



**Trakya Üniversitesi  
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

**Cilt: 25      Sayı: 2      Aralık      2024**

**TRAKYA  
UNIVERSITY  
JOURNAL OF  
ENGINEERING  
SCIENCES**

**Volume: 25    Number: 2    December 2024**

**Trakya Univ J Eng Sci**

<http://dergipark.org.tr/tujes>

[tujes@trakya.edu.tr](mailto:tujes@trakya.edu.tr)

**ISSN 2147-0308**

**Trakya Üniversitesi  
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

**Cilt: 25**

**Sayı: 2**

**Aralık**

**2024**

**Trakya University  
Journal of Engineering Sciences**

**Volume: 25**

**Number: 2**

**December**

**2024**

**Trakya Univ J Eng Sci**

<http://dergipark.org.tr/tujes>  
[tujes@trakya.edu.tr](mailto:tujes@trakya.edu.tr)

**ISSN 2147-0308**

**Dergi Sahibi / Owner**

Trakya Üniversitesi Rektörlüğü, Fen Bilimleri Enstitüsü Adına  
On behalf of Trakya University Rectorship, Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Doç. Dr. Filiz UMAROĞULLARI

**Yayın Kurulu Üyeleri / Editorial Board Members**

**Baş Editör / Editor-in-Chief**

Doç. Dr. Önder AYER Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi

**Alan Editörleri / Co-Editors**

Prof. Dr. Hacı Ali GÜLEÇ Gıda Mühendisliği Trakya Üniversitesi  
Prof. Dr. Esmâ MIHLAYANLAR Mimarlık Trakya Üniversitesi  
Prof. Dr. Gökhan KAÇAR Genetik ve Biyomühendislik Trakya Üniversitesi  
Doç. Dr. Hasan Faik KARA Mimarlık Trakya Üniversitesi  
Doç. Dr. Gürkan İRSEL Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi  
Doç. Dr. Sezer ULUKAYA Elektrik-Elektronik Müh. Trakya Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Selin ARABULAN Mimarlık Trakya Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Altan MESUT Bilgisayar Mühendisliği Trakya Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Emir ÖZTÜRK Bilgisayar Mühendisliği Trakya Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KOÇYİĞİT Elektrik-Elektronik Müh. Trakya Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Pınar Aydan DEMİRHAN Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi

**Dil Editörü / Language Editor**

Doç. Dr. Aslı ARABOĞLU Mütercim Tercümanlık Trakya Üniversitesi

**Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board**

Prof. Dr. Hüseyin Erol AKATA Makine Mühendisliği İstanbul Aydın Üniversitesi  
Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER Makine Mühendisliği Yıldız Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU Makine Mühendisliği Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Naci GENÇ Elektrik-Elektronik Müh. Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Özer GÖKTEPE Tekstil Mühendisliği Namık Kemal Üniversitesi  
Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA İnşaat Mühendisliği Ege Üniversitesi  
Prof. Dr. M. Bahattin TANYOLAÇ Biyo-mühendislik Ege Üniversitesi  
Prof. Dr. Pelin ONSEKİZOĞLU BAĞCI Gıda Mühendisliği Trakya Üniversitesi  
Prof. Dr. İsa CAVİDOĞLU Gıda Mühendisliği Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
Prof. Dr. Yılmaz KALKAN Elektrik-Elektronik Müh. Adnan Menderes Üniversitesi  
Prof. Dr. Orhan ARKOÇ Jeoloji Mühendisliği Kırklareli Üniversitesi  
Prof. Dr. Sedat BİNGÖL Makine Mühendisliği Dicle Üniversitesi  
Doç. Dr. Cemil ÖZYAZGAN İnşaat Mühendisliği Kırklareli Üniversitesi  
Doç. Dr. Timur KAPROL Mimarlık Namık Kemal Üniversitesi  
Doç. Dr. Ümit HÜNER Makine Mühendisliği Kırklareli Üniversitesi  
Doç. Dr. Hamza F. CARLAK Elektrik-Elektronik Müh. Akdeniz Üniversitesi  
Dr. Aslı Günay BULUTSUZ Makine Mühendisliği Yıldız Teknik Üniversitesi  
Assoc. Prof. Dr. Jiri SOBOTKA Mechanical Engineering Technical University of Liberec  
Assoc. Prof. Dr. Regita BENDIKIENE Mechanical Engineering Kaunas University of Technology  
Assist. Prof. Dr. Tomasz JACHOWICZ Polymer Processing Lublin University of Technology  
Assist. Prof. Dr. Mirosław SZALA Mechanical Engineering Lublin University of Technology  
Assist. Prof. Dr. Balazs BOKOR Mechanical Engineering Budapest Univ. of Tech. Econ.  
Assist. Prof. Dr. Eldhose IYPE Chemical Engineering BITS Pilani  
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ERGEN Mimarlık Siirt Üniversitesi

**Dizgi / Design**

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KOÇYİĞİT

**İletişim Bilgisi / Contact Information**

Address : Trakya Üniversitesi, Enstitüler Binası, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balkan Yerleşkesi, 22030, Edirne / TÜRKİYE

Web site : <http://dergipark.org.tr/tujes> E-mail : [tujes@trakya.edu.tr](mailto:tujes@trakya.edu.tr)

Tel : +90 284 2358230 Fax : +90 284 2358237

**Baskı / Publisher**

Trakya Üniversitesi Matbaa Tesisleri / Trakya University Publishing Centre

## **İçindekiler / Contents**

### **Araştırma Makaleleri / Research Articles**

#### **AA5754 ve AA7075 Alaşımlarının Kimyasal Aşındırma ile İşlenmesinde Aşındırma Süresi ile Yüzey Pürüzlülüğü İlişkisinin İncelenmesi**

*Investigation of the Relationship Between Etching Duration and Surface Roughness in Chemical Machining of AA5754 and AA7075 Alloys*

Tunahan PAMUKÇU, Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN ..... 65-75

#### **Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişin Statik Eğilme ve Serbest Titreşim Analizi**

*Static Bending and Free Vibration Analysis of Functionally Graded Porous Sandwich Beam*

Caner SOLAR, Vedat TAŞKIN ..... 77-90

#### **Spice Model of Mutlu-Kumru Memristor Model and Its Usage for Analysis, Modeling, And Simulation of a Memristor-Based Sawtooth Signal Generator**

*Mutlu-Kumru Memristör Modelinin Spice Modeli ve Testeredişi Sinyal Jeneratörü İçin Analizi, Modellenmesi ve Simulasyonu*

Ertuğrul KARAKULAK, Reşat MUTLU ..... 91-100

#### **Techno-Economic Evaluation of a Photovoltaic System for Industrial Facility: A Case Study in Edirne, Turkey**

*Endüstriyel Tesis İçin Bir PV Sisteminin Tekno-Ekonomik Değerlendirmesi: Türkiye-Edirne'de Bir Vaka Çalışması*

Hacer AKHAN ..... 101-116

#### **Experimental Optimization of Surface Roughness in Milling of AISI 304 Stainless Steel on A CNC Vertical Machining Center**

*AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin CNC Dik İşleme Merkezinde Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu*

Beyza AVCI, Serdar Osman YILMAZ, İbrahim Savaş DALMIŞ ..... 117-128

## **Artificial Neural Network Models of Cross-Linked Polyethylene**

*Çapraz Bağlı Polietilenin Yapay Sinir Ağı Modelleri*

Rabia KORKMAZ TAN, Hakan ÇANTA, Reşat MUTLU ..... 129-141

## **Afet Sonrası Etkilenenlerin Coğrafi Bilgi Sistemiyle İzlenmesi: Kahramanmaraş Depremi Örneği**

*Monitoring of Affected Individuals After The Disaster Using Geographic Information Systems: The Case of The Kahramanmaraş Earthquake*

Yener TÜREN, Eylül MALKOÇ, Hilmi KUŞÇU ..... 143-150

## AA5754 ve AA7075 Alaşımlarının Kimyasal Aşındırma ile İşlenmesinde Aşındırma Süresi ile Yüzey Pürüzlülüğü İlişkisinin İncelenmesi

Tunahan PAMUKÇU<sup>1\*</sup>, Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, TÜRKİYE

**Makale Künye Bilgisi:** Pamukçu, T., Ürkmez Taşkın, N. (2024). AA5754 ve AA7075 Alaşımlarının Kimyasal Aşındırma ile İşlenmesinde Aşındırma Süresi ile Yüzey Pürüzlülüğü İlişkisinin İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 25(2), 65-75.

### Öne Çıkanlar

- AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşım yüzeylerde kimyasal aşındırma yöntemi ile zamana bağlı olarak kontrollü bir şekilde yüzey pürüzlülüğü değişimi sağlanmıştır.
- AA5754 ve AA7075 alaşımlarının iki farklı kimyasal içeriğe sahip çözelti kullanılarak kimyasal aşınma hızları tespit edilmiştir.
- AA5754 ve AA7075 alaşım yüzeylerinde çalışmada kullanılan kimyasal çözeltiler ile elde edilebilecek en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihi:</b> Geliş: 3 Haziran 2024 Kabul: 22 Ekim 2024	Bu çalışmada endüstride yaygın olarak kullanılan AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımlarında iki farklı kimyasal dağlayıcı (A: HF, HCl, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O) (B: HF, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O) kullanılarak farklı sürelerde yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kimyasal aşınma hızı değişimi incelenmiştir. Kullanılan kimyasal çözeltilerin bu malzemelerin yüzey özellikleri üzerindeki etkinin incelenmesi amaçlanmıştır. Her iki alaşım için de en yüksek yüzey pürüzlülüğü artışı B çözeltisi içerisinde 20 dk aşındırma süresinde elde edilirken, en yüksek kimyasal aşınma hızı değeri B çözeltisi içerisinde 10 dk aşındırma süresinde elde edilmiştir. Kimyasal aşındırma metodunun alüminyum yüzeylerin aşındırılmasında etkili bir yöntem olduğu ve işleme süreleri ile numuneler üzerinde oluşan yapıların ve gözenek boyutlarının kontrol edilebileceği görülmüştür.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Kimyasal Aşındırma; Alüminyum; Yüzey Pürüzlülüğü; Malzeme İşleme Hızı.	

### Investigation of the Relationship Between Etching Duration and Surface Roughness in Chemical Machining of AA5754 and AA7075 Alloys

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: June 3, 2024 Accepted: October 22, 2024	In this study, surface roughness (Ra) and chemical wear rate changes were investigated in AA5754 and AA7075 aluminium alloys, which are widely used in industry, by using two different chemical etchants (A: HF, HCl, HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O) (B: HF, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O) at different times. It is aimed to investigate the effect of the chemical solutions used on the surface properties of these materials. For both alloys, the highest surface roughness increase was obtained at 20 min etching time in B solution, while the highest chemical etching rate value was obtained at 10 min etching time in B solution. It was seen that chemical etching method is an effective method for etching aluminium surfaces and the structures and pore sizes formed on the samples can be controlled with the processing times.
<b>Keywords:</b> Chemical Etching; Aluminum; Surface Roughness; Material Wear Rate	

## 1. Giriş

Çok sayıda kimyasal süreçte rol oynayan mühendislik yüzeylerinin anlaşılması ve kontrol edilmesi elektrik, elektronik, enerji, triboloji, optik, biyoloji ve biyomimetik gibi birçok ileri teknoloji alanındaki gelişmelerin temelini teşkil eder. Özellikle mikrofabrikasyon alanında büyük teknolojik gelişmelerle birlikte minyatürleşmeye eğilimin artması fonksiyonel mikro/nano yüzey üretimine ve kontrolüne olanak sağlayan teknolojilerin gelişimini beraberinde getirmektedir.

Yüzeyler çok sayıda fiziksel, kimyasal, mekanik, termal vb. olgunun meydana geldiği ara yüzü temsil eder. İşlevsellik yüzeyin hem morfolojisi hem de kimyasal bileşimi ile belirlendiğinden boyutlar küçüldükçe yüzey uygulamaları için gerekli farklı yüzey özelliklerinden yararlanılabilir veya belirli bir yüzey özelliği farklı yüzey uygulamaları için temel gereksinim olabilir. Örneğin iki yüzeyin birbiri ile yapışma kabiliyeti; yüzeylerin ıslanabilirliği, yüzey serbest enerjisi, pürüzlülük ve birbirine mekanik bağlanma özellikleri ile kontrol edilir.

Yüzey morfolojisi ve bununla ilişkili olarak yüzey pürüzlülüğü malzemenin; kılcallık, ıslanma, yansıtma, ışık absorpsiyonu, kırınım gibi fiziksel ve optik özelliklerini, biyolojik adsorblama ve termal özelliklerini, sertlik, malzeme yorulması, sürtünme aşınma gibi mekanik ve tribolojik özelliklerini makro ve mikro ölçekte kontrol eden yüzey parametresidir.

Bir yüzeyde bu parametreleri kontrol ederek veya mikro/nano yapılar oluşturularak; örneğin bir malzemeye iyi yapışma, enerji depolama, dayanım, sıvı veya gaz bariyer katmanları oluşturma, korozyon sorunlarını azaltma, kir, mikroorganizma, buz ve don oluşumunu engelleme, alev geciktirilmesi gibi farklı işlevler kazandırılabilir.

Yüzey yapılandırma ile yüzeye fonksiyon kazandırma ile ilgili ilk çalışmalar Barthlott ve Neinhuis tarafından Lotus yapraklarının kendini temizleme etkisinin (lotus etkisi) keşfedilmesi ve süperhidrofobik yüzeylerin farklı malzemeler üzerinde oluşturulma çabalarıdır. Daha sonra farklı yöntemlerle oluşturulan yüzeylerin sıvılar tarafından ıslatılabilirlik özellikleri teorik ve deneysel olarak birçok çalışmada incelenmiştir. (Barthlott ve Neinhuis, 1997; Lipowsky, vd., 2000; Yang, vd., 2006). Islanmaya benzer şekilde yapışma, temas halindeki cisimler arasında uygulanan moleküler çekimden kaynaklanan bir etkidir ve yüzey mikro geometrileri yapısal yapıstırıcılar yoluyla yapılan bağlantıların dayanımını doğrudan kontrol eder (Bruzone, vd., 2003; Cognard, vd., 2006; Lonardo, vd., 1989) Yüzeylerin en önemli optik özelliklerinden biri yansımadır. Bu parametre her malzeme için tipiktir ve yansıtıcı yüzeyin pürüzlülüğünden etkilenir. (Bennet, vd., 1961) Konvektif ısı transferi, doğal veya zorlanmış olabilen kütle transferini ifade eder ve konvektif ısı transferi, mikro yapı yüzeylerin temel öneme sahip olduğu çok aktif bir araştırma alanını temsil etmektedir. Yüzeylerin mekanik özellikleri, yüzey özelliklerinin yüzey tarafından sınırlanan parçanın direnci üzerindeki etkisini içerir. Temas mekaniği, pürüzlerin desteklediği yükü ve gerçek temas alanını dikkate alır. Bu hususlar, kayan yüzeyler (tribolojide) ve yükü statik olarak ileten yüzeyler için temel öneme sahiptir ve Greenwood ve Williamson'ın (1996) çalışmasıyla kapsamlı olarak ele alınmıştır. Yorulma, mühendislik uygulamaları için bir diğer önemli olgudur. Yüzeyin kalitesi, yüzey mikro geometrisi, kusurlar vb. sertliği ve artık gerilimin yorulma davranışında birincil bir role sahip olduğu kabul edilir (Yahata, 1987) (Yahata, 1982).

İleri yüzey uygulamaları için tercih edilen ve özellikle düşük yoğunluk ve kabul edilebilir mukavemet değerlerinden dolayı, ağırlık azaltımının bir zorunluluk olduğu havacılık ve otomobil endüstrilerinde kullanılan



başlıca metallere bir tanesi alüminyumdur. Alüminyum, magnezyumdan sonra yoğunluğu en düşük ikinci metaldir. Hafiflik, kolay işlenebilirlik, mukavemet, termal ve elektriksel iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle, uçak ve otomotiv endüstrisi, yapı malzemeleri, ambalaj endüstrisi, elektrik ve elektronik sektörü gibi birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, pasifleşebilen bir metal olması alüminyumun çok yüksek bir korozyon direncine sahip olmasına neden olmaktadır. Dünya’da demir çelikten sonra en çok üretilen ikinci metal ve demir-dışı metaller arasında ise en çok üretilen metaldir (yaklaşık 100 milyon ton / yıl). Yüksek geri dönüşüm oranına sahip bir malzeme olarak ilerleyen yıllarda önemini korumaya devam edeceği, alüminyuma olan talebin her geçen yıl giderek artacağı öngörülmektedir. (BTYPK, 2021) (TALSAD, 2023).

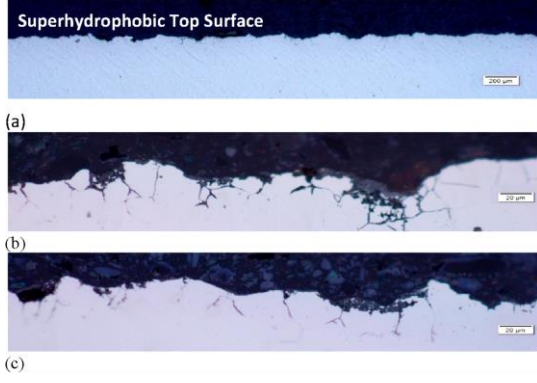
5xxx serisi alüminyum alaşımları korozyon direnci, iyi işlenebilirliği ve yüksek kaynak kabiliyetleri ile denizcilik, ulaşım ve otomotiv sektörlerinde (Casalino vd., 2014), 7xxx serisi alüminyum alaşımları ise yüksek mukavemet ve hafiflik avantajları sayesinde havacılık sektöründe çeşitli uçak gövdelerinde, uzay araçlarında, pervanelerde ve motor parçalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Cavalere vd., 2006). (Hamed, 2017) (Kasman ve Yenier, 2014).

Korozif (deniz suyu, asidik ortam, nemli ortam vb.) ortamlarda da kullanılabilen bu iki alaşımın; gelişen teknolojiyle birlikte yüksek hassasiyetli işleme gerektiren parçaların kullanıldığı ileri teknoloji sistemlerinde, çeşitli fonksiyonel yüzeylerde, metal kaplamalar, organik kaplamalar, kompozit kaplamalar vb. gibi yeni uygulama alanlarında önemi giderek artmaktadır. Metal yüzeylerin işlenmesinde ya da yüzeyde mikro/nano yapıların oluşturulmasında farklı enerjileri kullanan (mekanik, kimyasal, termal elektrokimyasal, vb.) çok sayıda ileri imalat yöntemi geliştirilmiştir. Kimyasal aşındırma uygulamaları

günümüzde bu imalat yöntemlerinden biri olarak dikkat çekici gelişmeler göstermiştir. Bu yöntem, malzemenin uygun bir kimyasal çözelti içerisinde kontrollü olarak aşındırılması olarak tanımlanabilir (Anusree ve Puthumana, 2014). Yöntemde kullanılacak kimyasal çözelti, püskürtme veya daldırma yöntemiyle malzemeye nüfuz ettirilebilmektedir.

Yüzeyin kontrollü bir şekilde aşındırılması ile işlenen malzeme istenilen şekil ve boyutlara getirilebilmekte ve yüzeyde istenilen yüzey yapıları oluşturulabilmektedir. Hemen hemen bütün mühendislik malzemeleri uygun kimyasallar kullanılarak kimyasal olarak işlenebilmektedir. Malzeme mekanik özelliklerinin kimyasal aşınma ye etkisi olmaması, malzemenin ısı ve dinamik etkilere maruz kalmaması, dar bir tolerans aralığında hassas parça işlenebilmesi, çapak oluşmaması, farklı malzemelere uygulanabilirliği ve maliyetinin düşük olması bu yöntemin en önemli avantajlarıdır (Çakır vd., 2007).

Ayrıca işlenecek malzemenin kimyasal bileşenlerine ve bu bileşenlerin yüzey yapılanmalarına bağlı olarak kullanılacak çözeltilerle seçici kimyasal aşındırma yapılarak mikro ve nano ölçekte yüzey yapıları oluşturulabilir ve bu yapılar rastgele, düzensiz, karmaşık geometrik (fractal) düzenler oluşturabilir. Bazı işlevsel yüzey uygulamalarında (yapışma ve süperhidrofobik yüzey oluşturma) düzensizlik istenen bir özelliktir. Örneğin düşük enerjili yüzeylerde yüzeyi oluşturan malzeme bileşimleri homojen olmadığında, yüzeylerin farklı mikro ölçekli bölgelerinde kimyasal aşındırma oranları eşit olmaz, mikro ölçekli yapıların eşit olmayan dağılımı, yüzeylerde mevcut rastgele pürüzlülüğün ve süperhidrofobik özelliklerin oluşmasına yol açar (Taşkın, 2021). Şekil 1’de kontrollü kimyasal aşındırma ile düzensiz yapı oluşturulmuş süperhidrofobik çelik yüzeylerin kesitlerinden alınmış SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 1.** Kimyasal işleme ile pürüzlendirilmiş süperhidrofobik bir yüzeylerin kesit SEM görüntüleri (a) 200 µm, (b) and (c) 20 µm (Taşkın, 2021)

Benzer şekilde, Dong ve arkadaşları (2011) bakır üzerinde lazer aşındırma yöntemi ile mikro ölçekli düzenli yapılar ve seçici kimyasal aşındırma yöntemi kullanarak rastgele yapılar oluşturarak yaptıkları çalışmada düzenli yüzeylerde daha düşük temas açısı elde etmişlerdir. Onda ve arkadaşları (1996) suyun ve farklı konsantrasyonlardaki çeşitli sulu çözeltilerin temas açılarını incelemek için düz ve fraktal yüzeyleri alt tabaka olarak kullanmış fraktal yüzeydeki temas açıları daha yüksek (süperhidrofobik;  $174^\circ$ ), düzenli yüzeylerde daha düşük temas açıları (hidrofobik; maksimum  $109^\circ$ ) gözlemişlerdir. Akpınar (2024), AA2024 alüminyum alaşımlarının yapıştirılarak birleştirilen bağlantılarının mukavemetini arttırmak için çeşitli değişken parametreler kullanmıştır. Bunlardan biri de malzeme yüzeylerinin kimyasal aşındırma yöntemi ile yüzey pürüzlülüğünün artırılmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü artırılan numunelerin bağlantısında hasar yükü değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte yapışkan ile yapıştirılan numune yüzeylerinin arasındaki tutunmanın da artmasıyla açıklanmıştır. Kimyasal aşındırma yöntemi ile alüminyumun yüzey pürüzlülüğünün ve morfolojisinin kontrollü olarak değiştirildiği yüzey mühendisliği uygulamalarında aşındırma sıcaklığı (Burokas, 2008), aşındırma süresi (Sarkar, 2008), kimyasal çözelti türü

(Wu, 2012) (Çakır, 2019) ve konsantrasyonu (Abbas, 2018) başlıca değişkenlerdir.

Bu çalışmada AA5754 ve AA7075 alaşım yüzeylerinin kimyasal işlenmesinde iki farklı çözelti içinde ve farklı aşındırma süreleri için malzeme aşındırma hızları ve yüzey pürüzlülüklerinin (Ra) zamana bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Çalışmanın, endüstride sıklıkla kullanılan bu iki alüminyum alaşımın fonksiyonel yüzey uygulamaları için kimyasal işlenmeleri ile ilgili yapılacak çalışmalar için literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Malzeme ve Deney Düzenneği

Çalışmada AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımları ve dağılayıcı olarak 2 farklı çözelti (A ve B çözeltileri) kullanılmıştır. Alüminyum alaşımlarının ve çözeltilerin kimyasal içeriği sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmiştir.

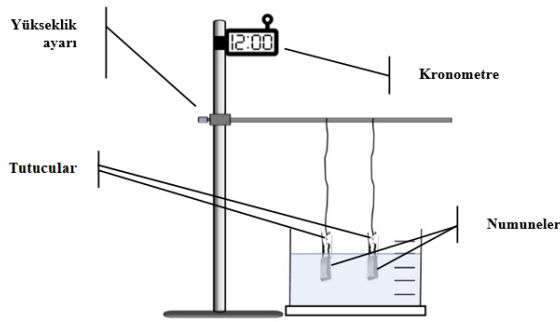
**Çizelge 1.** Alüminyum alaşımlarının kimyasal içeriği

Elementler	AA5754	AA7075
Si	0,40	0,40
Fe	0,40	0,50
Cu	0,10	1,2-2,0
Mn	0,50	0,30
Mg	2,6-3,6	2,1-2,9
Cr	0,30	0,18-0,28
Zn	0,20	5,1-6,1
Ti	0,15	0,20
Diğer	0,15	0,15
Al	Kalan	Kalan

Numunelerin kimyasal işlenmesi için tasarlanan düzenek Şekil 2’de verilmiştir. Numunelerin kimyasal çözelti içerisine eş zamanlı olarak daldırıp çıkarılabilmesi için yükseklik ayarı yapılabilen bir düzenek tasarlanmıştır. Aşındırma süresinin takip edilebilmesi için kronometre kullanılmış, numunelerin çözelti kabının tabanına değmeyip sıvı içinde askıda durması için askı tertibatı kullanılmıştır.

**Çizelge 2.** Kimyasal çözeltilerin içeriği

	Kimyasal içerik	Miktar (ml)
A çözeltisi	Hidroflorik asit (HF)	5,0
	Hidroklorik asit (HCl)	7,5
	Nitrik asit (HNO <sub>3</sub> )	12,5
	Saf su (H <sub>2</sub> O)	475
B çözeltisi	Hidroflorik asit (HF)	1,10
	Hidrojen peroksit (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	0,43
	Saf su (H <sub>2</sub> O)	23,8



**Şekil 2.** Deney düzeneği şematik gösterimi

## 2.2. Deneysel Çalışmalar

### 2.2.1. Numune Hazırlama

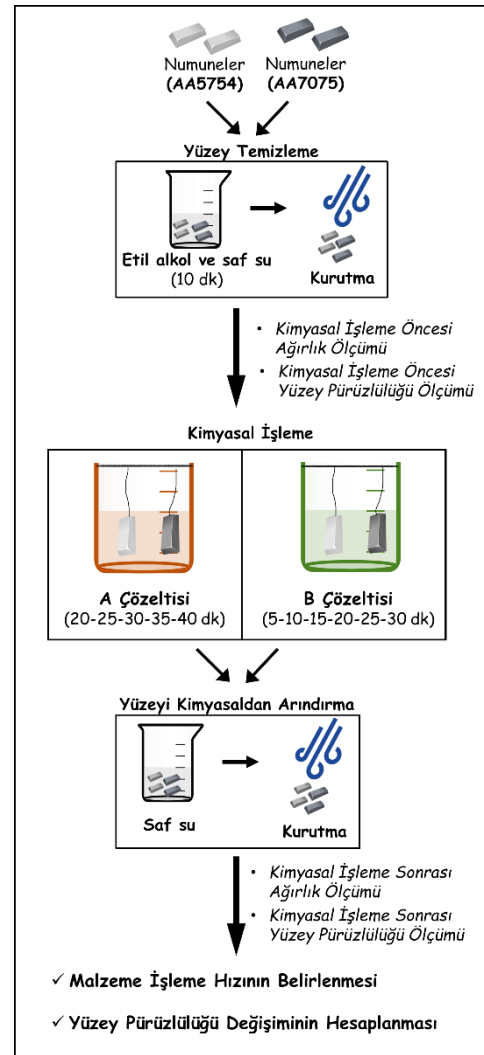
AA5754 ve AA7075 alaşımlarından 10 x 20 x 3 mm boyutlarında her durum için 6 yüzünden ölçüm yapılabilecek şekilde 20 adet numune hazırlanmıştır. Numune yüzeyleri N5 kalitesinde hazırlanmış ve kimyasal aşındırma öncesinde kir ve oksit tabakalarından arındırmak için etanol ve saf su ile temizlenmiştir.

Kimyasal aşındırma işlemi öncesinde ve sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülük ve kütle değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü değeri Taylor Hobson Precision Surtronic 25 profilometre ile 0.01 µm belirsizlikle ölçülmüştür. Ölçümlerin tümünde Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) parametresi kullanılmıştır. Kimyasal aşındırma sonrası malzeme yüzeylerinde meydana gelen pürüzlülük değişiminin incelenmesi amacıyla numuneler kimyasal aşındırma

öncesi ve sonrasında optik mikroskopta incelenmiştir. Kütle ölçümlerinde 0,0001g belirsizlik ile ölçüm yapabilen Mettler Toledo terazi kullanılmıştır.

### 2.2.2. Kimyasal İşleme

Aşamaları ve değişkenleri şematik olarak Şekil 3'te özetlenen kimyasal aşındırma için literatürdeki uygulamalar esas alınarak 2 farklı (A ve B) çözelti hazırlanmıştır.



**Şekil 3.** Deney aşamaları ve işlem parametreleri

Ön çalışmalar dikkate alınarak numuneler A çözeltisi içerisinde sırasıyla 20-25-30-35-40 dk boyunca, B. çözeltisi içerisinde ise 5-10-15-20-25-30 dk boyunca bekletilmiş ve süre sonunda numuneler saf su içine alınarak kimyasal reaksiyon sona erdirilmiştir.

Kimyasal işlem öncesi ve sonrası kütle farkı aşındırma süresine bölünerek “g/dk” cinsinden aşındırma hızları belirlenmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

AA5754 ve AA7075 alaşımı numunelere iki farklı kimyasal çözelti içerisinde farklı sürelerde kimyasal aşındırma uygulanarak zamana bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değişimi ve malzeme aşındırma hızları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

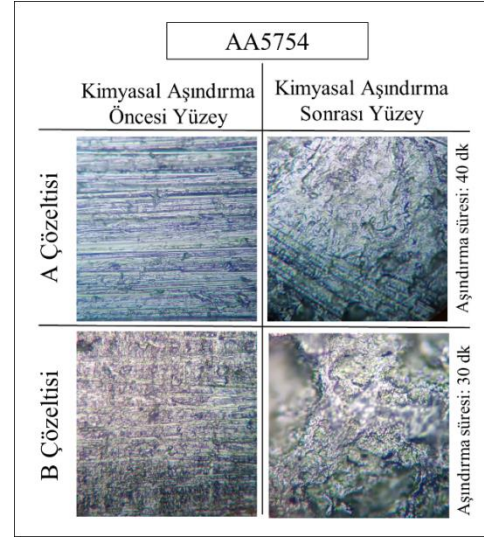
#### 3.1. İşleme Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

AA5754 ve AA7075 alaşımı numuneler A ve B çözeltileri içinde daldırılarak farklı sürelerde kimyasal aşındırmaya tabi tutulmuştur. Yüzey pürüzlülüklerinin değişimi ve aşındırma hızları Çizelge 2’de verilen çalışmanın işlem süreleri ön çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. A çözeltisi ile aşındırma tabii tutulan her iki alaşımda da kimyasal aşınma hızı ilk 15 dakikada 0,0001g/dk’dan az olarak gerçekleşmiş ve ortalama olarak ~0,035 µm/dk yüzey pürüzlülük değişimi meydana gelmiştir.

