the selective separation and enrichment of the target lanthanum in the ore samples by applying the flotation process was aimed. One of the most crucial aspect of this research is to change the crystal structure of the ore prior to flotation process to provide a certain particle size and to effectively separate the lanthanum from the mineral structure via flotation. The applied process to increase the degree of liberation at a certain size through changing the crystal structure of the ore is the sulfurization process. For this aim, the impact of temperature, time and the amount of H₂S on the sulfurization process while the impact of medium pH, amount of collector, pulp density and some stimulating and suppressing reagents on the efficiency flotation process were carefully investigated. The achieved results showed that the efficiency of the flotation process for lanthanum in the ore samples was found as 96.1%. under optimum parameters. On the other hand, lanthanum grade in the concentrated sample significantly increased from 1.0% to 10.35%.

Doi: 10.24012/dumf.1053377

* Sorumlu yazar

Giriş

Lantan ilk kez C. G. Mosander tarafından 1839'da keşfedilmiştir. Periyodik cetvelde Lantanidler grubunun ilk elementidir. yoğunluğu 6.1 g/cm^3 olan lantanın Atom ağırlığı 138,905 akb, atom numarası 57, erime noktası $920 \text{ }^\circ\text{C}$ ve kaynama noktası $3470 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Lantan diğer nadir toprak elementleri ile birlikte doğada karışık halde bulunmasına rağmen özellikle monazit ve bastnasit içerisinde yer alır. Aynı zamanda toryum, uranyum ve plutonyum'un fisyon tepkimeleri sonunda açığa çıkan ürünlerde de lantan bulunur [1].

Lantan, projektörlerin üretiminde yaygın olarak kullanım alanı bulan karbon temelli aydınlatma sistemlerinin üretim proseslerinde, La_2O_3 formunda camın alkali direncinin artmasına katkı sağladığı için optik ve cam malzemelerin özellikle infrared ışınlarını absorblayan camlar, kameralar, teleskoplar ve lenslerin üretim proseslerinde, demire katkı maddesi olarak eklenerek granüllü demir üretimi proseslerinde, hidrojen emici özellikteki sünger alaşımlarında, çeliğin içeriğine ilave edilerek malzemenin darbe ve genleşme dayanıklılığının artırılmasında, katalizör olarak da elektronik vakum tüplerinin üretilmesinde kullanım alanı bulmaktadır [1-5].

En değerli bastnasit, fluorit ve barit cevheri yatağı ülkemizde Eskişehir Sivrihisar ilçesi'nde bulunmaktadır. Burada yaklaşık %3 tenörlü 4 000 000 ton civarında nadir toprak elementini içeren cevheri yer almaktadır. Cevherin içeriğindeki nadir toprak elementlerinin miktarı bastnasit mineraline bağlıdır. Fakat cevherin içeriği ve yapısı fluorit ve barit ile beraber oldukça komplekstir. İçeriğinde yer alan elementler ve özellikle düşük tenörlü seryum, toryum ve lantan içeriğine sahip olması nedeniyle oldukça önemlidir. Nadir toprak elementleri kompleks yapıdaki cevherde yer alan bastnasit mineralinin içerisinde ve cevher yapısında yaklaşık % 1.23 oranında lantan tenörü yer almaktadır [1]. Cevher yatağında gerçekleştirilen araştırmaların tarihi 1959'a kadar uzanmaktadır. Bu araştırmaların ilk aşamasında odaklanılan noktalar cevher eşmenin oluşumu ve yatağın rezervidir [6,7]. Aynı zamanda, cevher yatağının teknoloji kaynaklı problemlerini çözmek için de bazı ön araştırmalar

yapılmıştır [8]. Nadir toprak elementlerinin yer aldığı minerallerin çok ince taneli yapıda olması, fiziksel yöntemler kullanılarak zenginleştirilmesini ve içeriğinin belirlenmesini güçleştirmektedir. Bu noktada, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından nadir toprak elementlerinin gerekli analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre numunelerde lantan, seryum, neodimyum ve niyobyum gibi nadir toprak elementleri ve toryum varlığı belirlenmiştir. Aynı zamanda nadir toprak minerallerinin ise bastnasit formunda olduğu sonucuna varılmıştır [9].

Cevher içeriğinde yer alan lantan ve nadir toprak elementlerinin etkili bir şekilde ayrılması için gerçekleştirilen araştırmalarda, asit liçi [10-12] ve flotasyon [13-16] gibi farklı teknikler uygulanmış, fakat lantanın zenginleştirilmesi istenilen seviyede gerçekleştirilememiştir. Çözelti içerisinde yer alan lantanın ve nadir toprak elementlerinin seçici ve etkin bir şekilde ayrılmasına yönelik olarak adsorpsiyon-biyosorpsiyon [17-22] ve ekstraksiyon [23-32] teknikleri uygulanır.

Bu çalışmada, Eskişehir ili Sivrihisar ilçesi'nde yer alan ve ülkemiz için ekonomik değeri oldukça fazla olan bastnasit cevherinden lantanın flotasyon tekniği ile zenginleştirilmesi ve liç işlemi ile çözültüye alınması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın ilk kısmında cevher örnekleri ilk önce belirli tanecik boyutuna gelmesi için öğütülmüştür. Daha sonra cevher numunelerinin tanecik boyutunun homojen hale gelmesi için elekten geçirme işlemi uygulanmıştır. Sonraki aşamada, cevher numunelerinin içeriğindeki bileşenler analiz edilmiş ve yapıda yer alan nadir toprak elementlerinin (toryum, seryum, lantan vb.) miktarları belirlenmiştir. Daha sonra, cevher numunesi içindeki lantanın flotasyon tekniği uygulanarak yapıdan ayrılması ve zenginleştirilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, cevherin serbestlik derecesinin ve flotasyon veriminin artırılması için flotasyon işlemine başlamadan cevher numunesine sülfürleme işlemi uygulanmıştır. Sülfürleme işleminde deneysel koşulların optimizasyonunun sağlanması için, zaman, sıcaklık ve H_2S miktarının sülfürleme işlemine olan etkisi araştırılmıştır. Diğer taraftan, ortam pH'ı, toplayıcı miktarı, pülp yoğunluğu ve bazı canlandırıcı ve bastırıcı reaktiflerin flotasyon verimine etkisi incelenmiştir. Optimum

koşullarda elde edilen sonuçlar cevher numunesinde yer alan lantanın flotasyon veriminin %95 olduğunu göstermiştir. Bu yöntemle ortaya çıkan konsantride lantan tenörü oranı % 11,10'lara kadar yükseltilmiştir. Araştırmanın son kısmında, flotasyon tekniği ile cevher numunesinden ayrılan ve zenginleştirilen lantanın “sülfatlaştırıcı kavurma” ve “su liçi” teknikleri kullanılarak çözelti ortamına alınması sağlanmıştır. Bu işlemlerde, konsantr numunelere yüksek sıcaklıkta kavurma işlemi uygulanmış, uygulanan kavurma sıcaklığı ve zaman gibi faktörlerin proses verimine etkisi araştırılmıştır. Belirlenen optimum koşullar altında lantanın yaklaşık tamamının çözelti ortamına alındığı belirlenmiştir.

DeneySEL Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel süreç 5 ana kategoride toplanmıştır. Bunlar;

- ✓ Cevher numunelerinin parçalanarak öğütülmesi ve deneysel çalışmalara uygun tanecik boyutuna getirilmesi, eleme ile homojen tanecik boyutunun elde edilmesi.
- ✓ Homojen tanecik boyutundaki cevher numunelerinin içeriğinin analizi. Bu aşamada cevher numunelerinin içeriğinde yer alan lantan ve diğer nadir toprak elementlerinin miktarlarını belirlemek için numunelerin çözünürleştirme işlemleri HF/HNO₃ karışımında sıcaklık ayarlı mikrodalga (Berghow marka MWS-2 model) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cevher numunesi içerisindeki hedef elementlerin analizleri İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) (Perkin Elmer marka 2100 model) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre cevher numunesinin %1,01 seryum, % 1,23 lantan ve % 0,029 oranında toryum içerdiği belirlenmiştir.
- ✓ Cevher numunesindeki lantana uygulanan flotasyon veriminin artırılması için sülfürleme işleminin uygulanması ve gerekli parametrelerin optimize edilmesi: Bu aşamada numunelere uygulanan sülfürleme işlemi 1,3 L iç hacme ve 2 cm et kalınlığında bir hücresi olan, 250 atm basınca ve 350 °C sıcaklığa dayanıklı tasarlanmış ve Cr-Ni çeliğinden üretilmiş otoklav kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Sülfürleme işleminin gerçekleştirildiği otoklav

- ✓ Sülfürleme işlemi uygulanmış cevher numunelerindeki lantanın flotasyon tekniği ile yapıdan ayrılarak deriştirilmesi. Flotasyon tekniği uygulanırken Denwer marka flotasyon cihazından faydalanılmıştır. Sonraki aşamada deriştirilmiş olan ve artık numuneler içerisinde yer alan seryum ve diğer nadir toprak elementlerinin analizi ICP-OES cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

- ✓ Flotasyon işlemi uygulanarak cevher içeriğinden ayrılan ve konsantr edilen lantanın çözelti içerisine alınması. Bu aşamada ise sülfatlaştırıcı kavurma ve su liçi teknikleri uygulanmıştır. Bu amaçla, kavurma aşamasında Carbolite marka tünel fırından faydalanılmıştır. Kavurma aşaması sonrası çözeltiye alınan ve artıka kalan lantanla birlikte diğer nadir toprak elementlerinin analizleri de ICP-OES ile gerçekleştirilmiştir.

✓ 2.1.Sülfürleme işleminde kullanılan kimyasallar

Sülfürleme işlemi otoklav içerisinde aşağıdaki reaksiyonlar temelinde gerçekleştirilmiştir.

- ✓ $FeS_2 \rightarrow FeS + S$ (Oksijensiz ortamda 725 °C'de kavurma işlemi) (1)
- ✓ $2FeS + H_2SO_4 \rightarrow H_2S(g) + FeSO_4$ (2)

Reaksiyon (1) ve (2)'den görüldüğü gibi sülfürleme aşamasında sülfür kaynağı ve asit olarak sırasıyla pirit ve sülfürik asit kullanılmıştır.

Flotasyon tekniğinde kullanılan kimyasallar

Seryum flotasyonunda, toplayıcı olarak potasyum amil ksantat (Merck marka), köpürtücü olarak DW-250, canlandırıcı olarak ise FeCl₃(Merck marka), ortamın pH'ının ayarlanmasında NaOH ve 0.1 M HNO₃ (% 65'lik) ve bastırıcı olarak Na₂SiO₃ (Merck marka) çözeltisi kullanılmıştır.

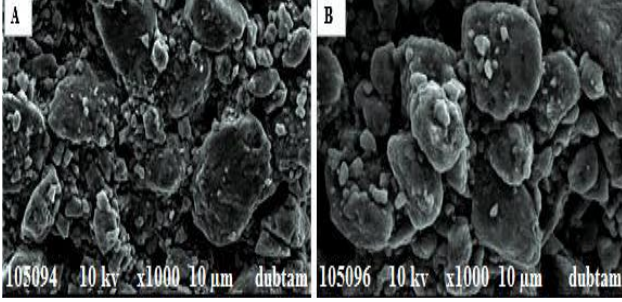
Diğer taraftan, sülfatlaştırıcı kavurma liç işleminde H₂SO₄ (Fluka marka, % 98'lik) ve bidistile saf su, çözünürleştirme işleminde ise HF ve HNO₃ (Merck marka) kullanılmıştır.

Bastnasit cevher numunesinin karakterizasyonu ise SEM (FEI marka Quanta FEG 250 model) ve FT-IR (Perkin Elmer marka Spectrum 400 FT-IR model IR spektrofotometresi) ile gerçekleştirilmiştir.

Lantan analizlerinde kullanılan seryum standartları La(NO₃)₃ tuzundan (Merck marka) hazırlanmıştır. Bunun için 100 mgL⁻¹ konsantrasyonda stok çözelti hazırlanarak analizlerde 1.0, 5.0, 10.0 ve 20.0 mgL⁻¹ konsantrasyonda standartlar kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bütün deneyler aşamalarda, işlem öncesi ve işlem sonrası pH ölçümlerinde dijital pH metreden (Mettler Toledo marka) faydalanılmıştır.

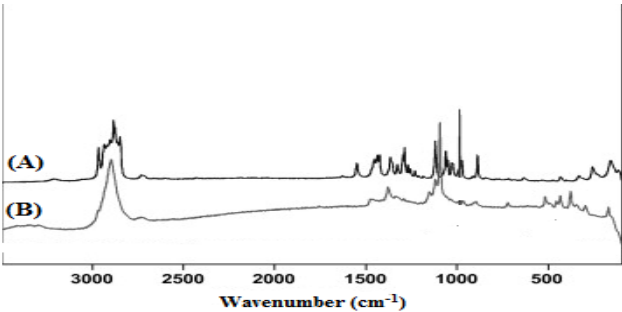
Cevher numunesinin karakterizasyonu

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri



Şekil 2. Bastnasit cevherine ait SEM görüntüleri A-sülfürleme işlemi öncesi; B- sülfürleme işlemi sonrası

FT-IR Analizleri



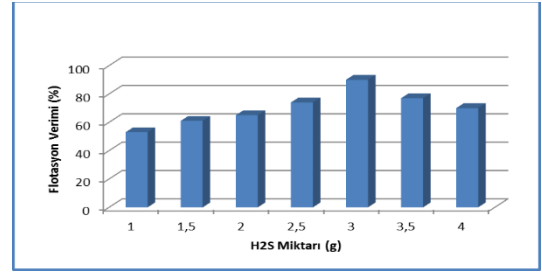
Şekil 3. Bastnasit cevherine ait FT-IR spektrumları A-sülfürleme işlemi öncesi; B- sülfürleme işlemi sonrası

Flotasyon İşleminde Önce Optimum Sülfürleme Koşullarının Tespit Edilmesi

Flotasyon işleminden önce optimum sülfürleme koşullarının tespit edilmesi amacıyla ilk önce bastnasit cevher numunesinden lantanın ayrılması için flotasyon tekniği kullanılmış fakat oldukça düşük verim elde edilmiştir. Bu sonucun sebebinin cevher numunesinin minerolojik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sorunun ortadan kaldırmaya yönelik olarak serbestleşme derecesini yükseltmek için sülfürleme işlemi uygulanmıştır.

Sülfürleme ortamında kullanılan optimum H₂S miktarının belirlenmesi

Gerçekleştirilen deneyde çalışmalarda sülfürleme ortamındaki H₂S miktarının flotasyon verimine etkisi araştırılmıştır. Şekil 4'de elde edilen sonuçlar verilmiştir.

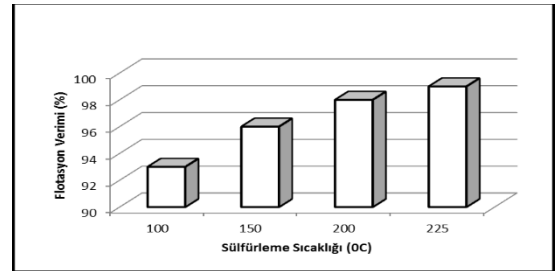


Şekil 4. H₂S miktarının Lantanın flotasyon verimine etkisi

Şekil 4'den de açıkça görüldüğü gibi, tespit edilen optimum parametrelerde (100 g cevher numunesi için 3g H₂S) lantanın flotasyon verimi %87,9 olarak belirlenmiştir ve elde edilen konsantrasyon numunedeki lantan miktarının %9,02 belirlenmiştir.

Optimum sülfürleme sıcaklığının belirlenmesi

Belirlenen optimum miktarda H₂S kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda sülfürleme sıcaklığının lantanın flotasyon verimine etkisi araştırılmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 5'de verilmiştir.

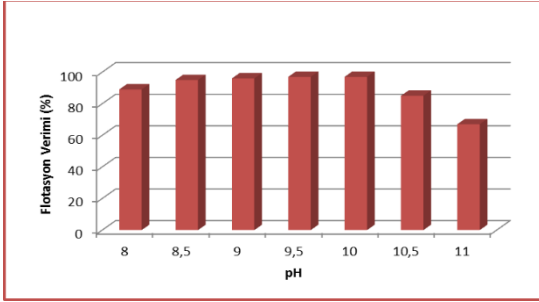


Şekil 5. Sülfürleme sıcaklığının Lantanın flotasyon verimine etkisi

Şekil 5’den de açıkça görüldüğü gibi, sülfürleme sıcaklığı arttıkça flotasyon verimi artmaktadır. Tespit edilen ideal koşullarda, lantanın flotasyon verimi % 92.17 olarak belirlenmiş, elde edilen konsantrede numunedeki seryum tenörünün ise % 10.08 civarında olduğu gözlenmiştir.

Flotasyon işlemi için optimum pH’ın belirlenmesi

pH’ın Lantanın flotasyon verimine etkisi ni araştırmak için ortam pH’ı 8 ile 11 aralığında değiştirilmiş ve % flotasyon verimi hesaplanmıştır (Şekil 6).

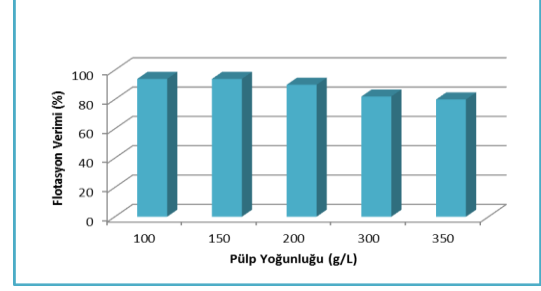


Şekil 6. pH’ın Lantanın flotasyon verimine etkisi

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, ortam pH’ının 9.5 olması durumunda en yüksek flotasyon verimine ulaşılacağını göstermiştir. Bununla birlikte, bu pH değerinde yüzen madde miktarı fazla olduğu için elde edilen konsantre numunedeki lantan tenörlerinin pH 8.50’de elde edilen konsantre tenörlerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, flotasyon verimi ile birlikte yüzen madde miktarı da önem arz ettiği için en ideal pH değeri yüzen madde miktarı da göz önünde bulundurularak 8.50 olarak belirlenmiştir.

Flotasyon işlemi için optimum pülp yoğunluğunun belirlenmesi

Lantana uygulanacak flotasyon işlemi için optimum pülp yoğunluğunun belirlenmesine yönelik çalışmalarda pülp yoğunluğu 100-350 g L⁻¹ aralığında değiştirilmiştir (Şekil 7).

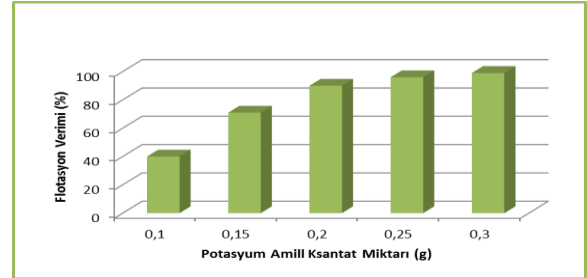


Şekil 7. Pülp yoğunluğunun lantanın flotasyon verimine etkisi

Şekilde 7’den de görüldüğü gibi, 200 gL⁻¹ pülp yoğunluğuna kadar lantanın flotasyon veriminde kayda değer bir değişiklik gözlenmemiş, bununla birlikte 350 gL⁻¹ değerine kadar çıkan pülp yoğunluğunda, elde edilen flotasyon veriminde azalma tespit edilmiştir.

Toplayıcı miktarının flotasyon verimine etkisi

Lantana uygulanan flotasyon tekniğinde kullanılan toplayıcının (potasyum amil ksantat) en uygun miktarını belirlemek için potasyum amil ksantat miktarı 0.1 ile 0.3 g arasında değiştirilerek % flotasyon verimine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Toplayıcı miktarının lantanın flotasyon verimine etkisi

Şekil 8’den görüldüğü gibi, toplayıcı miktarının 0.25 g olduğu durumda lantanın flotasyon verimi yaklaşık % 95 civarındadır. Bununla birlikte, elde edilen konsantre numunedeki tenör ise % 11.13 tespit edilmiştir.

Flotasyon işleminden sonra elde edilen konsantre numunelerden seryumun çözeltiliye alınması

Flotasyon işleminden sonra elde edilen konsantre numunelerden seryumun çözeltiliye alınması için ilk önce sülfatlaştırıcı kavurma işlemi ve sonra uygulanan liç işleminde ise ilk önce su, sonrasında 0.1 M sülfürik asit çözeltisi

kullanılmıştır. Bu amaçla, uygulanan kavurma sıcaklığı ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan sonra, liç işlemi sonrasında çözeltiliye geçen lantan miktarının zamanla değişimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Liç işlemi sonrasında çözeltiliye geçen lantan miktarının zamanla değişimi

Zaman (Sa)	Suya geçen lantan miktarı	Sülfürik asite geçen lantan miktarı	Artıkta kalan Lantan miktarı
1	14.73	78.47	7.80
2	16.46	77.69	5.85
3	20.68	77.23	2.09
4	34.75	64.97	0.23
5	35.21	64.46	0.33

Tablo 1’den de açıkça görüldüğü gibi, uygulanan flotasyon işlemi sonunda elde edilen konsantr numunede bulunan lantanın çözeltiliye geçmesi için uygulanan sülfatlaştırıcı kavurma tekniğinde en ideal sürenin 4 saat ve sıcaklık değerinin ise 700 °C olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda uygulanan kavurma işlemi sonunda konsantr numune içerisindeki lantanın neredeyse tamamı (% 99.77) çözeltiliye alınabilmiştir.

Sonuçlar

Eskişehir ili Sivrihisar ilçesi’nde yer alan ve ülkemiz için ekonomik değeri oldukça fazla olan bastnasit cevherinden lantanın flotasyon tekniği ile zenginleştirilmesi ve liç işlemi ile çözeltiliye alınması amaçlanmıştır.

Cevher numunesine flotasyon işlemi uygulandığında elde edilen flotasyon veriminin düşük olduğu belirlenmiş, o nedenle cevher numunesine serbestlik derecesini arttırmak için flotasyon işleminden önce sülfürleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonrası gerçekleştirilen flotasyon aşamasında elde edilen optimum koşullarda lantanın % 95.00’i flote edilmiştir ve konsantr numunedeki lantanın % 11.03’lere arttığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, ana cevher numunesindeki yüzdesine bakıldığında yaklaşık 10 kat bir zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında, konsantr edilen lantanın sülfatlaştırıcı kavurma liçi ile elde edilen optimum koşullarda % 99.77’si çözeltiliye alınmıştır. Lantanın özellikle birçok alanda

yaygın kullanımda olması gerçekleştirilen çalışmanın önemini ayrıca ortaya çıkmaktadır.

Kaynaklar

- [1] İ. Dolak, ‘Nadir Toprak elementleri içeren barit ve fluorit cevherinin değerlendirilmesi’ Ph.D. dissertation, Dept. Chem., Dicle Univ., Diyarbakır, Turkey, 2010.
- [2] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, ‘Removal and Preconcentration of Pb(II), Cr(III), Cr(VI) from the Aqueous Solution and Speciation of Cr(III)-Cr(VI) by Using Functionalized Amberlite XAD-16 Resin with Dithioethylenediamine’ *Asian Journal Of Chemistry*, vol. 22, no. 8, pp. 6117-6124, 2010.
- [3] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, ‘Removal and Preconcentration of Pb(II), V(V), Cr(VI) from the Aqueous Solution and Selective Separation of V(V)-Cr(VI) by Using Functionalized Amberlite XAD-16 Resin with Dithioethylenediamine’ *Asian Journal of Chemistry*, vol. 22, no. 8, pp. 6107-6116, 2010.
- [4] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, ‘Synthesis and preconcentration of Amberlite XAD-4 resin modified by dithioethylenediamine’ *Asian Journal of Chemistry*, vol 21, no. 1, pp. 165-175, 2009.
- [5] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, ‘Reduction of Cr (VI) in aqueous solutions by natural and roasted pyrite’ *Asian Journal of Chemistry*, vol. 19, no. 3, pp 2389-2396, 2007.
- [6] H. Kaplan, ‘MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi’ *MTA Dergisi*, Ankara, Türkiye, 1977.
- [7] S. Kulaksız, ‘Eskişehir toryum cevherinin değerlendirilmesi’, Ph.D. dissertation, Dept. Chem., Hacettepe Univ., Ankara, Turkey, 1977.
- [8] M.S. Çiftçi, ‘Eskişehir-Sivrihisar-Beylikahır fluoritli kompleks cevher yatağının fluorit yönünden değerlendirilmesine ilişkin ön teknolojik çalışmalar’ *MTA Dergisi*, vol. 103, p. 82-83, 1985.
- [9] Elgin G., (1983). MTA Genel Müdürlüğü, Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi, *MTA Dergisi*, Ankara, Türkiye.
- [10] M. Kul, Y.Topkaya, İ. Karakaya, ‘Rare earth double sulfates from pre-concentrated bastnasite’, *Hydrometallurgy*, vol. 93, no. pp. 129-135, 2008.
- [11] R. Vijalayakshmi, S.L. Mishra, H. Singh, C.K. Gupta, ‘Solvent Extraction of Uranium from Wet Process Phosphoric Acids’, *Hydrometallurgy*, vol 61, pp. 75-80, 2001.
- [12] R. Chi, X. Zhang, G. Zhu, Z.A. Zhou, Y. Wu, C. Wang, F. Yu F, ‘Recovery of rare earth from bastnasite by ammonium chloride roasting with fluorine deactivation’, *Minerals Engineering*, vol. 17, pp. 1037-1043, 2004.
- [13] İ. Dolak, R. Ziyadanoğulları, ‘Eskişehir bastnasit cevherinde bulunan toryumun zenginleştirilmesi’, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 10,no. 1, p. 211-220, 2019.

- [14] M. Chamsaz, M.S. Hosseini, M.H. Arbab-Zavar ‘Synergic Flotation Spectrophotometric Investigation of Rare Earth(III) Ions with Alizarin and 1,10-Phenanthroline’, *Journal of Colloid Interface Science*, vol 256, pp. 472-476, 2002.
- [15] J. Ren, S. Song, A. Lopez-Valdivieso, S. Lu, ‘Selective flotation of bastnaesite from monazite in rare earth concentrates using potassium alum as depressant’, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 59, pp. 237,245, 2000.
- [16] İ. Dolak, ‘Enrichment of Cerium from Eskişehir Bastnaesite Ore’, *Dicle University Journal of Engineering*, vol. 12. No. 2, pp. 13-20, 2021.
- [17] E.V. Oral, S. Özdemir, İ. Dolak, V. Okumus, A. Dundar, B. Ziyadanogulları, Z. Aksoy, R. Onat, R., ‘Anoxybacillus sp. SO B1–Immobilized Amberlite XAD-16 for Solid-Phase Preconcentration of Cu(II) and Pb(II) and Their Determinations by Flame Atomic Absorption Spectrometry’, *Bioremediation Journal*, vol .19, no. 2, pp. 139-150, 2015.
- [18] İ. Yener, E.V. Varhan, İ. Dolak, S. Özdemir, R. Ziyadanogulları, ‘A new method for preconcentration of Th (IV) and Ce (III) by thermophilic Anoxybacillus flavithermus immobilized on Amberlite XAD-16 resin as a novel biosorbent’, *Ecological Engineering*, vol. 103, pp. 43-49, 2017.
- [19] M.F. Baran, M.Z. Duz, S. Uzan, İ. Dolak, K.S. Celik, E. Kılınç, ‘Removal of Hg (II) from Aqueous Solution by Bacillus subtilis ATCC 6051 (B1)’, *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, vol. 8, no. 4, pp. 1-7, 2018.
- [20] İ. Dolak, ‘Ion Imprinted AffinityCryogels for the Selective Adsorption Uranium in Real Samples’, *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*, vol. 38, no. 6, pp. 115-125, 2019.
- [21] İ. Dolak, ‘Selective Adsorption of U(VI) by using U(VI)-imprinted poly-hydroxyethyl methacrylate-methacryloyl-L-histidine (p-[hema-(mah)3]) cryogel polymer’, *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 17,no. 2, pp. 3165-3178, 2018.
- [22] Z. Baysal, E. Aksoy, İ. Dolak, A. Ersöz, R. Say R., ‘Adsorption behaviours of lysozyme onto poly-hydroxyethyl methacrylate cryogels containing methacryloyl antipyrine-Ce(III)’, *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 67, no. 4, pp. 199-204, 2018.
- [23] İ. Dolak, M. Karakaplan, B. Ziyadanogulları, R. Ziyadanogulları, ‘Solvent Extraction, Preconcentration and Determination of Thorium with Monoaza 18-Crown-6 Derivative’, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 32, no. 5, pp. 1564-1568, 2011.
- [24] İ. Dolak, R. Keçili, D. Hür, A. Ersöz, R. Say, ‘Ion-imprinted polymers for selective recognition of neodymium (III) in environmental samples’, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol 54, no. 19, pp. 5328-5335, 2015.
- [25] E.V. Oral, İ. Dolak, H. Temel, B. Ziyadanogulları, ‘Preconcentration and determination of copper and cadmium ions with 1,6-bis(2-carboxy aldehyde phenoxy)butane functionalized Amberlite XAD-16 by flame atomic absorption spectrometry’, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 186, no. 1, pp. 724-730, 2011.
- [26] İ. Dolak, ‘Selective Separation and Preconcentration of Thorium (IV) in Bastnaesite Ore Using Thorium (IV)-Imprinted Cryogel Polymer’, *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, vol. 46, no. 2, pp. 187-197, 2018.
- [27] R. Keçili, İ. Dolak, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, ‘Ion imprinted cryogel-based supermacroporous trapsfor selective separation of cerium (III)in real sample’, *Journal of Rare Earths*, vol. 36, no. 8, pp. 857-862, 2018.
- [28] İ. Dolak, R. Keçili, R. Onat, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, ‘Molecularly imprinted affinity cryogels for the selective recognition of myoglobin in blood serum’, *Journal of Molecular Structure*, vol. 1174, pp. 171-176, 2018.
- [29] İ. Dolak, G. Canpolat, A. Ersöz, R. Say, ‘Metal chelate based site recognition of ceruloplasmin using molecularly imprinted polymer/cryogel system’, *Separation Science and Technology*, vol. 55, no. 2, pp. 199-208, 2020.
- [30] İ. Dolak, G. Canpolat, R. Keçili, R. Onat, Z. Baysal, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, ‘A novel lanthanide-chelate based molecularly imprinted cryogel for purification of hemoglobin from blood serum: An alternative method for thalassemia diagnosis’, *Process Biochemistry*, vol. 91, pp. 189-196, 2020.
- [31] G. Canpolat, İ. Dolak, R. Keçili, R. Onat, Z. Baysal, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, ‘Development of molecular imprinting-based smart cryogels for selective recognition and separation of serum cytochrome-c as a biochemical indicator’, *Process Biochemistry*, vol. 106, pp. 112-119, 2021.
- [32] İ. Dolak, R. Keçili, F. Yılmaz, A. Ersöz, R. Say, ‘Selective Recognition and Separation of Ubiquitin by Nanoparticle Embedded Cryogel Traps with Ubiquitin Memories Based on Photosensitive Covalent Imprinting’, *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 76, no. 2, pp. 165-171, 2021.



Sodyum Karbonat ile Aktive Edilmiş Cüruf Esaslı Karışımların Reolojik Özellikleri: Uçucu Kül ve Sıcaklık Etkisi

Rheological Properties of Sodium Carbonate Activated Slag-Based Mixes: Effects of Fly Ash and Temperature

Büşra Aktürk^{1*}

¹ İstanbul Bilgi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, busra.akturk@bilgi.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1484-7758>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Aralık 2021
Revizyon 9 Şubat 2022
Kabul 4 Mart 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Reoloji,
Tiksotropi,
Sodyum karbonat,
Cüruf,
Uçucu kül

ÖZ

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu esaslı sodyum karbonatla aktive edilen karışımların reolojik özellikleri ve tiksotropik davranışları belirlenmiştir. Bu sistemlerde cürufun uçucu kül ile farklı oranlarda ikame edilmesinin ve 10 °C, 25 °C ve 40 °C gibi farklı uygulama sıcaklıklarının karışımın eşik kayma gerilmesi, plastik viskozitesi, tiksotropisi gibi reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, sodyum karbonatla aktive edilen karışımların reolojik özelliklerinin çimento esaslı sistemler ile benzer özellik gösterdiği, uçucu kül ikamesi ile reolojik özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca, farklı uygulama sıcaklıklarının karışımların reolojik özelliklerini değiştirdiği, daha yüksek sıcaklıkta daha düşük eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 December 2021
Received in revised form 9
February 2022
Accepted 4 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Rheology,
Thixotropy,
Sodium carbonate,
Slag,
Fly ash

ABSTRACT

This study presents the rheological properties and thixotropic behaviour of sodium carbonate-activated slag/fly ash blend systems. The effect of different application temperatures such as 10 °C, 25 °C and 40 °C and the contribution of different fly ash replacement ratios on the rheological response were explored. Yield stress, plastic viscosity and thixotropy of the mixes are determined. It was found that sodium carbonate-activated mixes could have a similar rheological property with the cement-based systems, enhanced results are obtained with the fly ash substitution. Moreover, different application temperatures affected the rheological properties, higher temperatures caused lower yield stress and plastic viscosity.

Doi: 10.24012/dumf.1037766

* Sorumlu Yazar

Giriş

Beton üretiminde kullanılan çimento, üretimi sırasında yüksek miktarda CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Dünya genelinde açığa çıkan CO₂ emisyonunun yaklaşık %8'inin çimento üretimi kaynaklı olduğu bilinmektedir [1]. Son yıllarda artan CO₂ emisyonları nedeniyle pek çok sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de minimum karbon salınımı hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, çimento yerine atık malzemelerin bağlayıcı olarak kullanılması çevresel açıdan daha uygun ve sürdürülebilir bir çözüm olacaktır. Alkaliler ile aktive edilmiş malzemeler gösterdikleri erken yüksek dayanım, kimyasal etkilere ve donma-çözölmeye karşı dayanıklılık gibi olumlu özellikleri ile çimento esaslı sistemlere alternatif olmaktadır [2], [3].

Alkaliler ile aktive edilmiş malzemeler (AAM) son yıllarda gittikçe artan sayıda çalışılan konulardan biridir. AAM'lerin üretiminde bağlayıcı malzeme olarak çimento yerine yan ürünlerden granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi malzemeler ile ponza, tuf gibi doğal puzolanlar kullanılabilir. AAM'lerin özellikleri kullanılan bağlayıcının kimyasal kompozisyonu, inceliği, kullanılan aktivatör tipi ve miktarı ile uygulanan ısı küre göre değişiklik göstermektedir [4], [5]. Cüruf esaslı sistemler en çok üretilen, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek karışımlardan biridir. AAM'lerin üretiminde genellikle sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkaline aktivatör olarak kullanılması tercih edilmektedir [6]–[11]. Bu aktivatörler pH değerini artırır, bağlayıcı malzemenin çözünmesini kolaylaştırır. Ancak bu aktivatörler, genellikle sodyum silikat ve sodyum hidroksit, hızlı priz, yüksek kuruma rötesi ve mikro çatlak oluşumu gibi problemlere yol açabilmektedir [12], [13]. Ayrıca, bu malzemelerin üretim maliyeti yüksekliği ve yakıcı özellikte olmaları bu malzemeleri daha az tercih edilebilir kılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak aktivatör olarak sodyum karbonat (NC) kullanımı tercih edilmiştir. NC, çevre dostu, doğal yollarla da üretilebilir, ekonomik ve hidroksit ve silikatlara göre daha az zararlı olması özellikleri ile dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, Türkiye dünyada ikinci en büyük NC rezervlerine sahiptir [14]. Böylelikle, NC'nin ülkemizde kullanılabilir potansiyelini artmaktadır.

Yapı malzemelerinin sahip olması istenen temel özellikler; işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılıktır. İşlenebilirlik, malzemenin taze halde iken karıştırılması, yerleştirilmesi sırasında minimum enerji harcayacak, maksimum doluluk sağlayacak şekilde olmalıdır. Özellikle kendiliğinden yerleşen betonlarda, betonun kendi ağırlığı ile boşluksuz, minimum enerji ile yerleşebilir olması istenmektedir. Malzemenin işlenebilirliği, yapılan birtakım deneyler ile ölçülebilmekte, reolojik özelliklerinin belirlenmesi ile malzemenin işlenebilirliği, zamana bağlı davranışı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Malzemelerde belirlenen en temel reolojik özellikler eşik kayma gerilmesi ile viskozitedir. Eşik kayma gerilmesi malzemenin akışa geçmesi için gereken minimum gerilme, viskozite ise malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir [15]. Malzemenin eşik kayma gerilmesi ne kadar yüksek olursa malzemeyi yerleştirmek için harcanması gereken

enerji de o kadar yüksek olacaktır. Minimum enerji ile malzemeyi kalıba yerleştirmek için malzemenin eşik kayma gerilmesinin düşük olması istenmektedir.