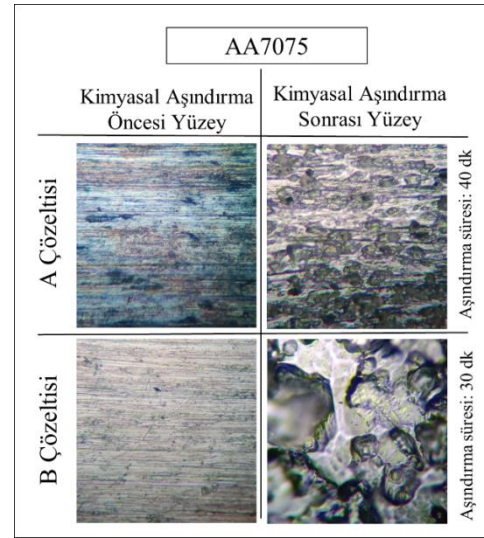
**Çizelge 2:** AA5754 ve AA7075 numunelerinin yüzey pürüzlülükleri ve aşındırma hızları

İşlem süresi (dk)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra, µm)		İşleme hızı (MRR, g/dk)	
<b>A Çözeltisi</b>				
	<b>AA5754</b>	<b>AA7075</b>	<b>AA5754</b>	<b>AA7075</b>
-	0,23±0,21	0,22±0,18	-	-
20	0,98±0,03	0,99±0,10	2,0x10 <sup>-4</sup>	5,7x10 <sup>-3</sup>
25	1,31±0,15	1,13±0,16	3,0x10 <sup>-4</sup>	5,4 x10 <sup>-3</sup>
30	1,64±0,14	1,14±0,15	2,0x10 <sup>-4</sup>	5,0 x10 <sup>-3</sup>
35	1,90±0,20	1,18±0,17	2,0x10 <sup>-4</sup>	4,7 x10 <sup>-3</sup>
40	2,23±0,24	1,37±0,18	3,0x10 <sup>-4</sup>	4,7 x10 <sup>-3</sup>
<b>B Çözeltisi</b>				
	<b>AA5754</b>	<b>AA7075</b>	<b>AA5754</b>	<b>AA7075</b>
-	0,58±0,14	0,48±0,20	-	-
5	2,50±0,52	4,58±1,40	1,5 x10 <sup>-2</sup>	2,2 x10 <sup>-2</sup>
10	4,08±0,82	6,80±1,22	1,0 x10 <sup>-2</sup>	3,3 x10 <sup>-2</sup>
15	4,71±0,71	6,92±1,43	8,0 x10 <sup>-3</sup>	1,8 x10 <sup>-2</sup>
20	6,68±1,78	8,95±1,67	6,6 x10 <sup>-3</sup>	1,4 x10 <sup>-2</sup>
25	5,76±1,43	7,56±2,94	5,6 x10 <sup>-3</sup>	1,2 x10 <sup>-2</sup>
30	5,26±1,85	8,05±2,85	5,1 x10 <sup>-3</sup>	1,1 x10 <sup>-2</sup>

Numuneler A çözeltisi içinde 20 dk işlem süresinden başlatılarak 5’er dakika arayla, B çözeltisinde ise kimyasal aşınma hızının daha yüksek olduğu göz önüne alınarak numuneler ilk 5. dakikadan itibaren yine 5 er dakika arayla kimyasal aşındırma tabi tutulmuştur.



(a)

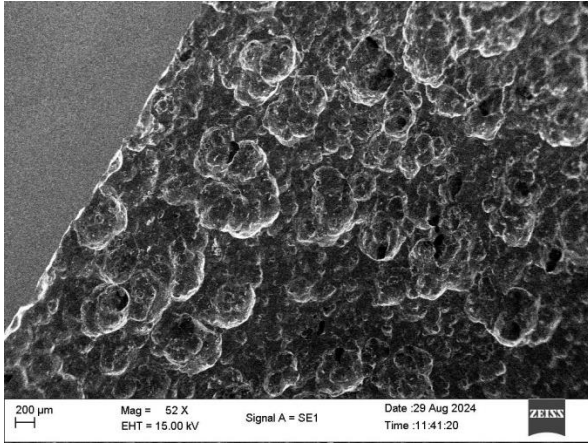


(b)

**Şekil 4 .** Kimyasal işlenmiş numunelere ait optik mikroskop görüntüleri (a) AA5754 (b) AA7075

Çizelge 1’de A ve B çözeltileri ile yapılan işlemlerde her iki alaşım için aşındırma süresi arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüklerinde genel olarak artış gözlenmiştir. Ancak, yüzey pürüzlülükleri yüzeyin

farklı bölgelerinde değişkenlik gösterdiği için ortalama değerlerin standart sapmaları ortalamanın %10'u civarında değişmiştir. Yüzey pürüzlülüğü oluşum mekanizmasının sürece bağlı doğası ve ilgili olguları etkileyen çok sayıda kontrol edilemeyen faktör nedeniyle pürüzlülük değişimi belirli bir aralıkta kontrol edilebilmektedir. Yüzeylerin gözle incelemesinde tüm yüzeylerde homojen dağılmış ~20-300 µm boyutlarında çukurcuklar oluştuğu gözlenmiştir. Bu yapılar Şekil 4.a ve 4.b de işlem öncesi ve sonrası olarak verilmiştir. Şekil 5' te ise işlem sonrası oluşan gözenekli yüzeyin daha ayrıntılı görüldüğü SEM görüntüsünde yüzey morfolojisi ayrıntılı görülmektedir.



**Şekil 5** . B çözeltisi ile işlem görmüş AA7075 numunesine ait bir SEM görüntüsü

Kimyasal aşındırma elektrokimyasal bir olgu olduğundan metallerin dağlanması ile benzer fiziksel davranış sergilemektedir. Özellikle çok fazlı metallerin dağlanmasında olduğu gibi farklı fazlar ve tane sınırları farklı hızlarda aşınır. Bu sebeple yüzeyde bazı bölgelerde gözlenen lineer çözülme artışı bazı bölgelerde görülmez ve zamanla çözünen bölgeler değişir. İstenen yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde etmek için kimyasal aşındırma süresinin yüzey malzemesinin türüne göre nasıl değiştiğini ortaya koyan çalışmalardan biri de Qu ve arkadaşlarının

(2007) metal yüzeyde kimyasal aşındırma ile yüzey pürüzlülüğü oluşturmak amacı ile yaptıkları çalışmadır.

Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen değişim kimyasal işlemin süresine bağlıdır ve çok fazlı metallerin dağlama ve aşırı dağlama mekanizmaları ile açıklanabilir. Bu süreç, aşındırma reaktifinin aktivitesi devam ettiği sürece tekrarlı olarak devam eder ve sonunda asimptotik bant aralığında bir dizi dalgalı pürüzlülük değerleri gözlenir. Bu olgu Kozak ve Zybura-Skrabalak'ın (2016) bir başka çalışmasında matematiksel bir modelle açıklanmıştır. Kimyasal ve elektrokimyasal aşındırma etkisi altında çok fazlı yapıları alaşımların yüzey profillerinin değişimini simüle ettikten sonra, aşındırma işleminin ilk aşamasında yüzey pürüzlülüğünün azaldığını daha sonra tekrar arttığını ve bu sürecin tekrarladığını bildirmişlerdir.

Bu çalışmada da benzer süreç oluşarak kullanılan reaktifler ve çözeltilerin derişimine bağlı olarak malzeme yüzeylerinde seçici çözünme gerçekleşmiştir. Oluşan mikro çukurcuklar aşındırma süresinin artması ile öncelikle derinleşmiş ve genişlemiştir.

### 3.2. İşleme Süresinin İşleme Hızına Etkisi

AA5754 ve AA7075 alaşımlarının A ve B çözeltileri ile aşındırma hızları Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 6'da ise iki alüminyum alaşımı için iki farklı dağlayıcı çözelti ile farklı sürelerde elde edilen kimyasal aşınma hızı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

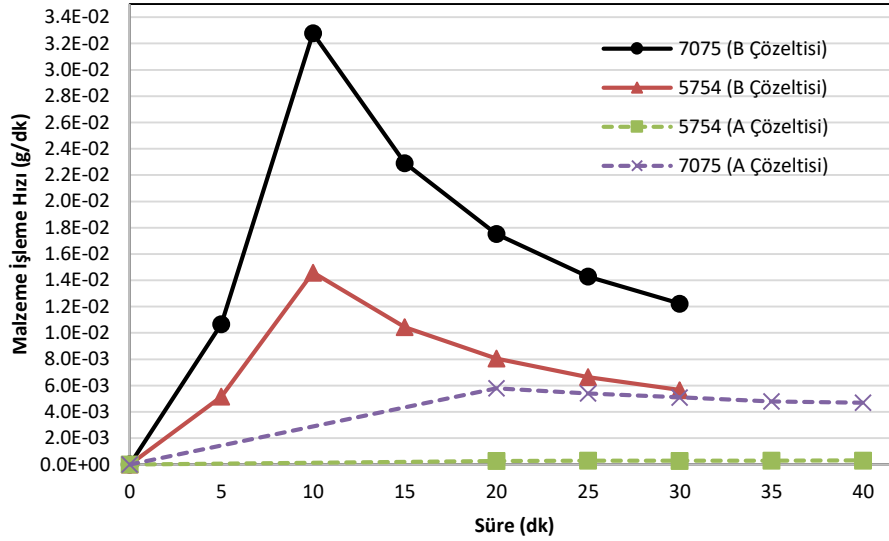
Her iki alaşım için aşındırma hızları reaktif çözelti türüne ve malzemeye bağlı olarak değişmiştir.

A çözeltisi ile yapılan işlemde AA5754 alaşımının kimyasal aşınma hızı  $2 \times 10^{-4}$  g/dk ile  $3 \times 10^{-4}$  g/dk olarak stabil değerler almıştır. AA7075 alaşımının kimyasal aşınma hızı ise ilk 20 dakika da lineer olarak artmış ve  $4-6 \times 10^{-3}$  g/dk aralığında sabit hıza ulaşmıştır. B çözeltisi içinde kimyasal aşınmanın her iki alaşım içinde A çözeltisine oranla daha hızlı olduğu, bir

maksimum değere ulaştıktan sonra düşmeye başladığı ve bir değer aralığında sabitleme eğilimi olduğu gözlenmiştir. AA7075 alaşımı için ilk 10 dakikada maksimum değer olan  $3,3 \times 10^{-2}$  g/dk değerine ulaştıktan sonra düşmeye başlamış ve  $1-2 \times 10^{-2}$  g/dk aralığında kalma eğilimi göstermiştir. AA5754 alaşımı için kimyasal aşınma hızı bu çözeltide de daha düşük olarak gerçekleşmiştir. İlk 10 dk da  $1,5 \times 10^{-2}$  g/dk

değerine çıkıp daha sonra  $5-6 \times 10^{-3}$  g/dk hız aralığında kalma eğilimi göstermiştir.

En yüksek kimyasal aşınma hızı B çözeltisi içerisinde AA7075 numunesinde, en düşük kimyasal aşınma hızı ise A çözeltisi içerisinde AA5754 numunesinde elde edilmiştir.



**Şekil 6.** AA5754 ve AA7075 alaşımlarının A ve B kimyasal çözeltileri içerisindeki zamana bağlı kimyasal aşınma hızı değerleri

#### 4. Sonuçlar

AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımlarından hazırlanan numuneler iki farklı kimyasal çözelti içerisinde farklı sürelerde işleme tabi tutularak yüzey morfolojilerindeki ve yüzey pürüzlülüklerindeki değişim incelenmiş elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

- AA7075 ve AA5754 alaşımlarının aşındırma hızları iki dağılayıcı çözelti (A çözeltisi: HF, HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O) (B çözeltisi: HF, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) için tespit edilmiş ve çalışmada belirlenen oranlar ile alüminyum alaşımlarının kontrollü kimyasal aşındırılmasında kullanılabileceği görülmüştür.

- Hazırlanan çözelti çeşidi çözelti oranları için AA7075 alaşımı yüzeylerinde AA5754 alaşımı yüzeylerine göre daha yüksek kimyasal aşınma hızı gözlenmiştir.

Sonuç olarak, kimyasal aşındırma metodunun alüminyum yüzeylerin aşındırılmasında etkili bir yöntem olduğu gözlenmiştir. Böylece çeşitli yüzey uygulamalarında istenen yüzey pürüzlülük değerlerinin ve yüzey morfolojisinin kontrollü olarak elde edilebileceği söylenebilir. İşleme süreleri ile numuneler üzerinde oluşan yapıların ve gözenek boyutlarının kontrol edilebilir olması da bu çalışmadaki uygulamanın özellikle yüzeyde gözenekli yapı oluşturmak istenen uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir.

### Teşekkür

Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP, Proje Numarası: 2023/178) tarafından desteklenmiştir.

**Çıkar Çatışması:** Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

### ORCID

Tunahan PAMUKÇU, 0009-0008-5660-2066

Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN, 0000-0003-2251-3889

### Kaynaklar

Abbas, F. I., Ahmed, B., Alaa, H. S., (2018). Influence FeCl<sub>3</sub> on Material Removal Rate And Surface Roughness in Chemical Machining Process, Kufa Journal of Engineering, 10 (1), 44-55.

Akpınar, İ. A., (2024). The effect of chemical etching and nanostructure additive epoxy coating technique on adhesion strength in aluminum joints bonded with nanostructure additive adhesive, International Journal of Adhesion and Adhesives, 129.

Anusree, T. G., Puthumana, G., (2014). Analysis of chemical machining for practical applications. BEST: International Journal of Management, Information Technology and Engineering, 2 (3), 77-86.

Barthlott, W, Neinhuis, C., (1997). Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces. *Planta* 202(1),1–8.

Bennet, H.E., Porteus, J.O., (1961). Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence. *Journal of the Optical Society of America* 51,123–129.

Bruzzone, A.A.G., Pantani, A., Ferrando, A., Lonardo, P.M., (2003). Aluminium Joining with Structural Adhesives for Automotive Applications.

Proceedings of 6th AITEM Conference, Gaeta, 15–26.

BTYPK, (2021). İleri Malzeme Teknoloji Yol Haritası, T.C. Cumhurbaşkanlığı Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu.

Burokas, V., Martushene, A., Bikul'Chyus, G., Ruchinskene, A., (2009). Aluminum alloy etching in phosphoric acid solutions. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 82, 1835–1839.

Casalino, G., Mortello, M., Leo, P., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G. (2014). Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy. *Materials & Design*, 61, 191–198.

Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F. W., Squillace, A. (2006). Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(6), 588–594.

Cognard, J., (2006). Some Recent Progress in Adhesion Technology and Science. *Comptes Rendus Chimie*, 9:13–24

Corbett, J., Mckeown, P. A., Peggs G. N., Whatmore, R. (2000). Nanotechnology: International Developments and Emerging Products. *Annals of the CIRP*, 49 (2), 523–545.

Çakır, O., (2019). Etchants for Chemical Machining of Aluminium and Its Alloys. *Acta Physica Polonica A*, 135 (4), 586-587.

Çakır, O., Yardımeden, A., Özben, T., (2007). Chemical machining. *Archives of Materials Science and Engineering*, 28 (8), 499-502.

Çetinkaya, C., Tekeli, S., Kurtuluş, O. (2002). Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Parametrelerin Mekanik Özelliklere ve

- Mikroyapıya Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 5(4), 321-335.
- Danzebrink, H. U., Koenders, L., Wilkening, G., Yacoot, A., Kunzmann, H. (2006). Advances in Scanning Force Microscopy for Dimensional Metrology. *Annals of the CIRP*, 55 (2), 841–878.
- De Chiffre, L., Lonardo, P. M., Trumpold, H., Lucca, D. A., Goch, G., Brown, C. A., Raja, J., Hansen, H. N. (2000). Quantitative Characterisation of Surface Texture. *Annals of the CIRP*, 49 (2), 635–652.
- De Chiffre, L., Kunzmann, H., Peggs, G. N., Lucca, D. A. (2003). Surfaces in Precision Engineering Microengineering and Nanotechnology. *Annals of the CIRP*, 52 (2), 561–577.
- Dong, C., Gu, Y., Zhong, M., Li, L., Sezer, K., Ma, M., Liu, W. (2011). Fabrication of superhydrophobic Cu surfaces with tunable regular micro and random nano-scale structures by hybrid laser texture and chemical etching. *Applied Surface Science*, 211, 1234-1240.
- Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., Engel, U. (2001). Microforming. *Annals of the CIRP*, 50 (2), 445–462.
- Greenwood, J.A., Williamson, J.P.B., (1966), Contact of Nominally Flat Surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 295,300–319.
- Hamed, J. A. (2017). Effect of welding heat input and post-weld aging time on microstructure and mechanical properties in dissimilar friction stir welded AA7075–AA5086. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(8), 1707–1715.
- Kasman, Ş, Yenier, Z. (2014). Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075. *Int Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 145–156.
- Kozak, J., Zybura-Skrabalak, M., (2016), Some problems of surface roughness in electrochemical machining (ECM), *Procedia CIRP*, 42, 101–106.
- Lipowsky, R., Lenz, P., Swain, P.S., (2000). Wetting and Dewetting of Structured and Imprinted Surfaces. *Colloids and Surfaces A*, 161, 3–22.
- Lonardo, P.M., Bruzzone, A.A.G., (1989). Influence of Surface Roughness Parameters on the Mechanical Strength in Metal Gluing. *Annals of the CIRP*, 38 (1), 571–574.
- Onda, T., Shibuichi, S., Satoh, N., Tsujii, K. (1996). Super-water-repellent fractal surfaces. *Langmuir*, 12(9), 2125-2127.
- Qu, M., Zhang, B., Song, S., Chen, L., Zhang J., Cao X., (2007). Fabrication of superhydrophobic surfaces on engineering materials by a solution-immersion process, *Advanced Functional Materials*. 17, 593–596.
- Sarkar, D. K., Farzaneh, M., Paynter, R. W., (2008). Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces. *Materials Letters*. 62, 1226–1229.
- TALSAD, (2023). Dünya ve Türkiye’de Alüminyum 2023 Yılı Raporu, Alüminyum Sektörü Raporu, Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği.
- Taşkın, N. U., Ordu, F., (2021). Effect of etching duration on roughness and wettability of different carbon steel substrates. *Materials Chemistry and Physics*. 257.
- Wu, R., Liang, S., Pan, A., Yuan, Z., Tang, Y., Tan, X., Guan, D., Yu, Y., (2012). Fabrication of nano-structured super-hydrophobic film on aluminum by controllable immersing method. *Applied Surface Science*. 258, 5933–5937.



Yahata, N., (1987). Effect of Lapping on the Fatigue-Strength of a Hardened 13Cr-0.34C Stainless Steel. *Wear*, 115 (3), 337-348.

Yahata, N., Inukai, T., Hayama, F., (1982). Effect of Surface Working on the Fatigue-Strength and Wear of a Hardened 13%Cr Stainless Steel. *Wear* 80(1), 89-100.

Yang, C., Tartaglino, U., Persson, B. N. J. (2006). Influence of Surface Roughness on Superhydrophobicity. *PRL* 97, 116103.



## Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişin Statik Eğilme ve Serbest Titreşim Analizi

Caner SOLAR<sup>1\*</sup>, Vedat TAŞKIN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, TÜRKİYE

**Makale Künye Bilgisi:** Solar, C., Taşkın, V. (2024). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişin Statik Eğilme ve Serbest Titreşim Analizi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 25(2), 77-90.

### Öne Çıkanlar

- FD gözenekli kirişlerde tabaka dizilimleri, uzunluk/kalınlık oranı statik eğilme ve doğal frekans değerlerini etkilemektedir.
- FD gözenekli sandviç kirişlerde gözeneklilik tipi ve gözeneklilik katsayısı statik eğilme ve doğal frekans değerlerini etkilemektedir.
- FD gözenekli kirişlerde kuvvet kanunu üstelindeki artış ile doğal frekans değerlerinde azalış meydana gelmektedir.

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 7 Haziran 2024 Kabul: 22 Ekim 2024	Bu çalışmada, basit destekli fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişin statik eğilme ve titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Sandviç kirişin yüzeyleri, fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeden, özü ise homojen bir malzemeden yapılmıştır. Çalışmada iki farklı gözenekli malzeme türü kullanılmıştır. Gözenekli malzeme türleri homojen ve simetrik özelliktedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli öz ve yüzey tabakalarının malzeme özelliklerinin, kuvvet kanunu dağılımına bağlı olarak kalınlık boyunca değiştiği varsayılmıştır. Kirişin hareket denklemleri, Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Gözenekli sandviç kiriş için iki farklı tipte karışım kuralı uygulanmıştır. Navier yöntemi kullanılarak kapalı form çözümü elde edilmiştir. Gözeneklilik katsayısı, kalınlığın uzunluğa oranı, öz ve yüzey tabakalarının kalınlık oranları, hacimsel değişim üsteli değiştirilerek sayısal sonuçlar elde edilmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Fonksiyonel Derecelendirilmiş; Sandviç; Gözenekli Kiriş; Titreşim.	

### Static Bending and Free Vibration Analysis of Functionally Graded Porous Sandwich Beam

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: June 7, 2024 Accepted: October 22, 2024	In this study, the static bending and vibration analysis of a simply supported functionally graded porous sandwich beam was performed. The surfaces of the sandwich beam are made of functionally graded porous material, while the core is made of homogeneous material. Two different types of porous materials were used in the study. The types of porous materials are homogeneous and symmetric. It is assumed that the material properties of the functionally graded porous core and surface layers vary through the thickness according to a power-law distribution. The equations of motion of the beam were derived using Hamilton's Principle. Two different types of mixture rules were applied for the porous sandwich beam. A closed-form solution was obtained using the Navier method. Numerical results are obtained by varying the porosity coefficient, the ratio of thickness to length, the thickness ratios of the core and surface layers, and the power law index.
<b>Keywords:</b> Functionally Graded; Sandwich; Porous Beam; Vibration.	

## 1. Giriş

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), kompozit yapıdaki malzemelerdir ve belirli bir doğrultuda malzeme bileşiminin veya yapısının sürekli olarak değiştiği malzemelerdir. Bu tür malzemeler, genellikle iki veya daha fazla farklı malzemenin özelliklerini bir araya getirerek, her iki malzemenin de avantajlarını sunmayı amaçlar. FDM'ler, termal bariyerler, yapısal bileşenler ve yüksek performanslı uygulamalarda kullanılır.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanlarında sıkça kullanılan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler genellikle metal-seramik karışımlarından oluşur. Bu malzemeler, metallerin dayanıklılığını artırmak amacıyla seramik kaplama ile korunur ve malzeme hatalarını azaltmak için derecelendirilirler (Aşık, 2021).

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), sürekli ve süreksiz olmak üzere iki kategoride sınıflandırılır. Sürekli FDM, homojen bir yapıya sahiptir ve belirli bir özellik veya işlev için kesintisiz bir değişim sağlar. Örneğin, termal veya elektriksel iletkenlik gibi özelliklerde sürekli gradyanlar bulunabilir ve karmaşık yapılar için tercih edilir. Süreksiz FDM ise, belirli bölgelerde veya noktalarda özelliklerin farklılaşmasına dayanır. Örneğin, belirli bir bölgenin termal olarak yalıtılması gibi. En basit FDM'lerde, malzeme bileşenleri kademeli bir geçişle değişirken, diğer türde ise basamaklı bir derecelendirme gösterirler (Alwan, 2017).

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Yapılar (FDSY), yüzey tabakaları ve öz tabakadan oluşur. Öz tabaka sertlik sağlarken, dış tabaka koruyucu ve dayanıklıdır. Ara yüzey tabakaları ise yapıya bütünlük kazandırır. (Al-Itbi, 2023)

Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeler (FDGM), içerdikleri gözeneklerin boyutu, şekli, dağılımı ve yoğunluğunun belirli bir yönde değiştiği

malzemelerdir. Öz tabaka hafif ve düşük yoğunluktadır, yüzey tabakalar ise dayanıklıdır. Yüzey tabakaları yapıya bütünlük sağlar. (Chopan, 2023)

### 1.1. Literatür Özeti

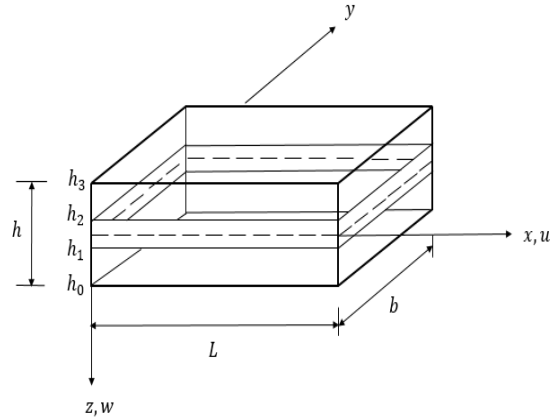
Literatürde, FD gözenekli ve gözeneksiz sandviç kirişlere ait birçok çalışma mevcuttur. Alwan (2017), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden oluşan kirişin, dört farklı teori kullanarak serbest titreşimini incelemiştir. Al-Itbi (2023), düzgün yayılı yüke maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin statik davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Chopan (2023), elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışını teorik olarak fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemedeki yapılmış sandviç kirişlerin üzerinde incelemiştir. Özmen (2021), fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin statik ve dinamik analizlerini deneysel, hesaplamalı ve analitik yöntemler ile incelemiştir. Aşık (2021), yaptığı çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FDM) oluşan sandviç kirişin serbest titreşim analizini incelemiştir. Demirhan (2016), fonksiyonel derecelendirilmiş öz veya yüzey tabakalarından oluşan sandviç kiriş ve plaklar için titreşim ve eğilme analizini dört değişkenli kayma deformasyon teorisi kullanarak yapmıştır. Filiz (2010), eksenel derecelendirilmiş çubuk ve kirişleri sürekli veya parçalı sürekli formda ele alarak serbest titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Altınöz (2016), çalışmasında fonksiyonel derecelendirilmiş kirişi ele alarak Timoshenko kiriş teorisini kullanmıştır. Demirhan ve Taşkın (2017), çalışmasında dört değişkenli plaka teorisine dayalı olarak iki karşılıklı basit mesnetli kenara sahip gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) plakanın serbest titreşim ve eğilme özelliklerini araştırmıştır. Aydogdu ve Taskin (2007), basit destekli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin serbest titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Demirhan ve Taşkın (2020), çalışmasında fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin

serbest titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Njim vd. (2021), gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen sandviç plakaların doğal frekanslarını değerlendirmek için serbest titreşim analizinin yeni yaklaşık analitik çözümünü ele almıştır. Benferhat vd. (2021), çalışmasında basit destekli fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç plakaların dinamik analizi üzerindeki gözeneklilik etkisini, enine kayma deformasyon etkilerini hesaba katan yeni geliştirilmiş bir kayma deformasyon teorisini kullanarak incelemiştir. Hadji ve Avcar (2021), çalışmasında fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli yüzey tabakalarına ve izotropik homojen öze sahip kare sandviç plakanın serbest titreşim analizini farklı sınır şartları altında gerçekleştirmiştir. Slimane vd. (2021), çalışmasında dört değişkenli yüksek dereceli kayma deformasyon teorisi kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç plakaların statik eğilme analizi için analitik çözümler sunmuştur. Kareem ve Noori (2022), çalışmasında fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerde gözeneklilik yapısının doğal frekanslar üzerindeki etkisini incelemiştir. Karakoti ve ark. (2022), çalışmasında gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FGM) yapılmış sandviç plaka ve kabuk panellerin, patlama yükü ve termal etkiler altındaki doğrusal olmayan geçici davranışını incelemek için bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Adhikari ve ark. (2020), çalışmasında gözeneklilik kusurlarının çeşitli FGM sandviç plakalarının burkulma özelliklerine etkisini modellemiş ve analiz etmiştir. Fu ve ark. (2018), gözenekli malzeme ile doldurulmuş oluklu çekirdekli FGM sandviç plakaların ses iletim kaybını analiz etmeyi amaçlamıştır. Farklı FGM yapıları kullanarak ses dalgası yayılımını incelemiş ve teorik model, önceki sayısal sonuçlarla karşılaştırarak doğrulamıştır. Nguyen ve ark. (2024), çok yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış gözenekli sandviç plakaların doğrusal olmayan serbest titreşim

davranışını incelemiştir. Dış tabakaları üç yönlü ve çekirdek tabakası iki yönlü FGM'den oluşan bu yapıların, malzeme gradyan indeksleri ve gözeneklilik dağılımının titreşim frekansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Amir ve ark. (2023), çalışmada kesikli soğutma plakalarının doğal frekans analizi üzerine bir inceleme yaparak, kesiklerin işlevsel derecelendirilmiş gözenekli plakaların titreşim davranışını nasıl etkilediğini araştırmıştır.

## 2. Temel Bilgiler ve Denklemler

Fonksiyonel derecelendirilmiş yüzeylere sahip ve özü izotropik olan kirişin boyutları;  $L$ , uzunluğu,  $h$ , kalınlığı;  $b$ , genişliği;  $h_0, h_1, h_2, h_3$ ,  $z$  eksen doğrultusunda tabaka uzunluklarını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Şekil 1'de fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişin koordinat takımı ve geometrisi verilmiştir.



Şekil 1. FD kirişin koordinat takımı ve geometrisi

Etkin malzeme özellikleri Denklem 1 ile tanımlanmıştır.

$$P(z) = P_m V_m + P_s V_s \quad (1)$$

Burada  $P_m$  ve  $P_s$  sırasıyla metal ve seramik malzemenin etkin özelliklerini,  $V_m$  ve  $V_s$  sırasıyla metal ve seramik malzemenin hacim oran fonksiyonunu temsil etmektedir. Çalışmada Tip1 ve Tip2 olmak üzere 2 farklı gözenek tipi tanımlanmıştır. Tip1 için etkin

malzeme özellikleri Denklem 2 ile, Tip2 için etkin malzeme özellikleri Denklem 3 ile tanımlanmıştır.

$$P(z) = P_m + (P_s - P_m)V_s(z) - \frac{e}{2}(P_s - P_m) \quad (2)$$

$$P(z) = P_m + (P_s - P_m)V_s(z) - \frac{e}{2}(P_s - P_m) \left[ 1 - \left( 2 \frac{|z|}{h} \right) \right] \quad (3)$$

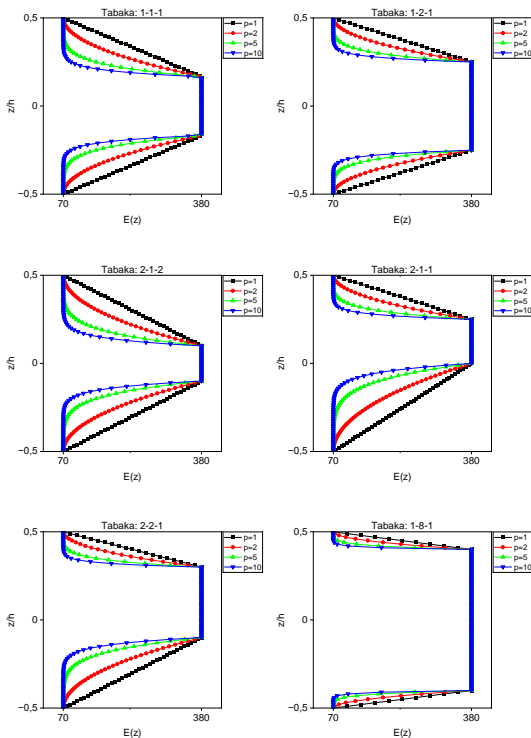
Kirişin yüzeyleri fonksiyonel derecelendirilmiş olup izotropik öze sahiptir. Gözenekli sandviç kirişin seramik hacim oran fonksiyonu,  $V_s^{(i)}$ ,  $z$ 'ye bağlı olmak üzere Denklem 4 ile tanımlanmıştır.

$$V_s^{(1)}(z) = \left( \frac{z-h_0}{h_1-h_0} \right)^p, \quad h_0 \leq z \leq h_1, \quad (\text{FD alt yüzey})$$

$$V_s^{(2)}(z) = 1 \quad h_1 < z < h_2, \quad (\text{Seramik öz})$$

$$V_s^{(3)}(z) = \left( \frac{z-h_3}{h_2-h_3} \right)^p, \quad h_2 \leq z \leq h_3, \quad (\text{FD üst yüzey}) \quad (4)$$

Şekil 2'de 6 farklı tabaka için  $E(z)$ 'nin  $z/h$  oranlarıyla farklı  $p$  üstellerindeki değişimleri verilmiştir.



Şekil 2. Kuvvet kanunu üstellerine bağlı olarak  $E(z)$  değişimi

## 2.1. Teorik Formülasyondaki Varsayımlar

FD gözenekli sandviç kirişin teorik formülasyonu aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır.

- Eksenel yer değiştirme ve uzama bileşeni, eğilme bileşeni ve kesme bileşeninden oluşur.
- Mevcut teori eksenel yer değiştirmenin hiperbolik bir dağılımını hesaba katarken enine yer değiştirme kalınlık boyunca sabittir.
- Enine normal deformasyonların etkileri ( $\epsilon_z = 0$ ) ihmal edilir.
- Kirişin kesitindeki hiçbir noktada  $y$  yönünde bağıl hareket olmadığından; gerilmeleri elde etmek için tek eksenli Hooke kanunu kullanılır.
- Teori, kiriş kalınlığı boyunca enine kesme gerilmesinin hiperbolik kosinüs dağılımını verir.

## 3. Hiperbolik Kayma Deformasyon Teorisi

Yapılan çalışmada kullanılan hiperbolik kayma deformasyon kiriş teorisinin yer değiştirme alanı Denklem 5 ile tanımlanmıştır.

$$u(x, z) = u_0(x) - \frac{zdw_0}{dx} + f\phi(x)$$

$$w(x) = w_0(x) \quad (5)$$

Denklem 5'te ifade edilen  $u_0, w_0$  sırasıyla, kirişin tarafsız eksenü üzerindeki bir noktanın  $x$  ve  $z$  yönündeki yer değiştirmeleridir. Şekil fonksiyonu  $f$ , kirişin kalınlığı boyunca enine kayma gerilmesi dağılımına göre  $z$ 'nin bir fonksiyonu olarak varsayılmıştır, yani kirişin üst ve alt yüzeylerinde sıfırdır.

Hiperbolik kayma deformasyon kiriş teorisinde kirişin herhangi bir noktasındaki yalnızca sıfır olmayan normal ve kayma gerilmeleri,  $\epsilon_x^0, k_x^b, k_x^s, \gamma_{xz}^0$ 'nin bilinmeyen yer değiştirme değişkenleriyle Denklem 6 ve 7'deki gibi ilişkilendirildiği noktalarda meydana gelir:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_x^0 + zk_x^b + fk_x^s \\ \gamma_{zx} &= g\gamma_{zx}^0\end{aligned}\quad (6)$$

$$\varepsilon_x^0 = \frac{du_0}{dx}, k_x^b = -\frac{d^2w_0}{dx^2}, k_x^s = \frac{d\phi}{dx}, \gamma_{zx}^0 = 0 \quad (7)$$

Şekil fonksiyonu  $f$  ve  $g$  fonksiyonu Denklem 8’de tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}f &= [z \cosh(1/2) - h \sin(z/h)] \\ g &= f' = [\cosh(1/2) - \cos(z/h)]\end{aligned}\quad (8)$$

Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kiriş, alüminyum (Al) ve alümina ( $A_2O_3$ ) malzemelerinden oluşmaktadır. Malzemenin özellikleri Denklem 9’da verilen kuvvet kanunu dağılımına göre kalınlık yönünde sürekli olarak değişmektedir. Kirişin  $k$  katmanındaki herhangi bir noktadaki gerilme-gerinim ilişkisi, tek eskenli Hooke kanunu ile Denklem 9’da ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}\sigma_x^k &= E^k(z)\varepsilon_x^k \\ \tau_{xz}^k &= G^k(z)\gamma_{zx}^k \\ G^k(z) &= \frac{E^k(z)}{2(1+\nu)}\end{aligned}\quad (9)$$

### 3.1. Hareket Denklemleri

FD gözenekli sandviç kiriş için hiperbolik kayma deformasyon teorisinin hareket denklemleri Hamilton prensibi ile türetilmiştir.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta V + \delta K) dt = 0 \quad (10)$$

Denklem 10’da  $\delta U, \delta V, \delta K$  ifadeleri sırasıyla toplam gerinim enerjisindeki, potansiyel enerjideki ve kinetik enerjideki değişimleri gösterir;  $t_1$  ve  $t_2$  sırasıyla başlangıç ve son zamandır.

Gerinim enerjisinin değişimi ( $\delta U$ ) Denklem 11 ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}\delta U &= \int_0^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x^k \delta \varepsilon_x + \tau_{xz}^k \delta \gamma_{zx}) dz dy dx = \\ &\int_0^L \left( N_x \frac{d\delta u_0}{dx} - M^c \frac{d^2\delta u_0}{dx^2} + M^s \frac{d\delta \phi}{dx} + Q\delta \phi \right) dx\end{aligned}\quad (11)$$

Denklem 11’de  $N_x$  ortaya çıkan aksenal kuvveti,  $M^b$  ve  $M^s$  ortaya çıkan eğilme momentinin eğilme ve kayma bileşenlerini,  $Q$  kesme kuvvetini temsil eder.

Denklem 12’de kirişin özelliklerini ve geometrisini temsil eden matrisler verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ M^b \\ M^s \\ Q \end{Bmatrix} = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x^k \\ \sigma_x^k z \\ \sigma_x^k f \\ \tau_{xz}^k f' \end{Bmatrix} dz = \begin{bmatrix} A & B & C & 0 \\ B & D & E & 0 \\ C & E & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ k_x^b \\ k_x^s \\ \gamma_{zx}^0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Denklem 13’te A, B, C, D, E, F ve H matrisleri tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}(A, B, C, D, E, F) &= b \int_{-h/2}^{h/2} E^k(z)(1, z, f, z^2, fz, f^2) dz \\ H &= b \int_{-h/2}^{h/2} G^k(z)g^2 dz\end{aligned}\quad (13)$$

Potansiyel enerjinin değişimi ( $\delta V$ ), yük  $q$  ve ekseneki yük  $N_0$  nedeniyle Denklem 14’teki gibi ifade edilmiştir.

$$\delta V = \int_0^L \left( q\delta w + N_0 \frac{dw}{dx} \frac{d\delta w}{dx} \right) dx \quad (14)$$

Kinetik enerjinin değişimi ( $\delta K$ ) ise Denklem 15 ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}\delta K &= \int_0^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho(z) \left( \frac{d^2u}{dt^2} \delta u + \frac{d^2w}{dt^2} \delta w \right) dz dy dx = \\ &\int_0^L \left( I_A \frac{d^2u_0}{dt^2} - I_B \frac{d^3w_0}{dx dt^2} + I_C \frac{d^2\phi}{dt^2} \right) \delta u_0 dx + \\ &\int_0^L \left( -I_B \frac{d^2u_0}{dt^2} + I_D \frac{d^3w_0}{dx dt^2} - I_E \frac{d^2\phi}{dt^2} \right) \frac{d\delta w_0}{dx} dx + \\ &\int_0^L \left( I_C \frac{d^2u_0}{dt^2} - I_E \frac{d^2w_0}{dx dt^2} + I_F \frac{d^2\phi}{dt^2} \right) \delta \phi dx + \int_0^L I_A \frac{d^2w_0}{dt^2} \delta w_0 dx\end{aligned}\quad (15)$$

Denklem 15’te verilen  $\rho(z)$ , her katmanın kütle yoğunluğunu ifade eder. Atalet moment katsayıları  $I_A, I_B, I_C, I_D, I_E, I_F$  ise Denklem 16 ile tanımlanmıştır.

$$(I_A, I_B, I_C, I_D, I_E, I_F) = b \int_{-h/2}^{h/2} \rho^k(z)(1, z, f, z^2, fz, f^2) dz \quad (16)$$

Hareket denklemleri, Denklem 10’un kısmi integrali alınarak,  $\delta u_0, \delta w_0$  ve  $\delta \phi_0$  katsayıları toplanarak ve sıfıra eşitlenerek elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{dN_x}{dx} &= I_A \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_B \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_C \frac{d^2 \phi}{dt^2} \\ \frac{d^2 M^b}{dx^2} &= -q + N_0 \frac{d^2 w_0}{dx^2} + I_B \frac{d^3 u_0}{dx dt^2} - I_D \frac{d^4 w_0}{dx^2 dt^2} + I_A \frac{d^2 w_0}{dt^2} + I_E \frac{d^3 \phi}{dx dt^2} \\ \frac{dM^s}{dx} - Q &= I_C \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_E \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_F \frac{d^2 \phi}{dt^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Denklem 12 elde edilen  $(N_x, M^b, M^s, Q)$  gerilme sonuçlarını Denklem 17'de yerine koyarak, bilinmeyen yer değiştirme değişkenleri  $(u_0, w_0, \phi_0)$  cinsinden hareket denklemleri Denklem 18'teki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} A \frac{d^2 u_0}{dx^2} - B \frac{d^3 w_0}{dx^3} + C \frac{d^2 \phi}{dx^2} &= I_A \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_B \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_C \frac{d^2 \phi}{dt^2} \\ B \frac{d^3 u_0}{dx^3} - D \frac{d^4 w_0}{dx^4} + E \frac{d^3 \phi}{dx^3} &= -q + N_0 \frac{d^2 w_0}{dx^2} + I_B \frac{d^3 u_0}{dx dt^2} - I_D \frac{d^4 w_0}{dx^2 dt^2} + I_A \frac{d^2 w_0}{dt^2} \\ &\quad + I_E \frac{d^3 \phi}{dx dt^2} \\ C \frac{d^2 u_0}{dx^2} - E \frac{d^3 w_0}{dx^3} + F \frac{d^2 \phi}{dx^2} - H \phi &= I_C \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_E \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_F \frac{d^2 \phi}{dt^2} \end{aligned} \quad (18)$$

#### 4. Navier Çözüm Yöntemi

Basit destekli fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişin eğilme ve serbest titreşim analizleri için hareket denkleminin çözümü Navier metodu ile elde edilmiştir. Basit destekli kirişin sınır koşulları Denklem 19'da verilmiştir.

$$w_0 = N_x = M^c = M' = 0, \quad x = 0 \text{ ve } x = L \quad (19)$$

Kenarların, eğilme ve titreşim analizleri için hareket edebilir basit destekli olduğu varsayılmıştır. Çözümün Denklem 20'deki formda olduğu varsayılmıştır:

$$\begin{aligned} u_0(x, t) &= \sum_{m=1,3,5}^{\infty} u_m \cos(\alpha x) e^{iat}, \\ w_0(x, t) &= \sum_{m=1,3,5}^{\infty} w_m \sin(\alpha x) e^{iat}, \\ \phi(x, t) &= \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \phi_m \cos(\alpha x) e^{iat} \end{aligned} \quad (20)$$

Denklem 20'de,  $i = \sqrt{-1}$  hayali birimi,  $\omega$  doğal frekansı,  $\alpha = m\pi/L$  ve  $(u_m, w_m, \phi_m)$  belirlenecek olan bilinmeyen katsayıları temsil etmektedir. Kirişin üst yüzeyinde etkili olan düzgün yayılı yük  $(q)$ , Denklem 21'de olduğu gibi varsayılmıştır:

$$q(x) = \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{4q_0}{m\pi} \sin(\alpha x) \quad (21)$$

Denklem 21'te,  $q_0$ , uzunluğun merkezindeki yükün en büyük değerini temsil etmektedir. Kiriş, aksel basma kuvveti  $N_0$ 'a maruz kalmaktadır. Denklem 20 ve Denklem 21'i, Denklem 19'da yerine koyarak, analitik çözüm Denklem 22-23'ten elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} A\alpha^2 & -B\alpha^3 & C\alpha^2 \\ -B\alpha^3 & D\alpha^4 & -E\alpha^3 \\ C\alpha^2 & -E\alpha^3 & F\alpha^2 + H \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} u_m \\ w_m \\ \phi_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{4q_0}{m\pi} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} A\alpha^2 & -B\alpha^3 & C\alpha^2 \\ -B\alpha^3 & D\alpha^4 & -E\alpha^3 \\ C\alpha^2 & -E\alpha^3 & F\alpha^2 + H \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} I_A & -I_B\alpha & I_C \\ -I_B\alpha & (I_D\alpha^2 + I_A) & -I_E\alpha \\ I_C & -I_E\alpha & I_F \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} u_m \\ w_m \\ \phi_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

FD gözenekli sandviç kirişin yer değiştirmeleri ve gerilmeleri Denklem 22'nin çözümü ile, doğal frekansların çözümü ise Denklem 23'ün çözümü ile elde edilmiştir.

#### 5. Sonuçlar ve Tartışmalar

Çalışmanın bu bölümünde hiperbolik kayma deformasyon teorisi ile basit destekli fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin statik eğilme ve serbest titreşim analizlerinin sonuçları sunulmuş ve literatür ile karşılaştırılmıştır. Sandviç kirişlerin dış tabakaları fonksiyonel derecelendirilmiş alümina ( $Al/Al_2O_3$ ) malzemesinden yapılırken, özü ise homojen izotropik alüminyum ( $Al$ ) malzemesinden yapılmıştır. Kirişin uzunluğu,  $L = 1 \text{ m}$  alınırken, kirişin kalınlığı en/boy oranına göre değiştiği kabul edilmiştir. Alümina ( $Al_2O_3$ ) ve alüminyum ( $Al$ ) malzemelerinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Alümina ( $Al_2O_3$ ) ve alüminyum ( $Al$ ) malzemelerinin özellikleri

Malzeme Çeşidi	$E$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$
Alümina ( $Al_2O_3$ )	380	3960	0.3
Alüminyum ( $Al$ )	70	2702	0.3

Tabakalar ve tabakalara ait kalınlık değerleri Tablo 2'de verilmiştir.



**Tablo 2.** Tabakalar ve tabakalara ait kalınlık değerleri

Tabaka çeşitleri	$h_0$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
1-1-1	-h/2	-h/6	h/6	h/2
1-2-1	-h/2	-h/4	h/4	h/2
2-1-2	-h/2	-h/10	h/10	h/2
2-1-1	-h/2	0	h/4	h/2
2-2-1	-h/2	-h/10	3h/10	h/2
1-8-1	-h/2	-2h/5	2h/5	h/2

Analiz sonucu bulunan sayısal sonuçlar aşağıdaki boyutsuz ifadeler ile elde edilmiştir. Boyutsuz ifadelerdeki tanımlamalar şu şekildedir;

- Boyutsuz Enine Yer Değiştirme

$$\bar{u} = \frac{u100E_m h^3}{q_0 L}$$

- Boyutsuz Düşey Yer Değiştirme

$$\bar{w} = \frac{w100E_m h^3}{q_0 L}$$

- Boyutsuz Eksenel Gerilme

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x h}{q_0 L}$$

- Boyutsuz Kayma Gerilmesi

$$\bar{\tau}_{xz} = \frac{\tau_{xz} h}{q_0 L}$$

- Boyutsuz Doğal Frekans

$$\bar{\omega} = \frac{\omega L^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}}$$

### 5.1. Statik Eğilme Analizi

Bu çalışmada altı farklı tabaka çeşidi kullanılarak (1-1-1, 1-2-1, 2-1-2, 2-2-1, 2-1-1, 1-8-1) gözenekli sandviç kirişin statik eğilme analizi yapılmıştır. İki farklı gözeneklilik çeşidi için boyutsuz düşey yer değiştirmeler Tablo 3-4'te verilmiştir. Tablo 3-4 incelendiğinde, 6 farklı tabaka çeşidi için L/h oranıyla düşey yer değiştirme değerleri değişmektedir. Seramik fazın en yüksek ve en düşük hacim oranına sahip olmalarından dolayı en küçük yer değiştirme tabaka 1-8-1'de ve en büyük yer değiştirme tabaka 2-1-2'de meydana gelmektedir. Gözeneklilik katsayısının (e)

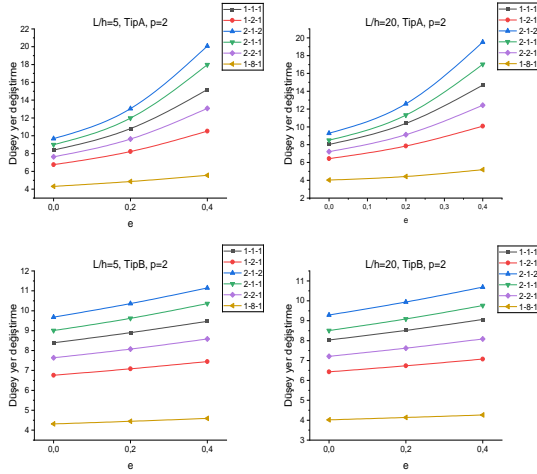
artışı ile düşey yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 3'te TipA ve TipB gözeneklilik tipleri için L/h=5 ve L/h=20 oranlarındaki gözeneklilik kat sayısının (e) artışı ile değişen düşey yer değiştirme değerleri 6 farklı tabaka için verilmiştir.

**Tablo 3.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin boyutsuz düşey yer değiştirme değerleri (TipA, p=2)

e	L/h = 5					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
<b>0</b>	8.3895	6.7578	9.6784	9.0037	7.6346	4.3118
<b>0.2</b>	10.7955	8.2235	13.0408	11.9871	9.6287	4.8543
<b>0.4</b>	15.1827	10.5158	20.0849	17.9828	13.0799	5.5539
e	L/h = 20					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
<b>0</b>	8.0313	6.4276	9.2864	8.5068	7.2122	4.0172
<b>0.2</b>	10.3856	7.8513	12.5861	11.3200	9.1177	4.4299
<b>0.4</b>	14.6955	10.0861	19.5294	17.0259	12.4306	5.1928

**Tablo 4.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin boyutsuz düşey yer değiştirme değerleri (TipB, p=2)

e	L/h = 5					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
<b>0</b>	8.3895	6.7578	9.6784	9.0037	7.6346	4.3118
<b>0.2</b>	8.8972	7.0845	10.3601	9.6187	8.0747	4.4463
<b>0.4</b>	9.4704	7.4445	11.1451	10.3635	8.5856	4.5901
e	L/h = 20					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
<b>0</b>	8.0313	6.4276	9.2864	8.5068	7.2122	4.0172
<b>0.2</b>	8.5146	6.7335	9.9387	9.0892	7.6205	4.1348
<b>0.4</b>	9.0597	7.0701	10.6895	9.7645	8.0810	4.2596



Şekil 3. Boyutsuz düşey yer değiştirme değerlerinin gözeneklilik katsayısı ile değişimi

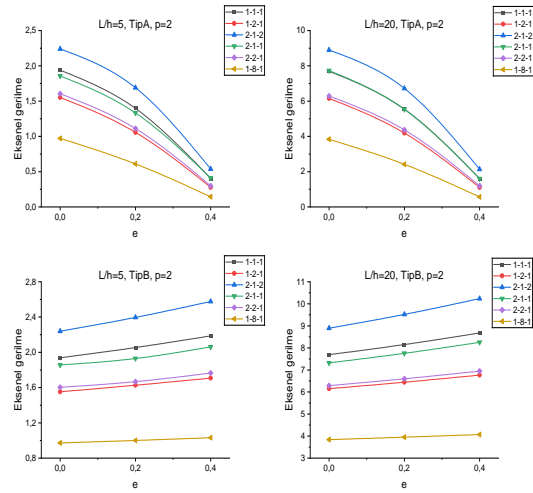
İki farklı gözeneklilik çesidi için  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranlarında gözeneklilik katsayısının ( $e$ ) artışı ile değişen aksel gerilme değerleri Tablo 5-6'da verilmiştir. Tablo 5-6 incelendiğinde her tabaka çesidi için aksel gerilme değerlerinin farklılık gösterdiği görülmektedir.  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranlarında en büyük aksel gerilme değeri tabaka 2-1-2'de iken, en düşük gerilme değeri tabaka 1-8-1'de meydana gelmektedir. Gözeneklilik katsayısının ( $e$ ) artışı ile aksel gerilme değerleri TipA gözeneklilik çesidinde azalmakta iken TipB için artmaktadır. Şekil 4'te TipA ve TipB gözeneklilik tipleri için  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranlarında gözeneklilik katsayısının ( $e$ ) artışı ile değişen aksel gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin boyutsuz aksel gerilme değerleri (TipA,  $p=2$ )

e	L/h = 5					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	1.9380	1.5520	2.2390	1.8570	1.6041	0.9720
0.2	1.3960	1.0560	1.6900	1.3320	1.1110	0.6100
0.4	0.4050	0.2780	0.5380	0.4100	0.2999	0.1440
e	L/h = 20					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	7.6910	6.1530	8.8940	7.3200	6.2865	3.8400
0.2	5.5420	4.1880	6.7180	5.5331	4.3693	2.4130
0.4	1.6090	1.1040	2.1390	1.6040	1.2003	0.5670

Tablo 6. Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişteki boyutsuz aksel gerilme değerleri (TipB,  $p=2$ )

e	L/h = 5					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	1.9380	1.5520	2.2390	1.8570	1.6041	0.9720
0.2	2.0540	1.6260	2.3960	1.9300	1.6673	1.0000
0.4	2.1860	1.7080	2.5770	2.0620	1.7649	1.0310
e	L/h = 20					
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	7.6910	6.1530	8.8940	7.3200	6.2865	3.8400
0.2	8.1530	6.4450	9.5180	7.7560	6.5999	3.9520
0.4	8.6750	6.7670	10.2370	8.2500	6.9475	4.0710



Şekil 4. Boyutsuz aksel gerilmesi değerlerinin gözeneklilik katsayısı ile değişimi

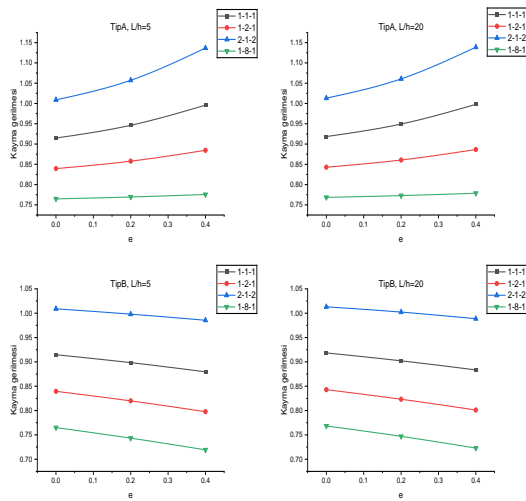
İki farklı gözeneklilik çesidi için 4 farklı tabaka tipinde  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranlarında gözeneklilik katsayısının ( $e$ ) artışı ile değişen kayma gerilmesi değerleri Tablo 7-8'de verilmiştir. Tablo 7-8 incelendiğinde, gözeneklilik kat sayısının ( $e$ ) artışı ile TipA gözeneklilik çesidi için kayma gerilmesi değerleri artmakta iken, TipB gözeneklilik çesidi için azalmaktadır. Farklı tabaka çesitlerinde  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranları için kayma gerilmesi değerlerinin değiştiği görülmektedir. Şekil 5'de TipA ve TipB gözeneklilik çesitleri için  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranlarında gözeneklilik katsayısının ( $e$ ) artışı ile değişen kayma gerilmesi değerleri verilmiştir.

**Tablo 7.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin boyutsuz kayma gerilmesi değerleri (TipA, p=2)

e	L/h = 5			
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	1-8-1
0	0.9147	0.8395	1.0090	0.7647
0.2	0.9463	0.8578	1.0573	0.7695
0.4	0.9960	0.8846	1.1368	0.7756
e	L/h = 20			
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	1-8-1
0	0.9184	0.8429	1.0131	0.7684
0.2	0.9493	0.8606	1.0607	0.7729
0.4	0.9978	0.8865	1.1388	0.7786

**Tablo 8.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin boyutsuz kayma gerilmesi değerleri (TipB, p=2)

e	L/h = 5			
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	1-8-1
0	0.9147	0.8395	1.0090	0.7650
0.2	0.8984	0.8199	0.9981	0.7433
0.4	0.8797	0.7977	0.9855	0.7193
e	L/h = 20			
	1-1-1	1-2-1	2-1-2	1-8-1
0	0.9184	0.8429	1.0131	0.7684
0.2	0.9022	0.8233	1.0023	0.7470
0.4	0.8835	0.8011	0.9887	0.7229



**Şekil 5.** Boyutsuz kayma gerilmesi değerlerinin e gözeneklilik katsayısı ile değişimi

## 5.1. Serbest Titreşim Analizi

Tablo 9-10-11-12’de 6 farklı tabaka çeşidi için, çeşitli kuvvet kanunu endeks değerlerinde, TipA ve TipB gözeneklilik çeşitlerinin gözeneklilik katsayısının değişimi ile elde edilen basit mesnetli FD sandviç kirişlerin doğal frekanslarının karşılaştırmasını sunmaktadır. Tablo 9-10 incelendiğinde, güç kanunu endeksinin artmasıyla doğal frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Doğal frekans değerinin en düşük değerleri tabaka 2-1-2’de, en yüksek frekans değerleri ise tabaka 1-2-1’de gözlenmiştir. Bunun nedeni bu kirişlerin seramik fazının en düşük ve en yüksek hacim oranlarına karşılık gelmesidir. Beklendiği gibi p=0 olduğunda doğal frekans değerlerinin tüm tabakalar için aynı olduğu görülmektedir.