Yapı malzemelerinin fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri ile ilgili yapılan çok sayıda çalışma bulunurken, reolojik özellikleri ile ilgili çalışma sayısı sınırlıdır. Özellikle farklı tip malzemelerin kullanıldığı özel karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesi son yıllarda daha önemli hale gelmiştir. Benzer şekilde, AAM'lerin mekanik, içyapı ve durabilite özelliklerine yönelik çok sayıda çalışma bulunurken, reolojik özelliklere yönelik az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu malzemelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesi ile uygulamada başarılı, taze hal özellikleri belirlenmiş malzeme üretimi mümkün olabilecektir.

Bu çalışmada, sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı sistemlerde uçucu kül ikamesinin ve farklı uygulama sıcaklıklarının malzeme reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu malzemelerin reolojik özelliklerine etki eden faktörler, bu malzemelerin uygulamada kullanılabilirliğine yönelik katkı sunacak; özellikle 3 boyutlu yazılım yöntemi ile üretilecek malzemeler ile ilgili gelecek çalışmalara ışık tutacaktır.

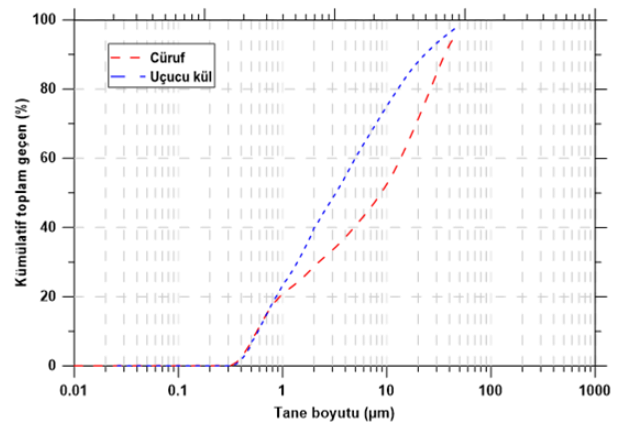
Materyal ve Metot

Malzemeler ve karışım oranları

Karışımlarda ana bağlayıcı malzeme olarak Kardemir Demir Çelik A.Ş.'den elde edilen, ASTM C989 standardına uygun granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Uçucu kül F tipidir ve ASTM C618'e uygundur. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları X-ışını floresan spektrometresi ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Bağlayıcı malzemelerin özgül ağırlıkları ve özgül yüzey alanları ve sırasıyla helyum piknometresi ve Blaine yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Cüruf ve uçucu kül için bu değerler sırası ile 2.92, 2.21 ile 4860 cm²/g ve 5236 cm²/g'dır.

Tablo 1. Bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri.

Malzemeler	Kimyasal kompozisyon (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI
Cüruf	40.6	12.6	35.7	1.2	5.8	0.1	0.13
Uçucu kül	52.6	25.0	3.3	5.8	2.1	1.0	-



Şekil 1. Cüruf ve uçucu külün tane boyutu dağılımı

Toplam 4 hamur karışımı üretilmiş olup karışımlara dair bilgiler Tablo 2'de paylaşılmıştır. Öncelikle %100 cüruf içeren kontrol karışımı üretilmiş, daha sonra uçucu kül, cüruf ile %25, %50 ve %75 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,38 olarak sabit tutulmuştur. Alkali aktivatör olarak sodyum karbonat (NC) bağlayıcı ağırlığının %6'sı kadar Na_2O içerecek şekilde kullanılmıştır. Karışımlar kullanılan cüruf yüzdesine göre isimlendirilmiştir. 100, 75, 50 ve 25 cüruf yüzdesini, "S" cürufu temsil etmektedir. Sonuçlar kısmındaki grafiklerde yer alan seri isimlendirmelerinde en sondaki 10, 25 ve 40 ise uygulama sıcaklıklarını ($^{\circ}\text{C}$) temsil etmektedir (Şekil 7 ve 8).

Tablo 2. Karışım oranları.

Karışımlar	Cüruf (%)	Uçucu kül (%)	NC (%) Na_2O	Su/Bağlayıcı
100S	100	-		
75S	75	25		
50S	50	50	6	0.38
25S	25	75		

Karışım prosedürü

Reolojik özelliklerin belirlenmesi için yapılan hamur üretimleri aşağıda belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle alkali aktivatör ile karışım suyu karıştırılmış ve alkali solüsyonu hazırlanmıştır. Aktivatör ve suyun karışımı ile ekzotermik reaksiyon meydana geldiği için solüsyon sıcaklığının 25°C 'ye düşmesi için solüsyon yaklaşık 1 saat kadar ortam sıcaklığında bekletilmiştir.

Karışım prosedürü aşamaları aşağıda belirtildiği şekildedir:

- Toz bağlayıcı malzemeler, cüruf ve uçucu kül, 30 sn süresince düşük hızda (140 ± 5 rpm) karıştırılmıştır.
- Daha sonra, aktivatör solüsyonu toz malzemeye ilave edilmiş ve 30 sn daha düşük hızda (140 ± 5 rpm) karıştırılmıştır.
- Son olarak, karışım yüksek hızda (285 ± 5 rpm) 2 dakika daha karıştırılmış ve karışım sonlandırılmıştır.

Uygulama sıcaklıklarının etkisinin belirlenmesi için reolojik deneyler 10°C , 25°C , 40°C sıcaklıklarda tekrarlanmıştır.

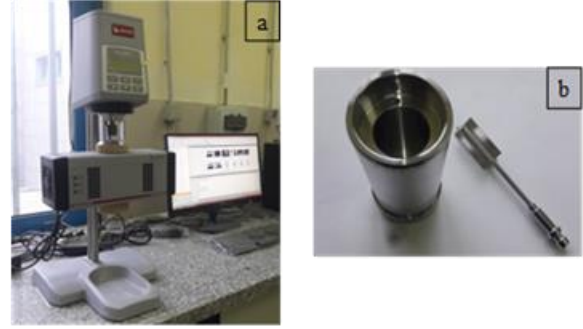
Deneysel Çalışma

Mini-slump test

Mini-slump testi üretilen hamur karışımlarının işlenebilirliğinin belirlenmesi için ASTM C1437'ye uygun olarak üretimden hemen sonra yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen karışım prosedürüne uygun olarak üretilen hamur numune, üst çap uzunluğu 70 mm, alt çap uzunluğu 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan standart Hagermann kesik konisine iki tabakada yerleştirilir. Her tabakada hamur numune 20 kez tokmaklanır. Kesik koni kaldırılır ve tabla manuel olarak 25 kez sarsılır. Sarsma sonucu elde edilen yayılma çapı iki birbirine dik doğrultuda ölçülür ve ortalama değer malzemenin işlenebilirliği olarak kaydedilir.

Reolojik ölçümler

Reolojik özellikler Anton Paar Rheolab QC rotasyonel reometresi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 2 (a)). Ölçüm için çapı 11 mm, uzunluğu 40 mm olan dört kanatlı uç kullanılmıştır (Şekil 2 (b)).



Şekil 2. (a) Rotasyonel reometre and (b) Dört kanatlı uç (four blade vane)

Yaklaşık 35 ml hamur reometre ölçüm kabına yerleştirilmiştir. Hamur üretiminden deneyin başlamasına dek geçen süre yaklaşık 5 dakikadır. Ölçümler üretimden hemen sonra alınmıştır.

Reolojik özelliklerin belirlenmesi için kademeli artan ve kademeli azalan kayma gerilmesi oranlarını uygulanmıştır. Şekil değiştirme kontrollü ölçüm ile ana reolojik parametreler olan eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi (τ) ve kayma hızı ($\dot{\gamma}$) temel reolojik özelliklerdir. Kayma gerilmesi malzemenin birim alanına uygulanan kuvveti, kayma hızı ise hız gradyanını ifade etmektedir. Bu çalışmada maksimum kayma hızı olarak 100 s^{-1} seçilmiştir. Bu değer uygulamadaki değerleri yansıttığı ve önceki pek çok çalışmada da kullanıldığı görülmektedir [16]–[20].

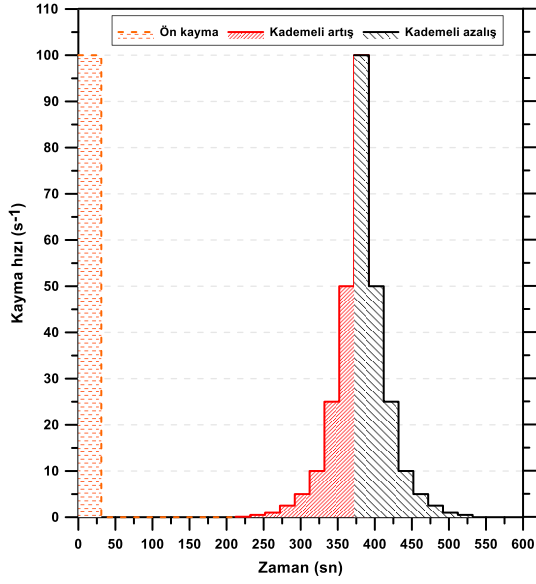
Eşik kayma gerilmesinin belirlenmesinde kayma gerilmesi (τ) - kayma hızı ($\dot{\gamma}$) eğrisinde stres platosunun net bir şekilde elde edilmesi için geniş bir aralıkta kayma hızı uygulanması gerekmektedir [20]. Bu nedenle, $0,05\text{-}100 \text{ s}^{-1}$ kayma hızı aralığının uygulanmasına karar verilmiştir. Çimento esaslı sistemlerde de bu aralığın kullanıldığı görülmektedir [16]–[21].

Akış eğrileri 3 aşamada elde edilmiştir:

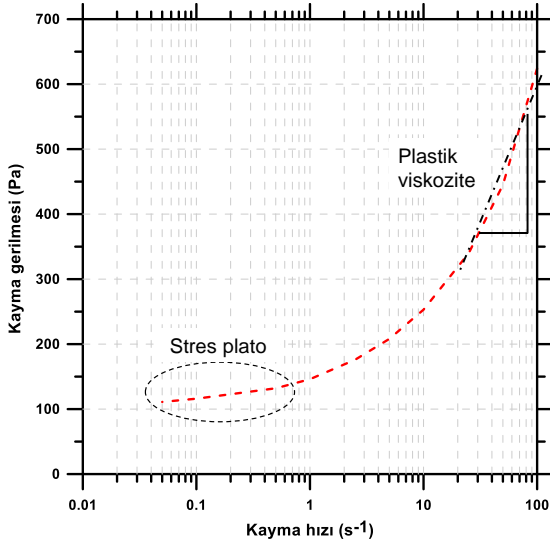
- 100 s^{-1} kayma hızında 30 sn süresince ön kayma gerilmesi uygulanması
- 180 sn dinlenme
- 0 s^{-1} 'den 100 s^{-1} 'e kademeli artış
- 100 s^{-1} 'den 0 s^{-1} 'e kademeli azalış (Şekil 3)

Kararlı kayma gerilmeleri elde edilmesi için her bir kayma hızı 20 sn süresince uygulanmıştır. Ölçüm yaklaşık 9 dakika sürmüştür. Her ölçüm elde edilen verilerin doğrulanması için tekrarlanmıştır. Ölçüm sonucunda serilerin kayma gerilmesi-kayma hızı eğrileri kayma hızı x-ekseninde logaritmik olarak gösterilecek şekilde çizdirilmiş ve azalan hız değerleri dikkate alındığında stres plato elde edilmektedir. Stres platonun ortalama değeri eşik kayma gerilmesini, 100 s^{-1} ile

25 s⁻¹ kayma hızı değerleri arasındaki eğrinin eğimi ise plastik viskoziteyi göstermektedir (Şekil 4).

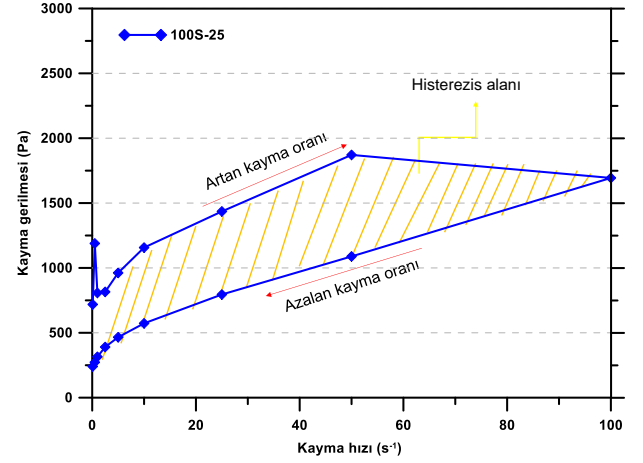


Şekil 3. Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin belirlenmesi için uygulanan kayma hızı değeri-zaman ilişkisi



Şekil 4. Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin belirlenmesi

Çalışmada NC ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül karışımlarının tiksotropik özelliklerinin belirlenmesi için tipik histerezis döngüsü reoloji metodu uygulanmıştır (Şekil 5). Çimento esaslı malzemeler için tiksotropi genellikle çıkış ve iniş eğrilerinin arasında kalan alanın hesaplanması ile belirlenir ve buna histerezis döngüsü denilmektedir. Bu metotla elde edilen sonuçlar uygulanan test prosedürlerine ve ekipmana göre değişiklik gösterdiği için hala bazı eksikleri bulunmaktadır [22]. Bu çalışmada elde edilen tipik bir histerezis döngüsü Şekil 5'te görülmektedir.



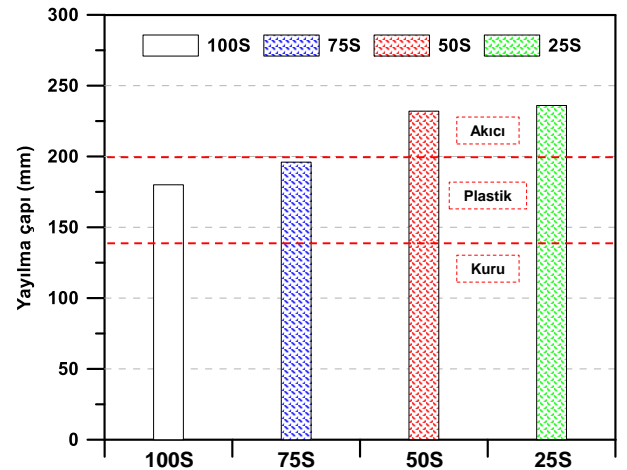
Şekil 5. Tipik histerezis döngüsü belirlenmesi

Sonuçlar ve Tartışmalar

Yayılma

Mini-slump deneyi çimento esaslı sistemlerde işlenebilirliğin belirlenmesi için uygulanan yöntemlerden biridir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar ile malzemelerin diğer reolojik özellikleri arasında ilişki kurulabilmekte; hamurda görülebilen yapısal iyileşme (*structural recovery*) ve topaklanma (*flocculation*) daha iyi analiz edilebilmektedir.

NC ile aktive edilmiş cüruf esaslı, uçucu kül katkıli sistemlerde 25 °C'de elde edilen yayılma çapları Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, kontrol serisi olan 100S'de yayılma çapı 180 mm iken, uçucu kül ikamesi ile yayılma çapı artmış; daha yüksek miktarda uçucu kül yer değiştirmesi ile elde edilen yayılma çapı daha yüksek değerlere erişmiştir. 50S ve 25S karışımlarının benzer işlenebilirliğe sahip oldukları görülmektedir. Kontrol serisi 100S ile en yüksek yayılma çapına sahip olan 25S serisi arasındaki fark %31'dir. Uçucu külün yayılma çapını artırma sebebi uçucu külün küresel tanecik sahip olması nedeni ile akıcılığı kolaylaştırmış olmasına bağlanmıştır [23].



Şekil 6. Karışımların 25 °C'deki yayılma çapları

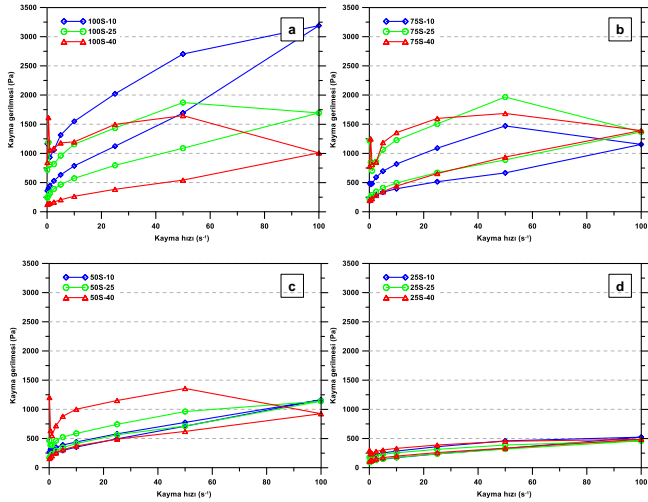
Önceki bir çalışmada, AAM'lerin malzemelerin sahip oldukları yayılma çaplarına göre malzemenin kuru, plastik ya da akıcı kıvamı olmasının belirlenebildiği ifade edilmiştir [24]. Buna göre, bu çalışmadaki tüm karışımların en azından plastik kıvama sahip oldukları, yüksek miktarda uçucu kül

kullanılan 50S ve 25S serilerinin ise akıcı kıvama sahip oldukları görülmektedir (Şekil 6).

Akış eğrileri

Farklı uygulama sıcaklıkları altında, artan ve azalan kayma gerilme oranlarına karşılık NC ile aktive edilmiş cüruf esaslı, uçucu kül katkılı karışımların gösterdiği kayma gerilmesi-kayma hızı değişim eğrileri Şekil 7 (a)-(d)'de verilmiştir.

Karışımların karıştırıldıkları sürece kayma incelmesi (*shear-thinning*) davranışı gösterdiği ve Newtonyan olmayan davranışın Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu görülmektedir. Statik koşullar altında çimento esaslı vb. malzemeler kayma kalınlaşması davranışı (*shear-thickening*) özelliği göstermektedir. Belli kayma hızı altında, görünen viskozite değerleri azalmakta, kayma gerilmesi uygulanmadığı zaman ise malzeme kendini toparlamaktadır. Şekil 7'den de görüleceği üzere tüm karışımların artan kayma hızında azalan kayma gerilmesi oranlarına göre daha yüksek kayma gerilmesi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Buna göre, 10 °C'de en yüksek kayma gerilmesine ulaşan seri 100S iken 25 °C ve 40 °C'de 75S serisi olmuştur.



Şekil 7. Karışımların akış eğrileri (a) 100S, (b) 75S, (c) 50S, (d) 25S

Uçucu kül ikamesi ile 10 °C'de maksimum kayma hızında (100 s⁻¹) erişilen kayma gerilmesi değerleri düşmüş; 75S ve 50S serileri benzer değerlere (~1200 Pa) ulaşmışlardır. 25 °C'de uçucu kül ikamesi maksimum kayma hızında erişilen değerleri düşürmüştür, 40 °C'de ise %25 uçucu kül ikamesi ile (75S serisi) artış görülmüş, daha fazla ikame ile yeniden düşüş görülmüştür. %75 uçucu kül içeren 25S serisi her sıcaklıkta benzer değerlere ulaşmıştır (Şekil 7).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 100S serisi sıcaklık arttıkça daha düşük maksimum gerilmelere erişilmekte, 10 °C'den 40 °C'ye artış ile maksimum gerilme üçte bir değerine düşmüştür. Benzer şekilde, 75S serisinde de kayma gerilmesinde azalma görülmektedir ve bu azalma 100S'deki azalmaya göre çok daha düşük seviyelerdedir. 50S ve 25S serilerinde ise sıcaklığa göre kayda değer bir değişim görülmemiştir.

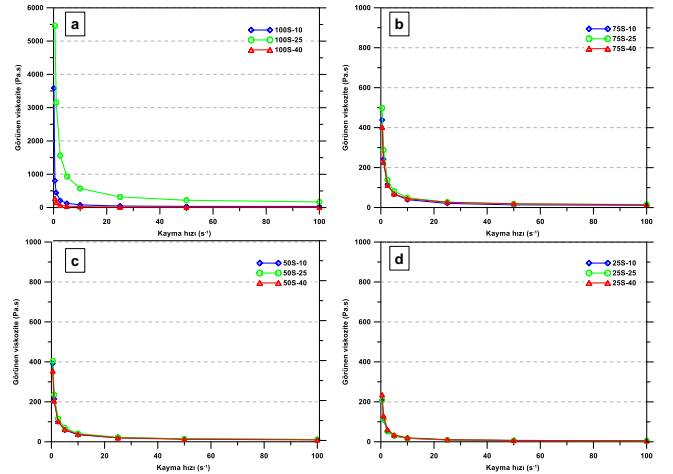
Uçucu kül ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak histerezis alanında farklılıklar görülmektedir. Bu konu "Tiksotropik davranış" başlığı altında detaylı olarak incelenmiştir.

Görünen viskozite- kayma hızı ilişkisi

Karışımların görünen viskozite-kayma gerilmesi ilişkileri Şekil 8'de paylaşılmıştır. Uygulanan kayma gerilmesine bağlı olarak zamanla görünen viskozite düşmeye başlamaktadır. Bu, kayma incelmesi (*shear-thinning*) nedeniyle meydana gelen, artan yapısal bozulmadan kaynaklanmaktadır. Kayma sonrası bozulan bağların sayısına bağlı olarak yapı yeniden eski haline dönmeye başlamaktadır [25].

Görünen viskozite eğrileri uçucu kül ikamesi ile azalmakta; daha düşük değerlere sahip olmaktadır. Bunun sebebi, hamur kayma gerilmesi etkisi altında iken topaklanmaların yok olmasıdır. Kayma gerilmesi altında hamur sürekli olarak incelik; kayma incelmeye görülür.

Kontrol serisinde (100S), uçucu kül ikamesi olmadığına, hamur tipik kayma incelmeye davranışı gösterir. Uçucu kül ikamesindeki artış ile kayma hızının görünen viskozite üzerindeki etkisi azalır. Bunun nedeni uçucu kül ikamesi ile hamurun incelmeye davranışı göstermesi ve zamanla Newtonyan akışa yakın bir kıvama sahip olmasıdır. Bu durumda eğri X eksenine daha paralel hale gelmektedir. Şekil 8 (b)-(d) den de görüleceği gibi uçucu kül ikamesi arttıkça karışımlar daha ince olmakta, görünen viskozite düşmekte ve Newtonyan akışa yaklaşmaktadır. En yüksek görünen viskozite değerleri 100S'de elde edilirken en düşük değerler 25S serilerinde elde edilmiştir.



Şekil 8. Karışımların 10 °C, 25 °C ve 40 °C'deki görünen viskozite-kayma hızı eğrileri (a) 100S, (b) 75S, (c) 50S, (d) 25S

Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite

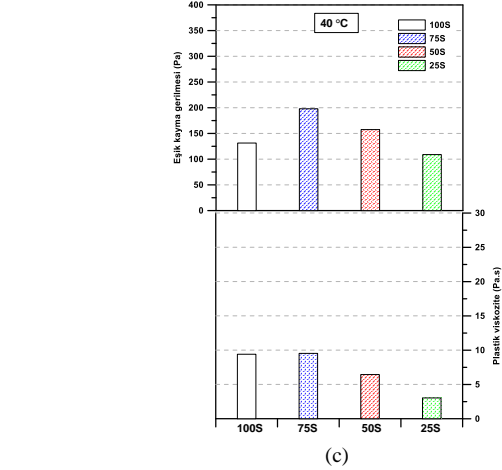
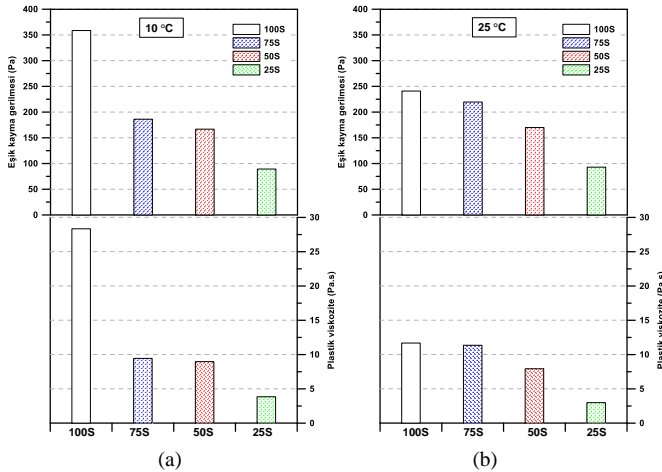
Eşik kayma gerilmesi (τ_0), betonun doldurma yeteneğini kullanabilmek için uygulanması için gerekli minimum gerilmenin büyüklüğüdür. Plastik viskozite (μ) betonun akışa geçtikten sonraki kayma hızı ile ilişkilidir. Düşük plastik viskoziteye sahip betonlar akışa geçtikten sonra daha hızlı hareket ederken, yüksek olanlar daha yavaş hareket edecektir. Plastik viskozite pompalanabilme veya döküm hızı gibi özellikleri etkilerken, taze betonun kalıbı doldurabilme yeteneğini etkileyen en önemli parametre eşik kayma gerilmesidir (τ_0). Viskozite, malzemenin kalıba yerleşme süresini etkilemektedir. Taze betonun reolojik davranışı genelde belli bir plastik viskoziteye sahip olan Bingham ya da Herschel-Bulkley sıvısı olarak modellenir [15], [26].

Bu çalışmada üretilen NC ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül karışımlarının farklı uygulama sıcaklıkları etkisi altında gösterdikleri eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Her sıcaklıkta en yüksek ve en düşük kayma gerilmesine sırasıyla 100S ve 25S karışımlarının sahip olduğu görülmektedir. Sadece 40 °C'de 100S serisi daha düşük değer göstermiştir. Uçucu kül oranı arttıkça eşik kayma gerilmesi değeri azalmış, en büyük azalma 10 °C'de gerçekleşmiştir. Serilerin sıcaklığa bağlı olarak eşik kayma gerilmesi değerleri 100S serisi hariç az miktarda artmış ya da azalmıştır. 100S serisi en yüksek kayma gerilmesini 10 °C de gösterirken (357 Pa) 40 °C'de 131 Pa değerine ulaşmıştır. 25S serisinde kayma gerilmeleri sıcaklığa göre 89 Pa ile 109 Pa arasında değişmiştir.

Eşik kayma gerilmesinin malzemenin viskozitesine, parçacıklar arası kuvvetlere ve olası parçacık topaklanmasına bağlı olduğu bilinmektedir [27]–[29]. Karışımlarda kullanılan katı oranı aynı iken farklı uçucu kül katkısı ile karışımların viskoziteleri değişmiş; uçucu kül oranı arttıkça viskozite ve buna bağlı olarak eşik kayma gerilmesi düşmüştür. Sıcaklık etkisi altında parçacıklar arası kuvvetler zayıflar ve daha düşük eşik kayma gerilmesi elde edilmektedir. Çalışma sonuçlarında 100S karışımının en yüksek oranda sıcaklık değişiminden etkilendiği görülmüş, uçucu kül oranı arttıkça sıcaklık etkisi daha az etkin olmuştur.

Plastik viskozite değerleri uçucu kül ikame oranı arttıkça azalmıştır. %25 ikame 25 °C ve 40 °C'lerde kayda değer düşüş sağlamamışken %50 ve %75 ikame oranlarında yüksek miktarda düşüş sağlamıştır. Ayrıca, 10 °C'de %25'lik uçucu kül ikamesi plastik viskozite kontrol karışımına göre üçte bir değerine düşmüştür.

Sıcaklık değişiminden en çok etkilenen serinin 100S olduğu görülmektedir. Bu seride 10 °C'de çok yüksek kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri elde edilmişken, sıcaklığın artması ile her iki sıcaklıkta da kayda değer düşüşler görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. Karışımların farklı uygulama sıcaklıkları altında kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri (a) 10 °C, (b) 25 °C ve (c) 40 °C

Tiksotropik davranış

Histerezis döngüsü çimento esaslı malzemelerin tiksotropisini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu metotta, iki akış eğrisinin altında kalan alan, yukarı yönlü artan eğri ile aşağı yönlü azalan eğri arasında kalan alan, malzemenin tiksotropisini ifade etmektedir. Artan eğri ile kayma hızı 0'dan maksimum değere dek kademeli olarak artmakta ve oluşmuş yapıyı bozmaktadır. Daha sonra, azalan eğri ile kayma hızı kademeli olarak maksimum değerden 0'a doğru azalmaktadır ve malzemenin toparlanmasına, bozulan yapısının yeniden yapılanmasına izin vermektedir. Bu iki eğri arasındaki alanın, başlangıçta oluşmuş olan bağları koparmak için birim zamanda birim hacimde yapılan işi ifade ettiği belirtilmektedir [30].

Şekil 7'de verilmiş olan akış eğrilerinin artan ve azalan eğrilerin arasında kalan alan histerezis döngüsü olarak adlandırılmıştır. Entegre histerezis alanı tiksotropi derecesini ifade etmektedir. Daha büyük alan daha tiksotropik malzemeyi ifade etmektedir. İntegrasyon metodu aşağıda gösterilmiştir.

Histerezis alanı aşağıda verilen integrasyon eşitliği (1) ile hesaplanabilmektedir.

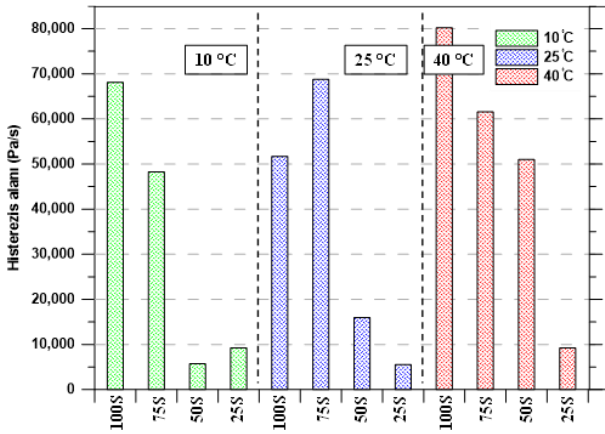
$$S = \int_{x_1}^{x_2} (Y_1 - Y_2) dx \quad (1)$$

S histerezis alanını (Pa.s); x_1 ve x_2 ilk ve son kayma gerilmesi oranlarını (s^{-1}); Y_1 ve Y_2 ise eğrilerin artan kısım ve azalan kısım arasındaki fonksiyonel ilişkiyi göstermektedir.

Şekil 10'da tüm serilerin farklı sıcaklık etkisi altındaki histerezis alanları verilmiştir. 25 °C'deki 75S serisi hariç tüm serilerde uçucu kül ikamesi ile histerezis alanı azalmıştır. 10 °C ve 25 °C'lerde %50 ve daha fazla uçucu kül ikamesi çok yüksek düşüşe neden olurken 40 °C'de %75 uçucu kül ikamesi ile histerezis alanı önemli derecede azalmıştır. 10 °C'de %50 uçucu kül ikamesi, 40 °C'de ise %75 uçucu kül ikamesi malzeme tiksotropisini azaltmıştır. 25 °C'de %25 uçucu kül ikamesi ile histerezis alanında artış görülmüştür, malzeme daha tiksotropik davranış göstermiştir.

25 °C'den 40 °C'ye sıcaklık artışı, daha büyük bir yapısal bozulmaya neden olarak histerezis döngüsü alanında artışa neden olmuştur. Bu, sıcaklık etkisi ile bağlayıcıların

reaktivitesinin artması ve erken yaşta oluşan hidrasyon ürünlerindeki tanecikler arası bağlar ile ilgilidir [31].



Şekil 10. Serilerin histerezis alan değerleri

Sonuçlar

Bu çalışmada sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı hamur karışımlarının reolojik özellikleri araştırılmıştır. Karışımlara farklı oranlarda uçucu kül ikamesinin ve farklı uygulama sıcaklıklarının reolojik özellikler üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı karışımlar çimento esaslı sistemler yerine kullanılabilir, benzer reolojik özelliklere sahiptirler.
- Uçucu kül ikamesi işlenebilirliği iyileştirmekte, eşik kayma gerilmesi ve plastik viskoziteyi düşürmektedir. Daha yüksek ikame oranları daha yüksek iyileşme sağlamaktadır.
- Farklı uygulama sıcaklıkları etkisi altında malzemelerin reolojik özellikleri değişkenlik göstermektedir. Sıcaklık artışı sonucu malzeme kayma incelmeleri davranışı göstermekte, sıcaklık arttıkça daha düşük kayma gerilmesi ve viskozite değerleri elde edilmektedir. Uygulamada yüksek kayma gerilmesi ve viskozitesi nedeniyle en çok zorlanılan karışım, kontrol karışımı olan 100S serisidir.
- Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite genel olarak birbiri ile uyumlu trend göstermiştir ancak aralarındaki ilişki lineer değildir.
- Histerezis alanı karışımların tiksotropi derecesini göstermektedir ve sıcaklık değişimleri ile uçucu kül ikamesine göre farklı değerler almaktadır.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, sodyum karbonat ile aktive edilmiş cüruf esaslı sistemler yapı malzemesi olarak kullanılabilir ve reolojik özellikler açısından uygulamada iyi sonuçlar verecek karışımlar üretilebilecektir. Uçucu kül ikamesi reolojik özellikleri iyileştirmekte, farklı uygulama sıcaklıkları altında ise karışımların reolojik özelliklerinin değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, benzer konularda yapılacak daha detaylı çalışmalara ışık tutacaktır.

Kaynakça

- [1] K. L. Scrivener and R. J. Kirkpatrick, "Innovation in use and research on cementitious material," *Cem. Concr. Res.*, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025.
- [2] J. N. Yankwa Djobo, A. Elimbi, H. Kouamo Tchakouté, and S. Kumar, "Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 606–614, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141.
- [3] S. Pilehvar *et al.*, "Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 200, pp. 94–103, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057>.
- [4] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, May 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [5] A. F. Abdalqader, F. Jin, and A. Al-Tabbaa, "Development of greener alkali-activated cement: Utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures," *J. Clean. Prod.*, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.010.
- [6] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [7] J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *J. Therm. Anal.*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991, doi: 10.1007/BF01912193.
- [8] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- [9] V. F. F. Barbosa and K. J. D. MacKenzie, "Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate," *Mater. Res. Bull.*, vol. 38, no. 2, pp. 319–331, 2003, doi: 10.1016/S0025-5408(02)01022-X.
- [10] H. Xu and J. S. J. van Deventer, "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000, doi: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [11] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 101, no. 6, pp. 467–472, 2004, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303836414>.
- [12] N. K. Lee and H. K. Lee, "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature," *Constr. Build.*

- Mater.*, vol. 47, pp. 1201–1209, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107.
- [13] X. H. Yuan, W. Chen, Z. A. Lu, and H. Chen, “Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 422–428, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.085.
- [14] D. Production and N. T. Relations, “Soda ash,” no. May 2008, pp. 2008–2009, 2012.
- [15] P. F. G. Banfill, “The rheology of fresh cement and concrete—a review,” *Proc. 11th Int. Cem. Chem. Congr.*, vol. 1, no. July, pp. 50–62, 2003, doi: 10.1016/0008-8846(90)90053-Z.
- [16] M. Torres-Carrasco, C. Rodríguez-Puertas, M. Del Mar Alonso, and F. Puertas, “Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour,” *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 54, no. 2, pp. 45–57, 2015, doi: 10.1016/j.bsecv.2015.03.004.
- [17] S. J. Choi, J. Il Choi, J. K. Song, and B. Y. Lee, “Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 112–118, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.182.
- [18] H. Mehdizadeh and E. Najafi Kani, “Rheology and apparent activation energy of alkali activated phosphorous slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 197–204, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.130.
- [19] D. P. Bentz, C. F. Ferraris, S. Z. Jones, D. Lootens, and F. Zunino, “Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 78, pp. 43–56, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.001.
- [20] K. Vance, G. Sant, and N. Neithalath, “The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 59, pp. 38–48, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.001.
- [21] S. G. Erzençin, K. Kaya, S. Perçin Özkorucuklu, V. Özdemir, and G. Yıldırım, “The properties of cement systems superplasticized with methacrylic ester-based polycarboxylates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 96–109, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.088.
- [22] P. F. G. Banfill and D. C. Saunders, “On the viscometric examination of cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 363–370, 1981, doi: https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90108-3.
- [23] P. Nath and P. Sarker, “Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete,” *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 1149–1156, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144.
- [24] M. M. Alonso, S. Gismara, M. T. Blanco, M. Lanzón, and F. Puertas, “Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 576–587, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.020.
- [25] J. Golaszewski, G. Cygan, M. Drewniok, and A. Kilijanek, “Rheological Properties of Scc in terms of its Thixotropic Behaviour and its Influence on Formwork Pressure,” *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 13, 2014.
- [26] O. H. Wallevik and J. E. Wallevik, “Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1279–1288, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.01.009.
- [27] R. J. Flatt and P. Bowen, “Yodel: A yield stress model for suspensions,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, no. 4, pp. 1244–1256, 2006, doi: 10.1111/j.1551-2916.2005.00888.x.
- [28] K. Vance, A. Dakhane, G. Sant, and N. Neithalath, “Observations on the rheological response of alkali activated fly ash suspensions: the role of activator type and concentration,” *Rheol. Acta*, vol. 53, no. 10–11, pp. 843–855, 2014, doi: 10.1007/s00397-014-0793-z.
- [29] D. Lowke, “Interparticle Forces and Rheology of Cement Based Suspensions,” *Nanotechnol. Constr.* 3, pp. 295–301, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-00980-8_39.
- [30] B. Hasanzadeh, “Testing and modeling of the thixotropic behavior of cementitious materials,” University of Louisville, 2017.
- [31] N. Roussel, “Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 9, pp. 1656–1664, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.08.001.