**Tablo 9.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin doğal frekans değerleri (L/h=5)

		1-1-1					
e		0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB	
p=0	5.1547	5.1547	5.0384	5.1479	4.9080	5.1407	
p=1	3.8761	3.8761	3.6152	3.8324	3.3049	3.7862	
p=2	3.4202	3.4202	3.0775	3.3569	2.6492	3.2895	
p=5	3.0198	3.0198	2.5769	2.9341	1.9742	2.8416	
p=10	2.8828	2.8828	2.3943	2.7876	1.6948	2.6841	
		1-2-1					
e		0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB	
p=0	5.1547	5.1547	5.0384	5.1479	4.9080	5.1407	
p=1	4.1102	4.1102	3.8850	4.0752	3.6222	4.0382	
p=2	3.7338	3.7338	3.4532	3.6850	3.1164	3.6333	
p=5	3.3782	3.3782	3.0315	3.3137	2.5971	3.2449	
p=10	3.2380	3.2380	2.8594	3.1661	2.3736	3.0893	
		2-1-2					
e		0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB	
p=0	5.1547	5.1547	5.0384	5.1479	4.9080	5.1407	
p=1	3.7309	3.7309	3.4439	3.6812	3.0972	3.6284	
p=2	3.2384	3.2384	2.8494	3.1650	2.3450	3.0862	
p=5	2.8466	2.8466	2.3364	2.7473	1.5847	2.6391	
p=10	2.7387	2.7387	2.1807	2.6302	1.2967	2.5109	

**Tablo 10.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin doğal frekans değerleri ( $L/h=5$ )

2-1-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.1547	5.1547	5.0384	5.1479	4.9080	5.1407
p=1	3.8212	3.8212	3.5436	3.7725	3.2077	3.7205
p=2	3.3559	3.3559	2.9800	3.2825	2.4912	3.2027
p=5	2.9808	2.9808	2.4867	2.8794	1.7566	2.7662
p=10	2.8739	2.8739	2.3322	2.7620	1.4710	2.6355

2-2-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.1547	5.1547	5.0384	5.1479	4.9080	5.1407
p=1	3.9914	3.9914	3.7438	3.9501	3.4501	3.9062
p=2	3.5729	3.5729	3.2510	3.5125	2.8506	3.4475
p=5	3.1983	3.1983	2.7847	3.1151	2.2294	3.0241
p=10	3.0656	3.0656	2.6095	2.9723	1.9689	2.8691

1-8-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.1547	5.1547	5.0384	5.1479	4.9080	5.1407
p=1	4.6786	4.6786	4.5202	4.6606	4.3404	4.6416
p=2	4.5146	4.5146	4.3396	4.4922	4.1397	4.4686
p=5	4.3523	4.3523	4.1596	4.3253	3.9380	4.2969
p=10	4.2833	4.2833	4.0826	4.2543	3.8511	4.2237

**Tablo 11.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin doğal frekans değerleri ( $L/h=20$ )

1-1-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.4610	5.4610	5.3200	5.4489	5.1650	5.4363
p=1	4.0325	4.0325	3.7643	3.9829	3.4123	3.9308
p=2	3.5391	3.5391	3.1718	3.4698	2.7193	3.3963
p=5	3.1113	3.1113	2.6434	3.0194	2.0162	2.9206
p=10	2.9664	2.9664	2.4522	2.8646	1.7277	2.7547

1-2-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.4610	5.4610	5.3200	5.4489	5.1650	5.4363
p=1	4.2886	4.2886	4.0391	4.2478	3.7523	4.2052
p=2	3.8773	3.8773	3.5728	3.8228	3.2123	3.7653
p=5	3.4931	3.4931	3.1225	3.4227	2.6648	3.3480
p=10	3.3426	3.3426	2.9402	3.2648	2.4310	3.1821

2-1-2						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.4610	5.4610	5.3200	5.4489	5.1650	5.4363
p=1	3.8766	3.8766	3.5641	3.8207	3.1923	3.7618
p=2	3.3468	3.3468	2.9318	3.2669	2.4020	3.1816
p=5	2.9315	2.9315	2.3935	2.8252	1.6150	2.7099
p=10	2.8193	2.8193	2.2319	2.7032	1.3195	2.5765

**Tablo 12.** Basit destekli FD gözenekli sandviç kirişlerin doğal frekans değerleri (L/h=20)

2-1-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.4610	5.4610	5.3200	5.4489	5.1650	5.4363
p=1	3.9773	3.9773	3.6733	3.9222	3.3116	3.8636
p=2	3.4759	3.4759	3.0726	3.3956	2.5568	3.3087
p=5	3.0781	3.0781	2.5540	2.9687	1.7944	2.8476
p=10	2.9673	2.9673	2.3936	2.8468	1.5006	2.7117

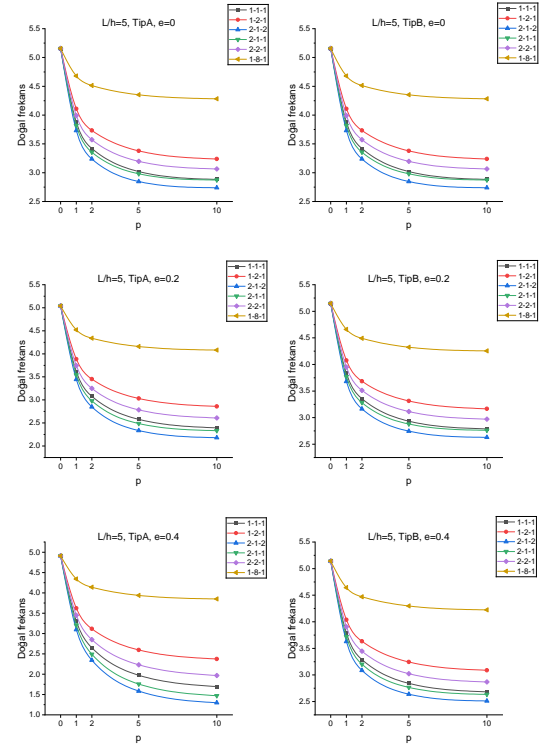
  

2-2-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.4610	5.4610	5.3200	5.4489	5.1650	5.4363
p=1	4.1600	4.1600	3.8872	4.1126	3.5686	4.0626
p=2	3.7055	3.7055	3.3580	3.6387	2.9325	3.5673
p=5	3.3039	3.3039	2.8639	3.2139	2.2825	3.1160
p=10	3.1631	3.1631	2.6798	3.0626	2.0124	2.9524

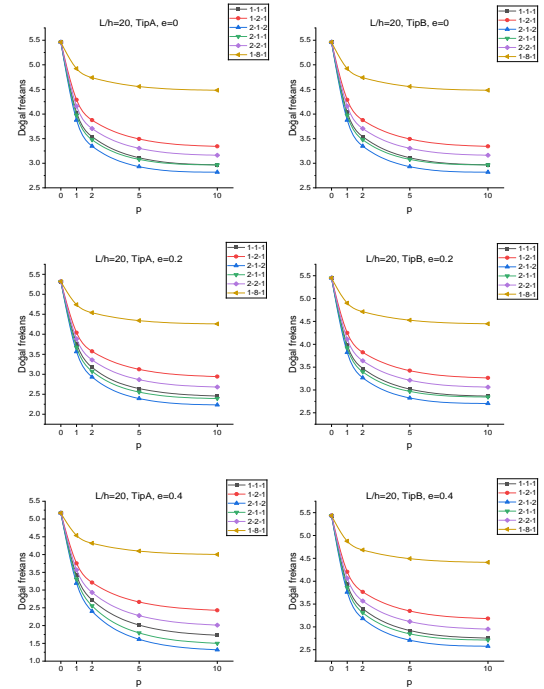
  

1-8-1						
e	0		0.2		0.4	
Gözeneklilik	TipA	TipB	TipA	TipB	TipA	TipB
p=0	5.4610	5.4610	5.3200	5.4489	5.1650	5.4363
p=1	4.9229	4.9229	4.7401	4.8994	4.5359	4.8749
p=2	4.7397	4.7397	4.5404	4.7117	4.3164	4.6826
p=5	4.5593	4.5593	4.3424	4.5267	4.0968	4.4927
p=10	4.4828	4.4828	4.2580	4.4481	4.0025	4.4119

Şekil 6-7’de TipA ve TipB için L/h=5 ve L/h=20 oranlarında farklı gözeneklilik katsayılarıyla (e) p üstelinin artışı ile boyutsuz doğal frekans değerlerinin değişimi verilmiştir.



**Şekil 6.** Boyutsuz doğal frekans değerlerinin TipA ve TipB için p üsteline göre değişimi (L/h=5)



**Şekil 7.** Boyutsuz doğal frekans değerlerinin TipA ve TipB için p üsteline göre değişimi (L/h=20)

Tablo 13'te FD kirişin  $L/h=5$  ve  $L/h=20$  oranları, gözenek tipleri, gözeneklilik katsayıları ( $e=0$ ,  $e=0.1$ ,  $e=0.2$ ) için  $p=2$  üstelinde doğal frekans değerlerinin literatür ile karşılaştırması verilmiştir.

**Tablo 13.**  $p=2$  üstelinde FD gözenekli kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

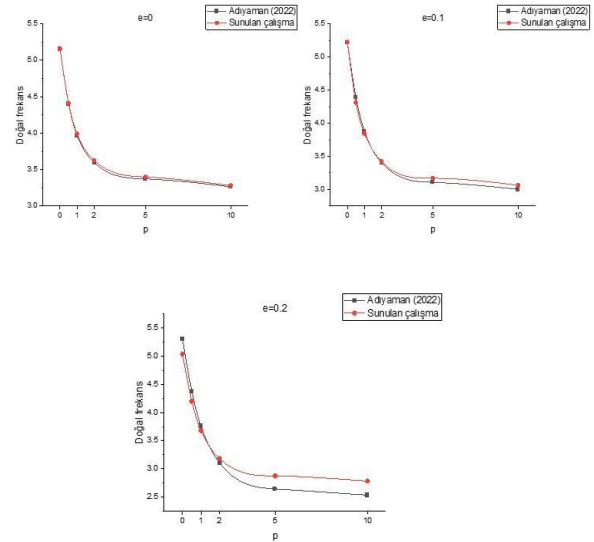
L/h	Teori	TipA			TipB		
		e=0	e=0.1	e=0.2	e=0	e=0.1	e=0.2
5	Hadji vd. (2019)	3.6264	3.4418	3.1489	3.6264	3.6069	3.5785
	Adıyaman (2022)	3.5970	3.4050	3.1023	3.5970	3.5736	3.5405
	<b>Sunulan çalışma</b>	<b>3.6267</b>	<b>3.4236</b>	<b>3.1782</b>	<b>3.6267</b>	<b>3.5755</b>	<b>3.5194</b>
20	Hadji vd. (2019)	3.8361	3.6335	3.3123	3.8361	3.8226	3.8004
	Adıyaman (2022)	3.8341	3.6308	3.3090	3.8341	3.8201	3.7975
	<b>Sunulan çalışma</b>	<b>3.8362</b>	<b>3.6044</b>	<b>3.3302</b>	<b>3.8362</b>	<b>3.7765</b>	<b>3.7117</b>

Tablo 14'te FD gözenekli kirişin  $L/h=5$  oranında, TipA ve TipB gözeneklilik tipine, gözeneklilik kat sayısına ( $e$ ) ve  $p$  üstelinin değişimiyle elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

**Tablo 14.** FD gözenekli kirişin doğal frekans değerlerinin  $p$  üsteline göre karşılaştırılması ( $L/h=5$ )

Gözeneklilik Tipi	Teori	e	p=0	p=0.5	p=1	p=2	p=5	p=10
TipA	Adıyaman (2022)	0	5.1523	4.4016	3.9710	3.5970	3.3725	3.2644
	<b>Sunulan çalışma</b>		<b>5.1542</b>	<b>4.4117</b>	<b>3.9914</b>	<b>3.6267</b>	<b>3.3991</b>	<b>3.2814</b>
	Adıyaman (2022)	0.1	5.2223	4.3934	3.8835	3.4050	3.1083	3.0028
TipB	Adıyaman (2022)	0	5.1532	4.4016	3.9710	3.5970	3.3725	3.2644
	<b>Sunulan çalışma</b>		<b>5.1542</b>	<b>4.4117</b>	<b>3.9914</b>	<b>3.6267</b>	<b>3.3991</b>	<b>3.2814</b>
	Adıyaman (2022)	0.1	5.2184	4.4429	3.9850	3.5737	3.3193	3.2112
TipA	Adıyaman (2022)	0.2	5.3047	4.3793	3.7577	3.1023	2.6403	2.5273
	<b>Sunulan çalışma</b>		<b>5.0379</b>	<b>4.1983</b>	<b>3.6784</b>	<b>3.1782</b>	<b>2.8710</b>	<b>2.7784</b>
	Adıyaman (2022)	0.2	5.2888	4.4872	3.9978	3.5405	3.2417	3.1252
TipB	Adıyaman (2022)	0.2	5.2888	4.4872	3.9978	3.5405	3.2417	3.1252
	<b>Sunulan çalışma</b>		<b>5.1474</b>	<b>4.3770</b>	<b>3.9255</b>	<b>3.5194</b>	<b>3.2750</b>	<b>3.1738</b>

Şekil 8'de  $L/h=5$  oranında TipA gözeneklilik tipi için  $e=0$ ,  $e=0.1$  ve  $e=0.2$  gözeneklilik kat sayılarına göre  $p$  üstelinin değişimiyle elde edilen doğal frekans değerlerinin literatür ile karşılaştırması verilmiştir.



**Şekil 8.** Boyutsuz doğal frekans değerlerinin  $L/h=5$  oranında literatür ile karşılaştırması

### 3. Genel Sonuçlar

FD gözenekli ve gözeneksiz sandviç kirişlerin statik eğilme analizinde 6 farklı tabaka için düşey yer değiştirme, eksenel gerilme değerleri ve 4 farklı tabaka için kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. FD sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi 6 farklı tabaka için gerçekleştirilmiştir. FD gözenekli sandviç kirişlerdeki her bir tabaka için 5 farklı  $p$  üsteline, 3 farklı gözeneklilik kat sayısına, 2 farklı gözeneklilik tipine ve 2 farklı kalınlık/uzunluk oranına göre statik eğilme ve serbest titreşim değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada Navier çözüm yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Gelecek çalışmalarda, farklı çözüm yöntemleri kullanılarak değişik sınır koşulları altında benzer analizler gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

FD gözenekli ve gözeneksiz sandviç kirişin statik eğilme ve serbest titreşim analizi sonucunda elde edilen düşey yer değiştirme, eksenel gerilme, kayma gerilmesi ve doğal frekans değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- FD gözenekli ve gözeneksiz kirişlerde kuvvet kanunu üstesindeki ( $p$ ) artış ile düşey yer değiştirme, eksenel gerilme ve kayma gerilmesi değerleri artarken, doğal frekans değerleri azalmaktadır.
- FD gözenekli ve gözeneksiz kirişlerde tabaka dizilimleri statik eğilme ve doğal frekans değerlerini etkilemektedir.
- FD gözenekli ve gözeneksiz kirişlerde uzunluk/kalınlık ( $L/h$ ) oranı statik eğilme ve doğal frekans değerlerini etkilemiştir.
- FD gözenekli sandviç kirişlerde gözeneklilik tipi ve gözeneklilik katsayısı statik eğilme ve doğal frekans değerlerini etkilemiştir.

**Çıkar Çatışması:** Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

### ORCID

Caner Solar, 0009-0007-6457-0984

Vedat Taşkın, 0000-0002-3013-2317

### 4. Referanslar

Adhikari, B., Dash, P., & Singh, B. N. (2020). Buckling analysis of porous FGM sandwich plates under various types of nonuniform edge compression based on higher order shear deformation theory. *Composite Structures*, 251, 112597. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112597>

Adiyaman, G. (2022). Free vibration analysis of a porous functionally graded beam using higher-order shear deformation theory. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 5. <https://doi.org/10.31462/jseam.2022.04277288>

Al-Itbi, S. K. A. (2023). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Statik ve Serbest Titreşim Analizi [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul].

Altınöz, M. (2016). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Timoshneko Kirişinin Çeşitli Sınır Şartlarında Dinamik Analizi [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul].

Alwan, H. H. S. A. (2017). Farklı Mühendislik Teorileri ile Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişin Serbest Titreşim Analizi [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta].

Amir, M., Lim, J., Kim, S.-W., & Lee, S.-Y. (2023). Finite element analysis of natural frequencies of the FGM porous cooling plate with cutouts: A multilayered FGM approach. *Results in Engineering*, 20, 101532. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101532>

- Aşık, A. E. (2021). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kirişin Serbest Titreşim Analizi [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta].
- Aydogdu, M., & Taskin, V. (2007). Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges. *Materials & Design*, 28(5), 1651-1656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.007>
- Benferhat, R., Tahar, H. D., & Abderezak, R. (2021). Effect of porosity on fundamental frequencies of FGM sandwich plates. 3, 25-40. <https://doi.org/10.12989/cme.2021.3.1.025>
- Chopan, A. (2023). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Zorlanmış Titreşim Analizi [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul].
- Demirhan, P. A., & Taskin, V. (2017). Levy solution for bending analysis of functionally graded sandwich plates based on four variable plate theory. *Composite Structures*, 177, 80-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.048>
- Demirhan, P. A., & Taşkın, V. (2020). Transfer Matris Metodu ile Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kirişlerin Titreşim Analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 259-269. <https://doi.org/10.24012/dumf.664735>
- Demirhan, P. A. (2016). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kiriş ve Plakların Dört Değişkenli Kayma Deformasyon Teorisi ile Eğilme ve Titreşim Analizi [Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne].
- Filiz, S. (2010). Eksenel Fonksiyonel Derecelendirilmiş Çubuk ve Kirişlerin Serbest Titreşimi [Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne].
- Fu, T., Chen, Z., Yu, H., Wang, Z., & Liu, X. (2018). An analytical study of sound transmission through corrugated core FGM sandwich plates filled with porous material. *Composites Part B*, 151, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.023>
- Hadji, L., & Avcar, M. (2021). Free Vibration Analysis of FG Porous Sandwich Plates under Various Boundary Conditions. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7, 505-519. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.35328.2628>
- Karakoti, A., Pandey, S., & Kar, V. R. (2022). Nonlinear transient analysis of porous P-FGM and S-FGM sandwich plates and shell panels under blast loading and thermal environment. *Thin-Walled Structures*, 173, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.108985>
- Kareem, S., & Noori, A. R. (2022). Influence of Porosity on the Free Vibration Response of Sandwich Functionally Graded Porous Beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7, 291-301. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1165940>
- Nguyen, V.-C., Tran, H.-Q., & Tran, M.-T. (2024). Nonlinear free vibration analysis of multi-directional functionally graded porous sandwich plates. *Thin-Walled Structures*, 203, 112204. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112204>
- Özmen, U. (2021). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Mekanik Analizi [Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa].
- Slimane, M., Hadj Mostefa, A., Hakima, B., Dimitri, R., & Tornabene, F. (2021). Higher-Order Free Vibration Analysis of Porous Functionally Graded Plates. *Journal of Composites Science*, 5, 305. <https://doi.org/10.3390/jcs5110305>



# SPICE Model of Mutlu-Kumru Memristor Model and Its Usage for Analysis, Modeling, And Simulation of a Memristor-Based Sawtooth Signal Generator

Ertuğrul KARAKULAK<sup>1\*</sup>, Reşat MUTLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Electronics Department, Vocational School of Technical Sciences, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup> Electrical and Electronics Engineering Department, Çorlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye

**Cite this article as:** Karakulak, E., Mutlu R. (2024). Spice Model of Mutlu-Kumru Memristor Model and Its Usage for Analysis, Modeling, And Simulation of a Memristor-Based Sawtooth Signal Generator, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*. 25(2), 91-100.

## Highlights

- SPICE Model of the Mutlu-Kumru Memristor Model
- Sawtooth Signal Generator Simulation with the Mutlu-Kumru Model
- Sawtooth Signal Generator Analysis with the Mutlu-Kumru Model

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: September 16, 2024 Accepted: December 23, 2024	Memristor has turned into a popular nonlinear circuit element following the discovery of a thin-film system that mimics the behavior of a memristor. Some memristor research has concentrated on developing new memristor models. Some memristor models have window functions. In the literature, there are a lot of different window functions proposed for modeling them. Recently, it has been shown that some memristive models cannot do a complete resistive switching in a finite time and a window function with a finite resistive switching time has been suggested to model a memristor. In this paper, its Spice model has been given. The model is modified using a different shaping factor for each polarity. Its Spice model is made in the LTspice program. As an example, the model is used to simulate a memristor-based sawtooth generator in this study. Its simulation results are also presented to verify the circuit's operation as a sawtooth signal generator.
<b>Keywords:</b> Memristor; Memristor Model; Sawtooth Signal Generator; Window Function.	

## Mutlu-Kumru Memristör Modelinin SPICE Modeli ve Testeredişi Sinyal Jeneratörü İçin Analizi, Modellenmesi ve Simülasyonu

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 16 Eylül 2024 Kabul: 23 Aralık 2024	Memristor, memristörün davranışını taklit eden ince film sisteminin bulunmasından sonra popüler bir doğrusal olmayan devre elemanına dönüşmüştür. Memristör araştırmalarından bir kısmı yeni memristör modellerinin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bazı memristör modelleri pencere fonksiyonlarına sahiptir. Literatürde memristörlerin modellenmesi için önerilen birçok farklı pencere fonksiyonu bulunmaktadır. Son zamanlarda, bazı hafızalı modellerinin sonlu bir zamanda tam bir rezistif anahtarlama yapamadığı gösterilmiş ve bir memristörü modellemek için sonlu rezistif anahtarlama zamanlı bir pencere fonksiyonu önerilmiştir. Bu yazıda bu modelin Spice modeli verilmiştir. Model, her polarite için farklı bir şekillendirme katsayısı kullanılarak değiştirilebilmektedir. Spice modeli LTspice programında yapılmıştır. Bu çalışmada örnek olarak, bu model memristör-tabanlı bir testere dişi jeneratörünü simüle etmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları devrenin testere dişi jeneratörü olarak çalıştığını doğrulamak için verilmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Memristör; Memristör Modeli; Testere Dişi Sinyal Üretici; Pencere Fonksiyonu.	

## 1. Introduction

The claim for the memristor's existence was made in 1971 (L. O. Chua, 1971). In 1976, memristive systems and their properties have been described (L. O. Chua & Kang, 1976). In 2008, a thin-film memristive system that behaves as a memristor has been discovered (Strukov et al., 2008). In the last decade, memristor and memristive systems have become hot research areas (Pershin et al., 2011; Prodromakis & Toumazou, 2010). New materials in nano dimensions showing memristive properties are under research (Pershin & Di Ventra, 2011). Memristor is expected to be used in analog and digital circuit applications (L. Chua, 2011; Prodromakis & Toumazou, 2010). That's why it is important to develop memristor models (Khalid, 2019). Because of their non-linear nature, it is hard to model the electrical characteristics of the memristors. Memristor models that have window functions are commonly used to model memristors and there are various window functions in the literature (D. Biolek & Biolková, 2009; Eroğlu, 2017; Joglekar & Wolf, 2009; Khalid, 2019; Prodromakis et al., 2011; Strukov et al., 2008; Zha et al., 2016). The first window function is presented by Strukov et al (Strukov et al., 2008). Joglekar has also provided a shapeable nonlinear dopant drift memristor model but it has a boundary-tackling issue (Joglekar & Wolf, 2009). Biolek et al have given a current direction-dependent window function without any boundary-tackling issues (D. Biolek & Biolková, 2009). Prodromakis et al have given a scalable and shapeable window function but with a boundary-tackling issue (Prodromakis et al., 2011). The model has been modified to get rid of the boundary-tackling issue and to have scalability (Zha et al., 2016). Some of the models are phenomenological approaches (Eroğlu, 2017; Khalid, 2019). In (Mutlu & Kumru, 2023), a boundary unreachability issue has been shown to exist for some memristor models, i.e., they do not switch in a finite time.

TEAM memristor model, which is a general model, simplifies the Simmons Tunnel Barrier Model and the derivative of its state space function is given as a piecewise function (Kvatinsky, S., et al., 2012). It makes use of thresholds in the model. An exponential function-based window function, which still suffers from boundary-tackling issues, has been suggested (Oğuz, Y., et al., 2017). Some memristor models have piecewise linear window functions (Hernández et al, 2019; Karakulak et al., 2020). A new window function, which provides finite resistive switching times has been reported in (Mutlu & Kumru, 2023). The model is also simple enough to provide some analytical solutions for resistive switching times.

Memristors may allow programmable electronic circuits made (Shin et al., 2009, 2011). Electronically programmable amplifiers can be made with memristors (Berdan, R.; Prodromakis, T.; Toumazou, 2012; Pershin & Di Ventra, 2010; T. a. Wey & Jemison, 2011). Memristor-based filters have been examined in the literature (Ascoli et al., 2013; S. C. Yener et al., 2018; Ş. Ç. Yener et al., 2014). It is possible to make memristor-based phase shifters or modulator circuits (Mutlu, R., Karakulak, 2018; T. A. Wey & Benderli, 2009). In (Itoh & Chua, 2008; Muthuswamy, 2010), memristor-based chaotic oscillators are examined. In (Mosad et al., 2013; Mutlu, 2015; Talukdar et al., 2011; S. Ç. Yener et al., 2014), different types of memristor-based relaxation oscillators are presented.

A memristor-based sawtooth signal generator (MBSSG) is suggested and examined analytically and experimentally using an HP memristor emulator (Özgülvenç et al., 2016). Other memristor models with nonlinear drift speed are also used to simulate the MBSSG (Kurt Demir A.; Mutlu R., 2019). It is shown that the memristor models used in (Kurt Demir A.; Mutlu R., 2019) have either boundary tackling or boundary reachability issues except for the HP memristor model (Mutlu & Kumru, 2023). Although

the simulations of the MBBSG are made in (Kurt Demir A.; Mutlu R., 2019), the nonlinear dopant drift memristor models cannot complete the resistive switching analytically and therefore the simulations are wrong (Mutlu & Kumru, 2023). The model given by Kumru and Mutlu can be used to model the MBBSG since such a memristor model completes a resistive switching in both forward and reverse polarities as the model since it does not have any boundary tackling and unreachability issues. The study aims to analyze the MBSSG with the new model, give its LTspice of model (Mutlu & Kumru, 2023), and use it to simulate the MBSSG.

This paper is arranged in the following way. In the second section, the Mutlu-Kumru memristor model is briefly told. In the third section, its LTspice model is given. In the fourth section, the MBSSG is given and its LTspice simulations are given. The paper is finished with the conclusion section.

## 2. Mutlu-Kumru Memristor Model

Some thin films, that have frequency-dependent zero-crossing hysteresis loops, are memristive systems and are nowadays called memristors. Such a memristor model with nonlinear dopant drift is presented as

$$v(t) = R(x)i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \mu_v \frac{R_{on}}{D^2} \cdot i(t)f(x, i) \quad (2)$$

where  $R(x)$  represents the resistance of the memristor,  $i(t)$  denotes its current,  $v(t)$  indicates its voltage,  $w$  is the length of its oxidized region,  $\mu_v$  is the dopant mobility,  $D$  is the total length of the  $TiO_2$  region,  $x=w/D$  is the normalized oxidized length,  $R_{on}$  is the minimum resistance, and  $f(x, i)$  is the window function.

The resistance of the memristor is given as

$$R(x) = R_{off} - (R_{off} - R_{on})x \quad (3)$$

HP memristor does. Some LTspice models of memristors are available in the literature (D. Biolek & Biolková, 2009; Karakulak & Mutlu, 2020). A memristor-capacitor (M-C) parallel circuit is inspected with an LTspice model of the proposed memristor model, but the model was not presented in (Mutlu & Kumru, 2023). It is important to present its LTspice

Its resistance varies between its minimum value,  $R_{on}$ , and its maximum value,  $R_{off}$ .

A window function indicates how closely a memristive system approximates an ideal memristor (Z. Biolek et al., 2009). The resistance value or memristive state-variable changes only when the window function  $f(x, i)$  is not equal to zero. In (Mutlu & Kumru, 2023), it is shown that some of the well-known models also have another problem named boundary reachability issue, i.e., their memristive switching time takes infinite time in both polarities and a new window function which also depends on device polarity is suggested:

$$f(x, i) = m_1 \sqrt[n]{1-x} \cdot stp(i) + m_2 \sqrt[n]{x} \cdot stp(-i). \quad (4)$$

where  $n$  is a positive number used to shape the window function, and,  $m_1$  and  $m_2$  are scaling parameters for the forward and reverse polarities respectively.

A memristor model with this window function switches in finite time when a DC voltage is applied (Mutlu & Kumru, 2023). Such a window function can be modified to have two shaping parameters, one for each direction:

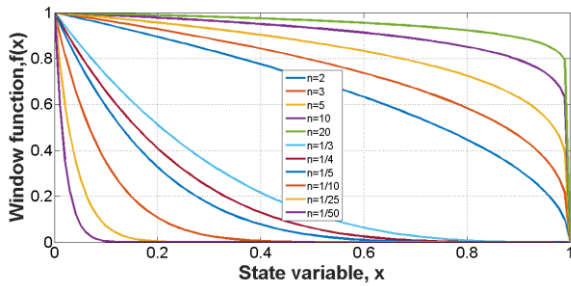
$$f(x, i) = m_1 \sqrt[n_1]{1-x} \cdot stp(i) + m_2 \sqrt[n_2]{x} \cdot stp(-i). \quad (5)$$

where  $n_1$  and  $n_2$  are the shaping parameters for the forward and reverse polarities respectively.

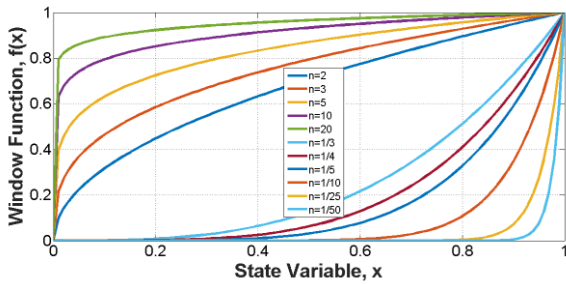
The new function can also be expressed as a piecewise function:

$$f(x, i) = \begin{cases} m_1 \sqrt[n_1]{1-x}, & i \geq 0 \\ m_2 \sqrt[n_2]{x}, & i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Combining Eq.s (1-5) makes the new memristor model. The plots of Mutlu-Kumru window functions for the forward and reverse polarities are given in Figure 1. The shaping parameters  $n_1$  and  $n_2$  defines the shape of the window functions. More information about the model can be found in (Mutlu & Kumru, 2023).



(a)



(b)

**Figure 1.** The Mutlu-Kumru window function for a) the forward biased memristor ( $i(t) > 0$ ), various  $n_1$  values, and  $m_1=1$  and b) the reverse biased memristor ( $i(t) < 0$ ), various  $n_2$  values, and  $m_2=1$ .

### 3. Memristor Spice Model With The Mutlu-Kumru Model

The new memristor model is made in the LTspice simulator environment since it is a program that has also been often used to make lots of the memristor models given in the literature. The LTspice code of the new model is presented in Table 1. The block scheme of the memristor model is shown in Figure 2. The current source placed between the input nodes whose

current is equal to  $i_{mem}(i(t))$  is used to represent the memristor and the other current source and a capacitor is utilized to calculate the state variable of the memristor ( $x(t)$ ). This memristor model possesses three pins or nodes. The pin XSV lets the state variable of the memristor be plotted. The model is simulated with a sinusoidal voltage for three different frequencies. Its hysteresis curves are plotted together to illustrate that it possesses the three fingerprints of a memristor as seen in Figure 3. The Lissajous curves are not symmetric with respect to the origin due to their polarity dependence and differing scaling parameters. Memristor waveforms for 20 Hz are shown in Figure 4.

**Table 1.** Memristor Model Codes

```
* SPICE Model of Mutlu-Kumru Memristor
* TE: Top electrode
* BE: Bottom electrode
* XSV: External connection to plot state variable

.SUBCKT MEM_MK TE BE XSV
.param Ron=150 Roff=1000 x0=0.076 D=16N uv=40F
m1=2 m2=3 n1=2 n2=2
* The Current Polarity Dependent Window Function a
.func fa(V1)={m1*pow(V1,1/n1)}
* The Current Polarity Dependent Window Function b
.func fb(V1)={m2*pow((1-V1),1/n2)}
* Window Functions with respecting to current direction
.func f(V1,V2)={stp(V2)*fb(V1)+(1-stp(V2))*fa(V1)}
* Memristor I-V Relationship
.func IVRel(V1,V2) = V1/(Ron*V2 + Roff*(1-V2))
* Circuit to determine state variable
Gx 0 XSV
value={I(Gmem)*Ron*uv*f(V(XSV,0),I(Gmem))/pow(D,2)}
Cx XSV 0 {1}
.ic V(XSV) = x0
* Current source representing memristor
Gmem TE BE value={IVRel(V(TE,BE),V(XSV,0))}
.ENDS MEM_MK
```

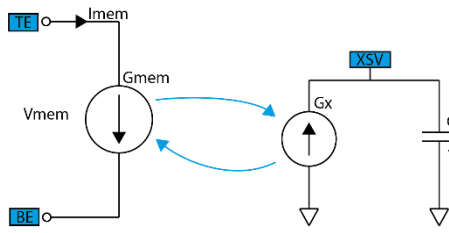


Figure 2. Block Scheme of Memristor Model

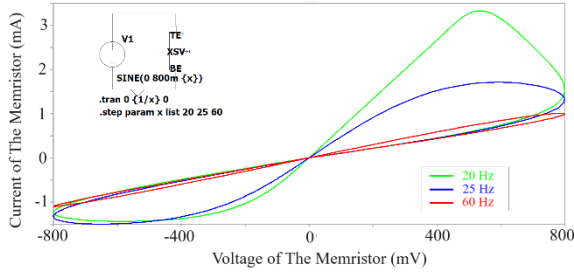


Figure 3. Hysteresis curves of the simulated memristor fed by a sinusoidal voltage of  $V_s(t)=0,8\sin(2\pi ft)$  V for the frequencies of 20, 25, and 60 Hz.