Moment Aktaran Çelik Çerçeve Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranışa Bağlı Yanal Yük Dağılımının İncelenmesi

Investigation of lateral load distribution in steel moment frame based on nonlinear behavior

Mehmet Fatih ARAT^{1*}, Hakan Tacettin TÜRKER²

¹Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mehmetfatiharat@yandex.com, ORCID: 0000-0001-5433-1583

²Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hakanturker@uludag.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5820-0257

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12 Ocak 2022
Revizyon 17 Mart 2022
Kabul 17 Mart 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Eşdeğer deprem yükü dağılımı, Kat kesme kuvveti dağılımı, Performans tabanlı plastik tasarım, Şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım

ÖZ

Günümüz yönetmelikleri binaların tasarımında, tasarım depremi altında taşıyıcı sistemde doğrusal olmayan şekil değiştirmeler oluşacağını öngörmektedir. Katlara etkiyen deprem yük dağılımları dayanım esaslı yöntemlerde, binanın lineer elastik davranışında bulunan mod şekillerine bağlı olarak bulunmaktadır. Eşdeğer deprem yükü yönteminde 1. mod şeklini veren yük dağılımı esas alınarak katlara uygulanacak kuvvetler bulunmaktadır. Bir şekil değiştirme tabanlı tasarım yöntemi olan Performans Tabanlı Plastik Tasarım (PTPT) metodunda önerilen bina yanal yük dağılımı yapının elastik ötesi davranışı dikkate alınarak bulunmuştur. Bu çalışmada Deprem yönetmeliğinde bina tipi yapıların tasarımında kullanmak için verilen yanal yük dağılımı ile performans tabanlı plastik tasarım yönteminde verilen yanal yük dağılımları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemiyle elde edilmiş kat kesme kuvveti dağılımı TBDY-2018 Deprem yönetmeliğinde ve performans tabanlı tasarım yönteminde kullanılan yanal yük dağılımları ile kıyaslanmıştır. Performans tabanlı plastik tasarım (PTPT) ve şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım (ŞGDT) yöntemleriyle tasarlanmış 4 ve 9 katlı moment aktaran çelik çerçeve (MAÇÇ) sistemler inceleme için kullanılmıştır. İncelenen yapılardan elde edilen kat kesme kuvveti dağılımlarının yönetmeliklerde belirtilen eşdeğer deprem yükü dağılımından elde edilen kat kesme kuvveti dağılımıyla uyum içinde olmadığı görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 January 2022
Received in revised form 17 March 2022
Accepted 17 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Equivalent lateral load distribution, Story shear distribution, Performance-based plastic design, deformation-based design,

ABSTRACT

It is known that nonlinear deformations will occur under severe earthquakes in structures designed according to today's regulations. Lateral load distributions acting on the floors are found in strength-based methods, depending on the mode shapes in the linear elastic behavior of the building. In the equivalent lateral load method, forces are applied to the floors based on the load distribution that gives the 1st mode shape. The lateral load distribution of the building proposed in the Performance-Based Plastic Design method, which is a displacement-based design method, was found by considering the inelastic behavior of the structure. In this study, the lateral load distribution given in the earthquake code for use in the design of building-type structures and the lateral load distributions given in the performance-based plastic design method were compared. For this purpose, the floor shear force distribution obtained by the nonlinear calculation method in the time history is compared with the lateral load distributions used in the earthquake code and performance-based design method. 4- and 9-storey moment-transmitting steel frame systems designed with performance-based plastic design and evaluation and design methods according to strain were used for the study. It has been observed that the story shear force distributions obtained from the examined structures are not in harmony with the story shear force distribution obtained from the equivalent earthquake load distribution specified in the regulations.

Doi: 10.24012/dumf.1056869

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yapıların deprem etkisi altındaki tasarımında eleman özelliklerinin yapı boyunca dağılımının performans üzerindeki etkisi yüksektir. Yapıda uygun olmayan rijitlik ve dayanım dağılımının oluşması yapının deprem altında istenmeyen davranışlar sergilemesine neden olabilmektedir. Birçok yapının yıkılma nedeni olan yumuşak kat mekanizması düzensiz olan rijitlik veya dayanım dağılımından kaynaklanmaktadır [1]. Düzensizlik dağılımının başlıca nedenlerinden biri eşdeğer deprem yükü dağılımının yapının doğrusal olmayan davranışını tam olarak yansıtamamasıdır [2, 3].

Yönetmeliklere göre yapılar tasarlanırken elastik tasarım yöntemlerinden eşdeğer deprem yükü yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır [4]-[6]. Yöntemde deprem altında yapıda oluşacak eylemsizlik kuvveti eşdeğer deprem yükleri ile temsil edilir. Eşdeğer deprem yükü dağılımı kat kütlelerinin yığılı olarak kabul edildiği çok serbestlik dereceli elastik bir konsol sistemin hakim mod şekline göre belirlenir [7]. Elastik sisteme göre belirlenen dağılımın aksine, yapının şiddetli depremler altında doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapacağı bilinmektedir. Yönetmelikler genellikle doğrusal olmayan davranışı deprem yükü azaltma katsayısı gibi mühendislik varsayımlarına dayanan yöntemlerle için içine dahil ederler. Bundan dolayı yönetmeliklerdeki yaklaşım doğrusal olmayan davranışı tam olarak belirleyememektedir [8]. Doğrusal olmayan davranışı tasarım sürecine daha kesin şekilde dahil edebilmek için performans tabanlı tasarım metodolojisine bağlı yeni yöntemler geliştirilmiştir [9]. Bu yöntemlerde kullanılacak eşdeğer deprem yükü dağılımları yapının doğrusal olmayan davranışını doğru şekilde temsil etmelidir. Lee ve Goel [10], belli deprem kayıtları altında yapılarda oluşan göreceli maksimum kat kesme kuvvetlerini kullanarak belirledikleri kat kesme kuvveti dağılımıyla yapıların doğrusal olmayan durumunu göz önüne alan bir eşdeğer deprem yükü dağılımı önermiştir. Chao vd. [11]'de zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini kullanarak moment aktaran çelik çerçeve, dış merkez çelik çerçeve, merkezi çaprazlı çelik çerçeve [12] ve özel moment aktaran kafes çerçeve [13] taşıyıcı sisteme sahip yapıların kat kesme kuvveti dağılımlarını belirlemiştir. Elde ettiği sonuçların yönetmeliklerce verilen eşdeğer deprem yükü dağılımlarından elde edilen kat kesme kuvveti dağılımlarına uymadığını belirtmiştir. Gholamrezatabar vd. [14] moment aktaran çelik çerçeve sistemlerin eşdeğer deprem yükü dağılımlarını incelemek için parametrik bir çalışma yaparak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle kat kesme kuvveti dağılımlarını belirlemiştir. Yapılan Parametrik çalışmada performans tabanlı plastik tasarım yöntemi kullanılarak tasarlanmış yapılar incelenmiştir.

Bu çalışmada ise doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz (DOZTAA) yöntemi kullanılarak elde edilen eşdeğer deprem yükü dağılımları ve kat kesme kuvveti faktörleri incelenmiştir. Tasarımları performans tabanlı plastik tasarım (PTPT) ve şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım (ŞGDT) yöntemleriyle yapılmış 4 ve 9 katlı moment aktaran çelik çerçeve sistemlere sahip yapılar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar TBDY-2018'de ve PTPT yönteminde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımlarıyla kıyaslanmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada DOZTAA kullanılarak yapılardan elde edilen maksimum eşdeğer deprem yükü dağılımları ve kat kesme kuvveti faktörü, TBDY-2018 yönetmeliğinde ve Chao vd. [11] tarafından önerilen eşdeğer deprem yükü dağılımlarıyla kıyaslanmıştır. Kıyaslama amacıyla Moment Aktaran Çelik Çerçeve (MAÇÇ) sisteme sahip PTPT ve ŞDGT yöntemlerine göre tasarlanmış 4 ve 9 katlı yapılar kullanılmıştır. Yapılara ait geometrik değerler, malzeme özellikleri ve yük değerleri literatürdeki değerlerle aynı alınmıştır. ŞDGT yönteminin uygulaması ile ilgili detaylar TBDY-2018 [4] ve FEMA 356 [9]'dan elde edilmiştir. İki yönteme göre tasarlanan yapıları kıyaslamak için DOZTAA kullanılmıştır. Tüm analizler Sap 2000 v20.1 [19] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Yanal Yük Dağılımları

Yönetmeliklerde genellikle Denklem 1'de verilen yüksekliğe bağlı eşdeğer deprem yükü dağılımı kullanılmaktadır [6, 16, 17]. Denklem 1 ilk olarak ATC 3-06 [18] tarafından kabul edilmiştir. Burada F_i i.kata gelen eşdeğer deprem yükünü, V taban kesme kuvvetini, w_i i. kattaki kat kütlelerini, h_i i. katın zemin seviyesinden yüksekliğini, k yönetmeliklerde farklı değerler alan üstel bir ifadeyi göstermektedir. Yapının elastik davranışı gözlemlendiğinde hakim periyot değeri 0.5 sn.'den küçük yapılar düzgün bir dağılıma sahipken ($k=1$), periyodu 2.5 sn.'den büyük yapılarda dağılımın ise parabolik bir eğri ($k=2$) olduğu görülmüştür. Hakim periyodun 0.5 sn. ile 2.5 sn. arasında olduğu yapılar ise interpolasyon yöntemiyle $k=1$ ile $k=2$ değerleri arasında değerler alır.

$$F_i = \left(\frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \right) \cdot V \quad (1)$$

Daha sonra UBC 97'de yüksek modların etkisini sisteme dahil edebilmek için en üst kata Denklem 2'de hesaplanan yüke ek olarak tekil bir yük [4,5],[16-18] eklenmektedir.

$$F_i = \left(\frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \right) \cdot (V - F_t) \quad (2)$$

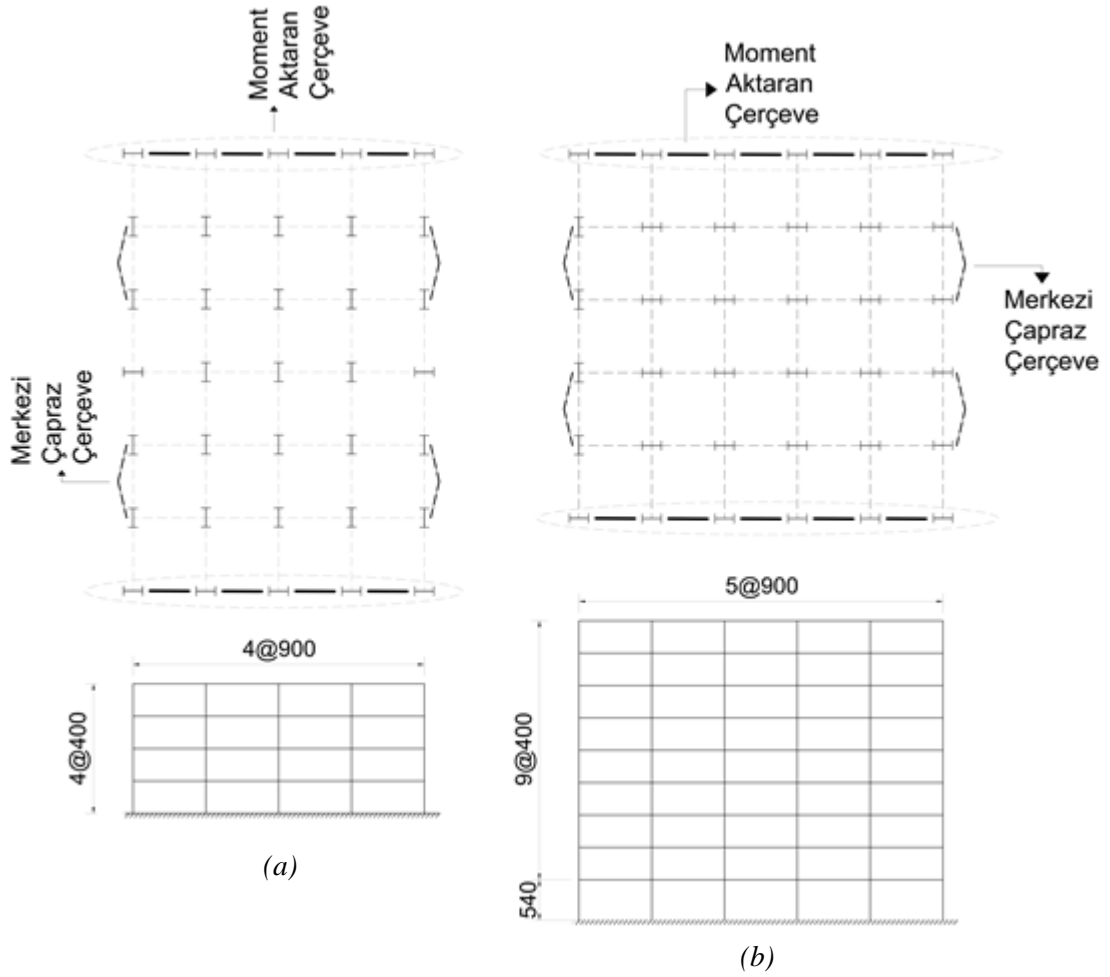
Lee ve Goel [10] yaptıkları çalışmada yapıların deprem altındaki doğrusal olmayan davranışını eşdeğer deprem yükü dağılımında yansıtılabilmek için farklı bir yaklaşımla yeni bir formül önermiştir (Denklem 3).

$$F_i = C_{vi}' \cdot V \quad (3)$$

$$C_{vi}' = (\beta_i - \beta_{i+1}) \cdot \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{\alpha T^{-0.2}} \quad (4)$$

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \left(\frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{\alpha T^{-0.2}} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde β_i kat kesme kuvvetini, w_n en üst katın kütlelerini, h_n zeminden en üst kata kadar olan yüksekliği, α ise Chao ve diğ. [11]'de 0.75 olarak önerilen sabit sayıyı temsil etmektedir.



Şekil 1. Tasarımı yapılan yapıların planları (a). 4 katlı MAÇÇ sisteme sahip bina, (b). 9 katlı MAÇÇ sisteme sahip bina

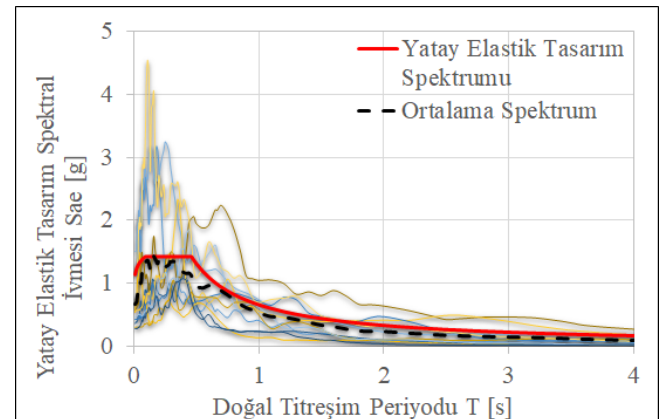
İncelenen Yapı Modelleri

Bu çalışma kapsamında tasarımları ŞDGT ve PTPT yöntemleriyle gerçekleştirilmiş 4 ve 9 katlı iki adet yapı incelenmiştir. Yatay yük taşıyıcı sistemleri x yönünde moment aktaran çelik çerçeve, y yönünde ise çaprazlı çelik çerçevdedir. Yapıların plan görünüşleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Tüm yapı sistemlerinde malzeme olarak ASTM A992 Grade 50 kullanılmıştır. Çatı katında 4.3 kN/m^2 ölü yük ve 1 kN/m^2 hareketli yük, normal katlarda 5.3 kN/m^2 ölü yük ve 3 kN/m^2 hareketli yük kullanılmıştır. Yapıların tasarımında kullanılan deprem parametreleri Tablo 2’de verilmiştir [20].

Tablo 1. Deprem parametreleri

Parametre	Değer
Bina Önem Katsayısı (I)	1
Zemin Sınıfı	ZB
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_s)	1.58
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1)	0.82
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	1
Kullanılacak Deprem Düzeyi	DD-2

Çalışmada kullanılan 4 ve 9 katlı iki yapının kesitleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4 ‘de verilmiştir. İncelemelerde kullanılan doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemi için kullanılan 11 farklı deprem kaydı Tablo 5’te belirtilmiştir. Deprem kayıtlarından elde edilen spektrumların yatay elastik tasarım spektrumu ile kıyaslanması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. DD-2 düzeyi yatay elastik tasarım spektrumu ile uyumlu yer hareketlerinden elde edilmiş spektrumlar

Tablo 3. 4 katlı yapının kesitleri

KAT	ŞDGT			PTPT		
	Dış kolon	İç kolon	Kiriş	Dış kolon	İç kolon	Kiriş
4	H400x422	H400x551	HE700A	H400x393	H400x678	HE500A
3	H400x422	H400x551	HE700A	H400x393	H400x678	HE650A
2	H400x551	H400x634	HE800A	H400x467	H400x744	HE800A
1	H400x551	H400x634	HE800A	H400x467	H400x744	HE800A

Tablo 4. 9 katlı yapının kesitleri

KAT	ŞDGT			PTPT		
	Dış kolon	İç kolon	Kiriş	Dış kolon	İç kolon	Kiriş
9	H400x382	H400x463	HE600A	H400x393	H400x593	HE400A
8	H400x382	H400x463	HE600A	H400x393	H400x593	HE500A
7	H400x463	H400x634	HE700A	H400x393	H400x593	HE600A
6	H400x463	H400x634	HE700A	H400x551	H400x818	HE650A
5	H400x509	H400x818	HE800A	H400x551	H400x818	HE700A
4	H400x509	H400x818	HE800A	H400x634	H400x900	HE800A
3	H400x634	H400x818	HE800A	H400x634	H400x900	HE800A
2	H400x634	H400x900	HE900A	H400x744	H400x990	HE800A
1	H400x818	H400x900	HE900A	H400x744	H400x990	HE800A

Tablo 5. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yönteminde kullanılan deprem kayıtları [15]

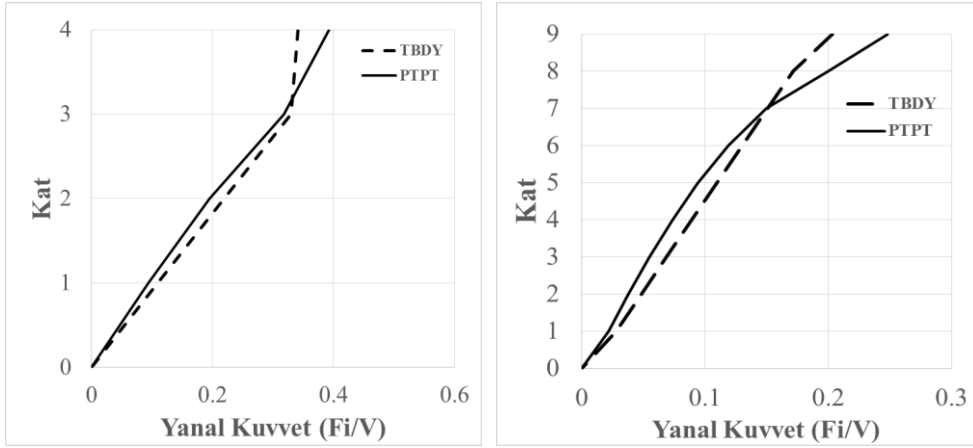
Kayıt Numarası	Deprem Adı	İstasyon
495	Nahanni_ Canada	Site 1
825	Cape Mendocino	Cape Mendocino
983	Northridge-01	Jensen Filter Plant Generator Building
1013	Northridge-01	LA Dam
1052	Northridge-01	Pacoima Kagel Canyon
1108	Kobe_ Japan	Kobe University
1111	Kobe_ Japan	Nishi-Akashi
1612	Duzce_ Turkey	Lamont 1059
1618	Duzce_ Turkey	Lamont 531
3548	Loma Prieta	Los Gatos - Lexington Dam
4456	Montenegro_ Yugoslavia	Petrovac - Hotel Olivia

BULGULAR VE TARTIŞMA

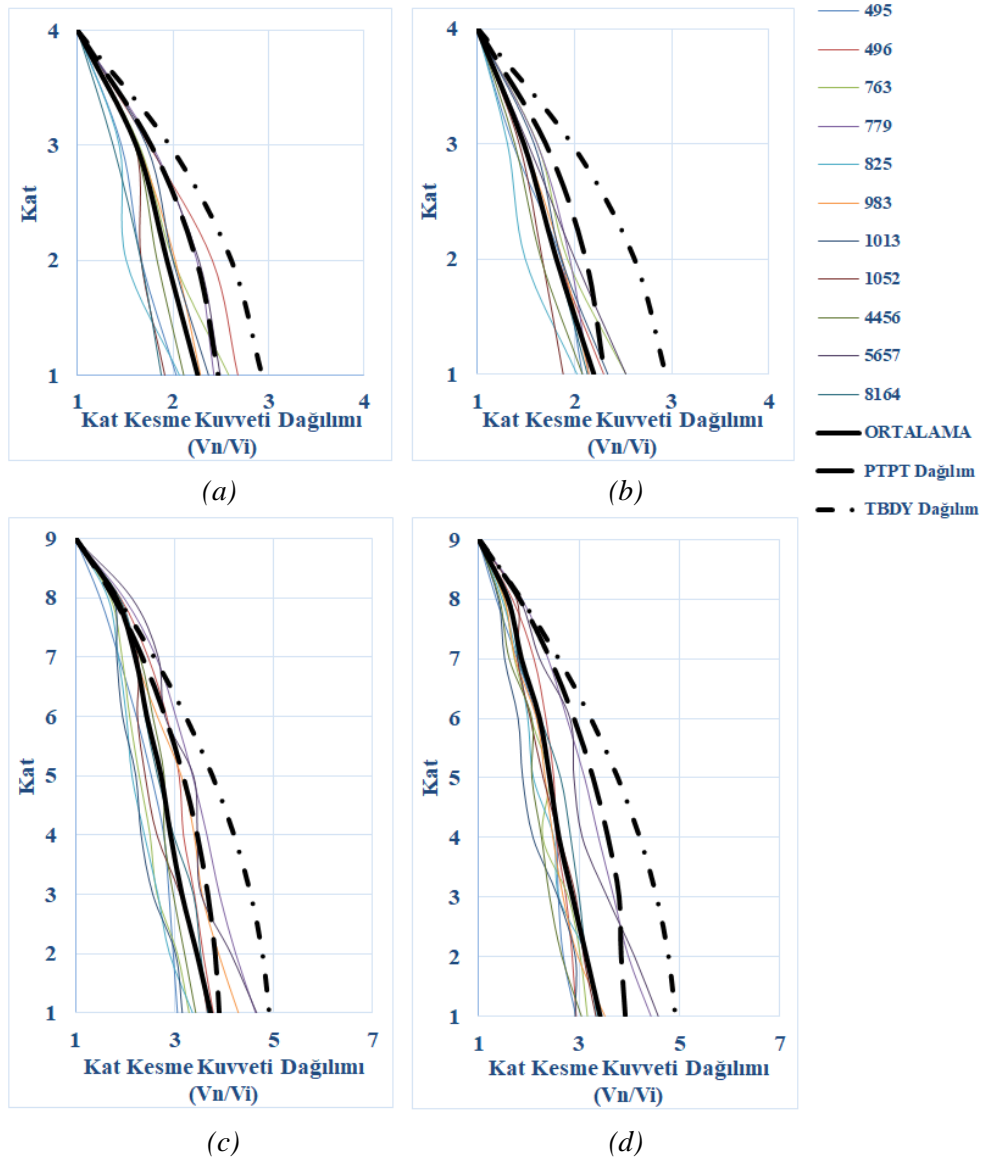
TBDY-2018'de verilen ve PTPT yönteminde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımlarının karşılaştırılması için öncelikle kullanılan örnek iki yapının deprem yükü taşıyıcı sistemlerinin eleman ağırlıkları verilmiştir (Tablo 6). İncelenecek iki yapının toplam ağırlıkları birbirine yakındır. Bununla birlikte PTPT yöntemine göre tasarlanan yapılarda kolon ağırlıkları TBDY-2018'e göre nispeten fazla iken, kiriş elemanların ağırlıklarının fazla olduğu görülmüştür. Yöntemlerde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımlarının kıyaslanması Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3.a'da 4 katlı yapı için ele alınan karşılaştırmada en üst kat haricinde dağılımların birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. En üst katta ise PTPT yönteminde kullanılan dağılımın daha yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Şekil 3.b'de PTPT yönteminde kullanılan dağılımın alt katlarda TBDY-2018'e göre nispeten daha düşük değerlerde olduğu en üst iki katta ise TBDY-2018 değerinin daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 6. Yapı ağırlıkları ve karşılaştırılması

	4 Kat (kN)			9 Kat (kN)		
	Kiriş	Kolon	Toplam	Kiriş	Kolon	Toplam
PTPT	280.4	469.7	750.1	772.0	1626.1	2398.1
ŞDGT	302.6	431.5	734.1	856.2	1466.9	2323.1
PTPT/ŞDGT	0.926	1.088	1.02	0.902	1.108	1.03



Şekil 3. Yanal kuvvet dağılımları (a). 4 katlı yapı, (b). 9 katlı yapı



Şekil 4. DOZTAA yönteminden elde edilen kat kesme kuvveti dağılımlarının, PTPT ve TBDY-2018'de verilen dağılımlarla kıyaslanması (a). 4 katlı ŞDGT, (b). 4 katlı PTPT, (c). 9 katlı ŞDGT, (d). 9 katlı PTPT

Şekil 4’te ŞDGT ve PTPT yöntemlerine göre tasarlanmış yapılardan elde edilen kat kesme kuvveti dağılımları verilmiştir. 11 farklı deprem kaydı altında doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yönteminden elde edilen sonuçların ortalaması ve PTPT ile TBDY-2018’de kullanılan yanal yük dağılımlarından elde edilen kat kesme kuvveti dağılımları verilmiştir. PTPT yönteminde kullanılan dağılım TBDY-2018 yöntemine nazaran, doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemindeki sonuçlara daha yakın değerler vermiştir. TBDY-2018 yöntemindeki dağılımdan elde edilen sonuçlarla PTPT ve ortalama sonuçlar kıyaslandığında üst katlarda daha düşük, alt katlarda ise daha yüksek kat kesme kuvveti talebinin oluştuğu görülmüştür.

SONUÇ

Bu çalışmada yapının doğrusal olmayan davranışını dikkate alan yanal yük dağılımı ile yönetmeliklerce verilen yanal yük dağılımı incelenmiştir. Yanal yük dağılımının yapının doğrusal olmayan davranışını doğru şekilde yansıtması tasarım sürecinin önemli adımlarındandır. Yapılan incelemede doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemleri kullanılarak elde edilen maksimum kat kesme kuvveti dağılımları PTPT ve TBDY-2018’de belirtilen eşdeğer deprem yükü dağılımlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PTPT yönteminde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımı TBDY-2018’e göre nispeten doğrusal olmayan davranışa daha yakın sonuçlar vermiştir.

Kaynaklar

- [1] R. K. Mohammadi, M. H. El Naggar, H. Moghaddam, “Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings”, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, pp.6597–6612, 2004.
- [2] Sutat Leelataviwat, “Drift and yield mechanism based seismic design and upgrading of steel moment frames”, *Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, University of Michigan*. 1998.
- [3] Hajirasouliha, H. Moghaddam, “A new lateral force distribution for seismic design of structures”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 135, no. 8, pp. 906–915, 2009.
- [4] TBDY-2018, Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [5] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Virginia, 2010.
- [6] International Code Council (ICC), 2006. International Building Code, ICC, Birmingham, Ala.
- [7] S. B. Kharmale, S. Ghosh, “Performance-based plastic design of steel plate shear walls”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 90, pp. 85–97, 2013.
- [8] G.C. Hart, “Earthquake forces for the lateral force code”, *Struct. Des. Tall Special Build*, vol. 9, pp. 49–64, 2000.
- [9] FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, 2000.
- [10] S-S. Lee, S.C. Goel “Performance-Based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism”, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, vol. 01, no. 17, 2001.
- [11] S. H. Chao, S. C. Goel, S. S. Lee, “A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures”, *Earthquake Spectra*, vol. 23, no. 3, pp. 547–569, 2007.
- [12] S. H. Chao, C. G. Subhash, “A seismic design method for steel concentric braced frames (CBF) for enhanced performance”, *Proceedings of Fourth International Conference on Earthquake Engineering*, Taiwan, 2006.
- [13] S. H. Chao, C.G. Subhash, “Performance-based plastic design of special truss moment frames”, *AISC Engineering Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 127, 2008.
- [14] Gholamrezatabar, B. Ganjavi, G. Ghodrati Amiri, M. A. Shayanfar, “Modified Seismic Design Lateral Force Distribution for the Performance-Based Plastic Design (PBSD) of Steel Moment Structures Considering Soil Flexibility”, *Scientia Iranica*, vol. 27, pp. 1050–1066, 2019.
- [15] M. F. Arat, “PTPT yöntemi ile ŞDGT yönteminin kıyaslanması,” *Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye*, 2020.
- [16] UBC, *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, Whittier, 1994.
- [17] NEHRP, *Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulation for New Buildings*, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 1994.
- [18] ATC-3-06, *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*. Applied Technology Council, San Francisco, California, 1978.
- [19] “SAP2000: Integrated Structural Analysis & Design Software.” *Computer and Structures*, Berkeley, CA, 2020.
- [20] M. Zorlu, B. Akbaş, J.J. Shen, O. Şeker, “Contribution of gravity frames to seismic performance of steel moment resisting frames”, *International conference on earthquake engineering and seismology*, Eskişehir, 2018.



Araştırma Makalesi/Research Article

Tarihi Diyarbakır sur kapılarındaki yapısal hasarların georadar (GPR) yöntemiyle belirlenmesi:
Urfa Kapı örneği*Determination of the structural damages in the historical Diyarbakır city walls by georadar (GPR)
method: The example of the Urfa Gate*Nursen İŞİK^{1*}, Fatma Meral HALİFEOĞLU² Mehmet Şakir GÜLER³¹ Dicle University, Diyarbakır, Turkey, isik@dicle.edu.tr. Orcid No: <https://orcid.org/0000-0002-6125-1896>² Dicle University, Diyarbakır, Turkey, mhalife@dicle.edu.tr. Orcid No: <https://orcid.org/0000-0003-2032-3774>³ Dicle University, Diyarbakır, Turkey, msakirguler@ogr.dicle.edu.tr. Orcid No: <https://orcid.org/0000-0003-1344-8130>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Şubat 2022
Revizyon 16 Mart 2022
Kabul 17 Mart 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Anahtar kelime , Diyarbakır , Urfa Kapı, yapısal hasar, Georadar (GPR), Suriçi Bölgesi.

ÖZ

Diyarbakır Suriçi Bölgesi, farklı biçim ve boyutta burçların bulunduğu tarihi surlarla çevrili bir kentsel sit alanıdır. Savunma yapılarından olan sur duvarları ve burçların geçmişte kullanılmalarına rağmen yakın dönemde bakımsız ve boş durumda kalarak, yapısal sorunları meydana gelmiştir. Urfa Kapı, Suriçi Bölgesindeki sur dışına açılan tarihi kapılarından biridir. Uzun yıllar restorasyon çalışması yapılmayan tarihi kapıda, yoğun trafik akışının etkisiyle zaman içinde sur duvarları, kapı geçişleri ve burçlarda strüktürel çatlaklar ve ayrışmalara bağlı yapısal sorunlar oluşmuştur. Oluşan hasarların zemin ve duvarlardaki konumları ve düzeylerinin belirlenmesi amacıyla, tarihi yapılarda tahribatsız yöntemlerden biri olarak kullanılan Georadar (GPR) taramaları yapılmıştır. Urfa Kapı ve kapı geçişlerinde 50 metre profil boyu, araştırma derinliği ise zeminde 20 metre duvarlarda 4.00 metre olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, tarihi surların batı yönündeki Urfa Kapı 'da sur duvarları ile kapı geçişlerinde zeminden kaynaklanan yapısal sorunların tespiti amacıyla georadar (GPR) taramaları yapılmıştır. Gözlemsel olarak tespit edilen hasarlar, aletsel olarak georadar taramalarıyla desteklenerek, hasar düzeyleri ve konumları belirlenmiştir. Zeminde çökme deformasyonları ve duvarlarda, çatlak ve kırıklar tespit edilerek deformasyonlar iki boyutlu radargramlarla gösterilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 February 2022
Received in revised form 16 March 2022
Accepted 17 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Diyarbakır, Urfa Gate, structural problems, Georadar (GPR), Suriçi District

ABSTRACT

Diyarbakır Suriçi Region is an urban protected area surrounded by historical walls with bastions of different shapes and sizes. Although the fortifications and bastions, which are among the defensive structures, were used in the past, they have been neglected and empty in the recent period, resulting in structural problems. Urfa Gate is one of the historical gates opening outside the city walls in the Suriçi Region. Due to the heavy traffic flow on the historical gate, which has not been restored for many years, structural problems have occurred due to structural cracks and weathering in the city walls, gate passages and bastions over time. Georadar (GPR) scans, which is used as one of the non-destructive methods in historical buildings, were carried out to determine the locations and levels of the damages on the floors and walls. The profile length of 50 meters at the Urfa Gate and gate passages, and the depth of research were chosen as 20 meters on the ground and 4.00 meters on the walls. In this study, georadar (GPR) scans were carried out to determine the structural problems arising from the ground at the fortification walls and gate passages in Urfa Kapı, on the west side of the historical city walls. Damage levels and locations were determined by supporting the observationally detected damages with instrumental georadar scans. Slump deformations in the ground and cracks and fractures in the walls were detected and deformations were shown with two-dimensional radargrams.

Doi: 10.24012/dumf.1069160

* Sorumlu Yazar

Giriş

Diyarbakır'ın ilk yerleşim merkezi olan Suriçi Bölgesi, anıtsal ve geleneksel yapıların bulunduğu bir kentsel sit alanıdır. Suriçi Bölgesi, farklı form ve boyutlardaki 82 burç ve sur duvarlarıyla çevrilidir.

Diyarbakır surları ve Hevsel Bahçeleri 2015 yılında UNESCO kültürel mirası listesine alınarak koruma altına alınmıştır [URL 1]. Tarihi surlarla ilgili birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır [1].

Yapım tarihi 4.yy'da inşa edildiği kaynaklarda [2] belirtilen Diyarbakır surları iç ve dış kaleden oluşmaktadır. Dış kale surlarının uzunluğu 4460 m, iç kale surları ise 598 metredir. Belirli dönemlerde yıkılan ve yok olan surların uzunluğu ise 620 metredir [3]. Surlarda burçlar ve sur duvarları arasında farklı boyutlarda geçitler olduğu Diyarbakır'ı 1045-1051 yılları arasında ziyaret eden Nasır-ı Hüsrev tarafından belirtilmiştir [4].

Suriçi Bölgesini çevreleyen sur duvarları, burçlar ve kapılarda tarih boyunca birçok onarım ve tamamlamanın dönemsel izleri günümüze kadar ulaşmıştır. 2013 ve sonrasında, bazı burç ve sur duvarında onarım ve müdahaleler yapılmış olmasına rağmen onarımı yapılmayan ve dış etkenlerle hasara uğrayan sur duvarı ve burçlarda bulunmaktadır. Onarımı farklı dönemlerde yapılmış burçlar ve sur duvarlarında zaman içinde kısmi veya bütünsel olarak yapısal sorunlar meydana gelmiştir.

Sur duvarları ve burçlarda en yaygın görülen yapısal sorunlar; malzeme kaybı, hatalı müdahale, trafik titreşimlerine bağlı malzeme boşalmaları, imar düzenlemeleri ile zemin ve temele bağlı oluşan oturmaya bağlı hasarlardır. Özellikle surlarda kısmi ya da bütünsel bozulmalar, yapım sistemini tehdit edecek boyutlara ulaşmıştır.

Restorasyonları başlatılan sur duvarları ve burçlarda yapısal sorunların tespitine gerektiği ölçüde önem verilmemektedir. Ayrıca surlarda yapılan restorasyon ve onarım çalışmalarında hatalı müdahalelerde mevcuttur.

Sur duvarları ve burçlardaki yapısal sorunların oluşum süreçleri göz önünde bulundurulmadan yapılan müdahaleler ile eksik tespitler nedeniyle genel müdahalelerin dışına çıkılamamıştır. Bu nedenle sur duvarları, burçlar ve kapı geçişlerindeki yapısal sorunların oluşum süreçleri, düzeyleri ve çeşitliliğinin belirlenmesi amacıyla gözlemsel ve aletsel ölçümlerin yapılması önemli ve gereklidir.

Tarihi yapılardaki yapısal sorunların aletsel tespitlerle belirlenmesi, yapıların mevcut strüktürü etkilemeyecek düzeyde ve sınırlılıktadır. Dolayısıyla tarihi yapılarda tahribatsız yöntemlerin kullanılması oldukça önemlidir [5].

Son yıllarda, kültürel miras niteliğindeki tarihi yapılardaki hasar ve sorunların tespitinde tahribatlı yöntemler yerine güncel ve daha etkin olan tahribatsız (NDT) yöntemlerin uygulanmasına geçilmiştir [6],[7], [8].

Tahribatsız görüntüleme tekniklerinde, hızlı veri toplama ve yüksek çözünürlükle gömülü cisimlerin algılanması sağlanmaktadır [9], [10],[11]

Georadar (GPR) tahribatsız görüntüleme yöntemlerinden biri olup, gelişen teknolojiyle kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Kültürel miras ve zemin ve altındaki yapıların tespitinin yanında yeraltında ve belirgin olmayan teşhis araştırmalarında tercih edilen jeofizik yöntemidir. [12], [13].

Georadar yönteminin kullanımı sadece arkeolojik kalıntıların bulunmasıyla sınırlı değildir. Yeraltı tesislerinin haritalama işlemlerinde (toprak altındaki boru ve tesisatlar), betonarme yapılarda tahribatsız muayenesi ile donatıların mevcut konumları ve boşlukların tayini, demiryolları mühendisliği, kara mayın tespiti gibi alanlarda kullanılmaktadır [14], [15].

Georadar yönteminde temel olarak bir elektromanyetik dalga yayan cihaz ve dijital kayıt sistemi ile alıcı antenlerden oluşur. Dalgaların yansımalarındaki gecikme süreleri ve antenlerin yaydığı malzemedeki dalgaların yayılma hızından, yansıtıcı cismin bulunduğu derinlik çıkarılarak elde edilir. Tarama yapılan nesnelere meydana gelen yansımaların tespiti için belirli frekanslardaki sinyallerin emisyonundan oluşmaktadır. Georadar, enerjinin yayıldığı ortamın yeraltı veya başka herhangi bir ortam olması için tasarlanmış bir radardır. Georadar araştırması, heterojen bir ortamda yayılan elektromanyetik dalgaların emisyonuna ve tespitine dayanır. Bu enerjinin ortamın homojen olmayan kısımlarında meydana gelmesi, dalgaların yansımalarına, kırılmalarına neden olmaktadır. Yansıyan dalgalar, antenler tarafından yakalanarak, dijital kayıt altına alınmaktadır [16].

Georadar taramalarında kullanılan verici antenler yatay doğrultuda elektrik alan vektörüne paralel olacak şekilde birkaç nanosaniyeli elektromanyetik dalga üretmektedir. Yeraltında ilerleyen dalgalar herhangi bir deformasyonla (anomali) karşılaştıklarında yansıma veya saçılmaya uğrarlar. Saçılan dalgalar yukarı çıkarak yüzeydeki alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıt cihazına kaydedilir. Elde edilen görüntü "radar izi" olarak adlandırılır. Yapılan taramalar önceden belirlenmiş noktalarda seçilen profillerle yapılmaktadır. Ölçüm noktalarındaki elde edilen radar izleri bir araya getirilerek "radargram" adı verilen radar kesitleri oluşturulur [17], [18].

Bu çalışmada, motorlu taşıt ve yaya trafiğinin yoğun olduğu Urfa Kapı sur duvarları ve kapı geçişlerindeki yapısal sorunlar, gözlemsel tespitlerle belirlenmiş, gözlemsel olarak tespit edilemeyen duvar ile zemindeki hasar durumları, düzeyleri ve konumları tahribatsız yöntemlerden biri olan Georadar (GPR) taramalarıyla belirlenmiştir.

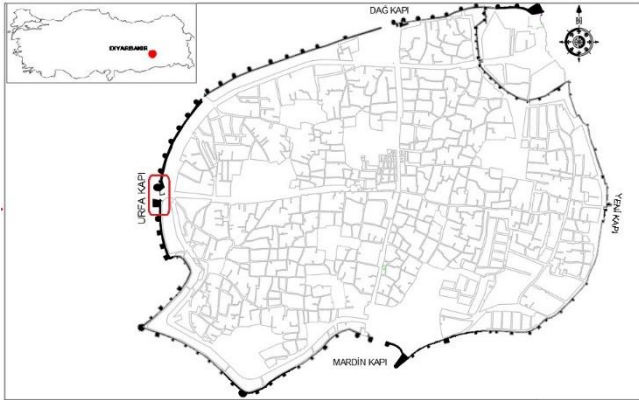
Gözlemsel ve aletsel tespitler öncesi Urfa Kapı, sur duvarları, kapı geçişleri ve burçlarının mimari özellikleri ve yapım tekniği incelenerek yapının mevcut durumuna göre planları çıkarılmıştır.

Georadar (GPR) taramalarıyla tespit edilen hasar düzeyleri konumları radargram kesitlerinde gösterilerek, kapılardaki

hasarların mevcut durumları saptanmıştır. Zemin ve duvarlarda tespit edilen hasarlara yönelik yapılacak güçlendirme ve restorasyon çalışmalarına katkı sağlayacak koruma ve tamamlayıcı müdahale önerileri sunulurak çalışma tamamlanmıştır.

Tarihi Diyarbakır Surları ve yapısal özellikleri

Diyarbakır, Türkiye'nin güneydoğusunda bulunan ve birçok ticari yolun yer aldığı tarihi kentlerden biridir. Antik dönemlere dayanan geçmişi ile geleneksel ve anıtsal yapıların bulunduğu Suriçi Bölgesi, dünya kültür mirasında yer alan önemli bir yerleşim merkezidir. Bu merkezde büyük çoğunluğu tescilli ve farklı tür ve plan tipine sahip yapılar yer almaktadır. Suriçi Bölgesi 82 burç ve dört ana kapıdan oluşan tarihi surlarla çevrilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Diyarbakır ilinin Türkiye'deki konumu ve Urfa Kapı'nın Suriçi Bölgesindeki yeri¹

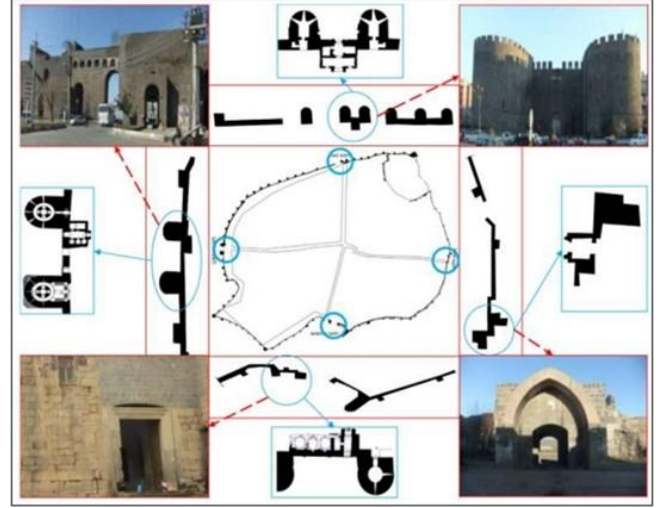
Diyarbakır surları, iç ve dış kaleden oluşmakta, iç kale Suriçi Bölgesi'nin kuzeydoğusunda yer almaktadır. Dış kale Suriçi Bölgesini çevreleyen birçok burç ve sur duvarlarından meydana gelmiştir. Dış kale surlarının uzunluğu 4460 m, iç kale surlarının ise 598 metredir. Farklı dönemlerde bazı surlar yıkılmış ve yıkılan surların uzunluğu 620 metredir [3].

Albert Gabriel'e [19] göre; Sur duvarlarının yükseklikleri 5-15 metre arasında değişiklik göstermektedir. Dış surların siperlik ve mazgallardan oluştuğu ve seğirdim yoluyla çevrelendiği ve yüksekliğinin 1.80-2.00 metre olduğu vurgulanmıştır. Sur duvar kalınlıkları 0.40-0.45 metre arasında değişmekte olup, yüksek sur duvarlarının mukavemetini arttırmak amacıyla kullanılan silindirik formu kenet taşları kullanılmıştır.

Diyarbakır Surları ve burçları, farklı form ve boyutlarda kullanım amaçlarına göre farklı özelliklerde yapılmıştır. Dış kale surlarının batısındaki sur ve burç duvarları, diğer duvarlara göre daha kalın olup, burçlar dairesel planlıdır. Yedi kardeş burcu, Ulu (Evli) Beden Burcu, Keçi Burcu ve Nur Burcu önemli burçlardır. Plan tipleri değişiklik gösteren burçlar, farklı boyutlarda tek ya da iki katlı olabildiği gibi büyük boyutlu burçlarda galeri katları da

bulunmaktadır. Burçların zemin katları geçmişte depo, üst katları ise askeri amaçlarla kullanılmıştır.

Surlar, Dicle Nehri'nden yaklaşık 100 metre yukarıda kayalık zemin üzerinde inşa edilmiştir. Suriçi Bölgesini çevreleyen Diyarbakır surlarının dışa açılan dört kapısı bulunmaktadır. Kuzey yönünde Dağ kapı (Harput Kapı), batısında Urfa Kapı (Rum, Halep Kapı), doğusunda Yeni Kapı, güneyinde Mardin Kapı (Tell Kapı) yer almaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Diyarbakır surları ve sur kapılarının konumları [20]

1950 yılında yapılan imar düzenlemeleriyle, Dağ Kapı ve Urfa Kapı arasındaki 13. ve 14. burçlardaki sur duvarlarında "Çift Kapı", 1959 yılında ise 8. ve 9. Burçlar arasındaki sur duvarlarında "Tek Kapı" olarak adlandırılan geçiş kapıları eklenmiştir [19],[21],[22].

Suriçi Bölgesinin kuzeyinde yer alan köşeli formu surlarla çevrilen İç kaleye giriş Saray Kapı'dan sağlanmaktadır. Kalenin doğusunda Küpeli Kapı, Oğrun Kapı ile Fetih Kapısı olmak üzere toplam dört adet geçiş kapısı bulunmaktadır.

İç kalede, Hz. Süleyman Cami ve birçok kamu yapısının bulunduğu bir yerleşke bulunmaktadır. Artuklu Kemeriyle girilen bu alanda, günümüzde kazı çalışmaları devam eden Artuklu Sarayı, Aslanlı çeşme, Saint George Kilisesi, Eski Ceza Evi Binası, Adliye A ve B Binaları, Kolordu Komutanlığı olarak kullanılmış tescilli yapılar yer almaktadır.

Diyarbakır Surları ve Hevsel Bahçeleri Kültürel Peyzaj alanının UNESCO Dünya Kültür Mirası olarak tescillenmesinde, Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi, Diyarbakır Valiliği ve kentte bulunan birçok kurum ve sivil toplum kuruluşları ile Kültür ve Turizm Bakanlığının desteğiyle 2012 yılında, kent tarihi ve kültürel zenginliklerin geleceğe aktarılması için çalışmalar başlatılmıştır [23].

Diyarbakır Surları ve Hevsel Bahçeleri için yaptığı adaylık başvurusu Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür

¹ Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi koruma amaçlı imar planına göre (KAİP) yeniden düzenlenmiştir.

Teşkilatına (UNESCO) bağlı Dünya Miras Komitesinde 2015 yılında değerlendirilerek ve alınan kararla, UNESCO Dünya Miras Listesi'ne eklenen on beş yapıdan biri olarak kaydedilmiştir [24].

Urfa Kapı ve burçlarının konumu ve mimari özellikleri

Urfa Kapı, Suriçi Bölgesinin batı yönünde sur dışına açılan kapısıdır. Albert Gabriel tarafından numaralandırılmış haritaya [19] göre 20 ve 20' numaralı burçlar ve üç geçiş kapısından oluşmaktadır. Kuzey yönünde bulunan kapı önceki yıllarda araç geçişinde kullanılmış, ancak kapının bulunduğu üst duvarlarda yapısal sorunların oluşması nedeniyle kapı araç geçişine kapatılmıştır. Kuzey kapısının üzerindeki yazıtların Artuklu Devleti dönemine (1183-1194) ait olduğu görülmüştür [25]. Urfa kapı ve kapı geçişlerinde 1944 yılında genel onarım geçirmiş üç kapı araç girişine açılmıştır. Ortadaki kemerli kapı, sonraki dönemlerde yapılan onarımlarda yükseltilmiştir. Bu nedenle orta kapıdaki özgün izler silinmiştir [19],[26],[27]. Günümüzde kuzeydeki kapı ve güney kapı trafiğe kapatılmış sadece ortadaki kemerli kapı araç trafiğine açık durumdadır. Toplam sur duvarının uzunluğu 33,73 m, duvar kalınlığı 4.04 m'dir. Kuzey kapı (K1) sur dışı genişliği 3,99 m'dir.

Kapılar, sur duvarı kalınlığı boyunca koridor oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Kuzey kapısının (K1) kuzey ve güney duvarında mekânlar bulunmaktadır. Kuzey kapı boyutları 3.43m-5.31m, ortadaki kemerli kapı (K2) 11,24 m yüksekliğinde ve 5,58 m genişliğindedir. Güney yönündeki kapı (K3) geçişi sur duvarı genişliğinde koridor şeklinde olup, çevresinde mekanlar bulunmamaktadır. Güney kapı boyutları (K3) 3.83m genişlik ve 3,63 m yüksekliğindedir (Şekil 3).

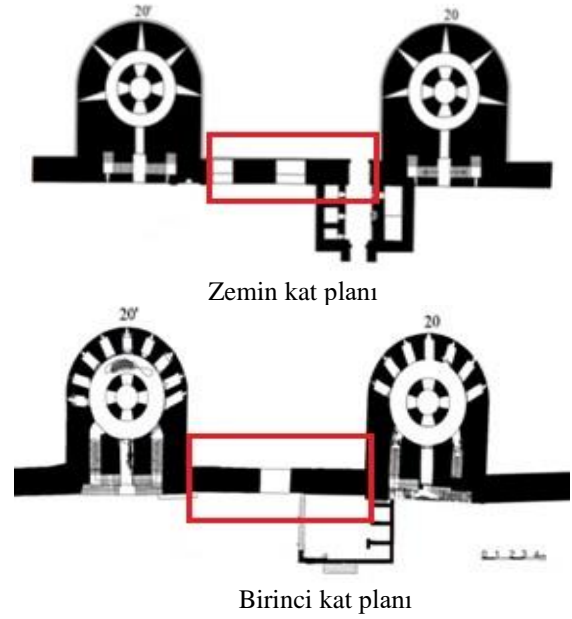


Şekil 3. Urfa Kapı Suriçi ve sur dışı görünümü (2022)

Urfa kapı geçişlerinin her iki yönde silindirik formlu iki burçla (20 ve 20') sınırlanmaktadır. Dıştan U biçimli silindirik formlu burçlar, galeri katı ve iki kattan oluşmakta ve burçlara sur içinden kemerli bir kapı ile girilerek ulaşılmaktadır. Burçların zemin katlarında dikdörtgen planlı giriş koridoru ile yukarı çıkan merdivenler konumlanmıştır.

20 ve 20' burçların birinci katında, dört ayağın taşıdığı bir galeri katı bulunmakta olup, ayakların oluşturduğu çekirdek bölümü koridorla çevrilidir. Birinci katta beş adet mazgal penceresi olan burçların ikinci katı aynı plan düzenindedir. (Şekil 4).

² Arkad: Mimarlıkta, sütun ya da ayakların taşıdığı kemer sırası, böyle bir kemer sırası ile sağır bir duvar arasında uzanan geçit [URL 2]



Şekil 4. Urfa Kapı 20-20' burçların planları [19]

Urfa Kapı sur duvarları, kapı geçişlerinde gözlemsel olarak tespit edilen hasarlar

Urfa Kapı sur duvarlarında 2019-2021 Haziran ayına kadar yapılan gözlemsel tespitlerle, kapı geçişleri, burçlar ve sur duvarlarındaki yapısal sorunlar belirlenmiştir. Bu sorunlar burçlar, kapı geçişleri ve sur duvarlarına göre ayrı olarak sınıflandırılmış ve gözlemsel tespitler fotoğraflarla belgelenmiştir. Haziran 2021 yılından sonra restorasyon sürecine giren Urfa kapı ve burçlarında, hasarlı alanlar askıya alınarak kısmi müdahaleler yapılmıştır.

Kapı geçişleri ve tespit edilen yapısal sorunlar

Urfa Kapı 'da 20 ve 20' burçlar arasındaki sur duvarlarında üç adet kapı geçişi bulunmaktadır. Kuzey kapı sur dışında kitabeli ve dörtgen formludur Ortada kemerli kapı (K2) diğer iki kapıya göre yüksektir. Güney yönündeki kapının (K3) sur dışında açılan kapısı dikdörtgen formlu olup, koridor şeklinde devam ederek Suriçi Bölgesine kemerli bir kapıyla açılmaktadır. Kapı geçişlerinin üstünde kemerli 11 adet sıralı niş şeklinde "arkad"²lar bulunmaktadır (Şekil 5).

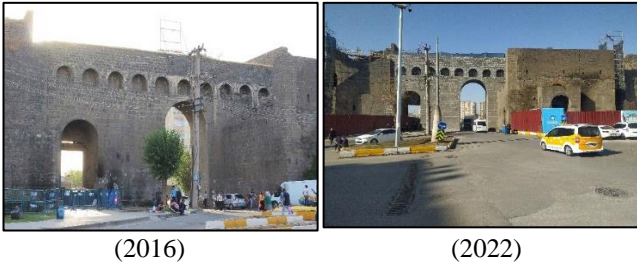


Şekil 5. Urfa Kapı geçişleri üstlerindeki "arkad"lar (2022)

Kuzey Kapı (K1)

Trafik titreşimi ve kapı üstü duvardaki ayrışmalar nedeniyle 2012 yılında araç trafiğine, 2017 yılından sonra da kısmi olarak yaya geçişine kapatılmıştır. Kapının güney duvarı tümüyle yıkılmış, doğu duvarında strüktürel ayrışmalar mevcuttur. Kapı içindeki koridor üzerindeki tonoz, sıva ile kapatılmış ve bu alanlardaki nemlenme problemleri dışa yansımıştır.

Kapı geçişlerinin altında ve kemer bölümlerinde malzeme kayıpları bulunmaktadır. Kuzey kapının üzerindeki güney duvarının yıkılması nedeniyle döşemede malzeme yığınları ve toprak dolgu bulunmaktadır. Toprak bulunan alanlarda bitkilenmeye bağlı, özellikle duvarlarda nem sorunları oluşmuştur. Kuzey kapı üzerindeki "arkad"lı dört adet niş toprak ve taş dolgu ile kapatılmış, ancak 2021 yılındaki kısmi müdahalelerle nişlerin içi temizlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Urfa Kapı Suriçi Bölgesi cephesindeki restorasyon öncesi ve restorasyon süreci

Orta Kemerli Kapı (K2)

Orta kemerli kapının (K2) 1944 yılında yüksekliğinin artırılarak düşeydeki boyutlarının değiştirilmesi nedeniyle sur duvarında kesit daralmaları oluşmuştur. Bu nedenle, kapının sur dışına bakan batı bölümündeki çevre duvarlarında, kılcal çatlak, kırık ve malzeme kayıplarına bağlı boşalmalar ve kısmi ayrışmaların oluştuğu görülmüştür.

2021 yılında yapılan kısmi onarımlarda orta kemerli kapının duvar yüzeylerinde, temizleme dışında malzeme kayıpları ve güçlendirmeye yönelik bir çalışma yapılmamıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Orta Kemerli Kapı (K2) batı yönünde meydana gelen malzeme kayıpları (2021)

Güney kapı (K3)

Güney kapıda (K3), kapıyı çevreleyen silmelerde malzeme kayıpları ve çatlaklar bulunmaktadır. Kapının alt bölümleriyle kuzey ve güney duvarlarında kısmi boşalma ve taş malzemede çatlaklar mevcuttur. Kapının sur dışına

açılan bölümlerindeki malzeme kayıpları zemine yakın alt bölümlerde yoğunlaşmıştır (Şekil 8).



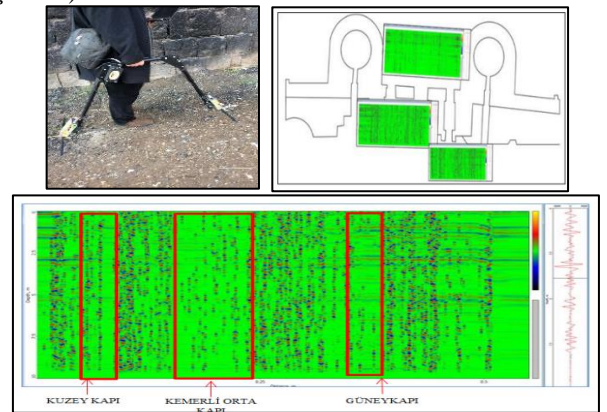
Şekil 8. Güney Kapıdaki (K3) malzeme kaybı hasarları

2021 yılında cephe temizliği ve burçların askıya alınması dışında, malzeme kaybı, çatlak ve kırıklara yönelik bir çalışma yapılmamıştır.

Urfa Kapı 'da zemin hasarlarına yönelik georadar (GPR) yöntemiyle yapılan aletsel tespitler

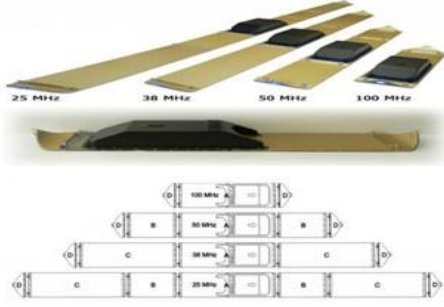
Urfa Kapı 'da hasarlara yönelik gözlemsel tespitler sonrasında, hasarların aletsel tespitlerle mevcut konumları ve düzeyleri belirlenmiştir. Zemin ve duvarlardaki hasar durumlarını belirlemek amacıyla georadar (GPR) cihazı kullanılarak, hasar durumları ve düzeyleri radargram kesitleriyle gösterilmiştir.

Urfa Kapı 'da kapı geçişlerindeki hasarların tespiti amacıyla 2017 yılında, 300 Hz'lik antenlere sahip Rimex GPR (Georadar) cihazıyla Georadar (GPR) taramaları yapılmıştır. GPR/Gradiyometre cihazından elde edilen tespitler, bilgisayar ekranına aktarılarak radargram ham görüntüleri, matematik işlemciyi yüksek oranda kullanan PRGSM 2,5 ve WOXLER 2 programları ile filtrelenmiştir. Jeofizik mühendisleri tarafından filtre edilen 16 görüntüye göre yatay ve dikey kesitler çıkarılarak, yapı zemin ve temel görüntüleri hakkında veriler elde edilmiştir. Yaklaşık 5,00 m derinliğin gösterildiği cihazda yapılan ölçümler sonucunda 1.00-2.50 metrede sürekli taşların bulunduğu temel yüzeyleri belirlenmiştir. 2.50-5.00 metre derinlikte yapılan ölçümlerde sürekli olmayan bir temel katmanı belirlenmiştir. Yapılan zemin taramasında elde edilen radargramların yatay ve dikey kesitlerinde, yüzeysel olarak temellerde herhangi bir deformasyon ve hasarın bulunmadığı tespit edilmiştir [28] (Şekil 9).



Şekil 9. Urfa Kapı 'da Rimex (GPR) cihazıyla yapılan aletsel ölçümler ve radargram kesitleri [28]

Urfa Kapı, kapı geçişleri ve sur duvarlarında georadar (GPR) taramaları 2020 yılında farklı georadar cihazıyla tekrar yapılmıştır. Georadar taramalarında Zond Python 3 GPR 100 Mhz merkez anteni bulunan cihaz kullanılmıştır. Python-3 GPR özellikle derin anketler (olumlu zeminde 65 metreye kadar) için kullanılan tek bir operatör tarafından taşınan bir taşınabilir dijital yeraltı radarıdır. Sur duvarlarındaki deformasyon, kırık ve çatlakların mevcut konumları ve düzeylerinin belirlenmesi amacıyla 1.6 Ghz anten kullanılarak taramalar yapılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Urfa Kapı, Kapı geçişleri ve sur duvarlarında kullanılan Python-3 GPR cihazı ve şematik görünümü (URL 3)

Urfa Kapı, sur duvarları ve kapı geçişlerinde yapılan taramalarda, araştırma derinliği, duvarlarda 4.00 metre, zemin için 20.00 metre seçilmiştir. Taramalar sonucunda elde edilen veriler, filtre edildikten sonra belirlenen deformasyon ve anomaliler radargram kesitler üzerinde gösterilmiştir. Çalışma alanına ait koordinat bilgileri, çalışma alanları poligonlara bölünecek şekilde alınmış ve köşe koordinatları Tablo 1 de gösterilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Urfa Kapı Sur duvarları ve kapı geçişleri yerbulduru haritası [29]

Tablo 1. Urfa Kapı, sur duvarları ve kapı geçişlerinin bulunduğu bölgeye ait koordinat bilgileri (ED/50/6')[29]

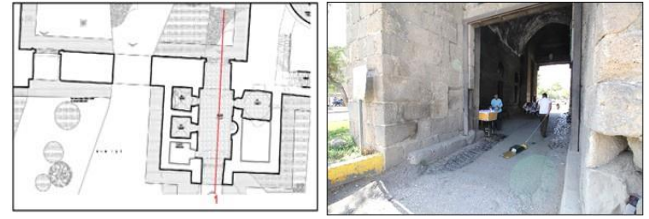
Koordinatlar	ZON (S)	Poligon	O	N	Yükseklik(m)
URFA KAPI	37 S	P-1	607868	4196652	665
	37 S	P-2	607880	4196647	666
	37 S	P-3	607864	4196449	665
	37 S	P-4	607868	4196445	663

Georadar (GPR) zemin taramaları, her kapı geçişi için ayrı olarak, duvar taramaları ise kapı geçişleri ve kapı geçişleri arasındaki sur duvarlarında yapılmıştır.

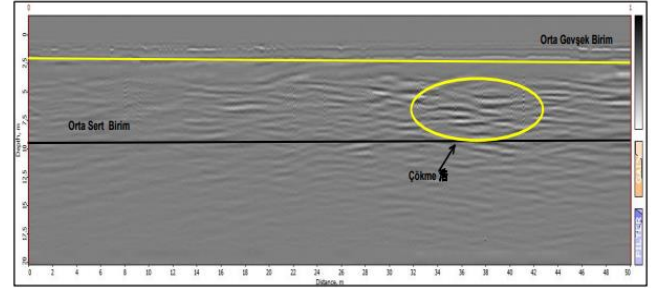
Urfa Kapı, kapı geçişlerinde yapılan zemin taramaları ve konumları

Kuzey Kapı (K1) Georadar Taraması (GPR-Z1)

Kuzey Kapı (K1) taramalarında 50.00 metre profil boyu ve 20.00 metre araştırma derinliği (penetrasyon) seçilmiştir. Profilde elde edilen verilere göre iki ayrı seviyenin ayrıldığı belirlenmiştir. Üst kısımlarda yaklaşık 2.50 metre kadar orta gevşek birim, 2.50–10.00 metreler arası orta sert birim olduğu düşünülmüştür. Ayrımlanan profil boyunca meydana gelen anomali yapılar radargram kesitlerinde gösterilmiştir. 7.50 metre derinlikte ve 36.00 ile 40.00 metreler arasında çökme şeklinde deformasyonlar tespit edilmiştir (Şekil 12, Şekil 13).



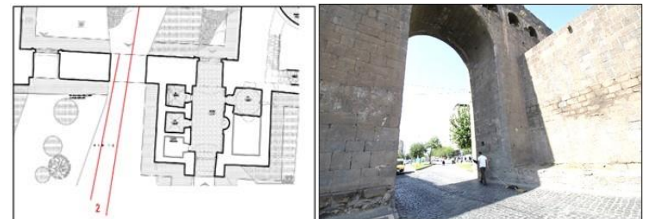
Şekil 12. Kuzey kapıda (K1) yapılan georadar (GPR-Z1) taramaları ve konumu



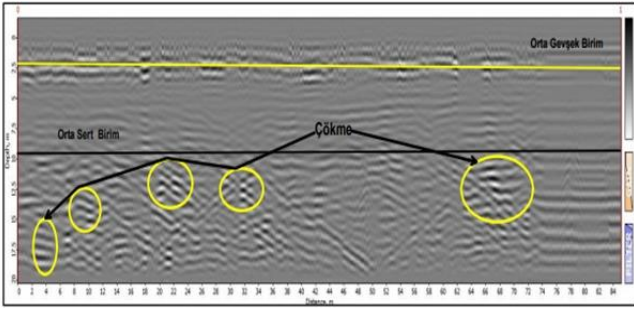
Şekil 13. Kuzey kapıda (K1) yapılan georadar taramalarından elde edilen radargram kesiti

Orta Kemerli Kapı (K2) Georadar Taraması (GPR-Z2)

Urfa Kapı, orta kemerli kapı (K2) zeminde yapılan georadar (GPR) taramalarında 90.00 metre profil boyu ve 20.00 metre araştırma (penetrasyon) derinliği seçilmiştir. Profilde elde edilen radargram kesitinde iki farklı seviye ayrıldığı görülmüştür. Zeminden yaklaşık 2.50 metreye kadar orta gevşek birim, 2.50 –10.00 metreler arası orta sert birim olduğu düşünülmektedir. Ayrımlanan profil boyunca çökme şeklinde deformasyonlar tespit edilmiştir. Çökme deformasyonlarının konumları radargram kesitinde gösterilmiştir (Şekil 14, Şekil 15).



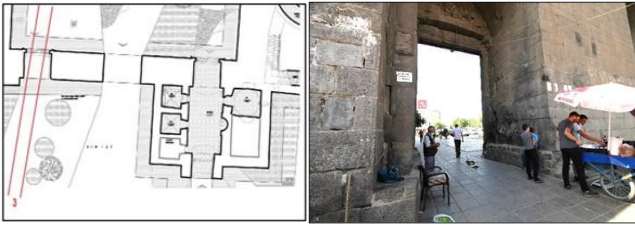
Şekil 14. Orta Kemerli kapıda (K2) yapılan georadar (GPR-Z2) taramaları ve konumu



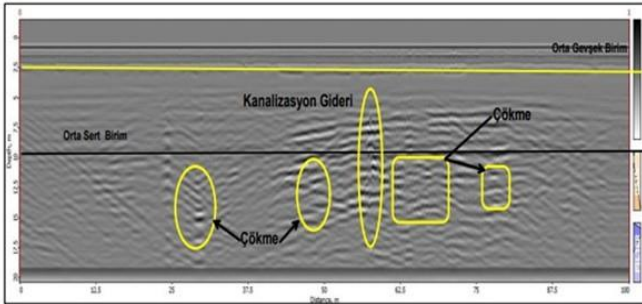
Şekil 15.Orta Kemerli kapıda (K2) yapılan georadar taramalarından elde edilen (GPR-Z2) radargram kesiti

Güney Kapı (K3) Georadar Taraması (GPR-Z3)

Urfa Kapı, güney kapısında (K3) yapılan georadar (GPR) taramalarında 100.00 metre profil boyu ve 20.00 metre araştırma (penetrasyon) derinliği seçilmiştir. Profilde elde edilen taramalarda, diğer kapılarda olduğu gibi iki farklı seviye ayrıldığı, zeminden 2.50 metreye kadar orta gevşek birim, 2.50–10.00 metreler arası, orta sert birim olduğu düşünülmüştür. 5.00 metre derinlikte ve 58.00 ile 60.00 metreler arasında bir adet kanalizasyon gideri ve farklı lokasyonlarda çökme deformasyonları olduğu tespit edilmiştir. Çökme deformasyonlarının konumları radargram kesitlerinde gösterilmiştir (Şekil 16, Şekil 17).



Şekil 16. Güney kapıda (K3) yapılan georadar (GPR-Z3) taramaları ve konumu



Şekil 17.Güney kapıda (K3) yapılan georadar taramalarından elde edilen (GPR-Z3) radargram kesiti

Urfa Kapı, kapı geçişlerinde yapılan duvar taramaları ve konumları

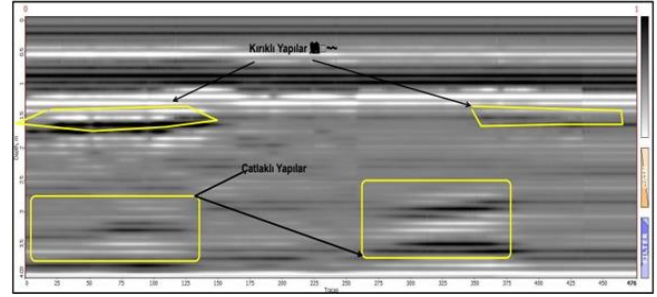
Güney kapı ile Orta Kemerli kapı arasındaki sur duvarı taraması (GPR-D1)

Güney kapı ile orta kemerli kapı arasında duvar taramasında (GPR-D1) 18.00 metre profil boyu ve 4.00 metre araştırma (penetrasyon) derinliği seçilmiştir. Taramalarda 00.50 ile 1.50 metrelerden itibaren kırıklı ve çatlaklı yapılar olduğu tespit edilmiştir. Çatlak ve kırıkların sur duvarlarında

strüktürel hasar oluşturacak düzeyde olmadığı düşünülmektedir (Şekil 18, Şekil 19).



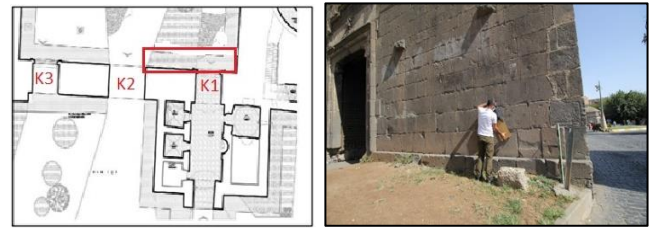
Şekil 18.Güney kapı (K3) ile orta kemerli kapı (K2) arasındaki sur duvarı (GPR-D1) tarama ve konumu



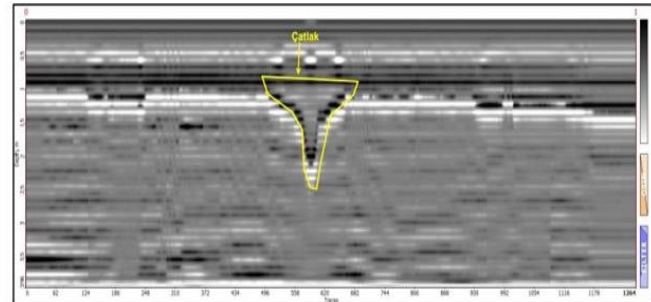
Şekil 19.Güney kapı (K3) ile orta kemerli kapı (K2) arasındaki sur duvarı (GPR-D1) radargram kesiti

Orta Kemerli Kapı (K2) ile Kuzey Kapı (K1) arasındaki sur duvar taraması (GPR-D2)

Urfa Kapı, orta kemerli kapı (K2) ile kuzey kapı (K1) arasındaki sur duvarında yapılan georadar taramalarında 12.00 metre profil boyu ve 4.00 metre araştırma derinliği (penetrasyon) seçilmiştir. Duvar taramalarında 0.50-1.50 metreden itibaren kırıklı ve çatlaklı yapılar tespit edilmiştir. 1.50 metre derinlikte 558.00- 650.00 traces aralığında oluşan yaklaşık **12 cm** ve alta doğru daralan bir adet çatlak yapısı mevcuttur. Tespit edilen çatlak ve kırıklı yapıların, gözlemsel tespitlerde belirlenmiş hasarlara yakın alanlarda olduğu görülmüştür (Şekil 20, Şekil 21).



Şekil 20. Orta kemerli kapı (K2) ile kuzey kapı (K1) arasındaki sur duvarı (GPR-D2) tarama ve konumu



Şekil 21. Orta kemerli kapı (K2) ile kuzey kapı (K1) arasındaki sur duvarı (GPR-D2) radargram kesiti

Sonuç ve Öneriler

Tarihi Suriçi Bölgesinin dört kapısından biri olan Urfa Kapı'daki hasarların tespiti amacıyla gözlemsel ve aletsel tespitler yapılmıştır.