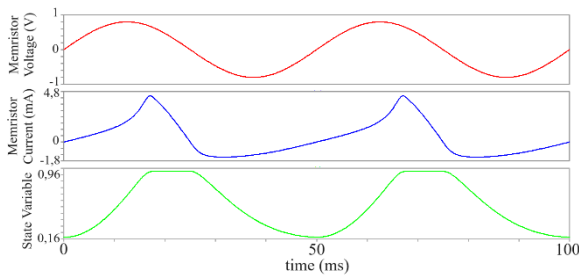


Figure 4. Voltage, Current, and State variable curves of the Mutlu-Kumru memristor model for 20 Hz.

#### 4. Simulation Results

The memristor-based sawtooth signal generator (MBSSG) presented in (Özgüvenç et al., 2016) is shown in Figure 5. It comprises a relaxation oscillator and an inverting amplifier that has a memristor used as the feedback component. The purpose of the relaxation oscillator is to produce a square wave. In Figure 4, the memristor polarity is selected so that its memristance increases with a positive current. The input current of the R-M amplifier is also the memristor current. The square wave results in the opamp being fed by a square wave current. Memristor’s memristance decreases in the positive alternance and increases in the negative

alternance if the memristor is not under saturation, i.e., its state variable is varying. In this case, the output of the MBSSG generator is negative memristor voltage. If the memristor is under saturation, i.e., its state variable is constant, the output of the MBSSG generator becomes constant, too. The output voltage of the relaxation generator can be assumed to be

$$V_{in} = \begin{cases} V_{sat}, & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -V_{sat}, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (7)$$

Where  $V_{sat}$  is the saturation voltage of the opamp of the relaxation oscillator and  $T$  is the electrical period of the square wave and equal to  $1/f$ .

The frequency of the relaxation oscillator is given as

$$f = \frac{0.455}{R_f C} \quad (8)$$

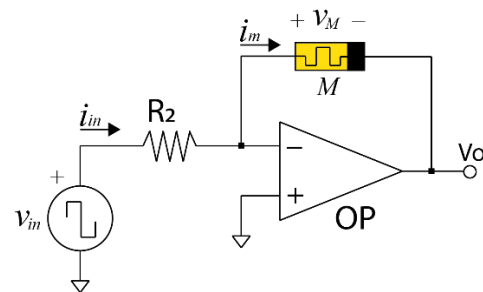
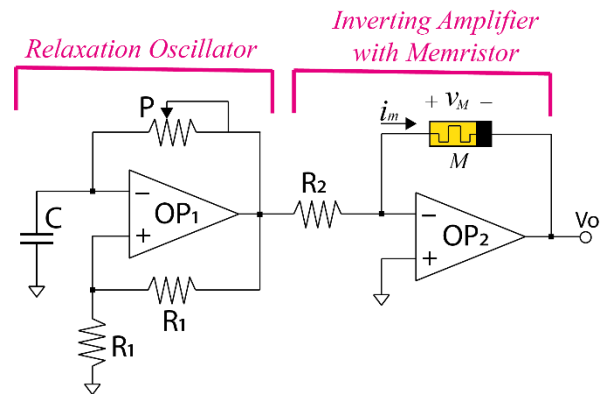


Figure 5. The sawtooth wave generator with a memristor (Özgüvenç et al., 2016).

LTspice circuit presentation of the MBSSG is given in Figure 6 and it is analyzed using the Mutlu-Kumru

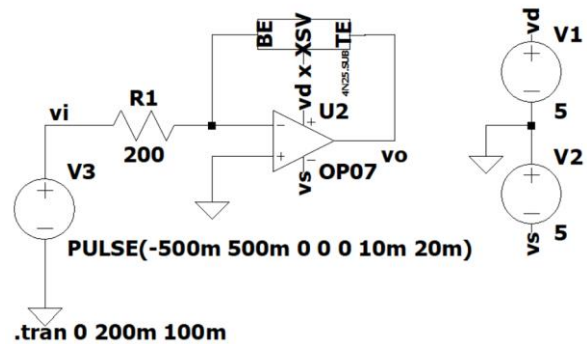
memristor model made in the last section. The memristor parameters used in the simulations are given in Table 1. For various memristor parameters, the output voltage waveform is presented in Figures 7-10.

**Table 2.** Circuit element parameters used in simulations

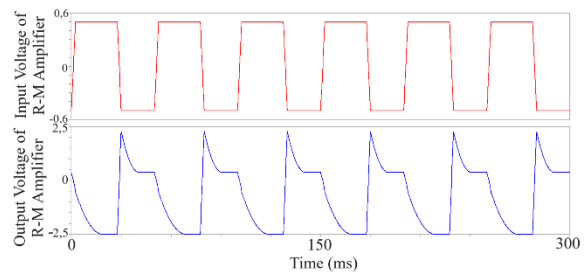
The memristor minimum resistance	$R_{on}$	150 $\Omega$
The memristor maximum resistance	$R_{off}$	1000 $\Omega$
The dopant mobility	$\mu_v$	$40.10^{-15}$ $m^2/V.s$
The memristive element length	$D$	16 nm
Parameter $m_1$	$m_1$	2
Parameter $m_2$	$m_2$	3
Parameter $n_1$	$n_1$	2
Parameter $n_2$	$n_2$	2

The MBSSG generator circuit has been simulated for three different frequencies: 20, 50, and 250 Hz. The frequency dependence of the shape of the output voltage of the MBSSG generator in the steady-state can be seen in the simulation results given in Figures 7-9. 20 Hz operation frequency is low enough for the memristor to get into saturation since its voltage becomes constant in some intervals in each period. Due to the operation of the memristor in the saturation region, the output voltage is not a sawtooth waveform. When the frequency is increased to 50 Hz, the period is not long enough for memristor to get into saturation, the memristor output voltage resembles a sawtooth waveform more. At 250 kHz, the period is shorter and the memristor's memristance only varies just a little bit and almost stays constant, and the output voltage waveform is almost a square wave, not a sawtooth wave. The shape of the output waveform can be further optimized by adjusting its frequency or using different

memristor parameters. The transient behavior of the MBSSG generator for 250 Hz can be seen in Figure 10 while as its steady-state behavior for 250 Hz is shown in Figure 9. The memristor state variable switches from 0 to 1 or 1 to 0 if the half period of the input square wave signal is higher than the resistive switching time as shown in Figure 7. The output waveform rises quickly and gets fixed at the value  $(V_{sat} R_{off})/R_2$  in the positive alternance and the output waveform falls quickly and gets fixed at the value  $-(V_{sat} R_{on})/R$  in Figure 7. However, if the half period of the square wave signal is lower than the resistive switching time, the resistive switching cannot be completed as shown in Figures 8 and 9. Over 250 Hz or at very high frequencies, the memristor starts behaving as if a linear time-invariant resistor, and, therefore, the MBSSG generator starts giving a square waveform. That's why the middle frequencies are the best for the operation of the MBSSG since the waveform resembles a sawtooth the most.

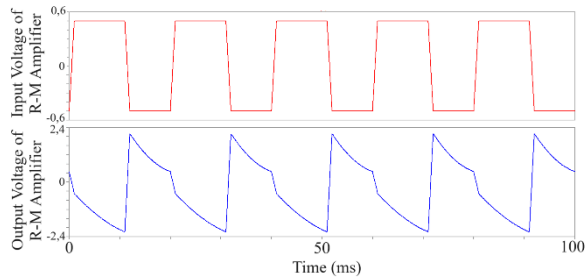


**Figure 6.** The LTspice schematic of the inspected generator.

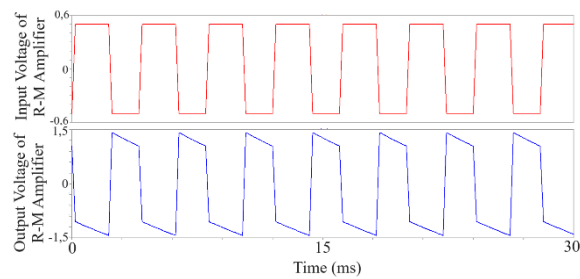


**Figure 7.** a) Input and b) Output Voltages of the R-M Inverting Amplifier for 20 Hz Input Frequency (

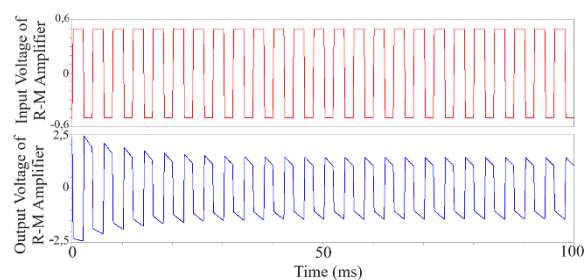
$R_2=200 \Omega$ ,  $x(0)=0.076$ , and the memristor model parameters same as Table 1)



**Figure 8.** a) Input and b) Output Voltages of the R-M Inverting Amplifier for 50 Hz Input Frequency ( $R_2=200 \Omega$ ,  $x(0)=0.076$ , and the memristor model parameters same as Table 1)



**Figure 9.** a) Input and b) Output Voltages of the R-M Inverting Amplifier for 250 Hz Input Frequency ( $R_2=200 \Omega$ ,  $x(0)=0.076$ , and the memristor model parameters same as Table 1)



**Figure 10.** a) Input and b) Output Voltages of the R-M Inverting Amplifier for 250 Hz Input Frequency ( $R_2=200 \Omega$ ,  $x(0)=0.076$ , and the memristor model parameters same as Table 1)

## 5. Conclusion

New circuit elements require models to be used in circuit programs such as Spice. Memristor is a

nonlinear element that has emerged in recent decades. A new window function, which gives finite resistive switching times has been reported in (Mutlu & Kumru, 2023). In this paper, an LTspice model of Mutlu-Kumru memristor model is presented and used to model a memristor-based sawtooth signal generator. The solutions with window functions given in (Kurt Demir A.; Mutlu R., 2019) are not valid due to boundary-tackling and boundary unreachability issues. The analytical solution of the generator has also been made to show that the signal generator is analytically solvable with Mutlu-Kumru window function.

In the future, once memristors are commercially available, it may be feasible to develop various types of signal generators based on memristors. However, inaccurate modeling of a memristor can lead to errors in these analog application circuits as well. Therefore, companies intending to commercialize memristors should also provide SPICE circuit models that accurately represent them to facilitate their integration into circuits.

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest to be disclosed.

## ORCID

*Ertuğrul Karakulak, 0000-0001-5937-2114*

*Reşat Mutlu, 0000-0003-0030-7136*

## References

- Ascoli, A., Tetzlaff, R., Corinto, F., Mirchev, M., & Gilli, M. (2013). Memristor-based filtering applications. *LATW 2013 - 14th IEEE Latin-American Test Workshop*, 1, 1–6. <https://doi.org/10.1109/LATW.2013.6562672>
- Berdan, R.; Prodromakis, T.; Toumazou, C. (2012). High precision analogue memristor state tuning. *Electronics Letters*, 48(18), 1105–1107.
- Biolek, Z., Biolek, D., & Biolková, V. (2009). SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radioengineering*, 18(2), 210–214.

- Chua, L. (2011). Resistance switching memories are memristors. *Applied Physics A*, 102(4), 765–783. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6264-9>
- Chua, L. O. (1971). Memristor—The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18(5), 507–519. <https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>
- Chua, L. O., & Kang, S. M. (1976). Memristive Devices and Systems. *Proceedings of the IEEE*, 64(2), 209–223. <https://doi.org/10.1109/PROC.1976.10092>
- Eroğlu, Y. O. A. F. G. A. H. (2017). A new window function for memristor modeling. 8th International Advanced Technologies Symposium, 3498–3502.
- Hernández-Mejía, C., & Torres-Muñoz, D. (2019, February). PWL Window Function for Nonlinear Memristive Systems. In 2019 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP) (pp. 9-13). IEEE.
- Itoh, M., & Chua, L. O. (2008). Memristor oscillators. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 18(11), 3183–3206. <https://doi.org/10.1142/S0218127408022354>
- Joglekar, Y. N., & Wolf, S. J. (2009). The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits. *European Journal of Physics*, 30(4), 661–675. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/30/4/001>
- Karakulak, E., & Mutlu, R. (2020). Spice model of current polarity-dependent piecewise linear window function for memristors. *Gazi University Journal of Science*, 33(4), 766–777. <https://doi.org/10.35378/gujs.605118>
- Khalid, M. (2019). Review on Various Memristor Models, Characteristics, Potential Applications, and Future Works. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 20(4), 289–298. <https://doi.org/10.1007/s42341-019-00116-8>
- Kvatinsky, S., Friedman, E. G., Kolodny, A., & Weiser, U. C. (2012). TEAM: Threshold adaptive memristor model. *IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers*, 60(1), 211–221.
- Kurtdemir A.; Mutlu R. (2019). Modeling and Simulation of a Memristor-Based Sawtooth Signal Generator Using Nonlinear Dopant Drift Memristor Models. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(1), 44–57.
- Mosad, a. G., Fouda, M. E., Khatib, M. a., Salama, K. N., & Radwan, a. G. (2013). Improved memristor-based relaxation oscillator. *Microelectronics Journal*, 44(9), 814–820. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2013.04.005>
- Muthuswamy, B. (2010). Implementing memristor based chaotic circuits. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(5), 1335–1350. <https://doi.org/10.1142/S0218127410026514>
- Mutlu, R., Karakulak, E. (2018). Memristor-Based Phase Shifter. 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 1–5.
- Mutlu, R. (2015). Solution of TiO<sub>2</sub> memristor-capacitor series circuit excited by a constant voltage source and its application to calculate operation frequency of a programmable TiO<sub>2</sub> memristor-capacitor relaxation oscillator. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23(5), 1219–1229. <https://doi.org/10.3906/elk-1108-38>
- Mutlu, R., & Kumru, T. D. (2023). A Zeno Paradox: Some Well-known Nonlinear Dopant Drift Memristor Models Have Infinite Resistive



- Switching Time. *Radioengineering*, 32(3), 312–324. <https://doi.org/10.13164/RE.2023.0312>
- Oğuz, Y., Gül, F., Eroğlu, H., “A New Window Function for Memristor Modeling”, 8th International Advanced Technologies Symposium, (2017).
- Özgüvenç, A., Mutlu, R., & Karakulak, E. (2016). Sawtooth signal generator with a memristor. 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, April, 19–24.
- Pershin, Y. V., & Di Ventra, M. (2010). Practical approach to programmable analog circuits with memristors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 57(8), 1857–1864. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2009.2038539>
- Pershin, Y. V., & Di Ventra, M. (2011). Memory effects in complex materials and nanoscale systems. In *Advances in Physics* (Vol. 60, Issue 2, pp. 145–227). <https://doi.org/10.1080/00018732.2010.544961>
- Pershin, Y. V., Martinez-Rincon, J., & Di Ventra, M. (2011). Memory circuit elements: From systems to applications. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 8(3), 441–448. <https://doi.org/10.1166/jctn.2011.1708>
- Prodromakis, T., Peh, B. P., Papavassiliou, C., & Toumazou, C. (2011). A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58(9), 3099–3105. <https://doi.org/10.1109/TED.2011.2158004>
- Prodromakis, T., & Toumazou, C. (2010). A review on memristive devices and applications. 2010 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, ICECS 2010 - Proceedings, 934–937. <https://doi.org/10.1109/ICECS.2010.5724666>
- Shin, S., Kim, K., & Kang, S. M. (2009). Memristor-based fine resolution programmable resistance and its applications. 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2009, 948–951. <https://doi.org/10.1109/icccas.2009.5250376>
- Shin, S., Kim, K., & Kang, S. M. (2011). Memristor applications for programmable analog ICs. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10(2), 266–274. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2009.2038610>
- Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), 80–83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
- Talukdar, A., Radwan, A. G., & Salama, K. N. (2011). Generalized model for Memristor-based Wien family oscillators. *Microelectronics Journal*, 42(9), 1032–1038. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2011.07.001>
- Wey, T. A., & Benderli, S. (2009). Amplitude modulator circuit featuring TiO<sub>2</sub> memristor with linear dopant drift. *Electronics Letters*, 45(22), 1103–1104. <https://doi.org/10.1049/el.2009.2174>
- Wey, T. a., & Jemison, W. D. (2011). Variable gain amplifier circuit using titanium dioxide memristors. *IET Circuits, Devices & Systems*, 5(1), 59. <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2010.0210>
- Yener, S. Ç., Mutlu, R., & Kuntman, H. (2014). A new memristor-based high-pass filter/amplifier: Its analytical and dynamical models. 2014 24th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2014 - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/Radioelek.2014.6828420>

- Yener, S. C., Mutlu, R., & Kuntman, H. H. (2018). Small signal analysis of memristor-based low-pass and high-pass filters using the perturbation theory. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 12(1–2), 55–62.
- Yener, Ş. Ç., Mutlu, R., & Kuntman, H. H. (2014). Performance analysis of a memristor - Based biquad filter using a dynamic model. *Informacije MIDEM*, 44(2), 109–118.
- Zha, J., Huang, H., & Liu, Y. (2016). A Novel Window Function for Memristor Model with Application in Programming Analog Circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 63(5), 423–427. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2015.2505959>

## Techno-Economic Evaluation of a Photovoltaic System for Industrial Facility: A Case Study in Edirne, Turkey

Hacer AKHAN<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Trakya University, Mechanical Engineering Department; Edirne, Turkey, 22030

**Cite this article as:** Akhan, H. (2024). Techno-Economic Evaluation of A Photovoltaic System For Industrial Facility: A Case Study In Edirne, Turkey, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*. 25(2), 101-116.

### Highlights

- Photovoltaic system is a cost-effective, environmentally friendly, and sustainable energy source for industrial applications.
- The capacity factor of the PV system is 14.8%.
- The annual average rate of solar energy utilization of the photovoltaic system is 20%.

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 4, 2024 Accepted: December 23, 2024	System solutions such as the use of renewable energy are used as energy management applications to implement the necessary measures to eliminate energy waste, losses, and inefficiencies in industrial facilities, to meet the needs of heating, cooling, ventilation, electricity, hot water, and lighting energy completely or partially. In this study, it is planned to obtain some of the electrical energy consumed as an energy efficiency increasing application in the industrial facility located in Edirne, from solar energy, which is a renewable energy source. With the 910 kW Photovoltaic (PV) system planned to be installed in the industrial facility, it is aimed to obtain approximately 20% of the electricity need of the facility with solar energy. Thus, because of the use of renewable energy in electricity production, 543.7 tCO <sub>2</sub> greenhouse gas emissions will be reduced, equivalent to 99.6 unused cars and pickup trucks per year. With the PV system installation, 1,183.0 MWh/year (101.737 TOE/year) energy savings and 318,376.66 \$/year cost savings will be achieved. The payback period of the system is 2.7 years.
<b>Keywords:</b> Photovoltaic; Energy Management; Solar Energy; Economic Analysis.	

### Endüstriyel Tesis İçin Bir PV Sisteminin Tekno-Ekonomik Değerlendirmesi: Türkiye-Edirne'de Bir Vaka Çalışması

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 4 Aralık 2024 Kabul: 23 Aralık 2024	Endüstriyel tesislerde enerji israfı, kayıpları ve verimsizliklerin giderilmesi için gerekli önlemlerin uygulanması, ısıtma, soğutma, havalandırma, elektrik, sıcak su ve aydınlatma enerjisi ihtiyaçlarının tamamen veya kısmen karşılanması için yenilenebilir enerji kullanımı gibi sistem çözümleri enerji yönetimi uygulamaları olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Edirne'de bulunan sanayi tesisinde enerji verimliliğini artırıcı bir uygulama olarak tüketilen elektrik enerjisinin bir kısmının yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden elde edilmesi planlanmıştır. Sanayi tesisine kurulması planlanan 910 kW Fotovoltaik (PV) sistem ile tesisin elektrik ihtiyacının yaklaşık %20'sinin güneş enerjisi ile elde edilmesi hedeflenmektedir. Böylece elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kullanımı sayesinde yılda 99,6 adet kullanılmayan otomobil ve kamyonete eşdeğer 543,7 tCO <sub>2</sub> sera gazı salımı azaltılmış olacak. PV sistem kurulumu ile 1.183,0 MWh/yıl (101,737 TEP/yıl) enerji tasarrufu ve 318.376,66 \$/yıl maliyet tasarrufu sağlanacaktır. Sistemin geri ödeme süresi 2,7 yıldır.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Fotovoltaik; Enerji Yönetimi; Güneş Enerjisi, Ekonomik Analiz.	

## 1. Introduction

In the world, 50% of primary energy consumption is realised in industry (AEO, 2018). At this point, it gains importance in terms of increasing efficiency and energy saving with energy management in industry. In Turkey, where the electricity consumption in the industry has a share of more than 35%, the utilization of renewable energy sources for electricity generation has been one of the objectives (enerji.gov.tr). Within the scope of efficiency-enhancing practices in industrial facilities, electricity generation systems based on renewable energy resources are established to meet part of the energy need. In order to meet the electricity, and lighting energy needs in buildings, system solutions such as the use of renewable energy sources are analysed by the designers at the project stage.

PV systems are a suitable power generation system for industrial applications. In 2020, the worldwide PV system capacity was 773.2 GWp (Statista). Owolabi et al. analysed the PV plant in Nigeria and proved that it is a viable option. Mukisa et al. evaluated rooftop PV system for industrial plants. Obeng et al. investigated the campus application of a thin film (CdTe) solar PV system. Farangi et al. investigated the economic analysis of PV system. Kumar et al. investigated the fulfilment of the energy needs of an educational building with a PV system. Chang et al. analysed the rooftop PV system for different buildings. Sajid et al. analysed a photovoltaic (PV) system to meet the electricity demand of an industrial plant. Rajput and Dheer conducted experiments on a 100 kWp PV system with the mathematical model they developed.

In the literature, there are studies on energy analysis in industrial plants (Andrews and Johnson, 2016) and environmental impact (Cheng et al., 2019). The management team in the plant is also an important factor (Tiller, 2012). Sola and Mota analysed the factors affecting energy management in industrial

facilities from these perspectives. A study developed by Martin et al. (2012) shows that better energy efficiency and productivity are strongly related to management practices. According to a study developed by Neves et al., the market also influences the adoption of an environmental management system (ISO 14001). Marimon and Casadesús (2017) conducted research on the application of ISO 50001 in industrial plants. The impact of energy management activities in an industrial company was analysed by Schulze et al. in 2016. Backlund et al. (2012) found that retrofit works in Industrial plant are more energy efficient for energy intensive industries. Tollander and Ottosson (2010) argue that energy management practices in industries are scarce. Energy efficiency practices in industrial plant should be developed both in terms of theoretical contributions and practical case studies (Worrell et al., 2009; Yin, 2009). Schulz and Stehfest (1980) showed that energy management practices in industry are beneficial both financially and environmentally (Klugman et al., 2009). Other studies show potentials for total energy savings (Karlsson et al., 2009; Thollander et al., 2007). The application of cogeneration systems in industrial plants is seen as a solution (Marshman et al., 2010). Rudberg et al (2013) investigated the preconditions for energy management in industrial plant.

The aim of the study is to obtain a part of the electrical energy consumed as an energy efficiency improving application in the industrial facility from solar energy, which is a renewable energy source. In this study, the PV system, which is an electricity generation system from solar energy that can be used in integration with the buildings, will be installed on the roof of the facility where the study is carried out. Within the scope of the study, a system that will provide electrical energy conversion from solar energy with a power of 910 kW consisting of 2000 grid-connected PV panels on a total area of 4,550 m<sup>2</sup> on the roof of 4 buildings of the

industrial facility will be installed and the electricity production of this system will be monitored for a period of two years. Using the obtained data, system performances, capacity factors, energy production efficiencies, levelled electricity costs will be determined. The performance and economic analysis of the PV system, which is designed to be installed, are theoretically examined for real field conditions. This study sets an example for future studies by providing methodology and information on how to improve energy efficiency by generating electricity from renewable energy sources, not only for industrial plants in Turkey, but also for other industrial plants around the world.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Site Description

The closed volume of the industrial facility located in Edirne; Turkey is 14,339 m<sup>2</sup>. It is located at 41° latitude, 26° longitude geographical coordinates. Figure 1 shows the location of the industrial facility. Table 1 summarises the Industrial facility 's location and heating characteristics in Edirne.



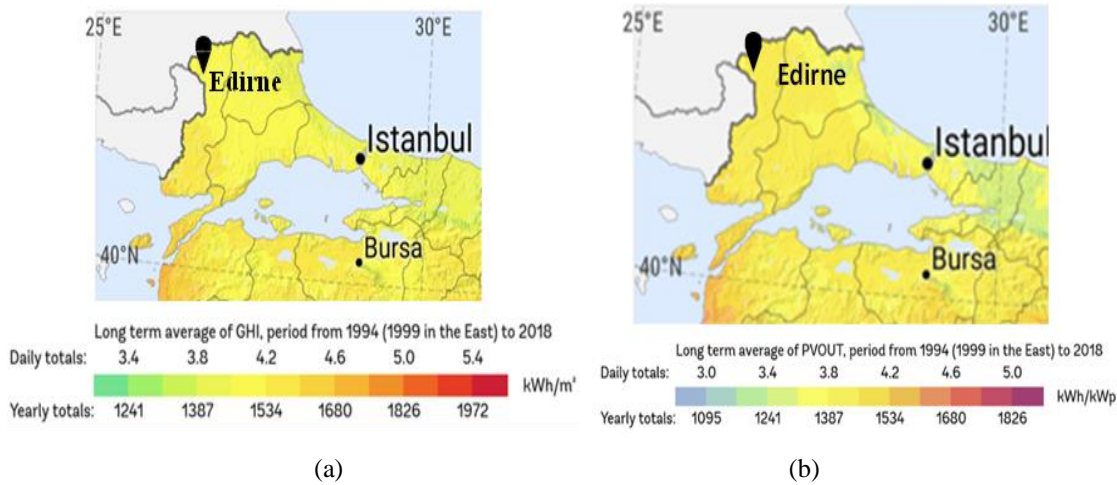
**Figure 1.** Location of the industrial facility in Edirne, Turkey (earth.google.com)

**Table 1.** Industrial facility location's climate data

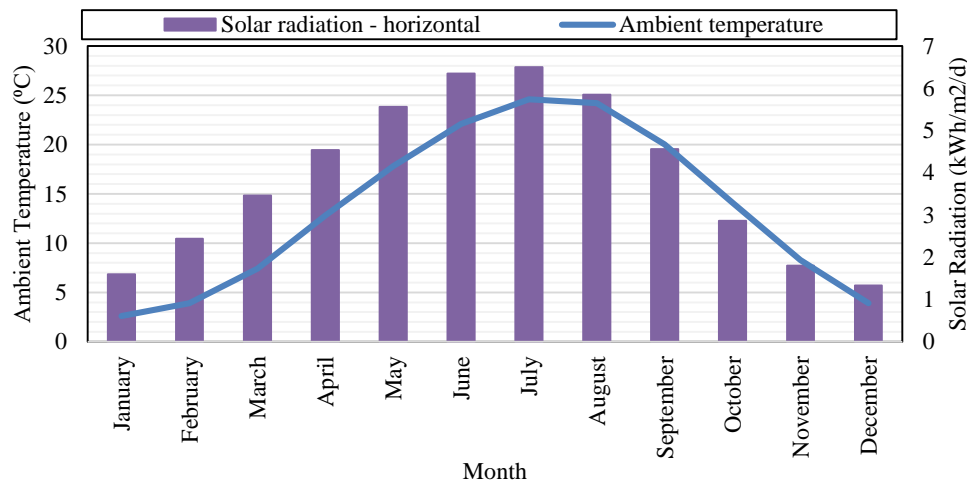
Parameter	Unit	Edirne
Latitude	°N	41.7
Longitude	°E	26.6
Elevation	m	51
Earth temperature amplitude	°C	21.8
Average annual air temperature	°C	13.5
Annual relative humidity	%	69.5
Heating design temperature	°C	-5.6
Cooling design temperature	°C	33
Total heating degree days	°C·d	2,212
Total cooling degree days	°C·d	2,009
Annual average horizontal solar radiation	kWh/m <sup>2</sup> /d	3.91
Annual atmospheric pressure	kPa	99.3
Annual average wind speed	m/s	1.9

-Solar energy potential

Figure 2 provides a summary of global horizontal radiation and estimated PV power potential in shopping mall location. It represents the average daily/yearly electricity generation totals obtained from 1 kW-peak solar power plant. Figure 3 shows the monthly average ambient temperature and solar radiation of the industrial facility site in Edirne, Thrace.



**Figure 2.** a) Global horizontal radiation and b) Photovoltaic power potential in Edirne, Turkey (Shopping mall location) (globalsolaratlas.info)



**Figure 3.** Monthly average ambient temperature and solar radiation in Edirne, Turkey (retscreen-database)

## 2.2. Energy Production, Consumption, and Cost of the Industrial Facility

The total energy consumption of the industrial facility in 2020 is 3,825.6 TOE, the total energy consumption in 2021 is 3,139.79 TOE, and the total energy consumption in 2022 is 3,825.6 TOE. The facility's total energy consumption average for the last 3 years is 3,477.81 TOE. In Figure 4, the monthly energy consumption of the industrial facility in 2022 and the monthly production of the industrial facility in 2022 in

Figure 5 are given. There is a linear variation between total energy consumption and production. Figure 6 shows the distribution of total production and energy consumption in the months of 2022. Considering the production and energy consumption in the industrial facility, it has been determined that production is mostly directly proportional to coal consumption. Figure 7 shows the total production and consumption trend graph in the months of 2022.