Urfa Kapı 'da 2017 yılında georadar taramaları sadece zeminde yapılmış ve bu taramalarda, mevcut hasarların yapısal sorun oluşturacak düzeyde olmadığı belirlenmiştir [28].

Urfa Kapı 'da sur duvarları ve kapı geçişlerinde zemin ve duvarlardaki hasarların belirlenmesi amacıyla tahribatsız yöntemlerden biri olan Georadar (GPR) yöntemi kullanılarak, Python 3 cihazı ile aletsel tespitler yapılmıştır.

Bu tespitlere göre;

- Urfa Kapı'daki sur duvarları ve kapı geçişlerinde yapılan georadar (GPR) taramalarında araştırma (penetrasyon) derinliği zemin için 20.00 metre, duvarlarda ise 4.00 metre olarak seçilmiştir.
- Georadar taramalarında, kapı geçişleri ve sur duvarlarının zemin yapısının, zemin ile 2.50 metre seviyesinde orta gevşek birim, 2.50-10.00 metre arasında ise orta sert birim şeklinde iki seviyede ayrıldığı görülmüştür.
- Urfa Kapı'nın kuzey kapısında (K1) 7.50 metre derinlikte ve 36.00- 40.00 metreler arasında çökme şeklinde deformasyonlar olduğu tespit edilmiştir.
- Orta kemerli kapı (K2) zemininde, orta sert zeminin altında belirgin şekilde beş adet çökme şeklinde deformasyonlar olduğu görülmüştür.
- Güney kapıda (K3) 5.00 metre derinlikte ve 58.00-60.00 metreler arasında bir adet kanalizasyon borusu olduğu düşünülen bir kanal ile farklı lokasyonlarda çökme deformasyonları olduğu tespit edilmiştir.
- Güney Kapı (K3) ile orta kemerli kapı (K2) arasındaki sur duvarında yapılan taramalarda, araştırma derinliği 4.00 metre olarak seçilmiştir. Bu taramalarda 00.50-1.50 metrelerden itibaren kırıklı ve çatlaklı yapılar olduğu tespit edilmiştir.
- Orta kemerli kapı (K2) ile kuzey kapı arasında kalan sur duvarlarındaki taramalarda 00.50-1.50 metre derinlikten itibaren kırıklı ve çatlaklı yapıların olduğu belirlenmiştir. 1.50 metre derinlikte 58.00-650.00 traces aralığında üst tarafı yaklaşık **12 cm** olan alta doğru daralan bir adet çatlak yapısı tespit edilmiştir.
- Zemin ve sur duvarlarında yapılan georadar taramalarında tespit edilen deformasyonların boyutları ve konumları iki boyutlu radargram kesitleriyle gösterilmiştir.

Urfa kapı, sur duvarları ve kapı geçişlerindeki hasarların belirlenmesi amacıyla, gözlemsel ve aletsel tespitler yapılarak, hasarların konumları ve düzeyleri belirlenmiştir. Üst yapıda meydana gelen çatlak ve deformasyonların zeminde tespit edilen çökmelere bağlı oluştuğu belirlenmiştir.

Urfa Kapı 'da tespit edilen hasarların giderilmesi amacıyla, 2021 yılında kısmi olarak başlatılan restorasyon çalışmalarının, hazırlanacak kapsamlı güçlendirme çalışmalarıyla desteklenmesi gerekli ve önemlidir.

Bu bağlamda Urfa kapı, sur duvarları ve kapı geçişleri için;

- Strüktürel hasarları bulunan Urfa Kapı, sur duvarları, kapı geçişleri ve burçlarını kapsayan rölöve projeleri güncellenerek, restorasyon, restitüsyon ve güçlendirme projeleri ivedilikle hazırlanmalıdır.
- Projelerinin hazırlanması sonrası, hasar analizlerine yönelik uygulama projelerine katkı sunacak akademik ve bilimsel destek sağlayan uzmanların bulunduğu bilim kurulları oluşturulmalıdır.
- Kuzey kapının (K1) Suriçi bölgesine bakan doğu duvarındaki strüktürel ayrışmaların giderilmesi amacıyla, kapının tümü askıya alınmalıdır. Kuzey kapı kemer ve tonozlarda kullanılan beton sıvalar kaldırılarak özgüne uygun tamamlamalar yapılmalıdır.
- Orta kemerli kapının (K2) güney duvarı ile batı duvarındaki çatlak ve kırıkların giderilmesi amacıyla güçlendirme çalışmaları yapılmalıdır.
- Güney kapının (K3) zemine yakın duvarlarındaki malzeme kayıpları, özgüne uygun malzemelerle tamamlanmalıdır. Kapı geçiş koridorundaki tonoz ve kemerlerdeki beton malzemeler kaldırılmalıdır.
- Sur duvarları, kapı geçişleri ile burçlardaki hasarların giderilmesi ve güçlendirilmesinde gerekli bölümlerde askılama uygulaması yapılarak uygun kuşaklama ve çemberleme gibi müdahaleler tercih edilmelidir.
- Burçların sur duvarlarıyla birleşim yerlerindeki ayrışma ve malzeme kayıpları tamamlanmalıdır.
- Kapı geçişlerinin üzerinde bulunan kemerli ve sıralı niş şeklindeki "arkad"lardaki malzeme kayıpları giderilmelidir.
- Kuzey kapının sur içi bölgesine bakan doğu duvarındaki hasarlı lentoda güçlendirme yapılarak, bozulmuş taşıyıcılık özelliği yeniden kazandırılmalıdır.
- Georadar taramalarıyla zeminde ve duvarlarda tespit edilen, çökme, kırık ve çatlakların giderilmesine yönelik, ilgili uzmanlar tarafından önerilen güçlendirme çalışmaları ivedilikle başlatılmalıdır.

Urfa kapı, sur duvarları ve kapı geçişlerinde georadar (GPR) taramalarıyla hasarların tespit edilmesi amacıyla yapılan bu çalışmanın benzer nitelikteki sur duvarları ve kapı geçişleri için bir rehber olacağı düşünülmektedir.

Gözlemsel tespitler sonucu tespit edilen hasarların, aletsel tespitlerle desteklenmesi ve elde edilen verilerde mevcut hasarların konumları ve düzeylerinin mevcut durumunun belirlenmesi ve belgelenmesi, Urfa Kapı 'da yapılacak restorasyon ve onarım çalışmalarında katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] V. Berchem, Strzygowski, J., 1910. "Amida, Heidelberg
- [2] C.Parla, "Türk İslam şehri olarak Diyarbakır" Yüksek lisans tezi. .35,1990
- [3] F.M. Halifeoğlu, "Castle Architecture in Anatolia; Fortifications of Diyarbakır". *Frontiers of Architectural Research* (2), 209–221, 2013.
- [4] N. Husrev, "Sefername" (Abdulvahap Terzi, Trans.). The Ministry of Education Publication, 1985.
- [5] N. Işık "Investigation of structural problems on the ground and walls of Diyarbakır historical Behram Pasha mosque by the georadar (GPR) method" DUJE (Dicle University Journal of Engineering) DÜMF Mühendislik Dergisi 12:4 689-698. 2021. Doi: 10.24012/dumf.1002241
- [6] D.M, McCann., M.C. Forde. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E International* 34, 71–84. 2001
- [7] N. Işık, Halifeoğlu, F.M. "Tarihi yapılarda tahribatsız yöntemlerle yapısal sorunların tespiti; Diyarbakır Hoca Ahmet (Ayn minare) camide georadar (gpr) ölçümleri ve değerlendirilmesi" DUJE (Dicle University Journal of Engineering)- *DÜMF Mühendislik Dergisi* 12:5, 2021: pp. 829-840 Doi: 10.24012/dumf.1051475
- [8] İ. Bedirhanoğlu, A. İrfanoğlu "Diyarbakır Şeyh Mutahhar Camii Dört Ayaklı minaresinin deprem yer hareketine karşı davranışı. *Uluslararası katılımlı tarihi eserlerin güçlendirilmesi ve geleceğe güvenle devredilmesi sempozyumu*, 223-234, 15-17 Ekim 2009.
- [9] N. Massini, L. Nuzzo and Enzo Rizzo GPR investigations for the study and the restoration of the rose window of Troia Cathedral (southern Italy) *Near Surface Geophysics*, 287-300, 2007.
- [10] P. Ulriksen P. Application of impulse radar to civil engineering. PhD thesis, Lund University of Technology, Lund, Sweden. 1982.
- [11] L. Binda, Lenzi G., A. Saisi. NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterization of stone masonries. *NDT&E International* 31, 411–419.1998.
- [12] D. Daniels, "Ground Penetrating Radar, 2nd Edition". *The institution of engineering and technology*, 2004.
- [13] A. S. Turk, K.A. Hocaoglu, A. A. Verity, 2011. "Subsurface Sensing". John Wiley & Sons Inc., ISBN: 978-0-470-13388-0.
- [14] M. Ambrosanio, V. Pascazio, "A compressive sensing-based approach for microwave tomography and GPR applications", *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec City, Canada, 2014.
- [15] S. Meschino, L. Pajewski, M. Pastorino, A. Randazzo, and G. Schettini, "Detection of subsurface metallic utilities by means of an SAP technique: Comparing MUSIC- and SVM-based approaches," *Journal. Applied. Geophysics*, 2013.
- [16] J. M. Gutiérrez "Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas.sistema georadar ramac/GPR VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCART, 2004.
- [17] Kadioğlu, S., "3D Ground Penetrating Radar-Data Acquisition, Processing, and Interpretation", 14th International Petroleum Congress and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey, Ankara-TURKEY, Proceedings, p.485-486. 2003
- [18] Kadioğlu, S. and Ulugergerli, E.U., Determination of cavities using ground penetrating radar in Dalaman Akköprü dam construction area, the 16th international geophysical congress and exhibition of Turkey, 7-10 December, MTA Cultural Center-Ankara, Abstract Book, 372-375. 2004.
- [19] A. Gabriel, "Voyages Archeologiques Dans La Turquie Orientale." 2. Cilt. s106. 1940.
- [20] N. Işık, F.M. Halifeoğlu, S. İpek, "Nondestructive testing techniques to evaluate the structural damage of historical city walls" *Construction and Building Materials*. Volume 253, 30 August 2020, 119228.
- [21] Ş. Beysanoğlu, "Anıtlar ve Kitabeleri ile Diyarbakır Tarihi, I", s.335, 1990.
- [22] İ. Yıldız, Ş. Öztürk, "Diyarbakır Surları" T.C Diyarbakır Valiliği Yayınları.s.24. 2016
- [23] S. Karadoğan, M. Assenat, "Amida" (Université Paul-Valéry Montpellier 3) atölyesi ve çalışmaları, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* Cilt:8 Sayı:2 285-292. 2017.
- [24] E. Deniz, "Türk dünyasından haberler", *Türk Dünyası Dergisi* sayı. 40, 233,2016.
- [25] C. Parla, "Türk İslam şehri olarak Diyarbakır" Yüksek lisans tezi. s.41, 1990
- [26] Ş. Beysanoğlu, "Anıtları ve Kitabeleri ile Diyarbakır Tarihi: Cumhuriyet dönemi", 2001.
- [27] C. Parla, "Diyarbakır Surları ve kent tarihi" *ODTÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2005/1. (22: 1) 57-84.
- [28] N. Işık, "Geleneksel yığma yapılarda taşıyıcı sistem hasarları ve nedenlerinin tespiti ile güçlendirme ve tamamlayıcı müdahale önerileri; Diyarbakır Suriçi Örneği", *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yayınlanmamış Doktora Tezi*, 287-288, 2017.
- [29] A.E. Anaran, "Urfa Kapı zemin ve duvar bazlı yayımlanmamış jeofizik etüt raporu", 2020.

İnternet kaynakları

URL 1 <https://whc.unesco.org/archive/2015/whc15-39com-19-en.pdf> (Erişim Tarihi: 31.01.2022)

URL 2 <https://www.arkeolojikhaber.com/haber-arkad-11905/> (Erişim Tarihi: 05.02.2022)

URL 3 <https://radsys.lv/en/products-soft/products/prod/6> (Erişim Tarihi: 01.02.2022).



Asma katın neden olduğu döşeme süreksizliklerinin yapısal performans üzerine etkisi *The effect of slab discontinuities on structural performance caused by mezzanine*

Ercan İŞİK¹, İbrahim Baran KARAŞIN^{2*}, Mehmet Emin ÖNCÜ²

¹ Bitlis Eren University, Department of Civil Engineering, Bitlis, eisik@beu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-8057-065X

² Dicle University, Department of Civil Engineering, Diyarbakır, baran.karasin@dicle.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-5990-1215

³ Dicle University, Department of Civil Engineering, Diyarbakır, oncume@dicle.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-6434-293X

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:
Geliş 10 Aralık 2021
Revizyon 20 Ocak 2022
Kabul 3 Mart 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar kelimeler: Asma kat;
pushover; öz değer; döşeme
süreksizliği; düzensizlik

ÖZ

Döşemelerde, asma kat gibi çeşitli nedenlerden dolayı süreksizlik oluşabilir. Ülkemizde asma kat yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tek ve iki yönde oluşturulan asma kat için öz değer ve statik itme analizleri yapılmıştır. Toplam altı farklı bina modeli hem X hem de Y yönü için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Tüm yapısal modellerde farklı performans seviyeleri için; periyotlar, etkili kütle katılım oranları, taban kesme kuvveti, elastik ve etkili rijitlik ve hedef yer değiştirme elde edilmiştir. Tüm değerlerin karşılaştırılması ve sonuçların yorumlanmasından sonra öneriler yapılmıştır. Yapıda kullanılacak asma kat nedeniyle döşeme süreksizlikleri ve yapı içerisinde kat yüksekliklerinin farklılaşması, bina savunma mekanizmasını zayıflatan riskler olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışma, İki farklı olumsuzluk değişkeninin etkileşimini ortaya koymak ve yaygın olarak kullanılan asma kat seviyelerinin yapısal deprem davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak adına önemlidir.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 10 December 2021
Revised 20 January 2022
Accepted 3 March 2022
Available Online 30 March 2022

Keywords: Mezzanine; pushover;
eigen value; slab discontinuity;
irregularity

Doi: 10.24012/dumf.1080070

* Sorumlu yazar / Correspondence

ABSTRACT

Slabs may contain discontinuity due to various reasons such as mezzanine. Mezzanine are widely used in our country. In this study, eigen value and static pushover analyses were made for mezzanine formed by one and two direction. Totally six different structural models were analysed separately for both X and Y direction. The periods, effective mass participation ratios, base shear force, elastic and effective rigidity and target displacement for different performance level were obtained for all structural models. Suggestions were made after comparison of all values and the interpretation of the results. The slab discontinuities and the differentiation of story heights in the building due to the mezzanine appear as risks that weaken the building defence mechanism. The study is important on behalf of asserting the interaction of two different negativity variables and revealing the effect of commonly used mezzanine levels on the structural earthquake behaviour.

1 Introduction

Earthquake performance can be defined as “building safety status determined according to the level and distribution of potential damages in a building under the influence of a certain earthquake” [1-3]. There are many parameters that may affect the earthquake performance of buildings negatively. These parameters are also found in the seismic design codes. The damage caused by the past earthquakes reveals the importance of the unfavourable parameters of the buildings. Parameters such as vertical/horizontal discontinuity, irregularity in plan, material quality, short column, stiffness/strength difference between stories and hill/slope effects weaken the earthquake defence mechanisms and decrease the earthquake performance of the structures [4-13]. These parameters in the structure should be avoided as much as possible. For this reason, if these parameters are required, special measures should be taken to improve the performance of the structure. Knowing the parameters that reduce the earthquake performances in the structural analysis will gain meaning in the operations that will be carried out at the design stage. Buildings that have been inattentive during the design and construction will naturally increase the amount of damage if combined with negativity parameters. Sufficient stiffness, strength, continuity, and ductility are the leading principles considered in the design of buildings under earthquake impact. The continuity of the structural system elements in the buildings is one of the general principles of earthquake-resistant building design. The continuity of the structural system elements provides the loads affecting the structures to transfer easily and without entanglement within the structure. In the case of discontinuity, the loads enter a difficult transfer process up to the ground by finding their way through the labyrinth shape. Nevertheless, because of several reasons, there may be interruptions in the structural elements. In such cases, it is not possible to refer to continuity. The discontinuity of the structural elements is one of the factors that will negatively affect the earthquake performance of the structure. This discontinuity is observed in the horizontal and/or vertical elements. One of these discontinuities is slab discontinuity. Slabs can be interrupted in any floor for different reasons. One of the factors causing the discontinuity of the slab is the mezzanine.

In the studies on slab discontinuity, different structural models and different gaps were taken into account and the results were compared. Khurram (2018), examined the effect of beam and slab discontinuity on structural behavior in reinforced-concrete (RC) buildings on ten different structural models for a 5-storey RC structure [14]. Tekdal (2008), investigated the effects of slab discontinuities on RC framed structures with different

types of discontinuities under earthquake loads. The models have changed according to the void ratio in the slabs and whether the voids are symmetrical in the plan or not [15]. Ayrançı (2004), carried out earthquake structural analyzes of 2 types of building samples with 3 different computer modelling approaches for the case of large slab irregularities [16]. Yedikardeş (2010), investigated the case of A2 irregularity (slab discontinuity) with sheared structures and the effect of shear placement to correct this situation [17]. Özdemir (2005), made structural analyzes by changing the gap rate and their location in RC buildings with A2-slab discontinuity [18]. Öztürk (2013), compared the behavior of RC buildings with slab gaps at certain rates under earthquake loads, taking into account the earthquake codes of Turkey and different countries [19]. Terzi and Elçi (2006), compared the effect of slab discontinuity on section effects in RC structures under different slab assumptions [20]. Sağlıyan and Yön (2018), examined the effect of multi-story RC structures with slab discontinuity in plan on earthquake behavior for six different structural models using incremental dynamic analysis method [21].

In this study, the discontinuity of the slab due to the mezzanine was examined. A reference RC building was selected to determine the effects of slab discontinuity. Earthquake performances of all models were obtained by considering six different structural models. The existing structures with mezzanine were examined on-site and models were created. The mezzanine models which cause discontinuity of single or double sides are considered principally. The heights of the stories can be different or have same values in buildings with mezzanines. As part of this study, the first group models were selected by taking the story height equal in buildings model. In the second group models, we selected the ground and mezzanine story height was different and the other story heights were equal. Since the mezzanine are generally used in commercial buildings, the height of the ground story can be different from the mezzanine height. For this reason, the analyses for the second group of models were carried out separately for both directions in order to reflect the results more accurately. All calculated values related to earthquake performance were compared. The obtained results were compared with the building values chosen as reference without any mezzanine and the suggestions were made. In addition, information about the concept of mezzanine is also given in the study. The fact that the models considered in the study were made in practice increases the value of the study. In addition, the differentiation of the story heights and the presence of the mezzanine together develop as a difference from the other studies.

2 Mezzanine and Slab Discontinuities

The two main components of the studies conducted to estimate the impact of earthquake disaster are the determination of earthquake hazard and determination of the vulnerability of the building systems. Vulnerability of structural systems is generally possible by examining the existing building stock and other construction structures, classifying them and obtaining the damage potential curves [22-28]. In some regions, mezzanine has an extensive usage and is one of the building stock properties for the region. Mezzanines are commonly used in the ground stories that are used especially for commercial purposes. Mezzanine is formed as a result of the differences of the story dimensions in the plan for two adjacent stories. It is generally used between the ground story and an upper

story. In some cases, it may take smaller values than other story heights. A connection is made between two stories with the usage of a stair. It can be used in different models, areas and for purposes. Mezzanine, half story or penthouse is used for different purposes. In general, it is thought to obtain efficiency by using the available space in the most optimum way. The area of use is highly increased in commercial enterprises especially. The use of mezzanine causes discontinuity of the slab in the structure. The discontinuity of the slab on any story for various reasons within the structural system is caused by the discontinuity of the slab. Slab discontinuities are expressed as A2 irregularity situation in Turkey Building Earthquake Code (TBEC-2018) [29]. In this case three different situations are taken into consideration. Slab discontinuity patterns of these three cases are shown in Figure 1.

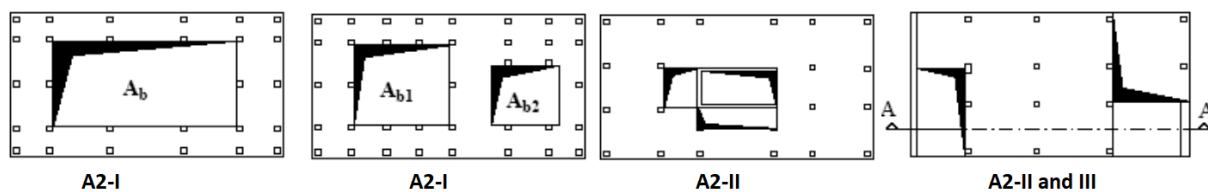


Figure 1. Slab discontinuity patterns [29]

In this study, a mezzanine was formed between the ground story and an upper story of the building. Some of the slabs in the story were removed from the structural system. Two different types of mezzanine were selected, and story height irregularity was revealed. Single and double-sided slab discontinuities due to the mezzanine are considered separately. Eigenvalue analysis and pushover analysis were performed separately for all structural models considered in this study.

Eigen Value Analysis

Mode shapes and natural frequency for any kind of structure can be obtained by eigenvalue analysis. Material properties remain constant throughout the calculation. Briefly, it can be evaluated as pure elastic structure analysis. It can be expressed by material cross-sectional properties such as cross-section, torsion constant, and moment of inertia, module of elasticity and module of stiffness. Structure-related modal period, frequency, modal participation factors, effective modal masses and their percentage values can be achieved by eigenvalue analysis [30-35].

Static Pushover Analysis

Pushover analysis is a common approach for determining seismic demand in building designs and evaluations. The pushover curve is evaluated from the static multiplier obtained by the application of the theorem of virtual works while considering kinematic varied configurations of the mechanism under study in

large displacements. The contribution of links is taken into account along this incremental kinematic analysis until the ultimate equilibrium condition. The displacement capacity for each contribution is a threshold considered as a performance level of the system. Pushover analysis is frequently utilized to predict nonlinear behavior of structural systems. In addition to this it is a static-nonlinear analysis method where a structure is subjected to gravity loading and a monotonic displacement-controlled lateral load pattern that continuously increases through elastic and inelastic behavior so that an ultimate condition is reached. Lateral load may represent the range of base shear induced by earthquake loading and its configuration may be proportional to the distribution of mass along building height, mode shapes or other practical effects. A capacity curve obtained from pushover analysis represents the relationship between the base shear force and the displacement of the roof. The base shear is normalized by building seismic weight while the roof level displacement is normalized by building height to represent the shear strength coefficient and roof displacement drift respectively [36-43].

Properties of the Sample Building Models

As part of this study, a 5-story RC building was selected. Seismostruct software was used for the numerical analysis in this study for all models [32]. The importance class of building was selected as II and damping ratio of 5% value was taken into consideration in all building models. C25 was used for concrete grade

and for rebars S420 grade was used as material for all structural models. All columns were selected as 300*400 mm and all beams were selected as 250*500 mm. The transverse reinforcements were used in both elements as $\Phi 10/100$. The cross sections of columns and beams used in the sample RC building are shown in Figure 2. These values are taken as constant in the analyses of all structural models.



Figure 2. The cross-sections of columns and beams

Force-based plastic hinge frame elements (infrmFBPH) were selected for columns and beams in all structural

models. These frame elements model the spread inelasticity based on force and only limit the plasticity to a finite length. The ideal number of fibers in the cross section should be sufficient to model the stress–strain distribution in the cross section [30, 32]. In total, 100 fiber elements are defined for the selected sections. This value is sufficient for such sections. Plastic-hinge length (L_p/L) was selected as 16.67%. Permanent and incremental loads were applied to the building model. The target displacement was selected as 0.50 m. All these values were taken as the same in all structural models.

The first variable was the presence of the mezzanine. Separate models were created for slab discontinuity due to the single or double direction mezzanine. In order to practice necessary controls a building which shows discontinuity was chosen. Slab discontinuities considered for single or double directions are shown in Figure 3.

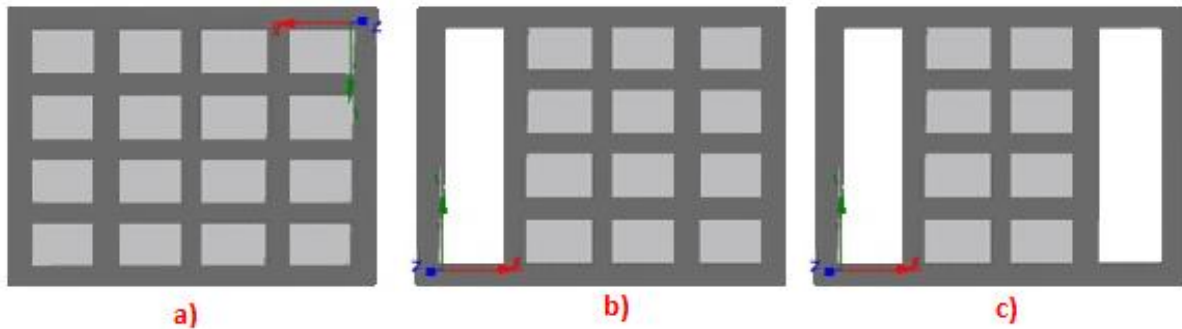


Figure 3. Slab discontinuities; a) No discontinuities, b) unidirectional discontinuity, c) bidirectional discontinuity

The 3D models obtained by the software within the study are given in Figure 4.

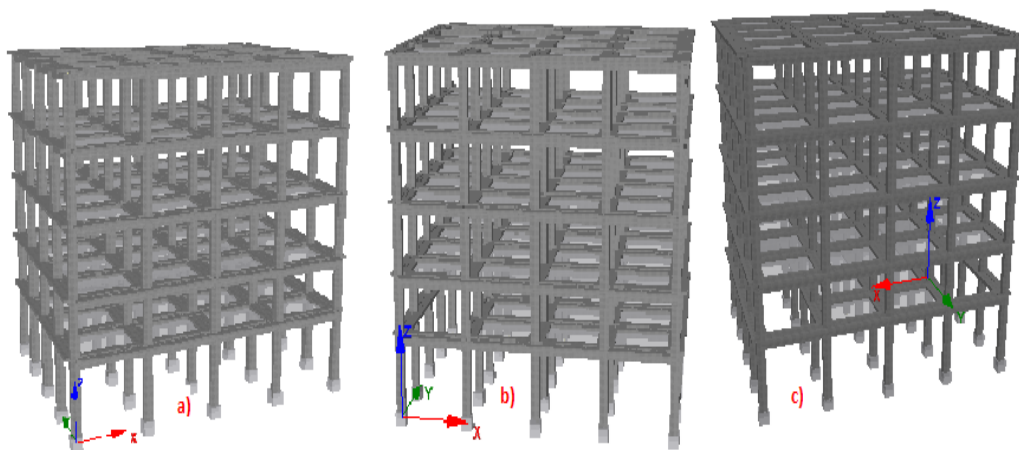


Figure 4. 3D structural models a) reference, b) unidirectional discontinuity, c) bidirectional discontinuity

The blueprint of the reference building model that does not include any slab discontinuity is shown in Figure 5.

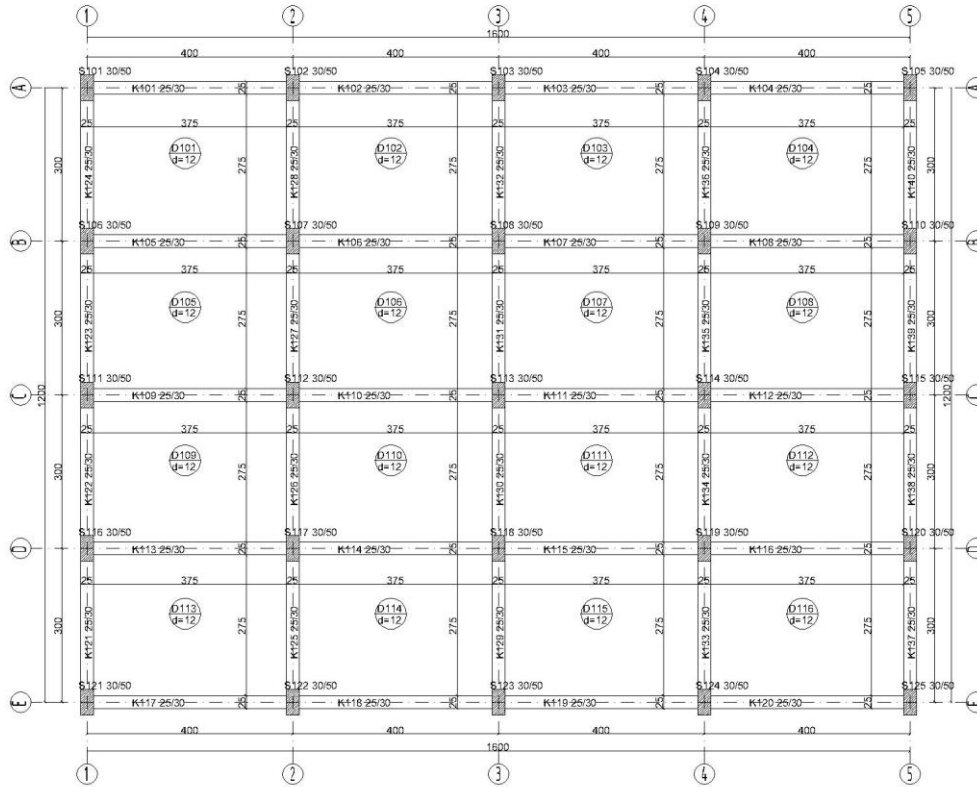


Figure 5. The blueprint of the reference building without slab discontinuity

The blueprint of the model used in case of a ground story due to the mezzanine is shown in Figure 6. discontinuity of slab on one side of the building on the 6.

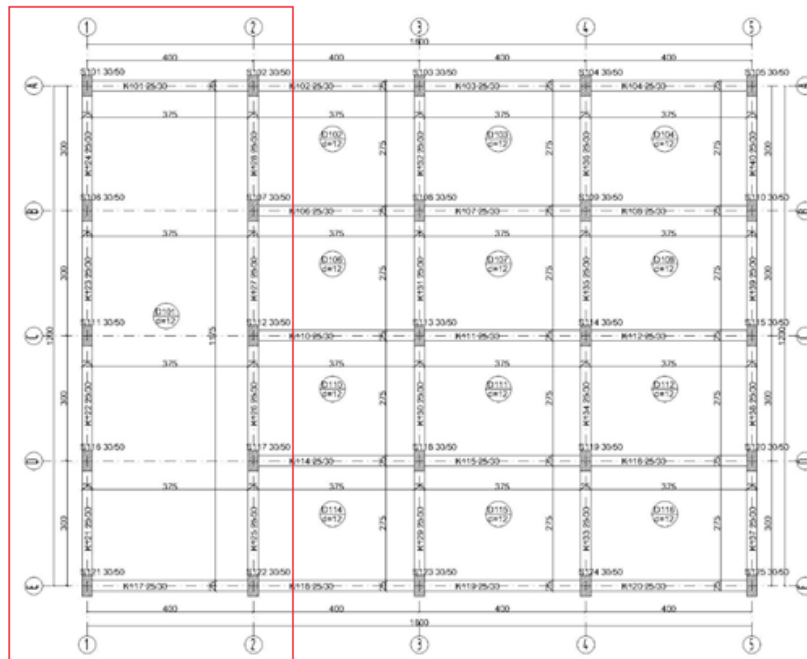


Figure 6. The blueprint of model for single-sided slab discontinuity in case of mezzanine

There is a discontinuity of slab in double-sided due to the mezzanine level in the third case of the study. The blueprint of the model for this situation is given in Figure 7.

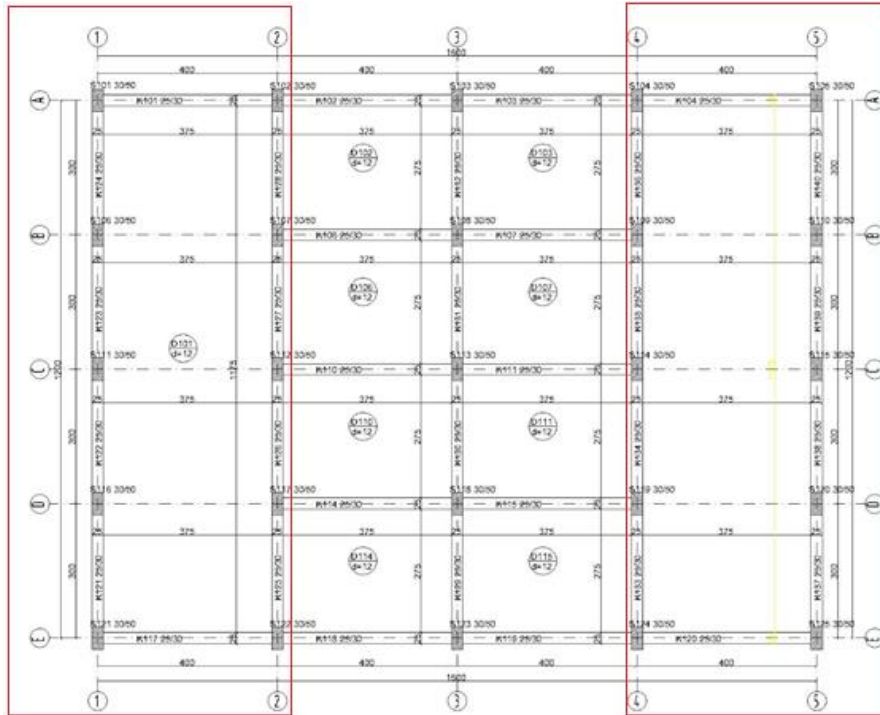


Figure 7 The blueprint of the model which discontinuity of double-sided slab

One of the variable parameters within the scope of the study in order to assert this difference is the height of the ground story. 2D models of the buildings in which

the ground and other story heights are measured as 3m and equally in the entire structure are given in Figure 8.

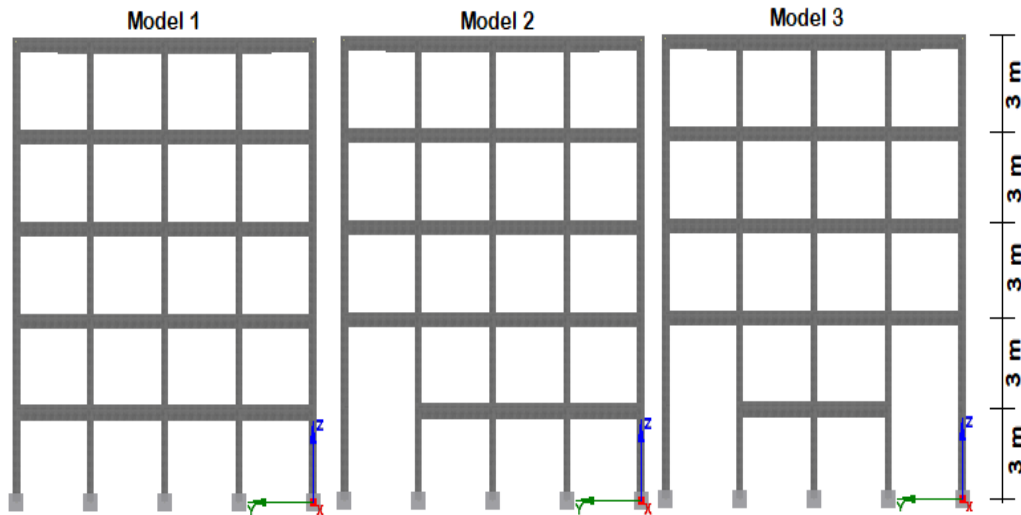


Figure 8. 2D models where all story heights are equal

The 2D models obtained in case the ground story height is 3.5m and the mezzanine height is 2.5m are given in Figure 9.

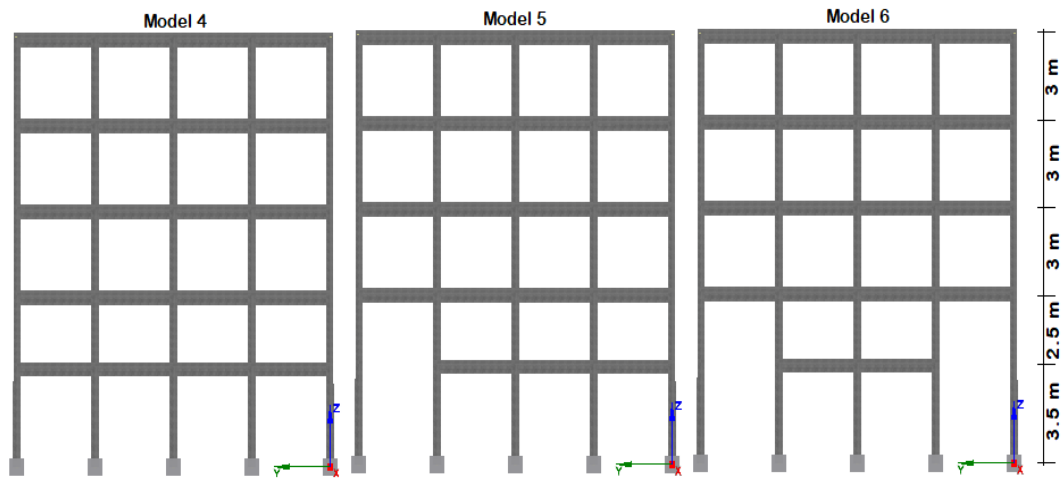


Figure 9. 2D models for different ground and mezzanine heights

Totally six structural models were considered in this study. Single and double-sided slab discontinuity due to the mezzanine, and ground story and mezzanine heights were taken into account for the variables.

Information on all models considered in this study is shown in the Table 1. Apart from that all other parameters are kept constant for all structural models.

Table 1 The variables in structure models considered in the study

Model No	Discontinuity	Story Height (m)		
		Ground Story	Mezzanine	Other Stories
1	None	3	3	3
2	Unidirectional	3	3	3
3	Bidirectional	3	3	3
4	None	3.5	2.5	3
5	Unidirectional	3.5	2.5	3
6	Bidirectional	3.5	2.5	3

Analysis Results

The natural fundamental periods of structural models were obtained from the eigenvalue analysis and comparisons of these are shown in the Table 2.

Table 2 Comparison of natural fundamental periods of structural models

Model	Period (sec)					
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
1	0.441	0.4415	0.4411	0.4536	0.4528	0.4521
2	0.355	0.3568	0.3582	0.3605	0.3620	0.3635
3	0.319	0.3274	0.3372	0.3215	0.3300	0.3401
4	0.148	0.1479	0.1471	0.1587	0.1573	0.1559
5	0.118	0.1177	0.1175	0.1248	0.1242	0.1235
6	0.104	0.1051	0.1063	0.1095	0.1101	0.1108
7	0.091	0.0901	0.0892	0.0920	0.0914	0.0908
8	0.068	0.0707	0.0698	0.0653	0.0717	0.0712
9	0.060	0.0679	0.0680	0.0618	0.0651	0.0650
10	0.058	0.0598	0.0594	0.0534	0.0614	0.0609

As the amount of gap in the story increased, the natural fundamental period of the structure increased and this reduces the rigidity of the structure. At the same time, when the story height is different in the building, the rigidity of the building decreases and the period of the building is obtained higher according to this. These two main factors are an indicator that these irregularities in

the structure will negatively affect the earthquake performance of the structure. The comparison of the cumulative effective mass participation ratios obtained for the first ten modes for the structural models where all the heights are the same in the building is given in Table 3.

Table 3 Cumulative effective mass participation ratios (%)

Mod	UX			UY			RX			RY		
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	0.00	0.00	0.00	86.14	86.54	86.95	9.35	9.09	8.83	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	86.14	86.54	86.95	9.35	9.09	8.83	0.00	0.00	0.00
3	84.09	85.46	86.85	86.14	86.54	86.95	9.35	9.09	8.83	8.10	7.46	6.80
4	84.09	85.46	86.85	95.84	95.87	95.90	48.05	47.41	46.71	8.10	7.46	6.80
5	84.09	85.46	86.85	95.84	95.87	95.90	48.05	47.41	46.71	8.10	7.46	6.80
6	94.38	94.65	94.94	95.84	95.87	95.90	48.05	47.41	46.71	36.28	36.16	36.04
7	94.38	94.65	94.94	98.73	98.64	98.54	50.93	50.20	49.40	36.28	36.16	36.04
8	94.38	94.65	94.94	99.76	98.76	98.54	54.32	50.63	49.40	36.28	36.16	36.04
9	97.99	94.65	94.94	99.76	99.67	99.56	54.32	53.63	52.86	38.39	36.16	36.04
10	97.99	97.83	97.68	100.0	99.67	99.56	54.58	53.63	52.86	38.39	38.04	37.67

The comparison of cumulative effective mass participation ratios obtained where the height of the

ground story and mezzanine is different from the other stories in the building is given in Table 4.

Table 4. Cumulative effective mass participation ratios where stories heights are different

Mod	UX			UY			RX			RY		
	Model 4	Model 5	Model 6	Model 4	Model 5	Model 6	Model 4	Model 5	Model 6	Model 4	Model 5	Model 6
1	0.00	0.00	0.00	90.60	90.78	90.96	7.03	6.92	6.81	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	90.60	90.78	90.96	7.03	6.93	6.81	0.00	0.00	0.00
3	87.72	88.81	89.90	90.60	90.78	90.96	7.03	6.93	6.81	6.68	6.19	5.68
4	87.72	88.81	89.90	98.78	98.76	98.73	50.32	49.75	49.17	6.68	6.19	5.68
5	87.72	88.81	89.90	98.78	98.76	98.73	50.32	49.77	49.17	6.68	6.19	5.68
6	97.74	97.72	97.71	98.78	98.76	98.73	50.32	49.77	49.17	38.06	37.86	37.64
7	97.74	97.72	97.71	99.66	99.64	99.62	51.03	50.50	49.93	38.06	37.86	37.64
8	97.74	97.72	97.71	99.81	99.64	99.62	52.52	50.51	49.93	38.06	37.86	37.64
9	99.33	97.72	97.71	99.81	99.80	99.78	52.52	51.99	51.43	38.78	37.86	37.64
10	99.33	99.22	99.12	100.00	99.80	99.78	53.43	51.99	51.43	38.78	38.57	38.32

Base shear forces for each structural model were obtained separately for both directions. Values were obtained for three different points on the idealized curve as displacement values. Eurocode-8 [44] was

used to obtain these values. The first value refers to displacement at the moment of yield (d_y), the second value refers to intermediate (d_{int}) and the third value refers to the target displacement. Elastic stiffness

(K_{elas}) and effective stiffness (K_{eff}) values were also calculated separately for all models directly using the stiffness reduction coefficients predicted in the software according to Eurocode-8. In the structural analysis, the limit states given in Eurocode-8 (Part 3)

[44, 45] were taken into consideration for damage estimation used worldwide. The limit states for damage estimation are presented in Figure 10, according to Eurocode-8.

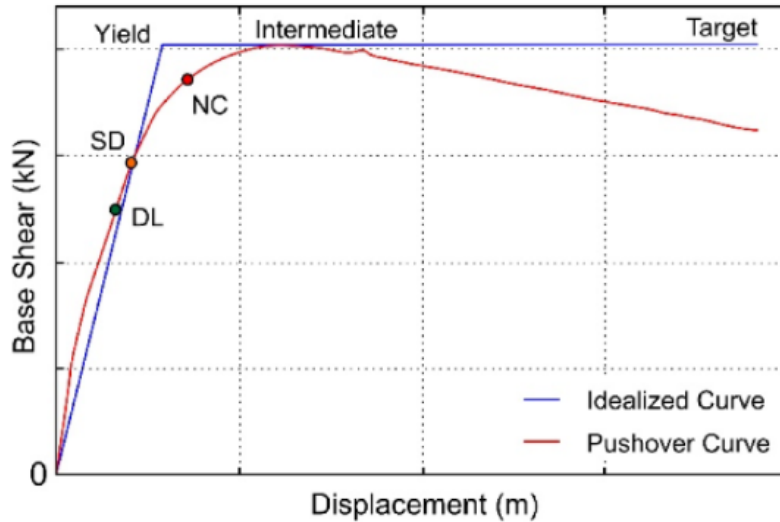


Figure 10. Limit states in Eurocode 8.

Three different cases are stated for the damage cases in the software. These are considered as near collapse (NC), significant damage (SD) and damage limitation (DL). These values are calculated for all the structural

models. The comparison of all values obtained in X direction as a result of structural analyses is given in the Table 5. The comparison of the values obtained for Y direction is given in the Table 6.

Table 5 Comparison of values obtained in X direction

Model	Base Shear (kN)	Displacement (m)	K_{elas}	K-eff	DL	SD	NC
1	5785.73	0.0865	115972.02	66898.56	0.0274	0.0352	0.0609
		0.1500					
		0.4908					
2	5574.43	0.0898	109779.06	62078.1	0.0283	0.0364	0.0631
		0.2001					
		0.4983					
3	5198.32	0.0900	101700.05	57772.62	0.0293	0.0376	0.0652
		0.1901					
		0.0500					
4	4938.45	0.0732	113070.61	67491.03	0.0279	0.0358	0.062
		0.1400					
		0.5005					
5	4905.19	0.0779	106654.05	60942.61	0.0287363	0.0368638	0.0639089
		0.1500					
		0.5007					
6	4778.16	0.0843	99158.61	56671.62	0.0300913	0.0386021	0.0669224
		0.1900					
		0.5001					

Table 6 Comparison of values obtained in Y direction

Model	Base Shear (kN)	Displacement (m)	K_elas	K-eff	DL	SD	NC
1	2956.02	0.0838 0.1300 0.5000	69963.64	35283.14	0.0381	0.0488	0.0847
2	2949.56	0.0841 0.1397 0.5007	69789.2	35072.9	0.038	0.0488	0.0846
3	2943.64	0.0844 0.1400 0.5008	69482.88	34858.26	0.0378	0.0486	0.0842
4	2486.51	0.0717 0.12 0.5	64064.81	34660.94	0.0393	0.0504	0.0875
5	2481.9	0.0721 0.1198 0.5007	63952.97	34445.71	0.0393	0.0504	0.0873
6	2477.23	0.0724 0.12 0.5000	63466.31	34232.76	0.039	0.05	0.0867

In addition, load factors for X and Y directions were obtained for each model in the study. The load factor λ cannot be controlled by the user directly. Instead it is automatically calculated by the program. $P_i = \lambda_i P_0$ is applied in a certain “i” increment and at the same time

the load vector corresponding to the controlled joint reaching the target displacement in that increment. The comparison of the load factors obtained is given in the Table 7.

Table 7 Comparison of maximum load factors

Model	Load Factor	
	X	Y
1	578.573	295.601
2	557.577	294.956
3	519.832	294.364
4	493.847	248.652
5	490.520	248.190
6	474.820	247.724

The comparison of the pushover curves obtained in X direction is shown in Figure 11 and in Y direction is shown in Figure 12.

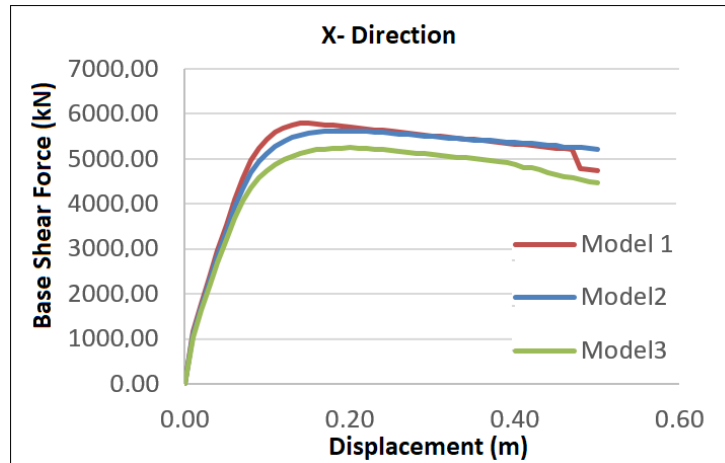


Figure 11 Comparison of pushover curves in X direction

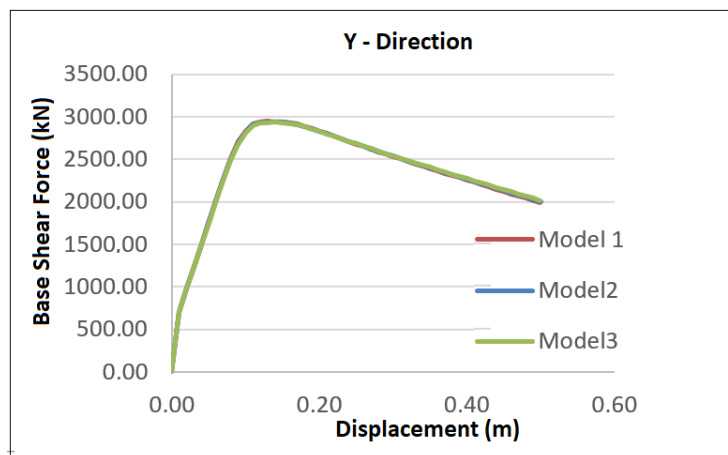


Figure 12 Comparison of pushover curves in Y direction

The comparison of the results where the heights of the story's in the building are the same and different is also obtained. In this comparison, the models created for none-discontinuity, unidirectional and bidirectional discontinuity were compared among themselves. Model 1 and Model 4 that were selected as reference; Model 2 with single-sided slab discontinuity due to mezzanine, and Model 3 with double-sided slab

discontinuity cases due to mezzanine were compared between each other. X and Y directions were taken into consideration separately while making these comparisons. The comparison of the pushover curves obtained for X direction is shown in Figure 13. The comparison of the pushover curves obtained for the models between each other in the Y direction is shown in Figure 14.

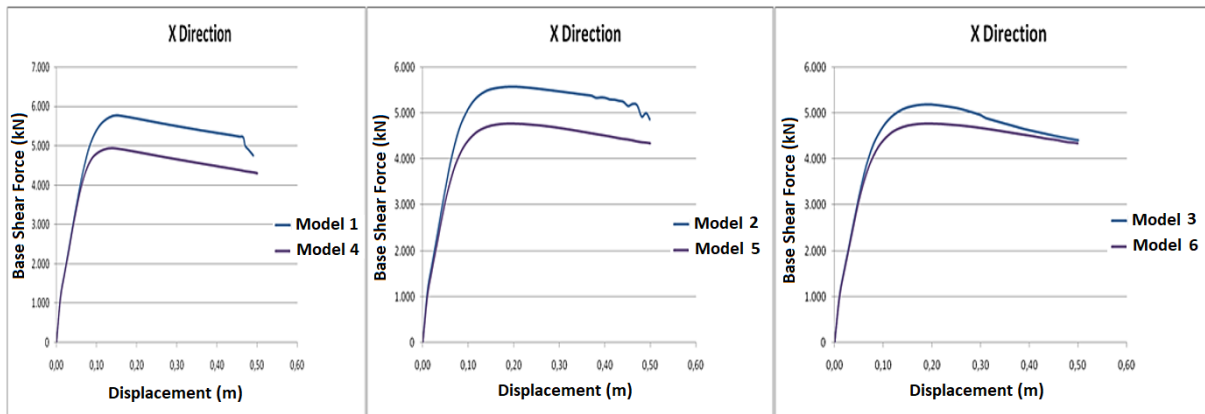


Figure 13. The comparison of models between each other in X-direction

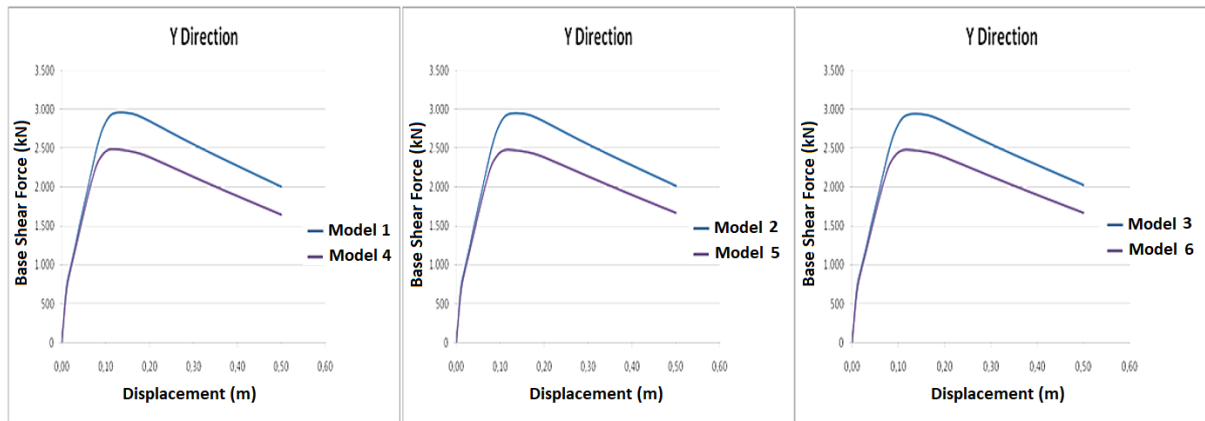


Figure 14. The comparison of models between each other in Y-direction

The comparison of the first damage occurring obtained for X direction is shown in Figure 15. The comparison of the first damage occurring obtained for the models between each other in the Y direction is shown in Figure 16.

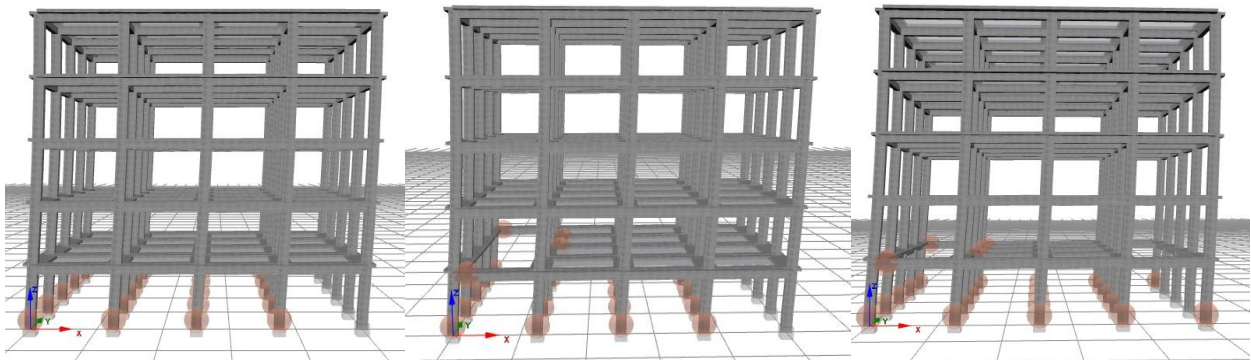


Figure 15. Plastic hinges at load factors 40.89-39.17-36.80 in X-direction for Model 1-2-3

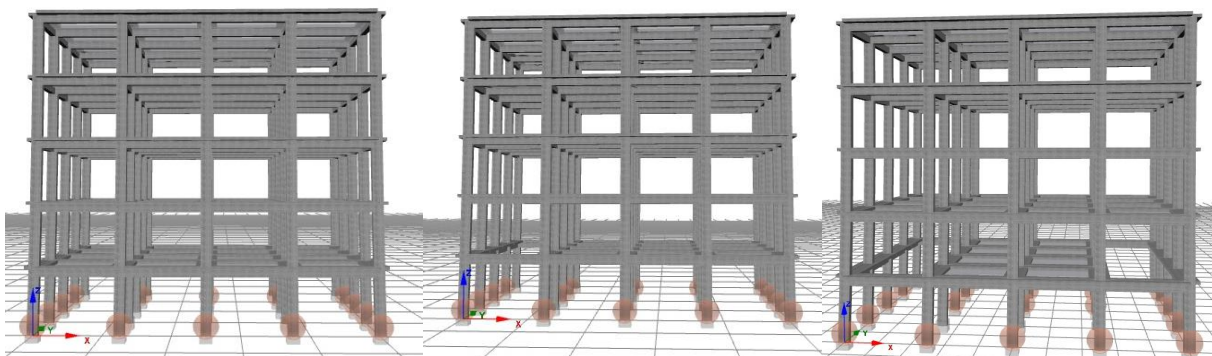


Figure 16. Plastic hinges at load factors 25.13-24.96-24.91 in Y-direction for Model 1-2-3

Comparisons were made for the first 3 models in order to reveal the effect of the mezzanine on the chord rotation in this study. The selected column in the ground story is shown in Figure 17.



Figure 17. Demonstration of selected column

The comparison of the chord rotation values obtained for the selected column for the first 3 models is made in the Table 8.

Table 8. Chord rotation values of selected column (Col123)

Element	Demand (X Direction)			Demand (Y Direction)		
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
col123 - End(A) - axis(2)	0.13588013	0.0808491	0.07929223	3.04E-08	5.32E-06	3.22E-07
col123 - End(A) - axis(3)	5.46E-06	3.47E-05	5.05E-05	0.1488093	0.1487721	0.1484661
col123 - End(B) - axis(2)	0.1300697	0.013335	0.0080529	3.08E-05	0.000102	0.000104
col123 - End(B) - axis(3)	7.84E-06	1.39E-04	4.94E-05	0.14732	0.147281	0.14697

In the first group (Model 1, Model 2 and Model 3) where all story heights are equal, period values are decreased with the increase of slab gap amount. The second group (Model 4, Model 5 and Model 6) where the story and mezzanine heights were different; period values were also decreased. The decrease in the mass of the building due to the absence of slab reduces the period values. While translational freedom mass participation rates increased in both X and Y directions in both group structure models; rotation translational freedom mass participation rates are decreased. In both groups, base shear forces are decreased for both directions. Three different displacement values calculated due to the idealized curve are increased with the amount of slab discontinuity. Both the elastic and the effective stiffness values have taken lower readings with the slab discontinuity. As the slab discontinuity increases, target displacement values are also increased for damage cases in both groups of building models. Comparisons have been made between similar building models (Model 1-Model 4; Model 2-Model 5; Model 3 - Model 6) in case of a change in the heights of the ground and mezzanine levels are also taken into consideration. In the case of building models where ground and mezzanine height values are different from other stories, increase in translational freedom mass participation rates and decrease in rotation freedom mass participation rates have been observed. The base shear force values obtained in the construction models

where the story heights were the same have been higher than the structural models where the story heights were different. The three different displacement values calculated in the idealized curve have given lower values in the building models where the story heights are different. Both elastic and effective stiffness values were decreased in the groups where the story heights are different. An increase was observed in the target displacement values calculation done for the building models in which story height is changed. The period values in the building model groups in which the mezzanine and ground story heights are different were obtained as higher values. The increase in the period value shows that the stiffness value is low. Variation of the story heights within the structure is one of the factors decreasing the stiffness of the structure. The load factor values calculated within the scope of the study also took lower values with the increase of negativity parameter. The amount of first plastic hinge increased as the amount of gap in the slab increased. The amount of first plastic hinge increased as the amount of gap in the slab increased. The pushover curves on Y direction are almost same. This shows that the importance of the lack of beam elements in Y direction. This result shows that if designer wants to remove slab, shouldn't remove the beam elements. Chord rotation values differed according to the section position taken from the column.

3 Results

Factors in structures that reduce the defence mechanism of the structure can refer to the negativity parameter. The negativity parameters in the structures can be formed differently. Within the scope of this study, structural analyses were made for the structures such as a RC building where the continuity of the slab in the structure changes and expressed as mezzanine, penthouse and half storey. In general, a mezzanine is commonly used in order to maximize the usage of the construction area in the buildings that carry out commercial activities on the ground stories. These can be built in different shapes and models. This study aims to reveal the effects of the presence of mezzanine on the structures under earthquake impact.

As part of the study, a 5-storey RC building was selected as reference building model. The mezzanine was formed without making any change in the structural size and properties of the reference structure. A mezzanine is formed between the ground and an upper story. The analyses were made to make the ground and mezzanine heights different from other heights in this study. The presence of the mezzanine and the fact that the story height values differ within the structure are some of the parameters that weaken the defence mechanism of the structures against earthquake effects.

In this study, it was observed that the discontinuity of the slab caused by partial mezzanine caused negativity in the transfer of earthquake forces to vertical structural

elements and reduced the lateral stiffness of the structure in an irregular way. It has occurred that the confidence in transferring lateral loads of the slabs which are rigid in the plane to vertical structural elements has given way to uncertainties with such irregularities.

Structural properties, type of structural system, characteristics of structural system elements, ratio of mezzanine area to normal story area, mezzanine height and mezzanine support situation may interchange mostly. The weakening of the defence mechanism was observed in all values if there is a mezzanine in the building. If there is a necessity for making a mezzanine, then measures should be taken to increase the stiffness of the structure. The aim of the study is to analyse that the presence of mezzanine has a negative effect on the defence mechanism of the building against earthquake effects. However, more dramatic results can be obtained by examining the subject with more analysis by considering the structures that have different geometries. Considering the effects of the irregularities observed in the structures on the earthquake behaviour and taking precautions accordingly are part of the earthquake resistant structure design. The study occupies an important position from this standpoint.

In future studies, it will be beneficial to analyse different structural systems, regular/irregular buildings in plan, different gaps rates and locations in different software programs in different analysis types

References

- [1] Krawinkler H.; Seneviratna G.D.P.K., "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation" *Engineering Structures*, 20(4-6), pp.452-464, 1998 [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)
- [2] Chopra A.K., Goel R.K., "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), pp.561-582, 2002 <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- [3] Yakut A., "Preliminary seismic performance assessment procedure for existing RC buildings" *Engineering Structures*, 26(10), pp.1447-1461, 2004 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.011>
- [4] Isik E., "Consistency of the rapid assessment method for reinforced concrete buildings" *Earthquakes and Structures*, 11(5), pp.873-885, 2016 <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2016.11.5.873>
- [5] Šipoš T.K.; Hadzima-Nyarko M. "Rapid seismic risk assessment" *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, pp.348-360, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.06.025>
- [6] Ozmen H.B.; Inel, M. "Effect of rapid screening parameters on seismic performance of RC buildings" *Structural Engineering Mechanics*, 62(4), pp.391-399, 2017. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.62.4.391>
- [7] Işık E.; Özdemir M.; Karaşin İ.B. "Performance analysis of steel structures with A3 irregularities" *International Journal of Steel Structures*, 18(3), pp.1083-1094, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0046-6>

- [8] Isik E.; Isik M.F.; Bulbul M.A. "Web based evaluation of earthquake damages for reinforced concrete buildings" *Earthquake and Structures*, 13(4), pp.387-396, 2017. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.13.4.387>
- [9] Hadzima-Nyarko M., Kalman Sipos T., "Insights from existing earthquake loss assessment research in Croatia" *Earthquakes and Structures*, 13(4), pp.365-375,2017. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.13.4.401>.
- [10] Atalić J.; Šavor Novak M.; Uroš M., "Seismic risk for Croatia: overview of research activities and present assessments with guidelines for the future" *Grđevinar*, 71(10), pp.923-947, 2019. <https://doi.org/10.14256/JCE.2732.2019>.
- [11] Harirchian E.; Hosseini S.E.A.; Jadhav K.; Kumari V.; Rasulzade S.; Işık E.; Lahmer T., "A review on application of soft computing techniques for the rapid visual safety evaluation and damage classification of existing buildings." *Journal of Building Engineering*, 43, 102536,2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102536>.
- [12] Akdoğan R.; Karaşin, A.H., "Effects of near-fault and far-fault ground motions on seismic performance of 5-story r/c building." *European Journal of Technique*, 7(1), pp60-68. 2017.
- [13] Dogan G.; Ecemis A.S.; Korkmaz S.Z.; Arslan M.H.; Korkmaz, H.H., "Buildings damages after Elazığ, Turkey earthquake on January 24, 2020." *Natural Hazards*, 109(1), pp.161-200. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04831-5>.
- [14] Khurram M.K., "Betonarme binalarda kiriş ve döşeme süreksizliğinin yapısal davranışa etkisinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye. 2018.
- [15] Tekdal E., "Döşeme süreksizliklerinin betonarme çerçevesel binaların davranışına etkisi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. 2008.
- [16] Ayrancı M.M., "Döşeme süreksizliği olan BA yapı sistemlerinin farklı bilgisayar modelleri ile analizi ve karşılaştırması" Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. 2010.
- [17] Yedikardeş U., "Deprem yönetmeliğine göre yapılardaki A2 düzensizlik durumunun incelenmesi ve perde yerleşiminin düzensizliğe etkisi." Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye. 2010.
- [18] Özdemir M.Y., "Yapıların deprem hesabında A2 düzensizlik durumunun incelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye. 2005.
- [19] Öztürk T., "Binalarda döşeme boşluklarının taşıyıcı sistem davranışına etkisi." *Teknik Dergi*, 24(116), pp.6233-6256. 2013.
- [20] Terzi M.; Elçi H., "Çerçeve tipi betonarme yapılarda döşeme süreksizliklerinin kesit tesirlerine etkisi." *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), pp.341-349. 2006.
- [21] Sağlıyan S.; Yön B. "Assessment of earthquake behavior of reinforced concrete buildings with slab discontinuity." *Turkish Journal of Science and Technology*, 13(1), pp.87-92. 2018.
- [22] Bilgin H.; Shkodrani N.; Hysenlliu M.; Ozmen H. B.; Isik E.; Harirchian, E. "Damage and performance evaluation of masonry buildings constructed in 1970s during the 2019 Albania earthquakes." *Engineering Failure Analysis*, 131, 105824.2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105824>.
- [23] Göker Ş.; Karaşin A. "Depremde hasar gören kırsal yapılar için bir yapısal hasar değerlendirmesi." *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 6(1), pp.31-38. 2015.
- [24] Işık M.F.; Işık E.; Bülbül M.A., "Application of iOS/Android based assessment and monitoring system for building inventory under seismic impact," *Grđevinar*, 70(12), pp.1043-1056, . 2018: <https://doi.org/10.14256/JCE.1522.2015>.
- [25] Yön B.; Onat O.; Öncü, M. E." Earthquake damage to nonstructural elements of reinforced concrete buildings during 2011 Van seismic sequence." *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(6),04019075.2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001341](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001341)
- [26] Kalman Šipoš T.; Hadzima-Nyarko M. "Seismic risk of Croatian cities based on building's vulnerability," *Tehnički Vjesnik*, 25(4), pp.1088-1094, 2018. <https://doi.org/10.17559/TV-20170708190145>.
- [27] Yön, B., Onat, O., Öncü, M. E., & Karaşin, A. "Failures of masonry dwelling triggered by East

- Anatolian Fault earthquakes in Turkey.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106126. 2020.
- [28] Pavić G.; Hadzima-Nyarko M.; Bulajić B. “A Contribution to a UHS-based seismic risk assessment in Croatia— A case study for the City of Osijek,” *Sustainability*, 12(5), pp.1796, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12051796>
- [29] TBEC-2018. Turkey Building Earthquake Code; Disaster and Emergency Management Presidency of Turkey: Ankara, Turkey, 2018.
- [30] Antoniou S.; Pinho R. “Seismostruct–Seismic Analysis Program by Seisimosoft,” Technical Manual and User Manual. 2003.
- [31] Ordu E.; Özkan M.T. “Three-dimensional finite element analysis of the seismic behaviour of pile foundations” *İtü Dergisi/d*, 5(2), pp.27-34. 2006.
- [32] SeismoStruct v6.5: A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures”. Seisimosoft. 2013.
- [33] Kutanis M.; Boru E.O.; Işık E. “Alternative instrumentation schemes for the structural identification of the reinforced concrete field test structure by ambient vibration measurements” *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), pp.1793-1801, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0758-0>
- [34] Nikoo M.; Hadzima-Nyarko M.; Khademi F.; Mohasseb S. “Estimation of fundamental period of reinforced concrete shear wall buildings using self organization feature map” *Structural Engineering Mechanics*, 63(2), pp.237-249, 2017. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.63.2.237>.
- [35] Aksoylu C.; Arslan M.H. “Çerçeve türü betonarme binaların periyod hesaplarının farklı ampirik bağıntılara göre irdelenmesi.” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), pp.569-581. 2019.
- [36] Hsiao F.P.; Oktavianus Y., Ou Y.C. “A pushover seismic analysis method for asymmetric and tall buildings” *Journal of Chinese Institute of Engineers*, 38(8), pp.991-1001., 2015. <https://doi.org/10.1080/02533839.2015.1056553>
- [37] Estêvão J.M.; Oliveira C.S. “A new analysis method for structural failure evaluation” *Engineering Failure Analysis*, 56, pp.573-584,2015. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.009>
- [38] Casapulla C.; Argiento L.U. “The comparative role of friction in local out-of-plane mechanisms of masonry buildings.” *Pushover analysis and experimental investigation, Engineering Structures*, 126, pp.158-173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.036>
- [39] Ademovic N.; Hrasnica M.; Oliveira D.V. “Pushover analysis and failure pattern of a typical masonry residential building in Bosnia and Herzegovina” *Engineering Structures*, 50, pp.13-29,2013. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.031>
- [40] Ademović N.; Hrasnica M. “Capacity degradation and crack pattern development in a multi-storey unreinforced masonry building” *Grđevinar*, 67(04.), pp.351-361, 2015. <https://doi.org/10.14256/JCE.1191.2014>
- [41] Işık E.; Özdemir M. “Performance based assessment of steel frame structures by different material models” *International Journal of Steel Structures*, 17(3), pp.1021-1031, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-9013-x>
- [42] Isik E.; Kutanis M. “Performance based assessment for existing residential buildings in Lake Van basin and seismicity of the region” *Earthquake and Structures*, 9(4), pp.893-910.2015. <https://doi.org/10.12989/eas.2015.9.4.893>
- [43] Salihovic A.; Ademovic N. 2018: Nonlinear analysis of reinforced concrete frame under lateral load, *Coupled System Mechanics*, 7(3), pp.281-295, <https://doi.org/10.12989/csm.2018.7.3.281>.
- [44] EN 1998-3 2005: Eurocode-8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings; European Committee for Standardization: Bruxelles, Belgium, 2005.
- [45] Pinto P.E.; Franchin P. "Eurocode 8-Part 3: Assessment and retrofitting of buildings." In *Proceedings of the Eurocode 8 Background and Applications, Dissemination of Information for Training*, Lisbon, Portugal, 10–11 February 2011.



Documentation and Sustainability of Construction Techniques for the Protection of Cultural Heritage: Kitchen Hearths and Chimneys in Traditional Diyarbakır Houses

Anıl İNAL¹, Neslihan DALKILIÇ*²

¹ Dicle University, Institute of Natural and Applied Science, Department of Architecture, Diyarbakır, Turkey, 0000-0001-6063-1574, anilinal.15@gmail.com

² Dicle University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, Diyarbakır, Turkey, 0000-0003-3920-9904, neslidal@dicle.edu.tr, nesdalkilic@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 October 2021
Received in revised form 12 March 2021
Accepted 17 March 2021
Available online 30 March 2021

Keywords:

Traditional construction techniques, Traditional house, kitchen, hearth, chimney, fireplace.

Doi: 10.24012/dumf.1086666

* Corresponding author

ABSTRACT

This article analyses the construction techniques of the kitchen hearths (fireplaces) and chimneys in the kitchens of traditional Diyarbakır (Turkey) houses. The first part of the study examines the historical development of kitchens. The second part investigates the architectural features of the kitchens of traditional Diyarbakır houses and the construction techniques and smoke evacuation methods of the hearths and chimneys in these kitchens. For this purpose, the hearths and chimneys of traditional kitchens, which are still used in their original form, and those of the demolished houses have been examined. They all have been documented by drawings and photographs. This study aims to contribute to the documentation and sustainability of cultural heritage and traditional construction techniques, and to guide the restoration practices that will be carried out in Suriçi.

Introduction

Throughout history, fire and hearths that were used for both heating and cooking have been treated as the crucial elements of living spaces in all civilizations [1]. While in single-spaced houses, people made use of the fire burning in the middle of the space to cook, with the increase of the number of spaces, kitchens were designed as private spaces for the fire [2]. Designed as cooking and storage spaces, kitchens are one of the most important places that shape the architectural plans of traditional houses. The hearths and chimneys of the kitchens in traditional Diyarbakır (Turkey) houses are important building parts that have survived to the present day.

The kitchens in traditional Diyarbakır houses have completely lost their past functional characteristics, and today they have been adapted in their layouts and interior equipment to meet the changing comfort standards. Due to

the use of gas stoves and electric ovens for cooking today, the original hearths have been walled-up or have become out of use. Since the hearths were not used, the smoke chimneys have not been maintained. Today, there are only a few hearths and chimneys that preserve their original form and continue to be used.

Although there are many publications on the architectural features of the traditional houses in Diyarbakır, which is an important historical city of South-eastern Anatolia [3-11], the construction techniques of hearths and chimneys of these houses have not been studied properly. The demolition of most of the houses and the decrease in the number of stonemasons who knew traditional construction techniques have resulted with the loss of the information on these building parts which have not been studied and documented sufficiently. This article aims to fill this gap in the literature. In the first part of the study, the historical development of kitchens and the architecture of the

kitchens in traditional houses in South-eastern Anatolia are explained. In the second part, the locations, materials, construction techniques and dimensions of the hearths and chimneys and the construction and smoke evacuation techniques of the chimneys in the kitchens of traditional Diyarbakır houses have been investigated. The information gathered have been documented with photographs and drawings.