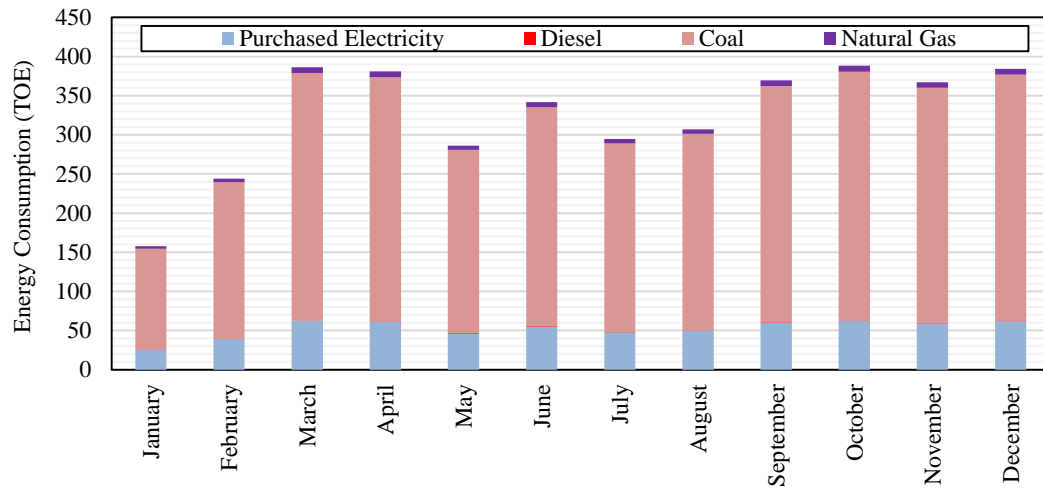


Figure 4. Energy consumption of industrial facility in the months of 2022

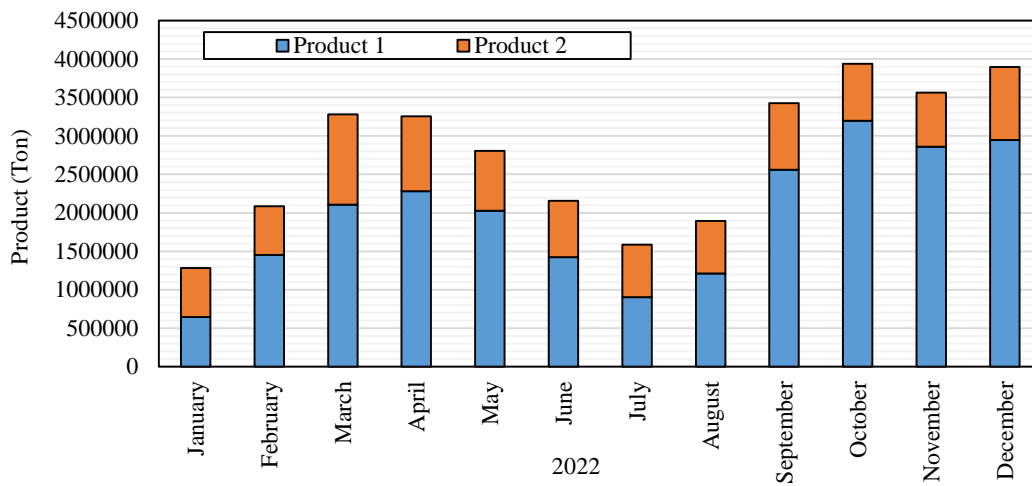


Figure 5. Production of the industrial facility in the months of 2022

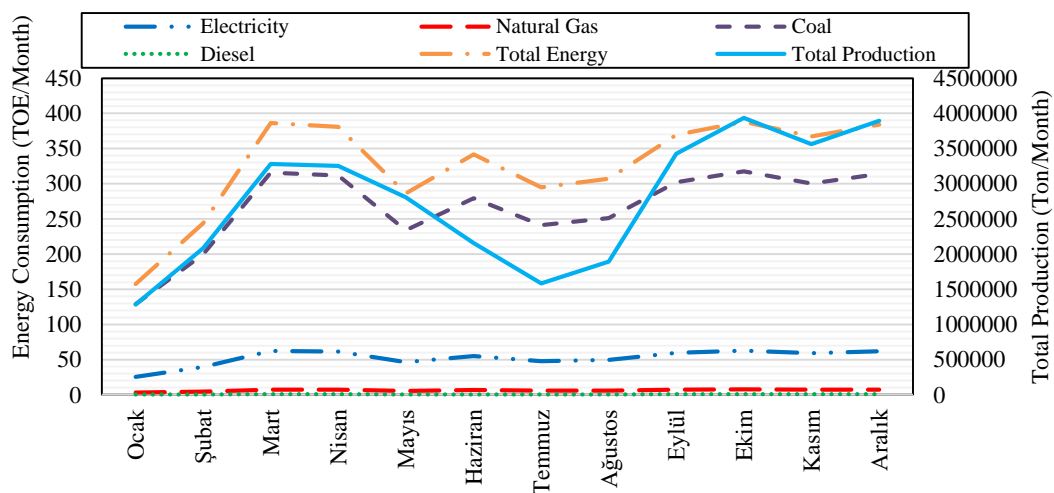
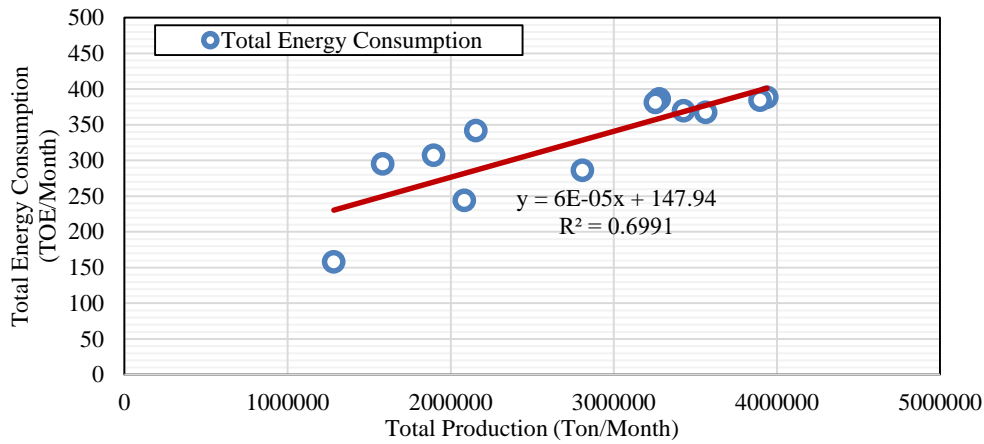


Figure 6. Distribution of total production and energy consumption in the months of 2022



**Figure 7.** Total production and consumption trend graph in 2022

Table 2 shows the average energy consumption and costs of the industrial facility for the years 2020-2021-2022. It is seen that 43.4% of the energy cost is spent on electrical energy. At this point, it will be an energy

efficiency enhancing application to produce electricity with a renewable energy source within the boundaries of the industrial facility to reduce the energy cost.

**Table 2.** Energy consumption and costs (average of 2020-2021-2022)

Energy (Purchased)	Consumption				Cost		Unit Cost
	Amount	Unit	TOE	Total%	\$	Total%	\$/ TOE
Electricity (purchased)	7,327,940.0	kWh	630.20	16.13	1,983,764.23	43,4%	3,147.83
Coal	15,977.0	Ton	3,195.4	81.77	2,529,340.37	55,3%	791.56
Natural gas	91,233.0	Sm <sup>3</sup>	75.27	1.93	51,547,848.60	1,1%	684.84
Diesel	8,000.0	Lt	6.77	0.17	9,101.85	0,2%	1,344.44
<b>Total</b>			<b>3,907.64</b>	<b>100</b>	<b>2,046,943.27</b>	<b>100</b>	<b>5,968.67</b>

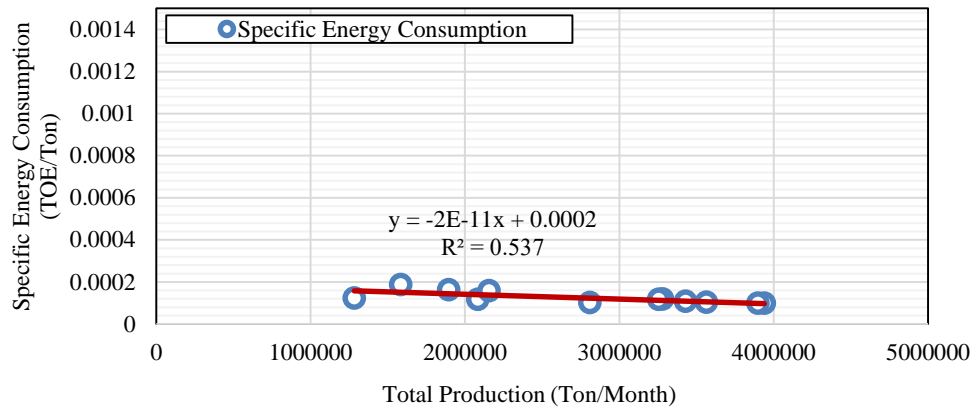
In order to determine the total amount of energy used in the factory, it is necessary to take into account the changes in production as well as consumption, and for this purpose, the ‘Specific Energy Consumption’ for each month should be calculated. Specific energy consumption is the amount of energy used to obtain a unit of product and can be expressed by Equation 1. SEC is specific energy consumption [TOE/Ton], EC is energy consumption [TOE] and P is production [Ton].

$$SEC = EC / P \quad (1)$$

Performance evaluation is done by regularly comparing the expected energy usage with the actual energy

consumption values. SEC values can be used to evaluate this. These are especially important for monitoring the impact of various operating conditions on factory production performance. The growth of SEC indicates poor performance and unnecessarily increased energy consumption. Figure 8 shows the specific energy consumption and total production diagram of the industrial facility in 2022. It has been determined that as the total production increases in the industrial facility, the specific energy consumption decreases, and this indicates that the performance of the industrial facility is good.





**Figure 8.** Total production and specific energy consumption in 2022

### 2.3. Simulation tool description

RETScreen Software is software used worldwide to evaluate energy production, cost analysis and greenhouse gas emission reductions for renewable energy technologies (Clean Energy Project Analysis).

### 2.4. PV system description and components

-Electrical load

The annual electrical energy consumption of the industrial facility is 7,327.94 MWh equivalent to 630 TOE. This consumption amount constitutes 16.13% of the total annual energy consumption of the facility. Electric energy consumption costs 1,983,764.2 \$ per year. The cost of electrical energy consumption constitutes 43.4% of the annual total energy consumption cost. The annual electricity consumption cost of the industrial facility is 3,147.83 \$/TOE. With the efficiency enhancing project, it is aimed to generate some of the electrical energy needs of the facility with renewable energy sources, to save money and to reduce CO<sub>2</sub> emissions. There is an area of 4,550 m<sup>2</sup> suitable for PV system installation in the roof areas of the facility.

-PV system design

The technical properties of PV module are shown at Table 3. Photovoltaic panels are flat plate monocrystalline type, with a lifetime of around 25 years, being specified the capital price is 950 \$/kW.

**Table 3.** Technical properties of PV module

Properties	Value
Cell type	Monocrystalline
Power	455 W
Maximum Power	1000 V/1500 V DC
Voltage	
Maximum Power	9.60 A
Current	
Open Circuit	50-40 V
Voltage	
Short Circuit	11.43 A
Current	
Efficiency	20.14 %
Number of cells	72
Power rating	0 W / 5 W
Working range	-40°C ~ +85°C
Dimensions	2096 x 1039 x 35 mm
Area	2.275 m <sup>2</sup>
Warranty	25 Years
Power tolerance	0 ~ 5 W
Weight	19 kg
Front surface	Low iron tempered glass
	3.2 mm
Cable	4 mm <sup>2</sup> (IEC)/12AWG(UL), 900 mm
Certificate	IP67

**Table 4.** PV system technical specifications

Proposed case power system		
Solar tracking mode	-	Fixed
Slope	°	32
Azimuth	°	0
Annual solar radiation - horizontal	MWh/ m <sup>2</sup>	1.43
Annual solar radiation - tilted	MWh/ m <sup>2</sup>	1.58
Photovoltaic		
Type	-	mono-Si
Power capacity	kW	910
Efficiency	%	20
Nominal operating cell temperature	°C	45
Temperature coefficient	% / °C	0.4
Total solar collector area	m <sup>2</sup>	4,550
Number of total solar collectors	piece	2,000
Miscellaneous losses	%	6.98
Inverter		
Efficiency	%	95
Capacity	kW	100x9
Miscellaneous losses	%	3.0
Summary		
Capacity factor	%	14.8
Electricity exported to grid	MWh	1,183

The features of the designed PV system are shown in Table 4. The tilt angle of the PV modules to be installed on the roof of the industrial facility is fixed and 32°. There are 2000 PV panels in the energy production system.

### 3. Results and Discussion

Figure 9 shows the pre-application energy consumption and energy costs ratios in the industrial facility, and Figure 10 shows the post-application energy consumption and energy costs. 16.1% of the energy

consumed in the industrial facility is electrical energy and electrical energy is purchased. With the PV system installation, an average of 16.14% of the electrical energy consumed will be produced and 7% savings will be made in energy costs. Table 6 shows the monthly electrical energy and monthly earnings produced by the PV system. Figure 11 shows the monthly electrical energy and solar radiation produced by the PV system. Table 5 shows the monthly electrical energy produced by the PV system and monthly earnings. The capacity factor of the system is 14.8%. Electric energy costs produced and purchased are shown in Figure 12.

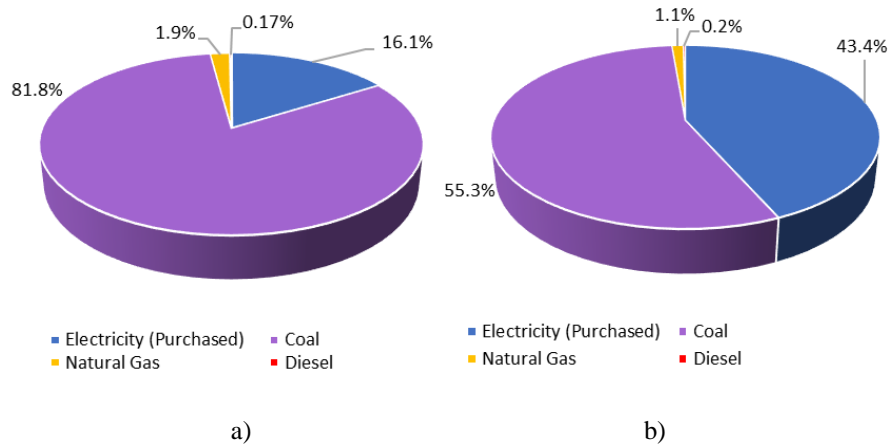


Figure 9. Before PV installation a) Energy consumption and b) Energy costs rates

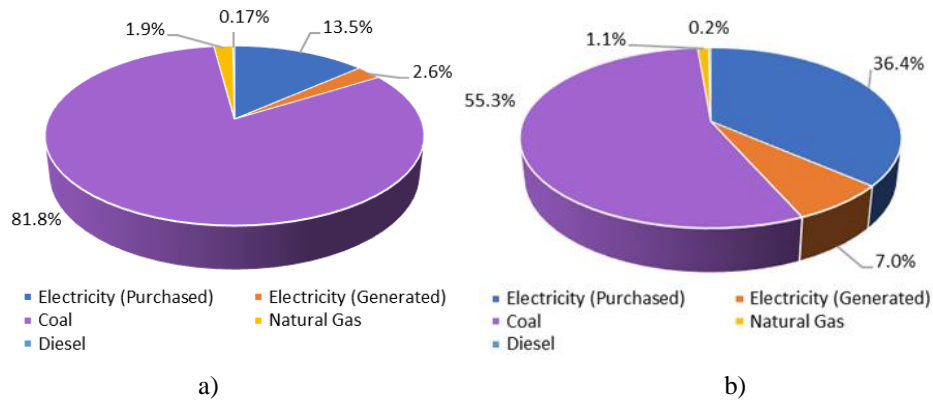


Figure 10. After PV installation a) Energy consumption and b) Energy costs

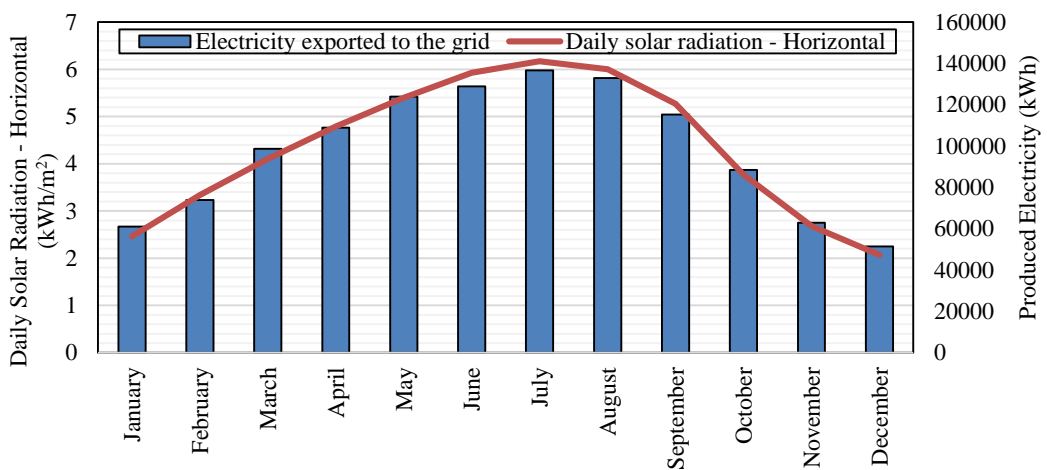
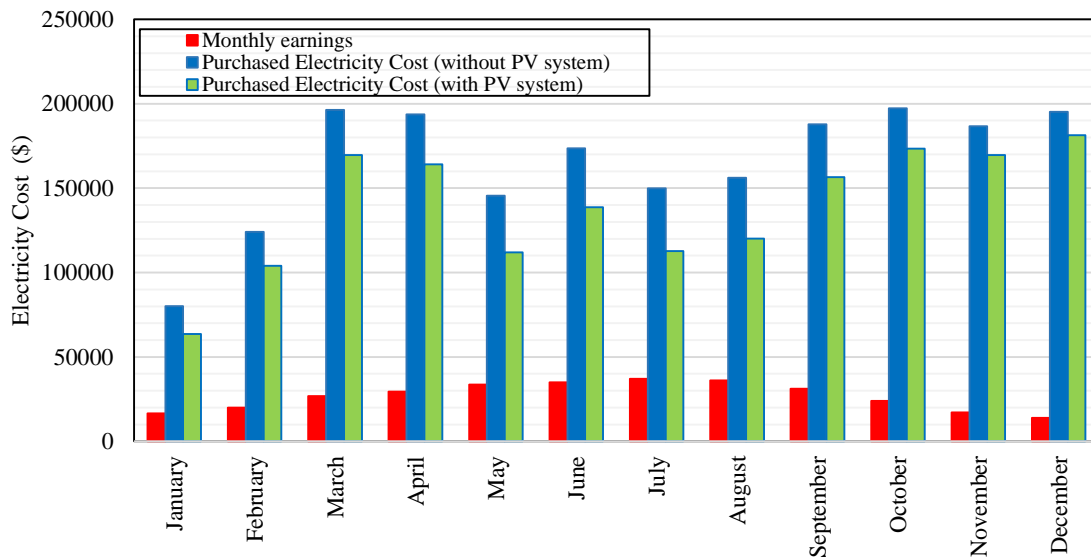


Figure 11. Monthly electrical energy and solar radiation produced by the PV system

**Table 5.** Monthly electrical energy produced by the PV system and monthly earning

Month	Electricity exported to grid		Monthly earning
	(kWh)	TOE	(\$)
January	61,050.0	5.25	16,547.93
February	73,920.0	6.36	20,036.42
March	98,610.0	8.48	26,728.77
April	108,830.0	9.36	29,498.96
May	123,880.0	10.65	33,578.34
June	128,940.0	11.09	34,949.88
July	136,690.0	11.76	37,050.56
August	132,900.0	11.43	36,023.26
September	115,310.0	9.92	31,255.40
October	88,480.0	7.61	23,982.98
November	62,940.0	5.41	17,060.23
December	51,460.0	4.43	13,948.51
Annual	1,183,000.0	101.74	318,376.66



**Figure 12.** Electric energy costs produced and purchased

The electrical energy values and costs purchased before the PV system installation in Table 6 and after the PV system installation in Table 7 are given. With the installation of the PV system, a total of 318,376.66 \$ financial gain is achieved annually. Figure 13 shows

the monthly solar energy utilization rate (solar fraction). The annual average rate of solar energy utilization of the PV system is 20%.

**Table 6.** Purchased electrical energy and costs (without PV system)

Month	Purchased Electrical Energy (kWh)		Purchased
	Energy (kWh)	Energy (TOE)	Electricity Cost (\$)
January	295,599.1	25.42	80,123.75
February	457,691.8	39.36	124,059.85
March	724,285.8	62.29	196,321.58
April	714,615.3	61.46	193,700.34
May	536,785.2	46.16	145,498.53
June	640,580.8	55.09	173,632.90
July	552,875.4	47.55	149,859.87
August	575,775.9	49.52	156,067.17
September	692,804.7	59.58	187,788.46
October	728,097.3	62.62	197,354.71
November	688,479.7	59.21	186,616.16
December	720,348.3	61.95	195,254.30
Annual	7,327,940.0	630.20	1,986,277.64

**Table 7.** Purchased electrical energy values and costs (with PV system)

Month	Electricity (kWh)		Electricity (TOE)		Purchased
	Purchased	Produced	Purchased	Produced	Electricity Cost (\$)
January	234,549.1	61,050.0	20.171	5.250	63,575.82
February	383,771.8	73,920.0	33.004	6.357	104,023.44
March	625,675.8	98,610.0	53.808	8.480	169,592.81
April	605,785.3	108,830.0	52.097	9.359	164,201.38
May	412,905.2	123,880.0	35.510	10.654	111,920.19
June	511,640.8	128,940.0	44.001	11.089	138,683.02
July	416,185.4	136,690.0	35.792	11.755	112,809.30
August	442,875.9	132,900.0	38.087	11.429	120,043.91
September	577,494.7	115,310.0	49.664	9.917	156,533.06
October	639,617.3	88,480.0	55.007	7.609	173,371.73
November	625,539.7	62,940.0	53.796	5.413	169,555.93
December	668,888.3	51,460.0	57.524	4.426	181,305.79
Annual	6,144,940.0	1,183,000.0	528.461	101.737	1,665,619.09

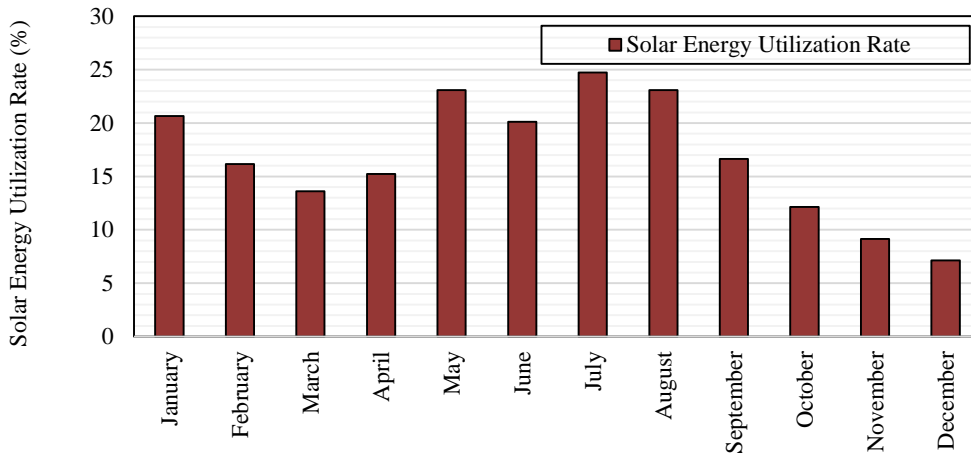


Figure 13. Utilization rate of solar energy (solar fraction)

**3.1. Economic analysis**

It is envisaged that the planned investment will be made with the own budgetary resources of the industrial facility. Table 8 contains PV system information. The PV system is designed as a roof application with a power of 910 kW. Table 10 includes the study savings. With the PV system installation, 1,183.0 MWh/year (101.737 TOE/year) energy savings and 318,376.66 \$/year cost savings will be achieved. The payback period of the system is 2.7 years. Figure 14 shows the PV system cumulative balance diagram. Figure 15 and

Figure 16 show the monthly average earning and expense. Table 9 contains the necessary data for the economic evaluation of the study.

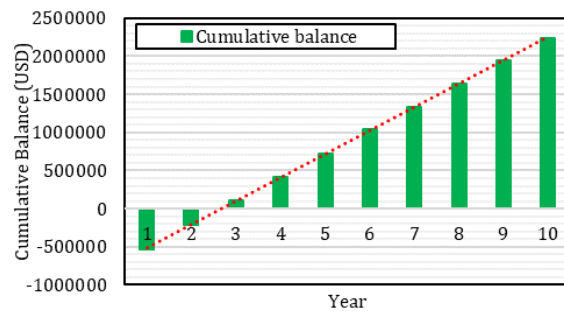


Figure 14. PV system cumulative balance

Table 8. PV system information

PV system information	
Study	910 kW Roof PV Solar Energy System
Electricity Purchase Unit Price	0.27 \$/kWh
Distribution Price Unit Price	0.026 \$/kWh
Annual Consumed Electricity	675,000.00 kWh
System Installed AC Power	910.00 kW
System Installed DC Power	910.00 kW
Annual Electricity Generation Potential	1,183,000.00 kWh
Unit Price	950.00 \$/kW
Investment Cost	864,500.00 \$
Investment Value Equity Ratio / Amount	100.00% / 864,500.00 \$
Depreciation Period of Investment (Month / Year)	32 months / 2.7 years
10 Year Total Savings Amount	3,100,908.68 \$
Performance Time of PV Power Plant	25 years

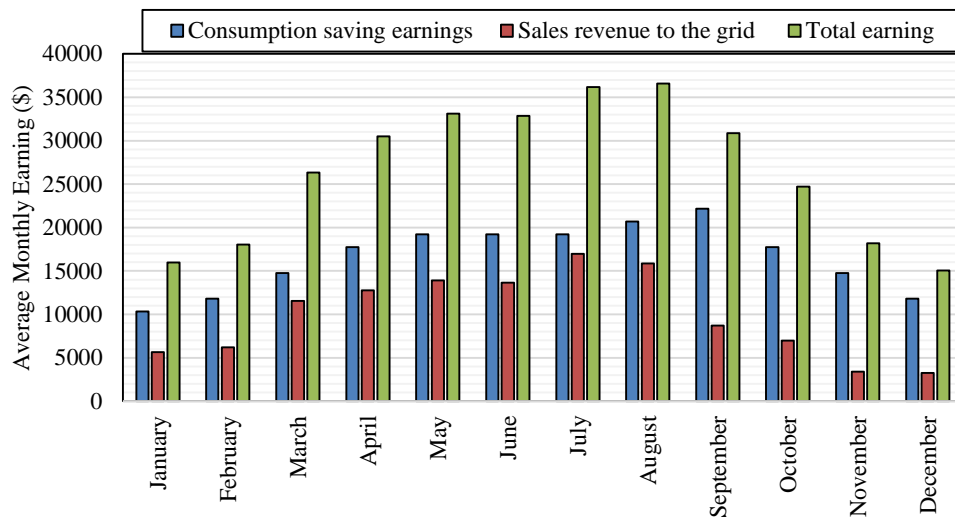


Figure 15. Average monthly earning

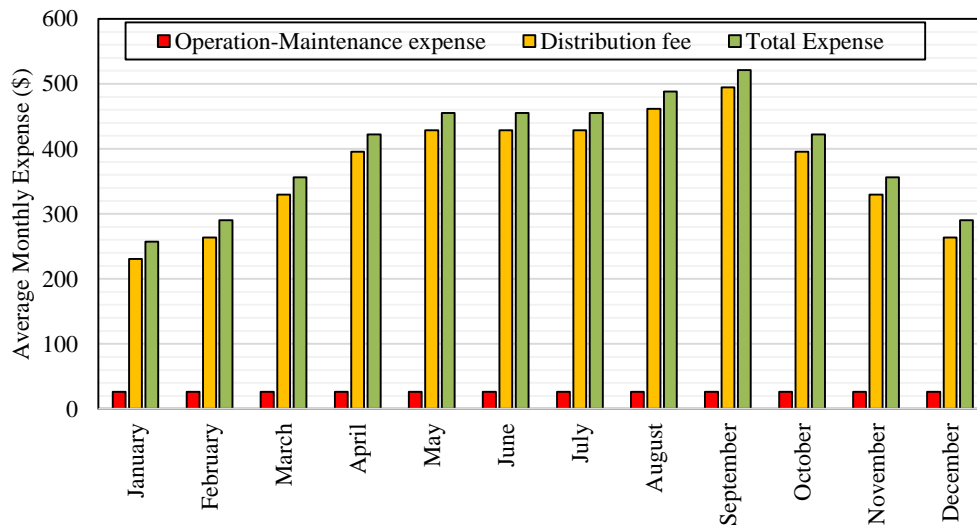


Figure 16. Average monthly expenses

Table 9. Necessary data for the economic evaluation

Economic evaluation	
Investment cost (\$)	864,500.0
Consumption saving earning (\$)	199,472.3
Sales revenue to the grid (\$)	118,904.4
Total earning (\$)	318,376.7
Operation-Maintenance expense (\$)	316.6
Distribution fee (\$)	4,452.5
Total expense (\$)	4,769.1
Scrap value (\$)	216,125.0
Discount rate	10%
Project life	25 years

### 3.2. Impact Analysis

Impact analysis is a process in which the significant impacts of the PV system analysed in the study on the environment are identified. It is used to determine the extent to which carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other greenhouse gas emissions released into the atmosphere are reduced by PV system installation. The effects of the proposed application on the environment or other equipment and systems, and the CO<sub>2</sub> emission reduction due to the savings to be made are given in Table 10.