Historical development of the kitchen in Anatolia and kitchens in the Southeastern Anatolia

The word "mutfak" in Turkish is derived from the word "matbah" in Arabic. The word "matbah", which derives from the Arabic verb tabh (to cook), means the place where food is cooked [12]. The Turks gave the kitchen names such as "aşevi, aş damı, aş ocağı, aşlık." The kitchen was either built outside the house or as a room downstairs adjacent to the main building but with an independent door. There has usually been a cellar near the kitchen [13].

The history of the kitchen has been largely linked to the development of heat sources [1]. Hearths and cooking spaces have been identified in the Neolithic settlements of Anatolia, such as Çatalhöyük. In the Bronze Age, there was a hearth in the middle of the megaron, which was composed of a single space incorporating both cooking and living functions. There were separate cooking places in Anatolian houses during also the Hittite and Urartu periods [14].

In ancient Greece, in addition to cooking, the kitchen was used as a gathering and living space. In the classical Roman and Byzantine houses, the kitchen was treated as an important place. In the Roman period, it became one of the sections next to the great hall. In some of the Mesopotamian cultures, on the other hand, the kitchen was built underground. It was ventilated and received light through a window opened from the ceiling [2].

In the Seljuk houses, cooking was done with the help of a hearth or tandoor in the kitchen. In Anatolian Seljuk houses, kitchens were on the ground floor of the houses or in one of the corners of the *sofa* [14].

The tents of some Turkmen communities, who continued their traditional lives in Anatolia, had a hearth called "fireplace" or "korluk" in the middle. These were generally used for heating but sometimes also for cooking [15]. The top of the tent was open above the stove and when the furnace was not in use, this part was covered with felt.

Thus, the smoke from the fire burning in the stove was allowed to get out and fresh air was let inside [16].

The tripod and the cauldron on the hearth, which was on during the whole day, were the two most important fittings of the tent. Mattresses were placed on both sides of the stove at night, and in the morning they were collected and stored in the closet [17]. There was also a simple "U" shaped stone hearth outside that was designed to be used when the weather conditions were suitable. Food preparation and cooking actions were also performed here [15].

For Turks, the fire / hearth was sacred. It had to survive. Because of this importance, it was used synonymously with the family (ocak) [16]. To wish for the continuity of the fire in the hearth to burn and of the chimney to smoke have been expressions of good will for a long time. In Anatolia, the fire in the hearth was covered with ash to be maintained until the morning. This fire was easily ignited again in the morning.

In the hearths, there were stone bases on which cauldrons and pots of different sizes were placed and there were chains for hanging the cauldrons. Wood and dung were used as energy sources in the hearths and tandoori [14].

When settlements replaced tents, the hearth that was located in the centre of the inner space of the tent, had not lost its importance and sanctity. It has been pushed sideways and placed into the wall [17, 18].

In different regions of Anatolia, as a result of cultural and geographical factors, different types of kitchens have been designed [14]. Kitchens were generally detached from the main building but were in direct contact with the courtyard or garden. Kitchens that were attached to the main building, were placed in the lower floors of the house in order to be able to be placed close to the courtyard and also to prevent the smell of the food access to the rooms.

Similar features are found also in the traditional residential kitchens in the other cities of South-eastern Anatolia Region, such as Gaziantep, Mardin, and Urfa.

In the traditional **Gaziantep** houses, the kitchens, that are called "ocaklık", are located either in the ground floor or on the opposite side of the house, in the garden. Since food is cooked by the fire made by using wood or coal, kitchens are preferred to be located far from the living quarters. There are hearths of different sizes in these "ocaklık", depending on the economic power of the owners. These hearths, which are made of stone, are 40-50 cm above the

ground. In traditional Gaziantep houses, the “ocak” part which is the zone for cooking, is large enough to accommodate three different sized copper cauldrons. The size of the ventilation hood above the stove is the same as the area these copper pots take up when they are brought side by side [19] (Figure 1).

The kitchen, which is also called "tandırılık" in traditional **Urfa** houses, is located in the harem part of the house. The kitchens are vaulted and their front part opens to the courtyard with an arch. In this space, there are one or more stone hearths which are 20 cm high from the floor and in which large cauldrons can fit. The tradition of having so many guests resulted with the building of large kitchens with 7-8 hearths. These hearths are connected to a single chimney on the roof. Over time, the arch opening to the courtyard was walled up. Alternating stones of the arch have been removed to provide air flow [20-21] (Figure 2).



Figure 1. Kitchen fittings in a Gaziantep house [22]



Figure 2. Kitchen fittings in an Urfa house [23]

In the traditional **Mardin** houses, the kitchens are usually in the ground floor. Their sizes vary according to the size of the house. The central and large kitchens in the ground floors were later replaced by small kitchens in the upstairs.

Dimensions vary in proportion to the size of the house. Simple U-shaped hearths made of stone are found in almost all kitchens [24] (Figure 3).

Kitchens in traditional **Diyarbakır** houses show formal similarities with kitchens in Mardin, Urfa and Gaziantep. The kitchens in Diyarbakır houses differ from the others by the material and design of their hearths and chimneys (Figure 4).

Some traditional houses that have been re-functioned [25, 26] as ethnography museums are aimed to introduce the traditional culinary culture to new generations. (Figure 1-2, 4-5)



Figure 3. Kitchen hearth in Mardin house



Figure 4. Kitchen fittings in a Diyarbakır house

Kitchens in traditional Diyarbakır houses

Traditional Diyarbakır houses are embodiment of hundreds of years of experience in terms of design strategy and construction techniques [5] (Figure 5). Kitchens are the places where cooking takes place. In houses with parts divided as harem and selamlık, the kitchen is located in the harem section. Kitchen sizes vary according to the size of

traditional houses and the population of the families. As it is the case also in the rooms, the length of the timber beam which was used to cover the space was crucial in determining the size of the space. Kitchen sizes are larger in the houses where larger families live.



Figure 5. A traditional kitchen

Kitchens are usually located in the winter section of the house. Since the arched façade of the kitchen facing the courtyard is usually oriented towards the south, the kitchen is a warm space as a result of the sunshine starting from early in the morning on cold winter days and because of the hearth that was on whole day. There are also kitchens that faced east or west. Few kitchens were oriented north (Figure 6). Since the south wing, which is the summer wing of the house, is preserved for living spaces such as iwans and rooms, the service elements such as the kitchen are mostly located in the other wings of the courtyard.

The kitchens are usually in the form of a small iwan with a single arch opening to the courtyard. Its most distinctive feature is the segmental arch on its front. The height of the arch of the kitchen is less than the height of the arches of the iwan. The difference between the arches of the iwan and the kitchen are easily visible on the façade [4] (Figure 7). In a few houses, the upper part of the arch of the kitchen is covered with a wooden grill. In the later period, measures have been taken against the cold by installing doors in the arches of some of the kitchens [11]. In some of the houses,

the front side of the kitchens facing the courtyard is walled up and the ventilation is done through a small window or a door instead of an arch (Figure 8c).

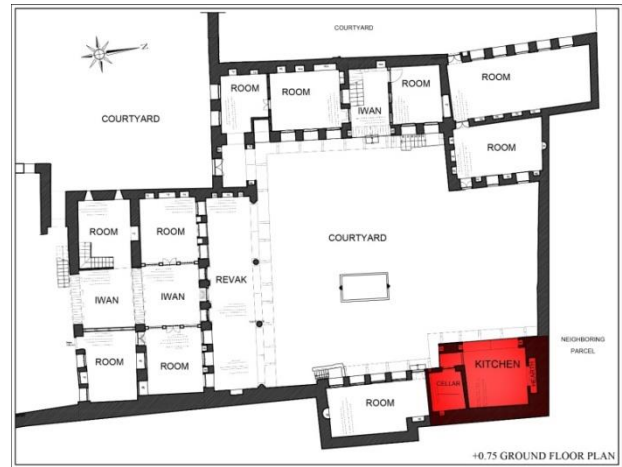


Figure 6. Traditional Diyarbakır house, Tigrel Konağı (Tigrel Mansion), Harem section

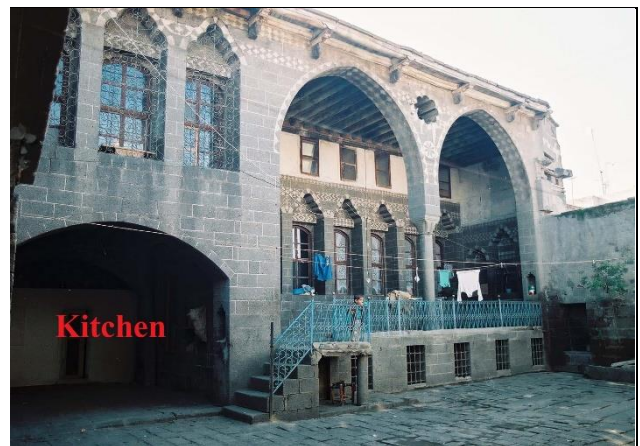


Figure 7. A rare example where the kitchen and the iwan are on the same side [4]

The floors of the kitchens are stone paved. In a few houses, the ground is rammed earth. Since levels of the floors of the courtyard and the kitchen are usually the same, it is difficult to open windows to the cellars which are under ground. That is why, finding cellars built under the kitchens is rare. In some houses, small cellars are adjacent to the kitchen. The upper structures of the kitchens are carried with straight timber beams. There is no water supply in the kitchens, but there are few examples with a well. The water was usually supplied from the wells in the courtyard. There are niches on the kitchen walls (Figures 8 and 9).

Kitchens have either a single hearth or two hearths. In large and crowded houses, there were two stoves in the kitchen due to necessity (Figures 8, 9).

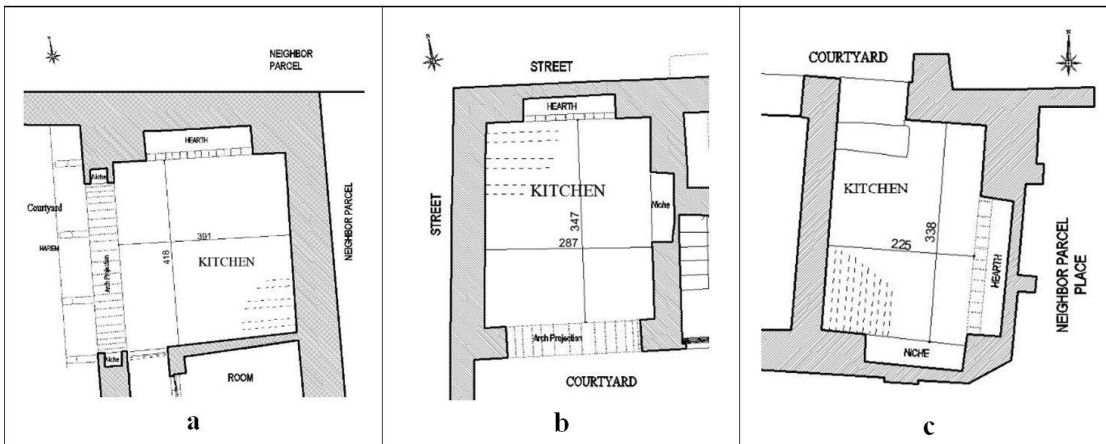


Figure 8. Kitchens with a single hearth

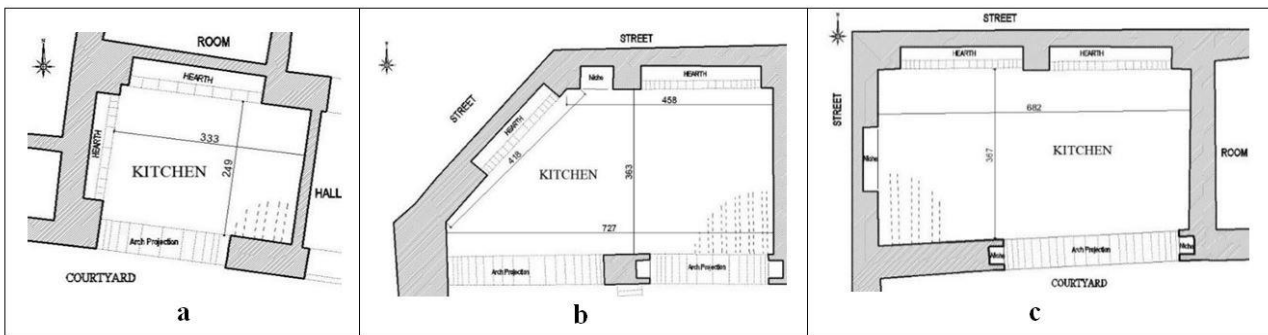


Figure 9. Kitchens with two hearths

Hearths

Since there were no heating systems in the rooms of traditional Diyarbakır houses, there was a hearth only in the kitchen. Since the number and size of the hearths varied according to the needs of the house, some large houses and mansions had more than one hearth. Hearths were used for baking and cooking, as well as heating water for washing laundry or bathing.

The hearth could be located either on the wall adjacent to the neighbouring house, on the partition wall that the kitchen shared with the room next to it, or on the wall facing the street. The width of the cooking area of the hearths varied between 90-280 cm. Large hearths were divided into sections of 30-45 cm width by partition stones in order to be able to put more than one pots side by side. Large pots were placed directly on the stones, whereas smaller pots were placed on mobile independent iron grids for cooking. The partition stones of some of hearths have been removed since they were not used any more (Figure 10-11).

The stoves were lit with firewood, and the wood burning under the hearth was mixed with the help of a small iron shovel until it turned into hot aisle. The firewood used for burning the fire in the stove was stacked on top of each other under the stairs or in a less used part of the cellar. When needed, they were brought in the kitchen from there [27].

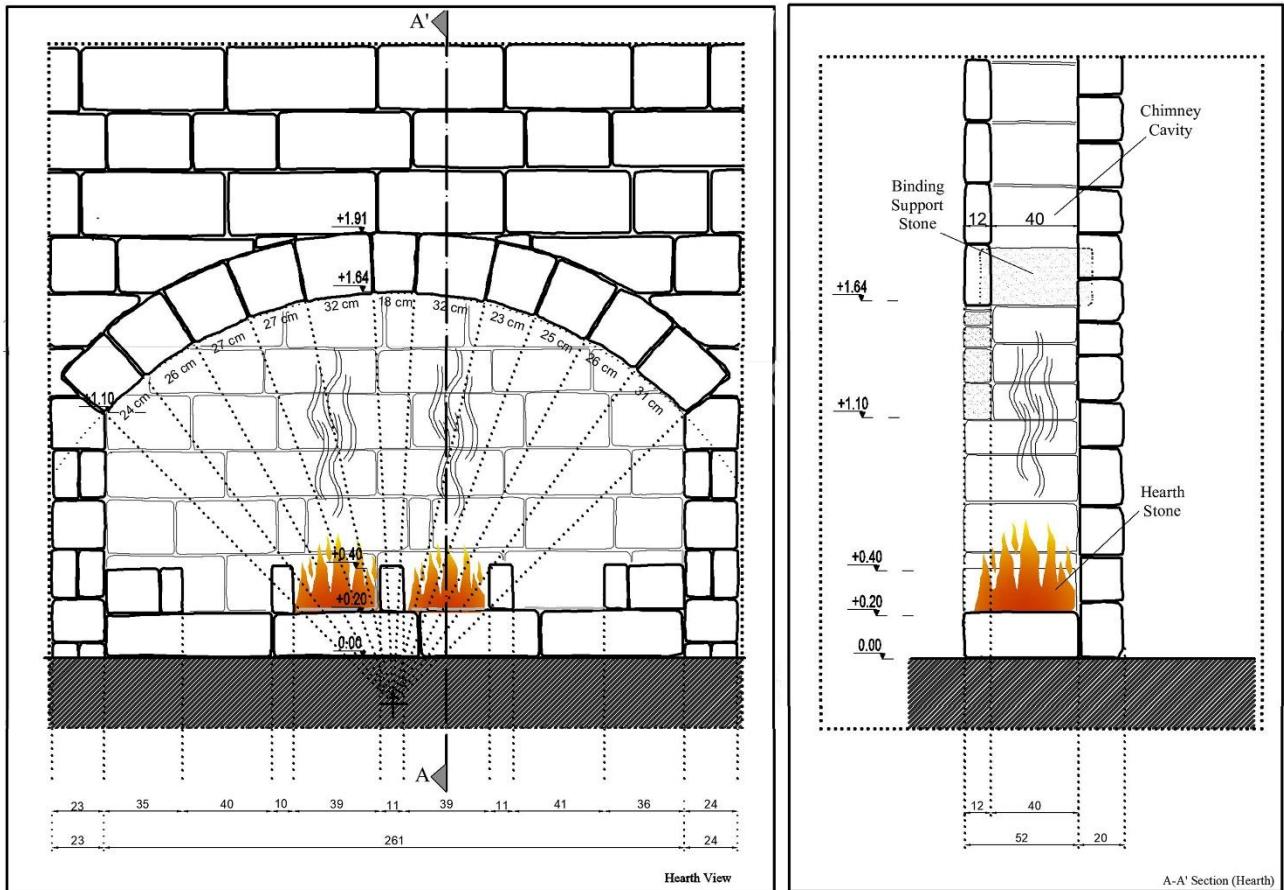


Figure 10. An elevation and section drawing of a hearth in a traditional house



Figure 11. Hearths in traditional houses

Chimneys

In traditional Diyarbakır houses, chimneys are located in the centre of the hearth. They were used to extract the smoke created by the burning fire and to discharge it to the outside. They are voids, surrounded by stone walls that continue along the wall behind them. Their bottom part is wide, whereas they get narrower at the top. Their main construction material is basalt.

The dimensions of the lower parts of the chimneys are approximately 80-280 cm x 40-45 cm, and of the upper narrow part on the roof are 25-30 cm x 40-45 cm. Thus, the chimneys started with a wide section and got narrower as they went up to the roof. The chimney of a kitchen located in the ground floor of a house was unearthed during its restoration. The chimney could be examined in detail as the roof had collapsed. The shaft of the chimney was measured as 28x45 cm on the roof. The walls of the chimney were made of basalt (Figure 12, 13). The width of the chimneys that come out of the side wall vary.



Figure 12. An original chimney detail of a destroyed house



Figure 13. A view from inside the chimney

The parts of the kitchen chimneys which are above the level of the earthen roof have a wooden frame which are plastered over with mud. This part is also called “*tütünlük*” (Figure 14) [9].

A common detail in all the examined chimneys was the “binding support stone”. Binding support stones (*atki taşı*) are usually placed just behind the keystone of the arch of the hearth. Their thickness is between 4-6 cm and their width is the same with the width of the chimney. It serves as an important structural element in order to keep the chimney cavity stable and to connect the two walls horizontally (Figure 15). There are also examples where the binder support stones are not just behind the keystone, but are designed to the right and left of the centre. There are examples where they are placed at equal distances to the centre on both sides.

Smoke evacuation techniques of chimneys vary according to the location of the kitchen. Two different techniques can be seen in these houses:

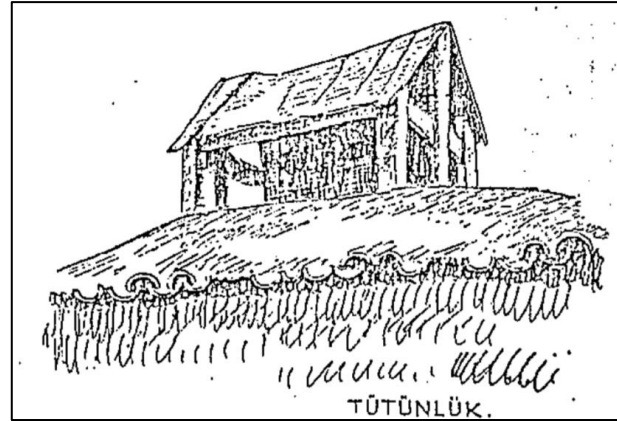


Figure 14. The drawing of the original cover of a chimney of a traditional Diyarbakır house, which is called “*tütünlük*” [9]



Figure 15. Binding support stone

- If the hearth is on the wall facing the street, smoke is evacuated from the street wall with small wall gaps located side by side or with pipes of 10-20 cm in diameter. These windows or pipes serve as chimneys. At the end of the chimney shaft, holes were opened to change the direction of the smoke and get it evacuated towards the street (Figures 16, 17, 18).

- If the hearth is located on the wall of the kitchen adjacent to the neighbouring house or on the wall adjacent to any other room of the house, the smoke is evacuated from the roof (Figures 16, 17).

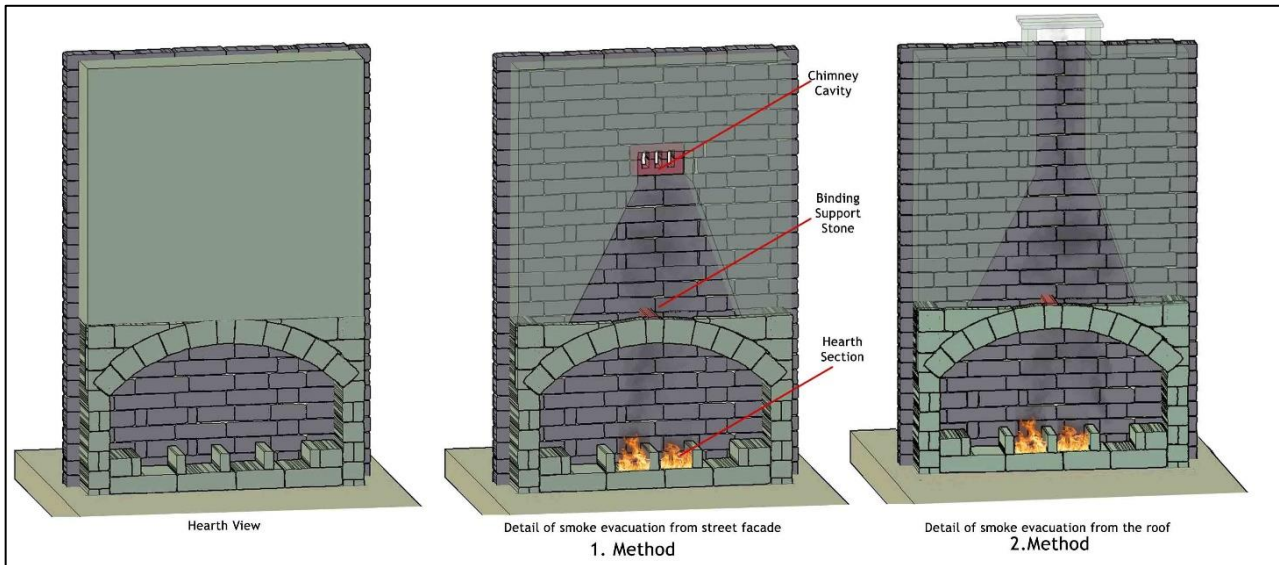


Figure 16. Three dimensional visual representation of hearths and chimneys

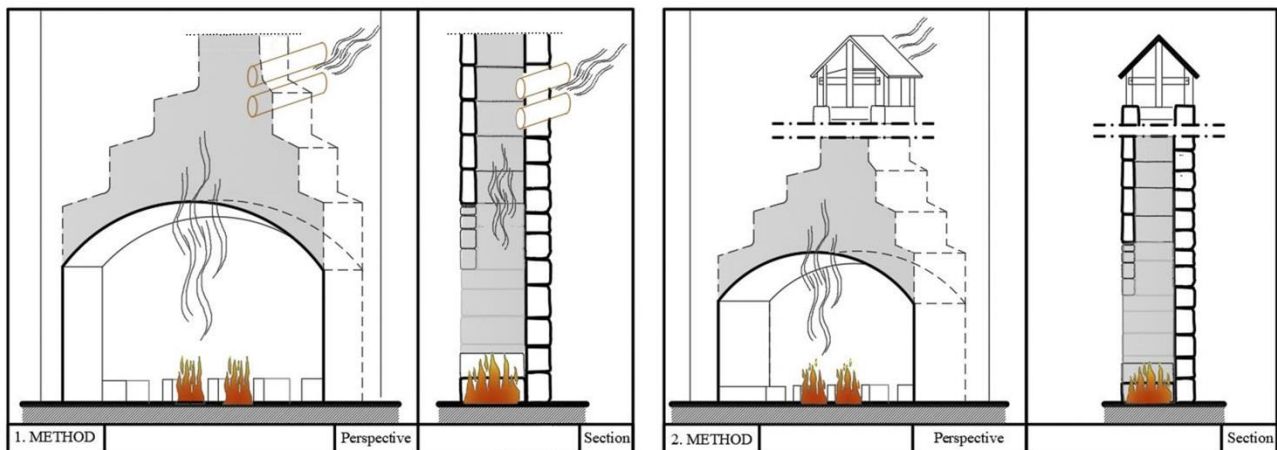


Figure17. Evacuation of the smoke (1. Method: from the street wall, 2. Method: from the roof)

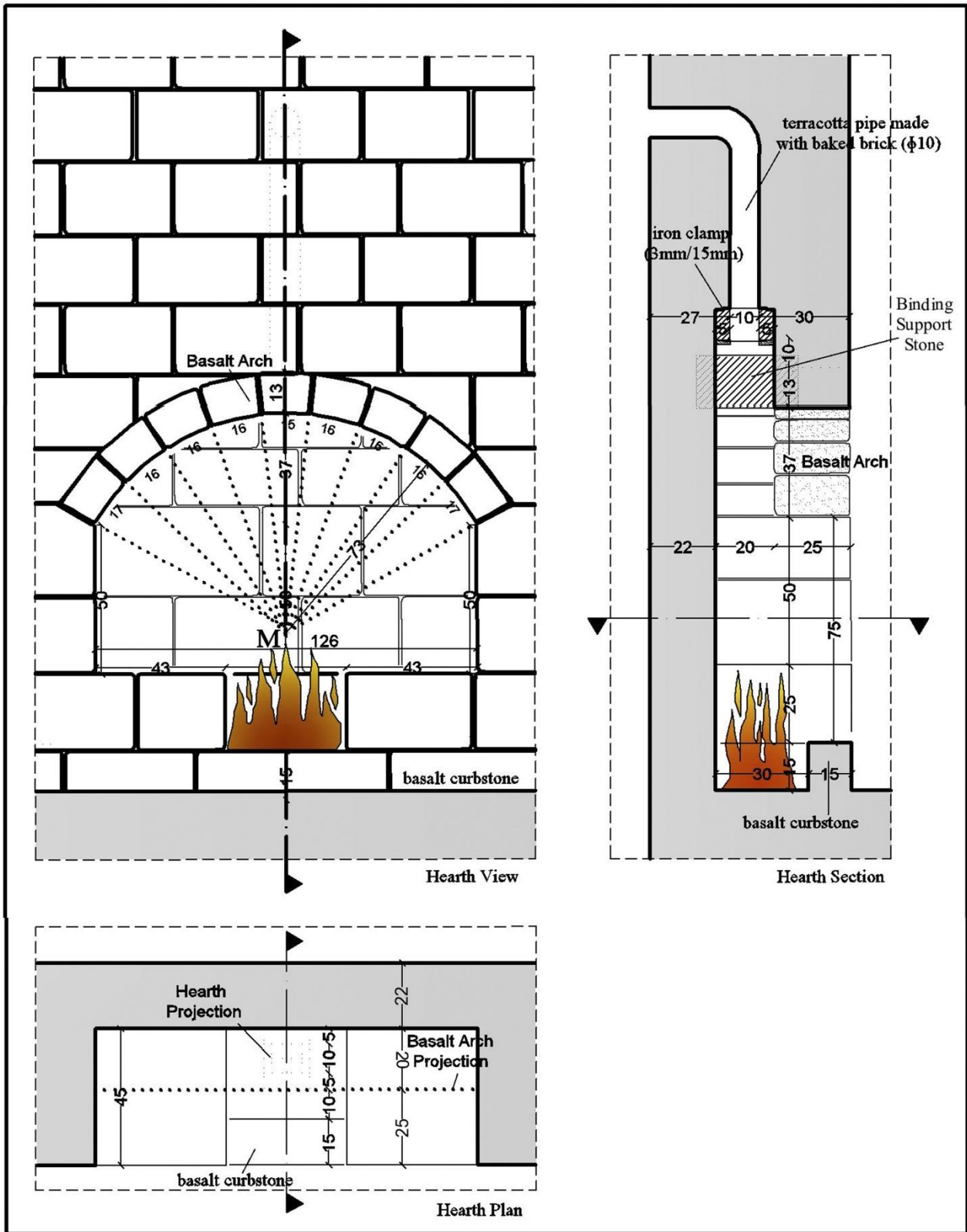


Figure18. Detail of the evacuation of the smoke from the street wall by pipes

Chimneys directed to the street façades of the houses were opened at the closest possible distance to the fire source. In many houses, smoke is evacuated from the wall of the kitchen facing the street, also as a solution that partly prevents the rainwater from entering the house. Erginbaş [5] stated that this method was used in some houses because of taking into the consideration of the fact that the roof soil could not be squeezed well in the sides of the chimney and as a result, the ceiling leaked.

Every small opening that can be seen on the street façades of the houses should not be considered as chimneys. Many of these small openings are made for the ventilation of spaces such as toilets, cellars and depots. Although they look similar to the chimneys, there is generally blackening around the chimneys (Figure 19).

In both methods, the wall with the chimney openings is made thicker than the other walls of the house. In this way, the fire resistance of the chimneys was preserved for many years.



Figure 19. Examples of chimneys that evacuate smoke from the street facade

Conclusion

In this study, the building elements that make up the kitchen were examined in order to preserve the traditional culture and transfer it to future generations. Traditional construction techniques of hearths and chimneys have been documented. The findings of the research are important because it is the first study conducted in this field and it enables the reinterpretation of the collected information in relation to the technological developments. Sustainability can be achieved by the documentation of traditional construction details, interpreting them in today's conditions and making them used in restorations and new architectural designs. We hope that the information gathered in this study would be used in the restorations that are planned to be undertaken in Diyarbakır Suriçi and that these results would assist in making intervention decisions in accordance with the original characteristics of the houses. We also hope that this study would provide data to those who will work further on this subject.

Acknowledgement

This article derives from Anıl İNAL's master's thesis entitled "Construction Techniques in Traditional Diyarbakır Houses" completed under the supervision of Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ. The research was supported by Dicle University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: ARCHITECTURE. 18.004.

References

1. Giedion, S. "Çağdaş Mutfağın Doğuşu", *Arredamento De Mimarlık*, Volume on Kitchens, **1994**.
2. Ünügür, S, M. "Mutfak ve Ergonomik Çözümlemesi", *Yapı Dergisi*, v: 188, Add. 3, **1997**.
3. Bekleyen, A. Eski Diyarbakır Evleri'nin Kitlesel Biçimlenmesini Etkileyen Asal Etmenlerin Belirlenmesi. Unpublished master's thesis. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Diyarbakır, **1993**, 78.
4. Dalkılıç, N. Geleneksel Diyarbakır Evlerinde Plan, Cephe ve Yapı Öğeleri Tipolojisi. Unpublished master's thesis. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **1999**, pp. 230.
5. Bekleyen, A. ve Dalkılıç, N. The Influence of Climate and Privacy on Indigenous Courtyard Houses in Diyarbakır, Turkey.

- Scientific Research and Essays*, **2011**, 6(4), pp.908-922.
6. Dalkılıç, N, & Bekleyen, A. Geçmişin Günümüze Yansıyan Fiziksel İzleri: Geleneksel Diyarbakır Evleri Kitabı. Diyarbakır, Suriçi, **2011**, p. 659,
7. Bekleyen, A, Dalkılıç, N. Design With Climate-What Can We Learn From the Past to Cope With Climate in Terms of Design Strategy and Usage Style of Courtyard Houses?, *Middle-East Journal of Scientific Research*, 11(3), **2012**, pp. 357-366.
8. Dalkılıç, N, Aksulu, I. Diyarbakır Kenti Geleneksel Konut Mimarisi, *Gazi Üniversitesi Sanat Dergisi*, 2/2, **2001**, pp.53-69.
9. Erginbaş, D. Diyarbakır Evleri. Diyarbakır Evleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **1952**, p.68.
10. Özyılmaz, H, Aluçlu, İ, Akın, T. Mutfak Kültürünün Geleneksel Diyarbakır Evlerine Sosyal ve Mekânsal Yansımaları, *Milli Folklor Dergisi*, 26, v: 102, **2014**, pp.138-153.
11. Tuncer, O.C. Diyarbakır Evleri. Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Yayınları, **1999**, pp. 574. Diyarbakır.
12. Bilgin, A. “Matbah-ı Âmire”. *Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi (DİA)*, İstanbul: Türkiye Diyanet Vakfı İslam Araştırmaları Merkezi (İSAM), C. 28, **2003**, pp. 115-119.
13. Ögel, B. Türk Kültür Tarihine Giriş, III, Ankara, **1985**, pp. 37-39.
14. Karpuz H, Karpuz E. Anadolu Türk Evinde Mutfak, Tarih-Halkbilimi-Edebiyat, Ed. M. Sabri Koz, İstanbul, **2013**, pp.288-295.
15. Bozkurt, N. “Çadır”, *İslam Ansiklopedisi*, Cilt 8, Türk Diyanet Vakfı Yayınları, **1993**, İstanbul
16. Ögel, B, Türk Mitolojisi, II. Cilt, Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu, Türk Tarih Kurumu Yayınları, Ankara, **1995**, pp. 495-532.
17. Diyarbakırlı, N. Hun Sanatı, Milli Eğitim Basımevi, **1972**, İstanbul
18. Küçükerman, Ö. Kendi Mekânının Arayışı İçinde Türk Evi, Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu Yayınları, 1996, İstanbul.
19. Köse, A. Türkiye’de Geleneksel Kırsal Konut Planlarında Göçebe Türk Kültürü İzleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi, *Sosyal Bilimler Dergisi*, v. VII/ 2 / Aralık, **2005**, pp.182.
20. Atacan, E. Geleneksel Gaziantep Evleri Plan ve Form Özellikleri, Unpublished PhD thesis, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **1996**, pp. 82-83.
21. Akkoyunlu, Z. Geleneksel Urfa Evlerinin Mimari Özellikleri, Kültür Bakanlığı Yayınları, **1988**, p.121
22. Emine Göğüş Mutfak Müzesi, Fotoğraf Arşivi.
23. Gayberi, Ş. Geleneksel Urfa Evlerinin Yapım Teknikleri, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, **2019**.
24. Alioğlu, F. Mardin Şehir Dokusu ve Evler, Tarih Vakfı Yayınları, İstanbul, **2000**.
25. Cebe, M, Özen, N, Akın, C.T. Evaluation of Building Program in Refunctionalization of Traditional Structures. *Turkish Studies, Information Technologies and Applied Sciences*. Volume 14, Issue 2, **2019**, pp.133-148.
26. Cebe, M, Özen, N, Akın, C.T. Yeniden İşlevlendirilen Hasan Paşa Hanı’nın Kullanım Sonrası Değerlendirilmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10-3, **2019**, pp.1145-1163.
27. Özyerli, S., Yemekli Diyarbakır Tarihi, Amida’nın Sofrası, Aras Yayıncılık, İstanbul, **2019**.



Effect of Elastomeric Bearings in Bridge Piers

Fevzi SARITAŞ*

* Darmstadt Technical University, Department of Civil Engineering, Guest Researcher, Germany
ORCID: ID: 0000-0003-0605-1450

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 March 2022
Received in revised form 27 March 2022
Accepted 27 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:
Elastomer, seismic,
time history, capacity, bridge- pier

Doi: 10.24012/dumf.1090459

ABSTRACT

In this paper, the influence of elastomeric bearings is investigated in terms of seismic responses under effects of severe ground motions. For this purpose, seismic performance of an isolated pier system has been analytically studied by using time history analyses. The isolation system is assembled by elastomeric bearings composed of rubber layers and steel-shims. The bearings are located between pier-top ends and box-girder of the bridge deck. Seismic solutions are obtained for isolated system and non-isolated pier system known as rigid connection. Time-dependent response quantities are obtained in transverse direction for two strong quakes. Additionally, nonlinear static procedure is carried out to obtain lateral seismic capacity. Thus, the displacement and shear force capacity are determined for the considered pier systems. Seismic responses are comparatively presented in terms of superstructure and base response values. Thanks to the isolation system, the pier has yielded at lower peak displacements and base responses with seismic demand as well. On the other hand, higher seismic capacity has been obtained in the case of isolation system and the results are presented by computed lateral capacity curves. The results show that the elastomeric bearing is an effective tool in the lateral strength and modal behavior of the pier system as well. However, peak displacements of the elastomeric bearing have exceeded the allowable limits related with displacement capacity.

1. Introduction

Piers are the most important structural members of a highway/railway bridge. As it is known, bridges are strategic structures and commonly used in transportation network. They are generally built to cross deep valleys or long spacings on sea or rivers. Bridges are constructed and designed to meet gravity, live and dynamic loads such as earthquakes and wind forces. In this context, all seismic loads arising from inertial forces occurred in the superstructure are carried and transmitted to soil media by means of substructure components so-called as pier system.

Conventionally, piers can be connected to superstructure in two ways; first way is, most commonly used, installing seismic isolation system and the other way is to create rigid connection, i.e., monolithic construction. General section types of the piers are circular, rectangular or hollow core boxes. They are constructed as either a single column with box girders or multi-column with cap system. Although hollow core section type is designed in large dimensions, it provides great advantages such as high bending and torsional stiffness, less volume and mass.

Displacement ductility capacity of a reinforced concrete hollow pier can be satisfied up to the value of 6 provided that adequate steel confinement is ensured [1]. From the past earthquakes, it has been understood that the main reasons of the collapse of bridges are mostly related to structural components as well as pier damages. In Northridge (1994, USA) and Kobe (1995, Japan) earthquakes, flexural and shear failures were observed in reinforced concrete piers [2, 3, 4]. From the field observations, bridges and therefore piers are very sensitive to severe ground motions and they should be attentively designed.

Analyses of the current studies have focused on the seismic effects and responses to reveal dynamic behavior. During an earthquake, dynamic forces occur in horizontal and vertical directions and in this case high seismic demands may develop in a bridge or pier system. Seismic loads happened in superstructure certainly can be merely carried by pier but this concept is not economical for long bridges and piers. However, this procedure involves different risks due to high uncertainties in ground motions. On the other hand, seismic isolation enables to shift natural period of a bridge to prevent resonance effects resulted from ground motion frequencies. Thus, pier period can be prolonged and desired performances can be obtained. Furthermore, isolation systems are used to limit/decrease the seismic

demand and to dissipate seismic energy over a considered structural system. Thus, the system would have gained extra flexibility and the response forces in the pier and transmitted accelerations from ground to superstructure would be significantly decreased.

In past years, strong earthquakes occurred in western Turkey caused large damages and killed many people. In 1999 earthquakes, August 17 Kocaeli ($M=7.4$) and November 12 Düzce ($M=7.2$), thousands of people died and many buildings, bridges and other structures collapsed or heavily damaged. Due to the impact effect, Bolu viaducts on the northern Turkey highways displaced from the alignment in near fault zone. Displacement demands were resulted in high quantities and they exceeded the capacity of the isolation system. Therefore, local damages in bearings and unseating of beam ends occurred at the pier caps [5]. Farshad and Alam showed that shear deformation of the rubber exceeded the maximum allowed displacements with higher failure probability [6]. Usage of elastomeric bearing is very attractive in seismic regions and many investigations have been carried out for design of isolated bridge piers [7, 8, 9, 10].

The main perspective of this study is to present the effect of connection type between superstructure and column for a concrete pier system. Seismic behavior of the pier system is investigated under severe earthquakes recorded in Turkey. Response quantities are given comparatively for two cases, i.e., rigid construction and an isolated system by rubber bearings. From the given results, isolation system has considerable reduced the base responses and displacements. It has also extended the natural vibration period of the system. Furthermore, important recommendations are presented in terms of usage of the isolation system.

2. Pier System and Isolation Model

The reinforced concrete pier is selected from a constructed bridge and it has a box girder and hollow core section for the column. The total pier height is about 32m and its superstructure height is 5m. Deck thickness is variable in the range of 0.25m and 0.40m. Furthermore, bottom cap and web sections have varying form in the longitudinal direction. The deck width is 20m. The whole pier system is illustrated in Figure 1. The column section is in hollow core type with dimensions of 7m x 3m and thickness of 0.45m as seen in Figure 1. Dimensions of the pier section are constant from ground up to level of bridge deck. Concrete strength of the pier system is 30 Mpa and yield strength of the steel (f_y) is 420 Mpa. Area of longitudinal steel rebars (A_s) is 1129.2 cm². Since the plastic zone is expected in lower end of the pier column, a plastic hinge is defined in bottom region.

The isolation system was built by elastomeric bearings composed of laminated rubber layers with reinforced steel shims as illustrated in Figure 2. It was composed of top and bottom plates, rubber layers in a certain thickness and steel shims between rubber layers. Rubber material provides flexibility in lateral direction. On the other hand, for huge structures like long bridges, natural rubber material has inadequate vertical stiffness and hence steel shims are imposed into bearings to overcome this deficiency. Thus,

rubber bearing system increases energy damping by performing high lateral displacements.

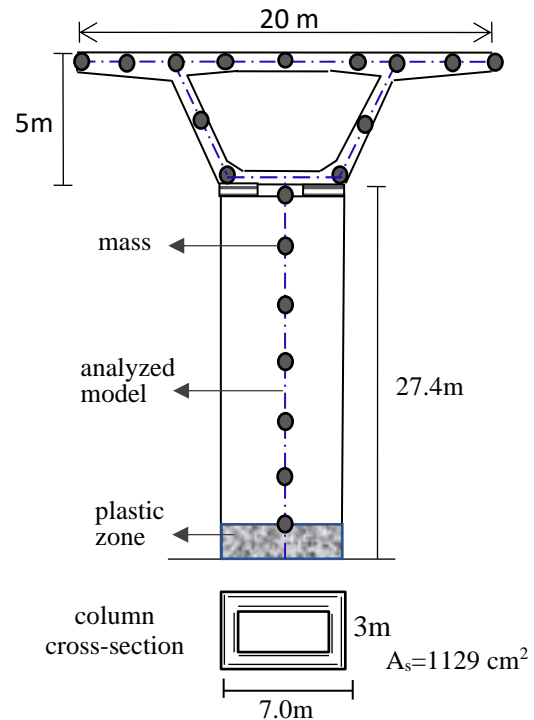


Figure 1. Bridge pier system

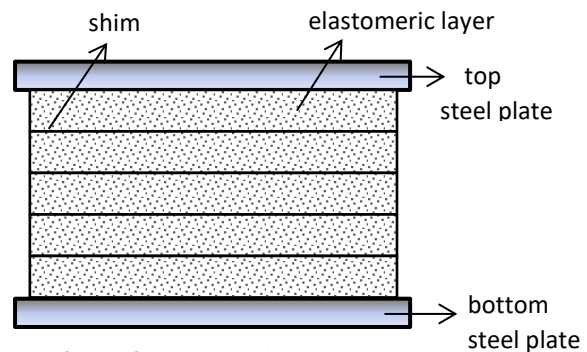


Figure 2. Elastomeric bearing

Dimensions of the pier system, structural properties of the bearing and pier column section used in this study are given in Table 1. Some stiffness values such characteristic strength are computed as well. Results of the free vibration analyses are displayed in Table 2 for both structural systems. Vibration periods showed that the elastomeric bearing has effectively extended the natural period of the pier system and it provides an important flexibility for the considered structure. Nonlinear behavior model is considered for elastomeric bearings in the solutions. For hysteretic response of the bearings, bilinear model is considered and characteristics parameters are given in Figure 3 with hysteretic loop.

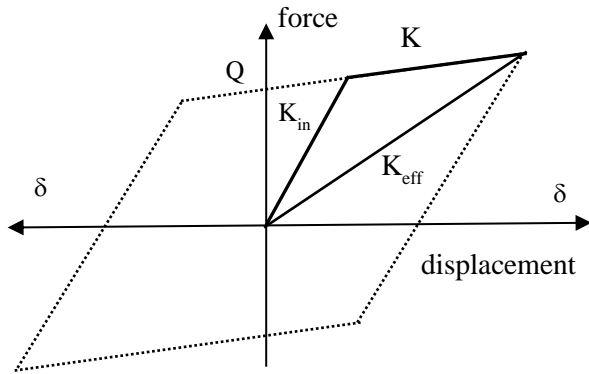


Figure 3. Behavior model of elastomeric bearing

The parameter of K_{in} denotes the initial stiffness and K is the secant stiffness related with post yield stiffness. K_{eff} is effective stiffness for the case of linear solution. Parameter of Q states bearing strength and it is obtained on the basis of hysteresis loop. As it is known, elastomeric material has high deformation capacity. However, displacement (δ) of a bearing system is a pioneer criterium for the safe design. Stiffness of a bearing system can be primarily categorized in two directions; horizontal (K_h) and vertical stiffness (K_v). As it is understood from bearing configuration, the vertical stiffness is much higher than horizontal stiffness. Mechanical characteristics of the bearings are calculated based on the following relations:

$$K_v = \frac{E \cdot A}{\sum t_r} \quad (1)$$

$$K_h = \frac{G \cdot A}{\sum t_r} \quad (2)$$

$$K_{eff} = K_h + \frac{Q}{\delta_{max}} \quad (3)$$

$$S = \frac{\text{area under loading}}{\text{area without loading}} \quad (4)$$

where E is compression module depending on shape factor (S), A is the area of bearing cross-section, G is the shear module and t_r is the thickness of each elastomeric layer. For a squared-shape (with size of a) bearing:

$$S = a / (4 \times t_r) \quad (5)$$

$$E = 6,73 \times G \times S^2 \quad (6)$$

Compression module is obtained based on the given relations for each elastomeric bearing.

3. Seismic Analysis of the Pier System

The pier system is modeled by finite frame elements specified by proper mesh intervals in three directions. Lumped mass approximation has been considered on nodal points for all directions in the model. Mass of the pier is 3143.8 kNs²/m. Elastomeric bearings are considered by a link element. Their structural characteristics are calculated on the basis of dimensions, properties, codes [11, 12] and formulas given in the literature [13]. Stiffness matrices of the bearings are calculated and incorporated into the system model.

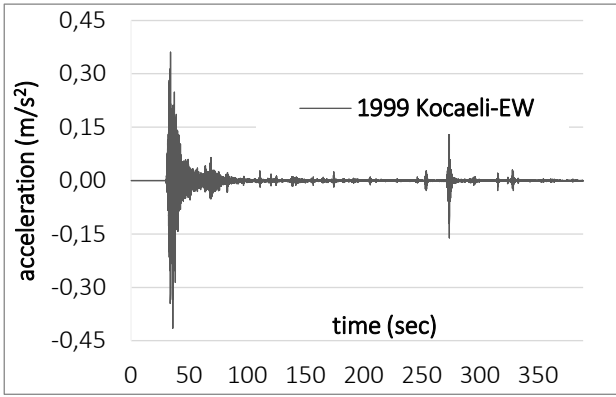
Table 1. Bearing and pier section properties

Properties	bearing	Pier
dimensions (m)	0.80×0.80	7×3×0.45
height (elas. layers) (m)	0.085	27.4
cross-sectional area (m^2)	0.64	8.19
moment of inertia as (m^4)	0.034	11.04
elasticity modulus (kN/m^2)	1.05×10^6	3×10^7
charac. strength (kN)	715	2.5×10^3
Shear modulus (kN/m^2)	1×10^3	1.25×10^7

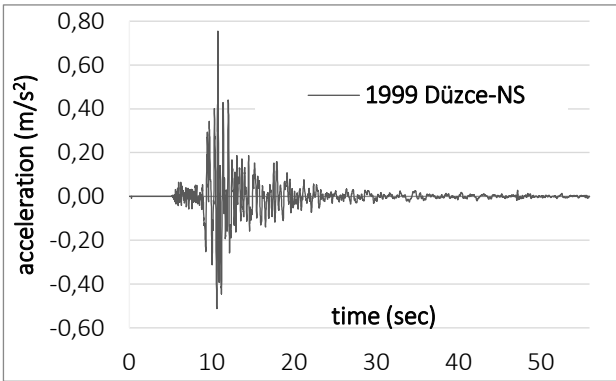
Table 2. Pier free vibration periods (sec)

Pier system	T ₁	T ₂	T ₃
pier with elastomeric bearing	1.99	0.64	0.61
fixed pier without elastomeric bearing	1.42	0.65	0.61

Nonlinear time history analysis is implemented for the considered pier under effects of seismic ground motions by using a software code [14]. In the time history analyses, kinematic model has been considered for the hysteretic behavior. Two strong earthquake motions happened and recorded in Kocaeli (Mw=7.4, 1999) and Bolu (Düzce, Mw=7.2, 1999) provinces in Turkey. They are selected due to their high destructiveness as seen from field observations after the earthquakes occurred. As is known, many people died and thousands of buildings collapsed or severe damaged. The considered earthquakes 1999 Kocaeli-EW and 1999 Düzce-NS records are given in Figure 4.



a. kocaeli record for EW component (1999)

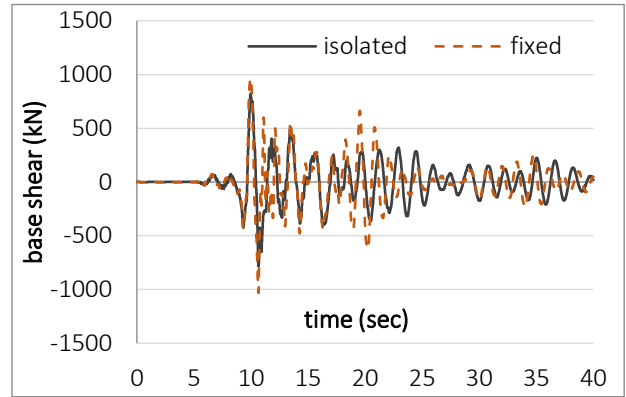


b. düzce record for NS component (1999)

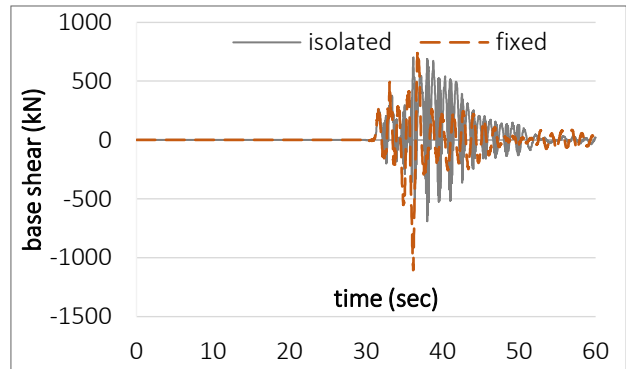
Figure 4. Acceleration records used in the analyses

Under strong ground motions given above, seismic responses are computed for two structural cases: i.e., the first one is base isolated pier system and the second case considers rigid connection type (non-isolated), it means that no isolation mechanism. All earthquake responses are comparatively presented and drawn by graphics for both cases. In Figure 5, seismic response quantities are illustrated in terms of total base shear of the pier system. As seen, the isolated system decrease distinctly the maximum shear forces, generally can be critical in designs, in compared to rigid connection type. The amount of decrease in maximum shear forces is much higher in case of Kocaeli earthquake.

The response comparisons given in Figure 5 are realized for pier displacements as well. From Figure 6, although some displacement values are to be lower than those of the fixed system, the rubber isolation system has quite limited and decreased the maximum displacements. As it is well known, maximum displacements play a key role in structural performance and most codes suggest some rules to limit these values. Researches have focused to overcome these maximum displacement problems that may lead to collapse of a structural system. As is seen from the Figure, usage of elastomeric bearing is a very effective tool to keep the maximum displacements in acceptable limits.

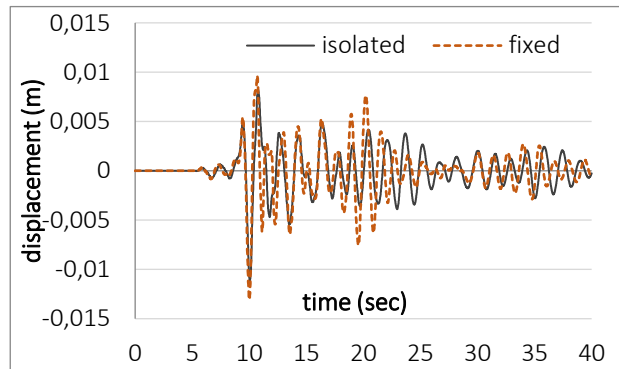


a. base responses for Düzce-NS earthquake

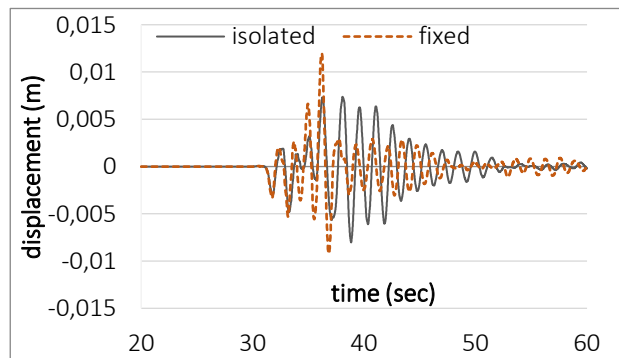


b. base responses for Kocaeli-EW earthquake

Figure 5. Base shear forces for different pier systems

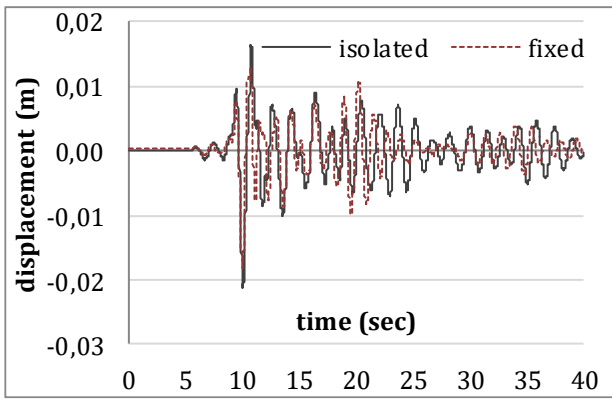


a. displacements for Düzce-NS earthquake

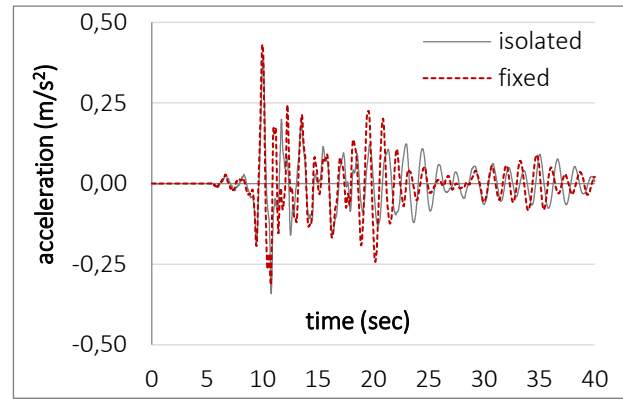


b. displacements for Kocaeli-EW earthquake

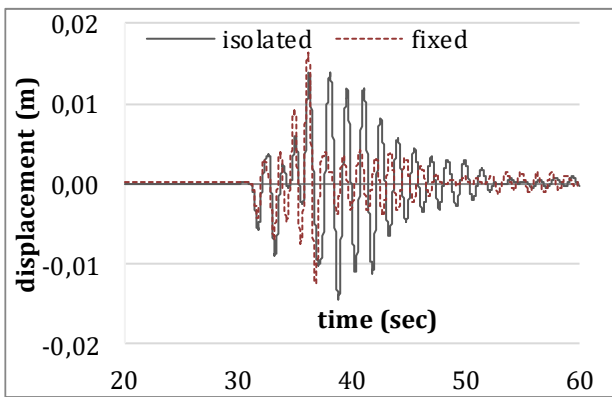
Figure 6. Pier displacements for different pier systems



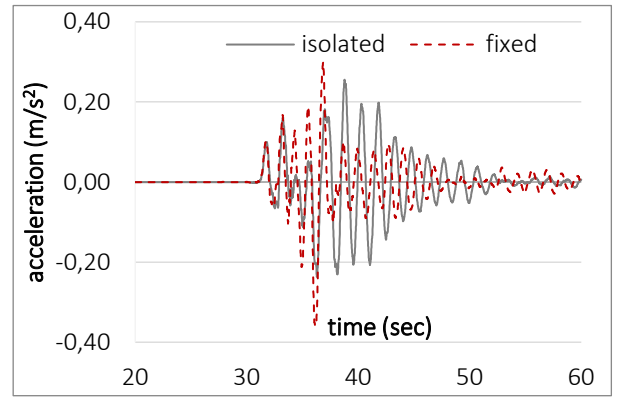
a. deck displacements in Düzce-NS earthquake



a. accelerations in Düzce-NS earthquake



b. deck displacements in Kocaeli-EW earthquake



b. accelerations in Kocaeli-EW earthquake

Figure 7. Deck displacements for different systems and earthquakes

Figure 8. Deck accelerations for different structural systems and earthquakes

Absolute deck-displacements are calculated as well and displayed in Figure 7. From the figures, it has been realized that the superstructure-displacements distinctly increase in the second phase of the earthquakes especially for the Kocaeli earthquake motion. Since the isolation system has high lateral displacement capacity, the deck system having massive mass reacts like a rigid body movement over the base isolation instruments. Therefore, elastic behavior model can be taken into account in the designs for superstructure of a bridge system.

Additionally, deck accelerations are compared to obtain the reduction ratios in the maximum values. From the Figure 8, maximum-accelerations of the superstructure have also developed with higher values in non-isolated system with reference to the isolated system. Peak ground accelerations resulted in strong ground motions are reduced by the isolation system and transferred from substructure to superstructure. It should be noted that soil characteristic would considerable affect the response values and it should be avoided the amplify effect of the soft soil. Because dominant period of this soil type may cause to resonance effect in case of period-extending of the bridge/pier system by using isolation system.

Lateral seismic capacity of a structural system plays a vital role and it is an important factor in earthquake resistant designs. All seismic design processes aim to provide an adequate lateral-stiffness by considering different concepts such as isolations and dampers. Pushover curves are used to obtain seismic performances in engineering designs. Nonlinear modal pushover analyses have been implemented to obtain lateral capacity of the considered system.

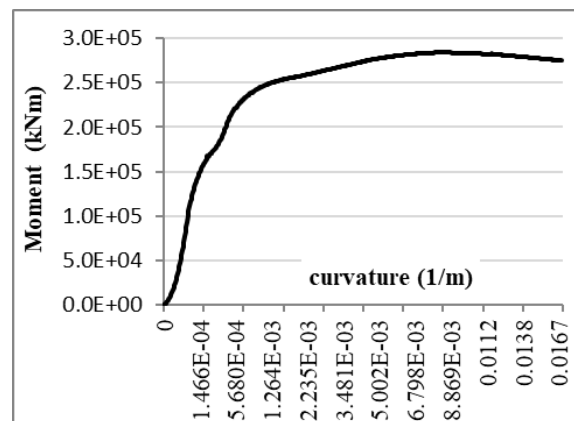


Figure 9. M-K curve for pier

In defining of section capacity moment-curvature relationship provides valuable characteristic [15]. For nonlinear behavior, moment-curvature (M-K) diagram is obtained for the pier section by considered steel reinforcements. As concrete material behavior, Mander [16] model is considered for stress-strain relationship in the solutions. The moment-curvature diagram is obtained as given in Figure 9.

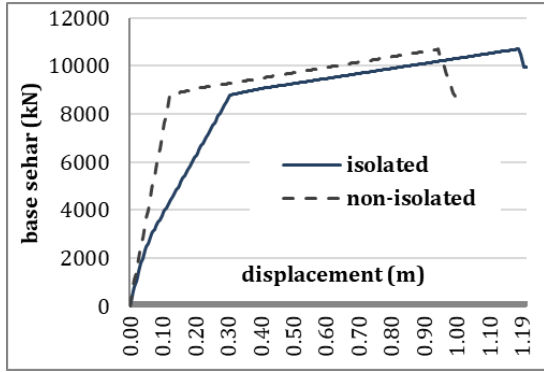


Figure 10. Capacity curves for the pier systems

In Figure 10, capacity curves are illustrated comparatively for both earthquake motions. These curves show elastic zone, post-yield zone and failure zones for the studied pier systems. As is seen, the base isolation has increased the lateral displacement capacity of the system and this increase-amount reaches up to 20% value. Furthermore, a minor increase is seen in the maximum base force for the lateral capacity. Seismic performance of the pier system is determined for maximum earthquake level by considering hard clay soil layer.

Design spectrum parameters are defined according to Turkish Building Seismic Code-2018 [15]. Thus, spectral acceleration coefficients of the design spectrum are obtained by the values of $S_{ds}=1.345$ (at short period) and $S_{d1}=0.563$ (at long period). These parameters reflect the soil influences to the design spectrum. The peak ground acceleration value is considered by the value of 0.646g. Under these conditions, performance requirements of the pier system are calculated for the assigned designed spectrum and the performance objectives of the pier system are comparatively given in Table 3.

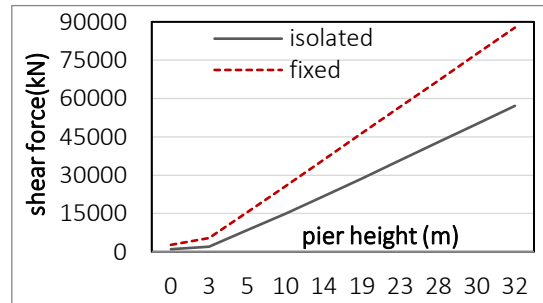
Table 3. Performance targets for maximum earthquake

pier type	V_p (kN)	d_p (m)	S_{ap} (m/s^2)	S_{dp} (m/s^2)
pier with elastomeric bearing	6642	0.219	0.24	0.204
fixed pier without elastomeric bearing	8198	0.133	0.301	0.116

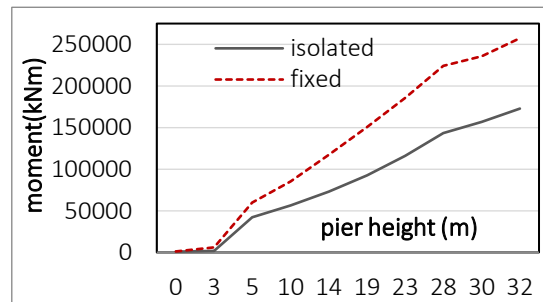
As seen, the isolation device has reduced the demand forces arising from quake motion. By using isolation system, while

the displacement demand of the pier system has increased from 0.106m (d_p) to 0.219m (d_p), the shear force value (V_p) decreases from 8198 kN to 6642 kN thanks to flexibility of the elastomeric bearing. On the other hand, the spectral displacements (S_d) and accelerations (S_a) have shown large variations as seen from the Table 3. While the deck accelerations have decreased for the isolated structure, the displacements have considerably increased due to the high self displacements of the elastomeric bearing. As a result, the isolation system has distinctly modified the behavior of the system and thus the pier-performance has increased advantageously about 20% by increasing displacement capacity.

Response variations in the pier are also investigated under effects of strong ground motions. For this purpose, each pier system is analyzed for seismic effects and response variations are obtained for fixed and isolated system in terms of parameter of the pier height. Figure 11 shows a comparison for response variations in the pier for the Düzce earthquake. Additionally, the variations in the pier system are compared in Figure 12 for the Kocaeli earthquake in terms of pier height. As seen, the isolation system has distinctly reduced response quantities and it becomes more efficient as the pier length increase. The results show that an isolation system would largely decrease response values (shear forces and bending moments) especially for very long piers.

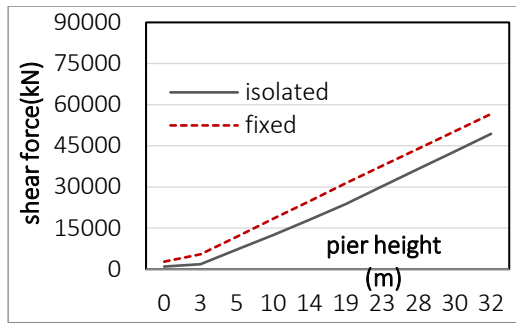


a. shear force variations along the pier heights

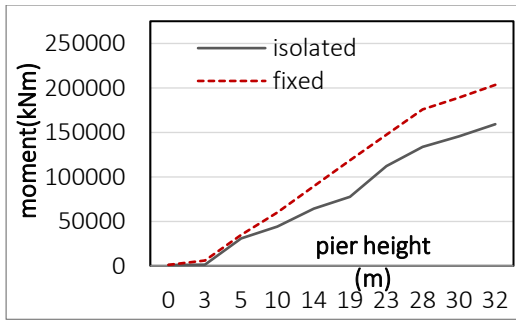


b. moment variations along the pier heights

Figure 11. Response variations for Düzce earthquake



a. shear force variations along the pier heights



b. moment variations along the pier heights

Figure 12. Response variations for Kocaeli earthquake

The peak displacements of the elastomeric bearing is also investigated under effects of considered strong ground motions. Maximum displacement of a bearing is a crucial parameter in design process. In this study, the maximum displacement value is limited by the value of $1,5 \times t_r$ which is prescribed by [17] code of Caltrans. In Figure 13, the variations of bearing displacements are illustrated for both equations. Additionally, the peak displacements of the elastomeric bearing are comparatively given in the Table 4. As seen from the graphic and table, peak displacement (0,174m) of the elastomeric bearing exceed the allowable displacement (0,128m) in case of Düzce-NS quake. On the other hand, the peak displacement (0,115m) of the Kocaeli-EW quake is in acceptable limits. The results show that the displacement capacity of the elastomeric bearing is insufficient for the strong earthquake and this case may lead to drop off the superstructure and therefore severe damages in the pier system could occur due to large displacements.

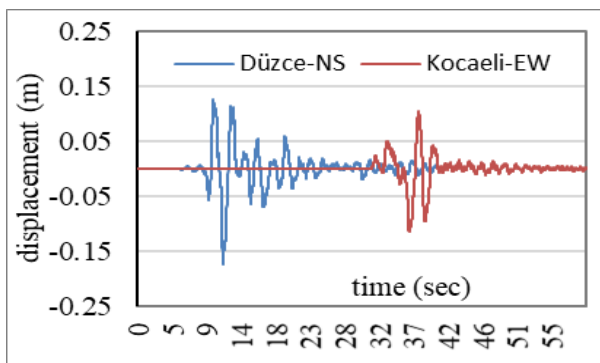


Figure 13. Displacements of the elastomeric bearing

Table 4. Peak displacements of the bearing

Earthquake	δ_{max} (m)	$\delta_{allowable}$ (m)
Düzce-NS	0.174	0.128
Kocaeli-EW	0.115	0.128

Furthermore, the earthquake energy is also measured in the pier system as illustrated in Figure 14. While the isolation system requires lower forces demanded by the earthquake motion, it provides higher energy capacity by means of capable of high displacements. The results show that the usage of a seismic isolation device is very effective tool, especially for bridges, in reducing of high seismic demands. The isolation system accomplishes this process by shifting the fundamental period of the structural system and by keeping away from the peak regions in a spectrum curve.

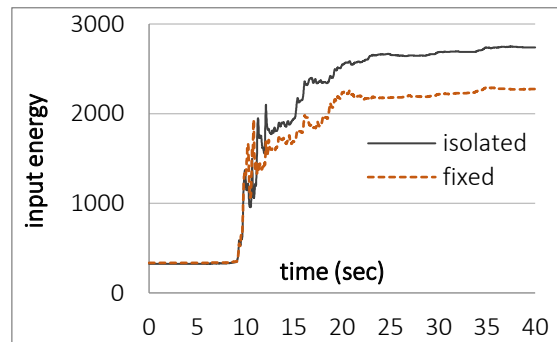


Figure 14. Demand energy for the pier system

4. Conclusions

This study has focused on effectiveness of an isolation system used in a reinforced concrete bridge-pier. For this purpose, the base-isolated pier is comparatively studied in terms of connection type between the superstructure and the pier-column under effects of strong and recorded ground motions. Two structural types are considered: an isolated and non-isolated pier system. Elastomeric bearings have been mounted between deck girder and pier-top ends in the pier system. Seismic response quantities are obtained in lateral direction by using static pushover procedures and nonlinear dynamic analyses in time history domain. The following conclusions are obtained from the present research:

- The isolation system has prolonged the natural vibration periods and it has enabled high flexibility that would provide more seismic performance. Since bridge or pier system has high period values, it should be avoided from the resonance range (for soft soil, especially) in the case of extending period.
- Using seismic isolation system has decreased the demands caused by earthquakes and increased the seismic capacity. Considerable reductions have been observed in the maximum base responses for the isolated pier system whereas the non-isolated system has yielded higher response quantities.

- The reduction in the maximum base shear forces is 25% in Düzce earthquake and 36% in Kocaeli earthquake. As seen from the presented figures, the amount of decrease varies depending on structural characteristics and earthquake motion as well. Because, earthquakes occur in random manner and they contain large uncertainties. The structure interacts with the earthquake in a complex form.
- Maximum displacements play a key role in engineering designs and the elastomeric bearings have distinctly limited and decreased the maximum displacement of the pier top-end.
- Due to high flexibility of the isolation system, absolute displacements in the superstructure have increased and massive deck system moves easily like a rigid body motion over the base isolation instruments. Therefore, elastic behavior model can be considered for the deck system.
- The isolated system has reduced the peak deck-accelerations and they are about 0.33g for Düzce earthquake and 0,25g for Kocaeli earthquake. Whereas, these maximum values are, respectively, 0,42g and 0,35g for the non-isolated pier system.
- Lateral stiffness capacity of the pier system has been comparatively displayed via pushover curves. Results showed that the elastomeric bearings have provided higher displacement capacity and therefore more seismic capacity up to 20% and a small increase in shear capacity.
- Peak displacements in the elastomeric bearing have exceeded the bearing capacity. Extremely large displacements in the bearings may lead to drop off the superstructure and dislocation of the bearing can develop with overturning of pier system. As a result, the displacement capacity of the elastomeric bearing is insufficient in case of a strong earthquake.
- For general inferences for the effectiveness of the rubber isolation system, extensive studies should be implemented over various pier types and different soil conditions by using nonlinear performance analyses.

5. Acknowledgement

The author thanks the reviewers for their positive contribution to the submitted article.

6. Funding

The author received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this paper.

7. Conflict of interest statement

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

8. Ethics committee approval

The author declares that there is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

9. References

- [1] Sheikh, M.N., Vivier, A., Legeron, F. Seismic vulnerability of hollow core concrete bridge pier. *In Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading, Consec '07*, Paris, France, , pp. 1445–1454, 2007.
- [2] Broderick, B.M., Elnashai, A.S. Analysis of the failure of interstate 10 freeway ramp during the Northridge earthquake of 17 January 1994. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. **1995**, 24, pp.189–208.
- [3] Elnashai, A.S., Bommer, J.J., Baron, C.I., Lee, D.H., Salama, A.I. Selected engineering seismology and structural engineering studies of the Hyogo-Ken Nanbu (Great Hanshin) earthquake of 17 January 1995. *ESEE research report*: No. 95-2. London: Imperial College, 1995.
- [4] Abdelkareem, K.H., Machida, A. Effect of vertical motion of earthquake on failure mode and ductility of RC bridge piers. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 2000.
- [5] Priestly, M.J.N., Calvi, G.M. Strategies for repair and seismic upgrading of Bolu viaduct 1, Turkey, *Journal of Earthquake Engineering*, **2002**, 06, pp.157-184.
- [6] Farshad H. D., & Alam, M.S. Effect of different steel-reinforced elastomeric isolators on the seismic fragility of a highway bridge, *Structural Control and Health Monitoring*. **2016**, 24, pp. 1-15. DOI: 10.1002/stc.1866
- [7] Saritaş, F., Hasgür, Z. Dynamic behavior of an isolated bridge pier under earthquake effects for different soil layers and support conditions, *Digest 2014*, December **2014**, pp. 1733-1756.
- [8] Saritaş, F. Performance-based seismic assessment of a base-isolated bridge-pier. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **2022**, 26, pp.21-38.
- [9] Kunde, M.C., Jangid, R.S. Seismic behavior of isolated bridges: A-State-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, **2003**, 3, pp. 140-170.
- [10] Razzaq, M.K., Bhuiyan, A.R. Okui, Y., Mitamura, H., Imai, T. Effect of rubber bearings modeling on seismic response of base isolated highway bridge. Joint Conference Proceedings, *7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)*, 2010, Tokyo, Japan.
- [11] AASHTO. LFRD Bridge design specifications. American association of state highway and transportation officials: loading and general information. Washington D.C., 2012.
- [12] DIN4141-14. Structural bearings, laminated elastomeric bearings design and construction. Deutsche Institut für Normung. Berlin, 1985.

- [13] Naeim, F., Kelly, J.M. Design of seismic isolated structure. USA, John Wiley & Sons, 1999.
- [14] CSI, Computer & Structures Inc. Linear and nonlinear static and dynamic analysis of three-dimensional structures. Berkeley, California, 2019.
- [15] Bedirhanoglu, I., Ilki, A. (2004). Theoretical Moment-Curvature Relationships for Reinforced Concrete Members and Comparison with Experimental Data. 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, pages: 231-240, 6-8 October, Bogazici University, Istanbul, Turkey. ISBN: 975-518-230-6
- [16] Mander, J.B., M.J.N. Priestley, and R. Park. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 114:1804-1826.
- [17] CALTRANS. 2019. Caltrans seismic design criteria version 2.0. State of California Department of Transportation. California.