**Table 10.** Impact analysis of the PV system

Emission Analysis	Unit	Value
Country - region	-	Turkey
GHG emission factor	tCO <sub>2</sub> /MWh	0.459598
Produced electricity	MWh	1,183.0
Net annual GHG emission reduction	tCO <sub>2</sub>	543.7

Annual net GHG emissions reductions equivalent to 543.7 tCO<sub>2</sub> equivalent to 99.6 unused cars and pickup trucks.

#### 4. Conclusions

In order to meet a part of the energy needs of industrial facilities, energy efficiency-enhancing practices are carried out by establishing electricity generation systems based on renewable energy sources, which are established within a maximum of ten kilometers from their facilities.

The following is the study's main conclusion:

-By installing a solar PV system with a capacity of 910 kW on the roof of the industrial facility in Edirne, Turkey, 1,183.0 MWh/year electrical energy can be produced annually.

-Thus, 20% of the electricity need of the facility will be produced using renewable energy sources and the emission of 543.7 tCO<sub>2</sub> to the atmosphere will be prevented.

-The payback period of the system is 2.7 years.

-The average annual earning of the system is 318,376.66 \$/year and its annual expense is 4,769.13 \$/year.

While making the economic analysis of the system payback period method, net present value method, benefit/cost method and internal rate of return methods

are used. According to each cost analysis method, the PV system study in the industrial facility is acceptable.

To ensure the continuity of the positive effect after the PV system installation, the personnel responsible for the system should be assigned and the personnel should be trained in PV system operation and maintenance. The system should be examined with periodic checks to be made on a regular basis. After the installation of the PV system, the performance of the system should be determined by measuring data such as electrical values and temperature on the system for the first two years and making system analysis. At the same time, since the temperature significantly affects the PV panel efficiency, the efficiency reduction due to the temperature increase can be calculated by measuring the panel surface temperatures.

#### Acknowledgement

-

**Conflict of Interest:** The author has no conflicts of interest to declare

**Data Sharing Statement:** Data available on reasonable request.

**Author Contributions:** Concept, design, execution, material supplying, data acquisition, data analysis/interpretation, critical review: H.A.

**Funding:** The authors declared that this study has received no financial support.

#### ORCID

Hacer Akhan, 0000-0002-7896-6441

#### References

AEO, (2018). Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf> [accessed July 29, 2018].



- Andrews, R., Johnson, E., (2016). Energy use, behavioural change, and business organizations: reviewing recent findings and proposing a future research agenda. *Energy Res. Social Sci.*, 11, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.09.001>.
- Backlund, S., Broberg, S., Ottosson, M., Thollander, P., (2012). Energy efficiency potentials and energy management practices in Swedish firms (5-055-12), ECEEE Ind. Summer Study, 669–677.
- Chang, S., Cho, J., Heo, J., Kang, J., Kobashi, T., (2022). Energy infrastructure transitions with PV and EV combined systems using techno-economic analyses for decarbonization in cities. *Applied Energy*, 319, 119254.
- Cheng, H., Hu, X., Zhou, R., (2019). How firms select environmental behaviours in China: the framework of environmental motivations and performance. *J. Clean. Off. Prod.*, 208(20), 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.096>.
- Clean Energy Project Analysis, 2005. Third Edition RETScreen Engineering & Cases Textbook. RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre. Canada.
- Farangi, M., Asl Soleimani, E., Zahedifar, M., Amiri, O., Poursafar, J., (2020). The environmental and economic analysis of grid-connected photovoltaic power systems with silicon solar panels, in accord with the new energy policy in Iran. *Energy*, 202,117771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.117771>.
- Karlsson, M., Gebremedhin, A., Klugman, S., Henning, D., Moshfegh, B., (2009). Regional energy system optimization – potential for a regional heat market. *Appl Energy*, 86(4), 441–451.
- Klugman, S., Karlsson, M., Moshfegh, B., (2009). A Swedish integrated pulp and paper mill – energy optimisation and local heat cooperation. *Energy Pol.*, 37(7), 2514–24.
- Kumar, R., Rajoria, C.S., Sharma, A., Suhag, S., (2021). Design and simulation of standalone solar PV system using pvsyst software: A case study. *Mater. Today Proc.*, 46, 5322–5328. <http://dx.doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.785>.
- Marimon, F., Casadesús, M., (2017). Reasons to adopt ISO 50001 Energy Management System. *Sustain. Times.*, 9, 1740. <https://doi.org/10.3390/su9101740>.
- Marshman, D.J., Chmelyk, T., Sidhu, M.S., Dumont, G.A., (2010). Energy optimization in a pulp and paper mill cogeneration facility. *Appl Energy*, 87, 3514–3525.
- Martin, R., Muûls, M., de Preux, L.B., Wagner, U.J., (2012). Anatomy of a paradox: management practices, organizational structure and energy efficiency. *Environ. Econ. Manag.*, 63, 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2011.08.003>.
- Mukisa, N., Zamora, R., Lie, T.T., (2019). Feasibility assessment of grid-tied rooftop solar photovoltaic systems for industrial sector application in Uganda. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 32, 83–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2019.02.001>
- Neves, F.O., Salgado, E.G., Beijo, L.A., (2017). Analysis of the environmental management system based on ISO 14001 on the American continent. *J. Environ. Manag.*, 199, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.049>
- Obeng, M., Gyamfi, S., Derkyi, N.S., Kabo-bah, A.T., Peparah, F., (2020). Technical and economic feasibility of a 50 MW grid-connected solar PV at UENR nsoatre campus. *J. Clean. Prod.*, 247, 119-

159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119159>
- Owolabi, A.B., Nsafon, B.E.K., Roh, J.W., Suh, D., Huh, J.S., (2019). Validating the techno-economic and environmental sustainability of solar PV technology in Nigeria using RETScreen experts to assess its viability. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 36, 100542. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2019.100542>.
- Rajput, S.K., Dheer, D.K., (2023). Forecasting power-factor reductions in rooftop PV-integrated industrial power systems: Mathematical modelling and experimental validation. *Sustainable Energy. Grids and Networks*, 33, 100974. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100974>
- Rudberg, M., Waldemarsson, M., Lidestam, H., (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*, 104, 487-496.
- Sajid, J., Sajid, M.B., Ahmad, M.M., Kamran, M., Ayub, R., Ahmed, N., Mahmood, M., Abbas, A., (2022). Energetic, economic, and greenhouse gas emissions assessment of biomass and solar photovoltaic systems for an industrial facility. *Energy Reports*, 8, 12503–12521.
- Schulz, V., Stehfest, H., (1980). Regional energy supply optimization with multiple objectives. *Eur J Operat Res.*, 17(3), 302–12.
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., (2016). Energy management in industry: a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *J. Clean. Prod.*, 112, 3692–3708
- Sola, A.V.H., Mota, C.M.M., (2020). Influencing factors on energy management in industries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119263.
- Statista. Worldwide existing capacity of solar PV. 2020. <https://www.statista.com/statistics/264629/existing-solar-pv-capacity-worldwide/>.
- Thollander, P., Danestig, M., Rohdin, P., (2007). Energy policies for increased industrial energy efficiency: evaluation of a local energy program for manufacturing SMEs. *Energy Pol.*, 35(11), 5774–5783.
- Thollander, P., Ottosson, M., (2010). Energy management practices in Swedish energy intensive industries. *J Clean Prod.*, 18, 1125-1133.
- Tiller, S.R., (2012). Organizational structure and management systems. *Leadersh. Manag. Eng.*, 2(1), 20-23.
- Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., Harnisch, J., (2009). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Eff.*, 2, 109–123.
- Yin, R.K., (2009). Case study research: design and methods. 4th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Inc. <https://earth.google.com/web/search/edirne/@41.66887542,26.57332484,48.8153462a>, <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study> Market Report Series. IEA/OECD. <https://retscreen-database> <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>

## Experimental Optimization of Surface Roughness in Milling of AISI 304 Stainless Steel on A CNC Vertical Machining Center

Beyza AVCI<sup>1</sup>, Serdar Osman YILMAZ<sup>2</sup> ve İbrahim Savaş DALMIŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Domeks Makine Anonim Şirketi, Tasarım Merkezi, Çerkezköy, Tekirdağ, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Çorlu, Tekirdağ, TÜRKİYE

**Cite this article as:** Avci, B., Yılmaz, S. O., Dalmiş, İ. S., (2024). Experimental Optimization of Surface Roughness In Milling of AISI 304 Stainless Steel on A CNC Vertical Machining Center, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(2) 117-128.

### Highlights

- Studies show that the use of coolant fluid has a negative effect on surface roughness, leading to an increase in roughness rather than an improvement in surface quality.
- The results obtained from validation experiments align with the calculated confidence interval values, indicating that the Taguchi method has been effectively used in the experimental design and optimization processes.
- Experimental results demonstrate that the feed rate (F) is the most influential factor affecting surface roughness.

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 6, 2024 Accepted: December, 23 2024	One of the most critical factors influencing the service life of machine elements is the condition of their surfaces. This study examines the impact of machining parameters on surface roughness during the milling of AISI 304 stainless steel. Experimental work was conducted using the Taguchi L18 design of experiments, and variations in surface roughness were systematically analyzed. Optimal machining conditions were determined based on experimental findings. The results indicate that surface roughness values obtained under dry machining conditions were lower compared to those achieved with the use of coolant. Furthermore, a comparison of experimental data and predicted Ra values revealed a strong agreement, validating the reliability of the Ra prediction model. Finally, the effect of cutting parameters on Ra was comprehensively analyzed.
<b>Keywords:</b> AISI 304; Milling; Surface Roughness.	

## AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin CNC Dik İşleme Merkezinde Frezelenmesinde YüzeY Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 6 Aralık 2024 Kabul: 23 Aralık 2024	Makine elemanlarının hizmet ömrünü etkileyen en kritik faktörlerden biri yüzeylerinin durumudur. Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz çeliğın frezelenmesi sırasında işleme parametrelerinin yüzeY pürüzlülüğüne etkisi incelenmektedir. Deneysel çalışma, Taguchi L18 deney tasarımı kullanılarak yürütölmüş ve yüzeY pürüzlülüğündeki değıişimler sistematik olarak analiz edilmiştir. Deneysel bulgulara dayanarak optimum işleme koşulları belirlenmiştir. Sonuçlar, kuru işleme koşulları altında elde edilen yüzeY pürüzlülüğü değıerlerinin, soğutma sıvısı kullanımıyla elde edilen değıerlere kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, deneysel verilerle öngörölen Ra değıerlerinin karşılaştırılması güçlü bir uyum ortaya koymuş ve Ra tahmin modelinin güvenilirliğini doğrulamıştır. Son olarak, kesme parametrelerinin Ra üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> AISI 304; Frezeleme; YüzeY Pürüzlülüğü.	

## 1. Introduction

Stainless steels are increasingly being used in various fields such as medicine, aviation, nuclear energy, food, and defense industries. Modifications in their composition, made to meet the mechanical and chemical properties required for specific applications, significantly affect their machinability. The high tensile strength, corrosion resistance, low thermal conductivity, ductile nature, and the presence of high amounts of strength-enhancing elements like chromium, nickel, and molybdenum are primary factors that make machining stainless steel challenging. Additionally, the tendency of stainless steel to work hard during machining is a critical issue that complicates manufacturing processes. Consequently, the difficulties in machinability pose significant challenges for manufacturers (Anonymous, 1997; Bahadur, Kumar, and Chowdhury, 2004).

AISI 304 stainless steel, despite its low machinability due to its properties, is widely used in the manufacturing industry. The primary goal of manufacturing is to transform raw materials into finished products, employing various technological methods in the process. Machining (e.g., turning, milling) is one of these methods, which removes material in the form of chips to achieve the desired shape (Belejchak, 1997; Kasap, 2001). In the manufacturing industry, the primary objective is to produce parts of the desired quality at minimum cost and in the shortest possible time. Among the modern manufacturing methods developed for this purpose, milling is one of the most commonly used techniques (Dilipak and Yılmaz, 2012; Yılmaz, 2009).

Incorrect selection of cutting parameters can lead to the loss of workpieces and the wear of cutting tools, causing financial losses. Surface quality, which plays a crucial role in determining the functionality of a product, can enhance the wear resistance and fatigue strength of materials. However, it can also significantly

impact production costs (Guvercin and Yildiz, 2018; Uğur, 2019).

Therefore, measuring and characterizing surface roughness is of great importance for optimizing machining processes. In the literature, various studies have been conducted on such optimizations using AISI 304 stainless steel.

Bodur (2022) examined the effects of cutting speed, feed rate, and depth of cut parameters on surface roughness and power consumption during turning of AISI 304 stainless steel, conducting a detailed statistical analysis of these effects. The results showed that the feed rate plays a significant role in surface quality, while all three parameters were found to be decisive in terms of power consumption (Bodur, 2022). Özbek et al. (2017) compared the machinability of AISI 304 and AISI 316 stainless steels using uncoated tungsten carbide cutting tools in turning experiments. The study, which found that AISI 316 steel is more difficult to machine than AISI 304, highlighted differences between the two materials in terms of surface roughness and cutting tool wear (Özbek, Çiçek, Gülesin, and Özbek, 2017).

Kuram (2016), focusing on the performance of coated cutting tools, studied the effects of different coating types on surface roughness, tool wear, and cutting forces during milling of AISI 304 stainless steel. The experiments showed that TiCN + TiN-coated tools provided the best performance, while AlTiN-coated tools resulted in the highest wear and surface roughness values (Kuram, 2016). Similarly, Tekaslan et al. (2011) experimentally measured cutting forces during turning operations and compared these values with theoretical models. The study emphasized that theoretical calculations did not exactly match the experimental results and that experimental methods were more reliable (Tekaslan, Gerger, Günay, and Şeker, 2011). Tekaslan et al. (2008) investigated the surface roughness of AISI 304 stainless steel samples

processed with different cutting parameters and noted that the optimal cutting speed was between 50-75 m/min. The study also showed that surface roughness deteriorated as the feed rate increased. It was concluded that appropriate cutting parameters should be selected to improve surface quality and reduce tool wear (Tekaslan, Gerger, & Şeker, 2008).

Although AISI 304 stainless steel has a wide range of industrial applications, studies on milling in the literature are relatively scarce. In this study, AISI 304 stainless steel was machined using parameters determined by the Taguchi method, both under wet and dry conditions, on a CNC milling machine. The study aims to investigate surface roughness and the parameters affecting surface roughness.

## 2. Material and Method

### 2.1. Test Pieces

For the experiments, AISI 304 stainless steel, with a hardness value ranging between 200-220 HV (Vickers Hardness), was used as the main material. The dimensions of the test pieces are presented in Figure 1. Its chemical composition and mechanical properties are provided in Tables 1 and 2, respectively.

### 2.2. Machinery and Equipment

The research investigated the effect of processing parameters on the surface quality of face milling of AISI 304 steel. In the experiments, a Frontier MCV 650 brand 3-axis CNC machining center with a motor power of 10 kW and a maximum spindle speed of 15,000 rpm was used. The experiments utilized an ER32UM D18 tool holder along with a 3-flute end mill featuring a 20 mm diameter and a length of 100 mm. The end mill's cutting edges were equipped with OKE

APKT1035PDSR tungsten carbide inserts used for stainless steel and steel application as shown in Figure 1. APKT1035 inserts are widely used standard inserts in the milling operations for the manufacturing industry. The overall dimensions of these inserts are 10x6.7x3.5 mm.



**Figure 1.** Milling Machine, Tool Holder, and Cutting Insert.

Two different processes were performed during the experiments: some were conducted using coolant, while others were performed as dry machining (without coolant).

The CNC machining coolant consisted of specially formulated chemical additives designed for optimal compound concentration.

The coolant mixture ratios were determined according to the manufacturer's recommendations to ensure the best lubrication and cooling properties. This controlled environment allowed for a consistent comparison between dry and wet machining processes. The experiments aimed to analyze how the presence or absence of coolant impacts surface roughness under varying cutting conditions.

**Table 1.** Chemical Composition of AISI 304 Stainless Steel (Şahin, Cakan, Tutar, and Şahin, 2023)

Si	C	P	Mn	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	Fe
0.280	0.014	0.006	1.830	0.009	17.490	7.370	0.520	0.370	≈ 0	Balance

**Table 2.** Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel

Hardness (HV)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (min. %)
200-220	515-740	205	60

### 2.3. Experimental Parameters

The experiments were conducted in two different modes: using wet and dry machining. The machining parameters are provided in Table 3. The cutting parameters used in the experiments were selected by considering the catalog values of the OKE APKT1035PDSR hard metal inserts mounted on the end mill and the preliminary experiments. For the experimental design, the Taguchi L18 orthogonal array was applied.

In this study, the Taguchi L18 ( $2^1 3^3$ ) orthogonal array (OA) was used. The experimental design included 18 cutting operations involving two different cooling methods, three cutting speeds (3000, 3500, and 4000 m/min), three feed rates (750, 1000, and 1250 mm/min), and three cutting depths (0.1, 0.15, and 0.2 mm). Based on the surface roughness values obtained after the experiments, S/N (Signal-to-Noise) ratios were calculated using the "smaller-is-better" equation.

**Table 3.** Machining Parameters and Levels

Parameters	Tensile Strength (MPa)	Level		
		1	2	3
Coolant	A	1 (Wet)	2 (Dry)	-
Speed (1/min)	B	3000	3500	4000
Feed rate, (mm/min)	C	750	1000	1250
Depth of cut (mm)	D	0,1	0,15	0,2

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

### 2.4. Measuring Devices and Methods

The surface roughness values (Ra) obtained during the experiments were measured using a Mitutoyo SJ-210 surface roughness measurement device, by the DIN EN ISO 16610-21 standard (Figure 2). The surface roughness measurements were based on the average of five different readings taken from each sample, which were then used for statistical analysis.

**Figure 2.** Surface Roughness Measurement Device

### 3. Results and Discussion

According to the experimental plan, the first 9 experiments were conducted using coolant, with varying cutting speeds, feed rates, and cutting depth values. The subsequent experiments, from 9 to 18, were performed under dry machining conditions. For both

coolant-assisted and dry conditions, a new cutting insert was used for each cutting speed.

### 3.1. Surface Roughness

The surface roughness results obtained from the experiments are presented in Table 4.

### 3.2. Determination of the optimum cutting condition

The optimal cutting performance in milling operations was determined using Signal-to-Noise (S/N) ratio analysis. This analysis facilitated the identification of delta statistics and ranking based on the results. The average results are presented in Table 5, where cutting speed ranked first (Rank 1) and was identified as the most influential factor on surface roughness. It was followed by spindle speed, cutting depth, and finally, the cooling factor in terms of their impact on surface roughness.

As summarized in Table 5, the S/N ratio analysis highlights the varying effects of different cutting parameters on surface roughness during milling operations. The rankings reveal the relative importance of these parameters in shaping the desired cutting performance outcomes.

The effects of cutting factors on Ra (surface roughness) are illustrated in Figure 3. The factors shown in the graph are the two most influential factors on Ra, determined based on variance analysis results.

Figure 4 displays the main effects plot for the mean S/N ratios of surface roughness (Ra). According to Figure 4, the second level of cooling ( $A_2$ ), the third level of spindle speed ( $B_3$ ), the first level of feed rate ( $C_1$ ), and the second level of cutting depth ( $D_2$ ) yield the minimum Ra values. Based on the mean analysis (Table 5), the levels of the variables ( $A_2$ ,  $B_3$ ,  $C_1$ ,  $D_2$ ) are the optimum levels for achieving minimum Ra. This is also evident in the main effects plot for the S/N ratio presented in Figure 4.

The study demonstrated the positive effect of dry cutting on surface roughness. This effect is believed to be related to the low thermal conductivity of stainless steel. During dry machining, heat is largely transferred to the chips, which helps prevent excessive temperature increases in the machining zone. The absence of coolant also aids in avoiding sudden temperature fluctuations, which is thought to improve surface quality. Coolants, on the other hand, can negatively affect surface morphology and tool geometry due to rapid cooling and thermal shocks. A review of the literature revealed that researchers such as Nguyen et al. (2020); Shelar and Shaikh (2018); Chockalingam and Wee (2012) and Ozcelik, Kuram, and Simsek (2011) have reported findings consistent with the results of this study.

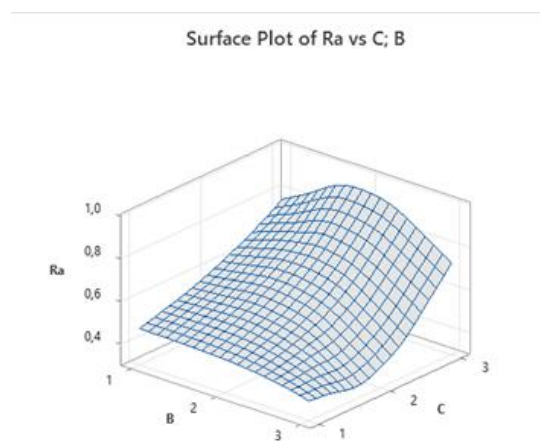


Figure 3. The Effect of Cutting Factors on Surface Roughness (Ra)

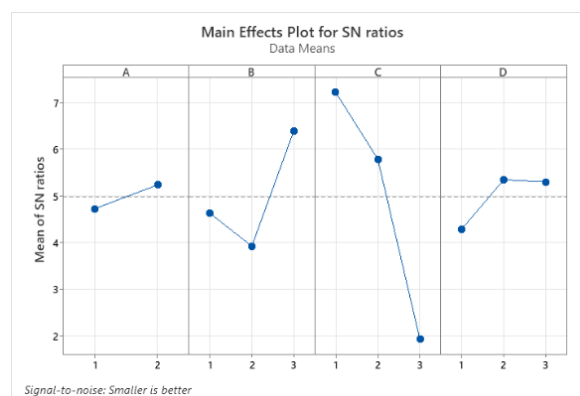


Figure 4. Response Graph for S/N Ratios of Surface Roughness (Ra)

**Table 4.** Experimental Surface Roughness Results and Calculated S/N Ratios

Test No	A	B	C	D	Surface roughness ( $\mu\text{m}$ )	S/N Ratio (dB)	Tahmini Ra
1	1	3000	750	0,1	0,521	<b>5,6566</b>	0,512733
2	1	3000	1000	0,2	0,454	<b>6,8512</b>	0,516833
3	1	3000	1250	0,15	0,705	<b>3,0387</b>	0,816200
4	1	3500	750	0,1	0,523	<b>5,6333</b>	0,574000
5	1	3500	1000	0,2	0,583	<b>4,6836</b>	0,578100
6	1	3500	1250	0,15	0,932	<b>0,6154</b>	0,877467
7	1	4000	750	0,15	0,450	<b>6,9280</b>	0,327867
8	1	4000	1000	0,2	0,435	<b>7,2302</b>	0,435000
9	1	4000	1250	0,1	0,814	<b>1,7832</b>	0,779800
10	2	3000	750	0,2	0,420	<b>7,5267</b>	0,430456
11	2	3000	1000	0,1	0,710	<b>2,9724</b>	0,583022
12	2	3000	1250	0,15	0,827	<b>1,6457</b>	0,779356
13	2	3500	750	0,15	0,395	<b>8,0725</b>	0,472522
14	2	3500	1000	0,2	0,639	<b>3,8873</b>	0,579656
15	2	3500	1250	0,1	0,935	<b>0,5875</b>	0,924456
16	2	4000	750	0,2	0,337	<b>9,4422</b>	0,329422
17	2	4000	1000	0,1	0,353	<b>9,0544</b>	0,481989
18	2	4000	1250	0,15	0,643	<b>3,8385</b>	0,678322

### 3.3. Analysis of Variance (ANOVA)

The primary purpose of using Analysis of Variance (ANOVA) in this research was to identify the significant effects of milling parameters on the performance characteristics of machined surfaces (Bilge and Motorcu, 2017). This study employed ANOVA to examine how cooling, spindle speed, feed rate, and cutting depth influence surface roughness. The analysis was conducted at a 5% significance level and within a 95% confidence interval.

In ANOVA, the significance of control factors is determined by evaluating the F-values associated with each factor. The ANOVA results for surface roughness are summarized in Table 6. The analysis revealed that, based on the percentage contribution rates, feed rate (F) was identified as the most influential factor affecting surface roughness, contributing 70.04%.

In summary, this study used ANOVA as a statistical tool to determine the significant effects of various milling parameters on surface roughness. The results presented in Table 6 highlight the substantial impact of coolant usage on performance characteristics, emphasizing its dominant role in shaping the properties of machined surfaces.

### 3.4. Regression analysis

Regression analysis is a crucial tool for modeling and analyzing relationships between a dependent variable and one or more independent variables. In this study, regression analysis was used to derive equations for predicting surface roughness. These predictions were formulated within the framework of a linear model. The calculated linear equations related to surface roughness are presented in Table 7.



**Table 5.** Response Table for Signal to Noise Ratios: Averages and Importance Levels for Surface Roughness

Level	A	B	C	D
1	4,713	4,615	<b>7,210</b>	4,281
2	<b>5,225</b>	3,913	5,780	<b>5,337</b>
3		<b>6,379</b>	1,918	5,290
Delta	0,512	2,466	5,292	1,055
Rank	4	2	1	3

**Table 6.** Analysis of Variance (Ra)

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cooling 1 On/ 2 Off	1	0,22%	0,001401	0,001401	0,17	0,692
S (1/min)	2	12,73%	0,080605	0,040303	4,77	0,035
F (mm/min)	2	70,04%	0,443446	0,221723	26,24	0,000
a (mm)	2	3,66%	0,023148	0,011574	1,37	0,298
Error	10	13,35%	0,084509	0,008451		
Total	17	100,00%				

**Table 7.** Regression Equation for Ra

Cooling 1 On / 2 Off			
1	Ra (µm) =	0,400 - 0,0505 S (1/min) + 0,1840 F (mm/min) - 0,0323 a (mm)	(2)
2	Ra (µm) =	0,382 - 0,0505 S (1/min) + 0,1874 F (mm/min) - 0,0323 a (mm)	(3)

This study focused on predicting surface roughness by utilizing regression analysis to establish predictive equations. These equations, formulated within the structure of a linear model, provide a quantitative basis for predicting surface roughness and are summarized in Table 7.

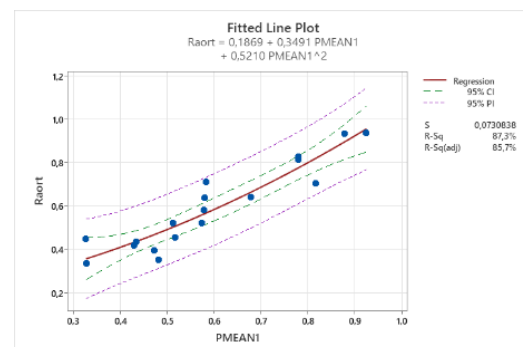
### 3.5. Fitted plots assessment

Figure 5 illustrates the fit plot comparing predicted and actual Ra values. This graph highlights the deviation between the actual and predicted values. Specifically, the proximity of the residuals to the diagonal line indicates the significance of the model. This closeness suggests that the model adequately represents the data and confirms its statistical relevance.

Furthermore, the R<sup>2</sup> value calculated for the relationship between predicted and actual Ra responses was found to be 0.87, while the P-value from the

ANOVA for regression was determined to be 0.002, indicating a statistically significant difference. These coefficients demonstrate a strong linear relationship between the two response variables.

An R<sup>2</sup> value of 87% for Ra emphasizes a substantial correlation between the predicted and observed values, highlighting the model's reliability in capturing and explaining variability in the data.



**Figure 5.** Comparison of Predicted Values and Experimental Results for Ra Output Parameters

### 3.6. Validation Experiments and Determination of Quality Losses

In the Taguchi method, validation experiments and the identification of quality losses constitute the final stage of the process, aimed at analyzing quality characteristics (Samtaş and Korucu, 2019). The main objective of validation experiments is to verify the accuracy of the results obtained during the analysis. These experiments aim to evaluate specific combinations of factors and levels, determined by the cumulative effects of the control factors. (Hill and Lewicki, 2006; Mandal, Doloi, Mondal, and Das, 2011). The contribution of each factor is accounted for in the total effect.

In the Taguchi optimization method, conducting at least one validation experiment is mandatory to verify the optimized conditions (Roy, 1990). The lowest surface

$$\eta_g = \bar{\eta}_g + (A_2 - \bar{\eta}_g) + (B_3 - \bar{\eta}_g) + (C_1 - \bar{\eta}_g) + (D_2 - \bar{\eta}_g) \quad (6)$$

$$Ra_c = 10^{-\eta_g/20} \quad (7)$$

**Table 8.** Regression Equation for Ra

	Level	Ra ( $\mu\text{m}$ )	S/N (dB)
Initial combination	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	0,337	9,44
Optimal combination (experimental)	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	0,333	9,55
Optimal combination (prediction)	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	0,347	9,19

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1;v_e} \times V_{ep} \times \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (8)$$

In this context,  $F_{\alpha;1}$ ,  $V_{ep}$  is the F ratio of the significance level  $\alpha$ ,  $\alpha$  is the significance level,  $1 - \alpha$  is the confidence interval,  $V_e$  is the degree of freedom of the error,  $V_{ep}$  indicates the variance of the error,  $r$  represents the number of validation experiments, and  $n_{eff}$  is the number of effectively measured results (Liu, Chang and Yamagata, 2010).

$$n_{eff} = \frac{N}{1+[V_t]} \quad (9)$$

roughness is attained by optimizing the influential factors within the ideal parameter combination. Therefore, considering the individual effects of control factors, the minimum surface roughness value ( $Ra_c$ ) for the A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub> combination (A<sub>2</sub> = Dry machining, B<sub>3</sub> = 4000 rpm, C<sub>1</sub> = 750 mm/min, D<sub>2</sub> = 0.15 mm) is calculated using the following equations (Fowlkes and Creveling, 1995):

Here, A<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>1</sub>, and D<sub>2</sub> represent the S/N ratios at the optimal levels of the factors.  $\bar{\eta}_g$  indicates the average S/N ratio for all factors, while  $\eta_g$  represents the S/N ratio calculated for the optimal levels. Considering these values, the minimum surface roughness value ( $Ra_c$ ) was determined to be 0.347  $\mu\text{m}$ .

Here, N represents the total number of experiments (18), and  $V_t$  is the total degrees of freedom for the process parameters considered in the average calculation, based on Table 5. Accordingly,  $n_{eff}$  was calculated as 2.25 (Pinar, Atik and Çavdar, 2010). For the evaluation conducted at a 95% confidence interval for surface roughness, with  $\alpha=0.05$  and  $V_e=18$ , the F value from the table was determined as  $F_{\alpha;1}$ ,  $V_e=4.96$ . Using Eq. (8) and Eq. (9), the confidence interval (CI) was calculated to be 0.181. The result of the validation experiments for surface roughness, conducted with a

95% confidence interval, is expected to fall within  $(0.347 \pm 0.181) \mu\text{m}$  or between 0.166-0.528  $\mu\text{m}$ . To evaluate the performance of the experimental studies carried out in this research, three validation experiments were conducted using the optimal conditions. In the validation experiments conducted under optimal levels ( $A_2B_3C_1D_2$ ), the surface roughness values were obtained as 0.3, 0.33, and 0.37  $\mu\text{m}$ , respectively, with an average value calculated as 0.33  $\mu\text{m}$ .

Table 8 compares the surface roughness values obtained through experiments and predictions based on the optimal combinations. Additionally, the  $A_2B_3C_1D_3$  combination was selected as the initial combination from the 18 experiments. Table 9 presents the performance comparison between the initial and optimal conditions. The average value obtained from the validation experiments, 0.33  $\mu\text{m}$ , lies within the predicted range of 0.166–0.528  $\mu\text{m}$ . This result confirms that the control factors analyzed in this study are both statistically significant and reliable.

**Table 9.** Performance Comparison Between Initial and Optimal Combination

	Initial combination	Optimal combination	
		Prediction	Verification
Level	$A_2B_3C_1D_3$	$A_2B_3C_1D_2$	$A_2B_3C_1D_2$
$Ra_m (\mu\text{m})$	0,337	$0,347 \pm 0,181$	0,33
Quality loss			%2,5

The quality characteristic of this experiment was improved from 0.337  $\mu\text{m}$  ( $A_2B_3C_1D_3$ , initial combination) to 0.333  $\mu\text{m}$  ( $A_2B_3C_1D_2$ , optimal combination), as indicated in Table 9. The quality losses between the initial and optimal combinations for surface roughness can be determined using the quality loss function ratio. This ratio indicates that for every 3 dB improvement in quality, the quality loss is reduced by half. The quality loss function is computed using the equation shown below. (Fowlkes and Creveling, 1995).

$$\frac{L_{opt}(y)}{L_{ini}(y)} \approx \left(\frac{1}{2}\right)^{\Delta\eta/3} \quad (10)$$

Here,  $L_{opt}(y)$  and  $L_{ini}(y)$  represent the optimal and initial combinations, respectively.  $\Delta\eta$  is the difference between the S/N ratios of the optimal and initial combinations. The difference in S/N ratios, which can be used to evaluate the quality loss for the optimal combination in the verification experiments, was found to be 0,11 [ $\Delta\eta = 0,11 (= 9,55 - 9,44)$ ]. The quality loss

of the verification test was calculated as 0.25 using Equation (10). Thus, the quality loss for the optimal combination is only 2,5% of that of the initial combination. Therefore, the quality loss for surface roughness was reduced by 97,5% using the Taguchi method for optimization.

#### 4. Conclusion

This study investigates how the surface roughness of AISI 304 stainless steel is affected by different surface machining conditions during milling operations.

The following results were obtained:

According to the experimental results, the optimal combination of surface milling parameters was determined as  $A_2B_3C_1D_2$  ( $A_2 =$  Dry machining,  $B_3 =$  4000 rpm,  $C_1 =$  750 mm/min,  $D_2 =$  0.15 mm).

Experimental results showed that the feed rate (F) was the most influential factor on surface roughness, with a contribution rate of 70.04%. This was followed by

spindle speed (S (rpm)) with a contribution rate of 12.73%.

The observed values from the validation experiments fell within the calculated confidence interval (CI), demonstrating the successful application of the Taguchi method.

Using the optimal combination, the quality loss of the surface roughness was reduced to 2.5%.

The initial surface roughness value of 0.337  $\mu\text{m}$  was reduced to 0.333  $\mu\text{m}$  through validation experiments conducted under optimal conditions.

The study showed that the use of coolant fluid had a negative effect on surface roughness, leading to an increase in roughness instead of improving surface quality.

Across all experiments, the highest surface roughness ( $R_a = 0.9346$ ) was observed under wet machining conditions with a cutting speed of 3500 rpm, a feed rate of 1250 mm/min, and a cutting depth of 0.1 mm.

#### Acknowledgment

We would like to thank the Design Center of DOMEKS Inc. for their valuable support in the experiments.

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest to be disclosed.

**Data Sharing Statement:** Data may be shared upon reasonable request.

#### Author Contributions:

Dalmış (ISD); Formal analysis–ISD; Investigation–Serdar Osman Yılmaz (SOY); Experimental performance–SOY; Data collection–Beyza Avci (BA); Processing–ISD and BA; Literature review–BA; Writing–ISD and BA; Review and editing–SOY and SD.

**Financial Support:** The authors declared that this study did not receive any financial support.

#### ORCID

Beyza Avci, 0000-0003-3504-8453

Serdar Osman Yılmaz, 0000-0001-7593-6135

İbrahim Savaş Dalmış, 0000-0002-4401-9155

#### References

- Anonymous. (1997). Modern metal cutting: A practical handbook. Sandvik Coromant Co. Inc.
- Bahadur, A., Kumar, B. R., & Chowdhury, G. S. (2004). Evaluation of changes in X-ray elastic contents and residual stress as a function of cold rolling of austenitic steels. *Materials Science and Technology*, 20(3), 387–392.
- Belejchak, P. (1997). Machining stainless steel. *Advanced Materials & Processes*, 23–25.
- Bilge, T., & Motorcu, A. R. (2017). Kompakt laminat kompozitlerin parmak freze ile delinmesinde takım aşınmasının yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık üzerine etkileri. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 180–192.
- Bodur, M. S. (2022). AISI 304 paslanmaz çelik talaşlı şekil verme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini azaltmaya yönelik istatistiksel yaklaşım. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11 (2), 1–11.
- Chockalingam, P., & Wee, L. H. (2012). Surface roughness and tool wear study on milling of AISI 304 stainless steel using different cooling conditions. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(8), 1386-1391.
- Dilipak, H., & Yılmaz, V. (2012). AISI 1050 çeliğinin karbür takımlarla frezelenmesinde oluşan titreşimlerin incelenmesi ve istatistiksel analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 285–294.

- Fowlkes, W. Y., & Creveling, C. M. (1995). Engineering methods for robust product design: Using Taguchi methods in technology and product development. Prentice Hall.
- Guvercin, S., & Yildiz, A. (2018). Optimization of cutting parameters using the response surface method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36 (1), 113–121.
- Hill, T., & Lewicki, P. (2006). *Methods and applications: A comprehensive reference for science, industry, mining*. StatSoft.
- Kara, F. (2018). Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel. *Materiali in Tehnologije/Materials and Technology*, 52(2), 195–200.
- Kasap, M. (2001). AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinde en uygun kesme parametrelerin ve işleme şartlarının deneysel olarak araştırılması (Master's thesis). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kuram, E. (2016). AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde farklı kaplama malzemelerinin takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 433–443.
- Liu, Y. T., Chang, W. C., & Yamagata, Y. (2010). A study on optimal compensation cutting for an aspheric surface using the Taguchi method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3, 40–48.
- Mandal, N., Doloi, B., Mondal, B., & Das, R. (2011). Optimization of flank wear using zirconia toughened alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and regression analysis. *Measurement*, 44(10), 2149–2155.
- Nguyen, T. T., Mia, M., Dang, X. P., Le, C. H., & Packianather, M. S. (2020). Green machining for the dry milling process of stainless steel 304. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(5), 881-899.
- Özbek, N. A., Çiçek, A., Gülesin, M., & Özbek, O. (2017). AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 43–49.
- Ozcelik, B., Kuram, E., & Simsek, B. T. (2011). Comparison of dry and wet end milling of AISI 316 stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(8), 1041-1049.
- Pınar, A. M., Atik, E., & Çavdar, U. (2010). AA 7075 alüminyum alaşımının frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme oranı, işleme deseni ve talaş derinliği işlem parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.
- Ross, P. J. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Roy, R. K. (1990). *A primer on the Taguchi method. Competitive Manufacturing Series*. Van Nostrand Reinhold.
- Samtaş, G., & Korucu, S. (2019). Temperlenmiş alüminyum 5754 alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin Taguchi metodu kullanılarak optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 45–60.
- Shelar, A. B., & Shaikh, A. M. (2018). Optimization of process parameters in milling of stainless steel 316 using coated insert and MEGA coated inserts. *Int. J. Emerg. Tech. Eng. Res*, 6, 17-26.

- Şahin, E. C., Cakan, B. G., Tutar, M., & Şahin, U. O. (2023). AISI 304 paslanmaz çeliğin elektrik direnç nokta kaynağı parametrelerinin Taguchi yöntemiyle çok amaçlı optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 324–335.
- Tekaslan, Ö., Gerger, N., & Şeker, U. (2008). AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 3–12.
- Tekaslan, Ö., Gerger, N., Günay, M., & Şeker, U. (2011). AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin titanyum karbür kaplamalı kesici takım ile tormalama işleminde kesme kuvvetlerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 135–144.
- Uğur, L. (2019). 7075 alüminyum malzemesinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün yanıt yüzey yöntemi ile iyileştirilmesi. *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (1), 326–335.
- Yılmaz, V. (2009). Frezeleme uygulamalarında işleme parametrelerinin sebep olduğu titreşimlerin incelenmesi (Master's thesis). *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*

## Artificial Neural Network Models of Cross-Linked Polyethylene

Rabia KORKMAZ TAN<sup>1\*</sup>, Hakan ÇANTA<sup>2</sup>, Reşat MUTLU<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Electronics Department, Vocational School of Technical Sciences, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup>Unika Cable, Çerkezköy, Tekirdağ, Türkiye

<sup>3</sup>Electrical and Electronics Engineering Department, Çorlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye

**Cite this article as:** Korkmaz Tan, R., Çanta, H., Mutlu, R. (2024). Artificial Neural Network Models of Cross-Linked Polyethylene, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 25(2), 129-141.

### Highlights

- Temperature and Frequency Dependent Model of XLPE Permittivity
- Modeling of XLPE Permittivity with ANN
- Performance Optimization of ANN Models

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 9, 2024 Accepted: December 19, 2024	Cross-linked polyethylene (XLPE) is the most widely used insulator material in high-power cables. The complex electrical permittivity of the XLPE layer mostly determines the leakage admittance of the cable and the propagation speed of the signal. The complex electrical permittivity of XLPE depends on not only operating frequency but also temperature. In this study, Artificial neural networks (ANNs) are used to model the complex electrical permittivity parts of the XLPE. The structure of the ANNs is optimized. It has been found that the optimized ANN can predict the behavior of the XLPE with an $R^2$ value of 0.99.
<b>Keywords:</b> Power cables; Insulation models; Cross-linked polyethylene; ANN model; Parameter prediction.	

### Çapraz Bağlı Polietilenin Yapay Sinir Ağı Modelleri

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 9 Aralık 2024 Kabul: 19 Aralık 2024	Çapraz bağlı polietilen (XLPE), yüksek güçlü kablolarda en yaygın kullanılan yalıtkan malzemedir. XLPE katmanının kompleks elektriksel geçirgenliği, genellikle kablonun kaçak admittansını ve sinyalin yayılma hızını belirler. XLPE'nin karmaşık elektriksel geçirgenliği, sadece çalışma frekansına değil, aynı zamanda sıcaklığa da bağlıdır. Bu çalışmada, XLPE'nin karmaşık elektriksel geçirgenlik bileşenlerini modellemek için çok katmanlı algılayıcılar Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmıştır YSAların yapısı optimize edilmiştir. Optimize edilmiş YSA'nın XLPE'nin davranışını 0.99 $R^2$ değeriyle tahmin edebildiği bulunmuştur.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Yüksek gerilim kabloları; Yalıtım modelleri; Çapraz bağlı polietilen; YSA modeli; Parametre tahmini.	

## 1. Introduction

Artificial neural networks (ANNs) are circuits or programs that mimic biological neurons (Haykin, 1998). ANNs are commonly used for classification, modeling, prediction, and estimation (Haykin, 1998; Liang and Bose, 1996). They are also used to model the results of industrial processes (Rajagopalan and Rajagopalan, 1996). Communication and power cables are important components of electrical power systems (Moore, 1997). An ANN is used to predict the characteristic impedance and return loss of a communication cable (Öztürk et al. 2020). Similar ANNs are used to compare the performance of two different cable production machines (Öztürk et al. 2019). XLPE is one of the commonly used insulators in power cables (Thue, 2017). Defects, wetting angle, and water-treeing characteristics of XLPE material are examined to achieve optimal performance in cable applications (Uydur et al. 2018; Karhan and Uğur, 2016; Karhan et al. 2021). XLPE permittivity is not constant (Gouda and Matter, 1992). The frequency-dependent complex permittivity of XLPE can be expressed with the Cole-Cole model (Cole and Cole, 1941). XLPE complex permittivity also depends on the temperature (Du et al., 2016). XLPE complex permittivity data has been presented in detail in (Li et al., 2022). Such data can be used to calculate the leakage admittance of a single-core power cable (Çanta et al., 2024). Parameters of aged XLPE cables have been predicted using ANNs (Ge et al., 2022; Arıkan et al., 2022). XLPE defects can also be detected using ANN (Zhou et al., 2023). Partial discharge in cables has been predicted with ANN in (Dessouky et al., 2014). The thermal behavior of XLPE is predicted using an ANN (Wang et al., 2022). The volumetric moisture content of XLPE cable insulation estimation has been made using electric modulus (Das et al., 2022). Machine learning methods have been applied for the prediction of electrical, thermal, and mechanical properties of XLPE cable insulation (Selvamany et al.,

2022; Slimani, et al., 2021; Boukezzi and Boubakeur, 2013).. The UV-aged properties of an XLPE cable insulation have been successfully predicted (Hedir, et al., 25). ANNs can be applied to Polymers and Nanocomposites for prediction, estimation, and classification (Ashok et al., 2024). XLPE cable's life has been predicted using an ANN (Zhang et al., 2020). The dielectric response of an insulator has been estimated by an ANN (Shen, et al., 2021). The study aims to use ANNs to model XLPE complex permittivity instead of using the Cole-Cole permittivity model. Different ANN models of XLPE are optimized for this purpose. ANNs having either one or two outputs with different numbers of hidden layers are tried.

This article is arranged as follows. In the second section, the complex permittivity of XLPE using the measured data is presented. In the third section, an ANN model is made for the complex permittivity of XLPE. This article concludes with the last section.

## 2. The Complex Permittivity of the XLPE Insulator

The leakage calculation of a power cable requires its complex permittivity data for the calculation of the cable leakage capacitance and conductance (Çanta et al., 2024). Such data must present complex permittivity components as a function of not only frequency but also temperature. The leakage current and the complex permittivity of a prism-shaped XLPE block are examined by varying temperature and frequency (Du et al., 2016). The real and imaginary complex permittivity characteristics of XLPE material given in (Du et al., 2016). are reproduced with Getdata program (<https://getdata-graph-digitizer.software.informer.com/>) and shown in Figure 1. The real and complex parts of the permittivity of XLPE depend on its operating frequency ( $f$ ) and temperature ( $T$ ) as shown in Figure 1. XLPE's complex permittivity,  $\epsilon_{XLPE}(f, T)$ , can be expressed as



$$\varepsilon_{XLPE}(f, T) = \varepsilon_0(\varepsilon'(f, T) - j\varepsilon''(f, T)). \quad (1)$$

where  $\varepsilon'$  and  $\varepsilon''$  is the real and imaginary parts of the relative complex permittivity of XLPE, and  $\varepsilon_0$  is the permittivity of free space.

Relaxation models are generally used to describe the dielectric relaxation phenomenon in polymer materials (Cole and Cole, 1941). The Cole–Cole equation given by Kenneth Stewart Cole and Robert Hugh Cole is expressed as

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2)$$

where  $\alpha$  is the power exponent parameter ranging zero to one and allowing the description of different spectral shapes,  $\varepsilon_s$  and  $\varepsilon_\infty$  are the "static" and "infinite frequency" dielectric constants, respectively,  $\omega$  is the angular speed and  $\tau$  is a dielectric relaxation time constant.

The real and imaginary parts of the complex dielectric constant  $\varepsilon^*(\omega)$  are, respectively, given as

$$\varepsilon'(\omega) = \text{real}(\varepsilon^*(\omega)) \quad (3)$$

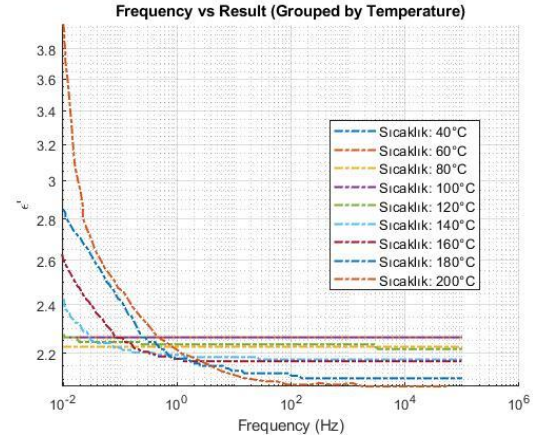
$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2))}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (4)$$

And

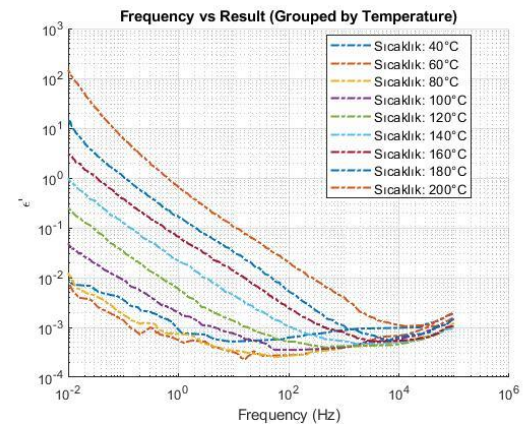
$$\varepsilon''(\omega) = \text{imag}(\varepsilon^*(\omega)) \quad (5)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (6)$$

The relaxation time constant is temperature dependent but, unfortunately, such a model does not represent the temperature dependence of the insulator explicitly. Even if it is expressed as a function frequency, it is quite difficult to curve-fit such a two-variable function even in MATLAB program, and, sometimes, approximations requiring experience are used for this purpose (Wang et al., 2015). A simpler method is needed for this purpose.



(a)



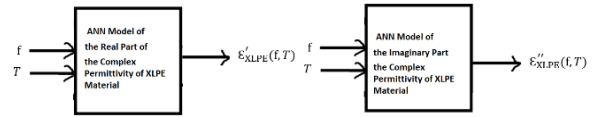
(b)

**Figure 1.** a) The real part of the complex relative permittivity of XLPE  $\varepsilon'$  and b) the imaginary part of the relative complex permittivity of XLPE  $\varepsilon''$  as a function of the operating frequency and temperature (Du et al., 2016).

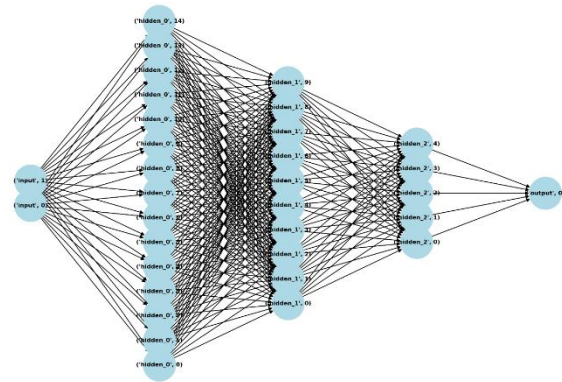
### 3. ANN Models of Complex Permittivity of the XLPE Material

ANNs can be trained to predict the XLPE behavior since ANNs can be used for curve-fitting successfully (Haykin, 1998; Liang and Bose, 1996). In this section, ANN models of the real and imaginary parts of complex permittivity of XLPE material are developed. The Neural Network Toolbox (NNTool) is developed for the MATLAB™ program and offers algorithms, pre-trained models and applications to create, train, visualize and simulate shallow and deep neural networks. The NNTool toolbox of MATLAB is used to predict the electrical parameters in this study. Two

separate ANNs are made: the first ANN's output is the real part of the complex permittivity and the second ANN's output is the imaginary part of the complex permittivity as shown in Figure 2. The inputs of all ANNs are the operation temperature and frequency. Both ANNs are optimized by varying the number of ANN layers, the number of neurons in each layer, and the training algorithm type. The structures of the optimized ANNs of the complex permittivity of XLPE and the selection of the number of hidden layer neurons are shown in Figure 3. The ANN has only two hidden layers. In order to reduce the error and obtain the best results, the number of neurons in the hidden layer is set to the values given in Table 1 after the optimization process.



**Figure 2.** Two ANN models, one with the real part of the complex permittivity as the output and the other with the imaginary part of the complex permittivity as the output



**Figure 3.** The architecture of the optimized ANNs for each XLPE dataset.

**Table 1.** The Structure of optimized ANNs

Type Network	Input Layer	1st Hidden Layer		2nd Hidden Layer		Output Layer		Training Algorithm
	Nb. of Neurons	Nb. of Neurons	Activation Function	Nb. of Neurons	Activation Function	Nb. of Neurons	Activation Function	
MLP	2	15	TANSIG	10	TANSIG	5	PURLING	TRINLM

In the artificial neural network (ANN), the sigmoid function is utilized for activation in the hidden layer, while a linear function is applied in the output layer. The NNTool employs the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm for weight calculation due to its fast and stable training performance compared to other algorithms. Input data, target outputs, and the data acquisition method (matrix) are specified, along with the distribution percentages for training, validation, and testing datasets. These ratios were adjusted throughout the study to improve results.

This model consists of 3 hidden layers, with 15, 10, and 5 neurons in each layer, respectively as shown in Figure 2. This structure processes the data through different layers and learns complex relationships, enabling the model to make more accurate predictions. As the model

progresses from the first hidden layer to the last, the number of neurons decreases. The purpose of designing the model this way is to achieve dimensionality reduction, allowing the model to focus on learning important features. This approach improves the model's ability to generalize, especially when dealing with high-dimensional data.

The visual represents the structure of an artificial neural network with 2 input values and 3 hidden layers. The number of neurons in each layer is as follows:

Input Layer: Composed of 2 neurons. Real data is used at this layer, representing the 2 input features in our data.

First Hidden Layer (Hidden Layer 1): Contains 15 neurons. It processes information from the input layer and passes it to the next hidden layer. The number of neurons in this layer is chosen to transform the input into a more complex representation.

Second Hidden Layer (Hidden Layer 2): Consists of 10 neurons. It further abstracts the information from the first hidden layer, processing it with fewer neurons for more intensive information handling.

Third Hidden Layer (Hidden Layer 3): Has 5 neurons. This layer processes the information from the second hidden layer in a more compact form and passes it to the output layer, facilitating higher-level feature extraction and decision-making.

Output Layer: Consists of 1 neuron and provides the model's final prediction, usually representing the outcome in classification or regression tasks.

Two error histograms are created to compare the distribution of prediction errors on the model's training, validation, and test datasets as shown in Figure 4. Each graph displays error values using 20 bins, with the frequency of error magnitudes shown on the vertical axis. The values on the horizontal axis represent the difference (error) between target values and predictions.

First Graph (First Visual): In the first histogram, most errors are concentrated around zero, indicating that the model's predictions are quite close to the target values in most cases. The errors for training (blue), validation (red), and test (green) datasets all show high density around zero, with only a small portion deviating from zero. This distribution suggests that the model has generally good generalization and balanced performance across all datasets.

Second Graph (Second Visual): This error histogram displays the distribution of prediction errors for the model on training, validation, and test datasets, divided into 20 error bins. The X-axis represents the error values, calculated as the difference between model outputs and target values, while the Y-axis represents the number of samples within each error bin. Most errors are close to zero, indicating that the model's predictions are generally accurate. The most frequent error range is between -0.4327 and 0.4327, with the majority of errors near zero. Blue bars represent training errors, green bars represent validation errors, and red bars represent test errors, indicating consistent performance across all datasets. The orange line at zero represents perfect predictions, and the small spread around this line shows that the model avoids large errors, demonstrating good performance.

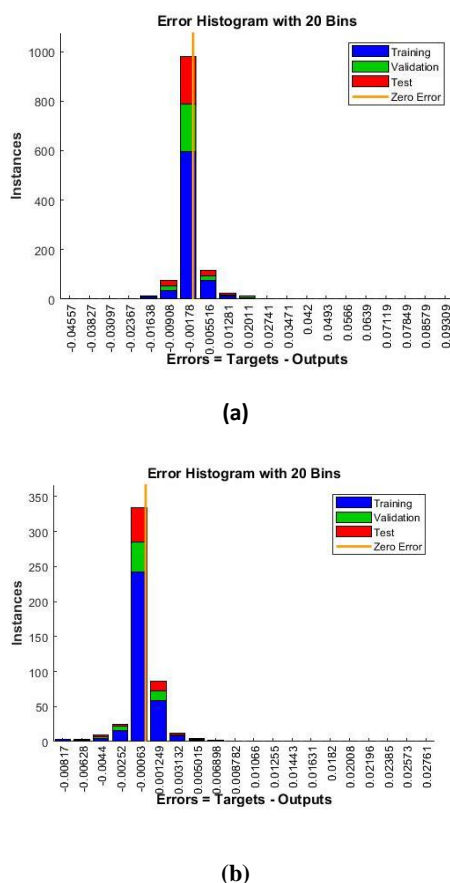
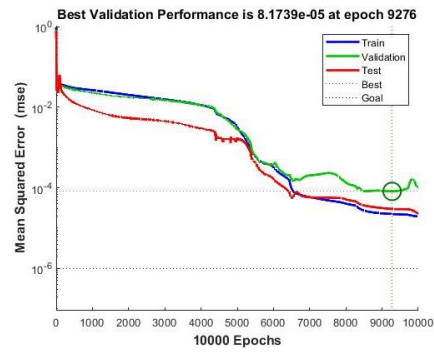


Figure 4. Error histograms of ANN Models of a) the real part ( $\epsilon'$ ) and b) the imaginary part ( $\epsilon''$ ) of the complex permittivity of XLPE

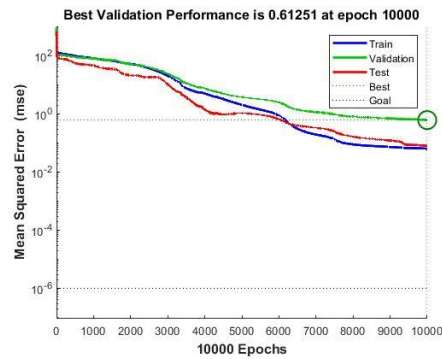
Figure 4 compares the error values (Mean Squared Error - MSE) during the model's training process, illustrating the model's performance across different epochs. In both graphs, the blue line represents training error, the red line represents test error, and the green line represents validation error, while the best validation performance is indicated at the top of each graph.

**Best Validation Performance of XLPE  $\epsilon'$  Graph:** In this graph, the model achieves its best validation performance at the 9276<sup>th</sup> epoch, with an MSE of 8.1739e-05. Initially, the training, validation, and test errors are at a high level, but as the number of epochs increases, these values continuously decrease. After a certain epoch, significant reductions in validation and test errors are observed, especially between epochs 6000 and 9000, where validation performance improves. This indicates that the model has achieved sufficient generalization capability and is performing well.

**Best Validation Performance of XLPE  $\epsilon''$  Graph:** This graph shows how the MSE values for training, validation, and test datasets change over 10,000 epochs. The Y-axis represents the MSE on a logarithmic scale, while the X-axis represents the number of epochs in the training process. The graph indicates that the model reaches its best validation performance at the 10,000<sup>th</sup> epoch, with an MSE of 0.61251. Initially, the error is high for all datasets, but as the number of epochs increases, the MSE values gradually decrease, and the model's performance improves. The flattening of the curves suggests that, beyond this point, further learning yields limited performance gains. This indicates that the model has reached the lowest error level on the validation set and that the training process has successfully been completed.



(a)



(b)

**Figure 5.** Best Validation Performance of ANN Models of **a)** the real part ( $\epsilon'$ ) and **b)** the imaginary part ( $\epsilon''$ ) of the complex permittivity of XLPE

Figure 5 compares the error values (Mean Squared Error-MSE) during the model's training process, illustrating the model's performance across different epochs. In both graphs, the blue line represents training error, the red line represents test error, and the green line represents validation error, while the best validation performance is indicated at the top of each graph.

**Best Validation Performance of XLPE  $\epsilon'$  Graph:** In this graph, the model achieves its best validation performance at the 9276<sup>th</sup> epoch, with an MSE of 8.1739e-05. Initially, the training, validation, and test errors are at a high level, but as the number of epochs increases, these values continuously decrease. After a certain epoch, significant reductions in validation and test errors are observed, especially between epochs 6000 and 9000, where validation performance improves. This indicates that the model has achieved

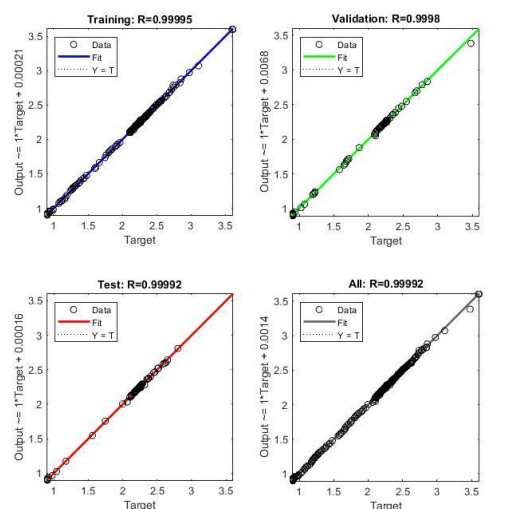
sufficient generalization capability and is performing well.

**Best Validation Performance of XLPE  $\epsilon''$  Graph:** This graph shows how the MSE values for training, validation, and test datasets change over 10,000 epochs. The Y-axis represents the MSE on a logarithmic scale, while the X-axis represents the number of epochs in the training process. The graph indicates that the model reaches its best validation performance at the 10,000<sup>th</sup> epoch, with an MSE of 0.61251. Initially, the error is high for all datasets, but as the number of epochs increases, the MSE values gradually decrease, and the model's performance improves. The flattening of the curves suggests that, beyond this point, further learning yields limited performance gains. This indicates that the model has reached the lowest error level on the validation set and that the training process has successfully been completed.

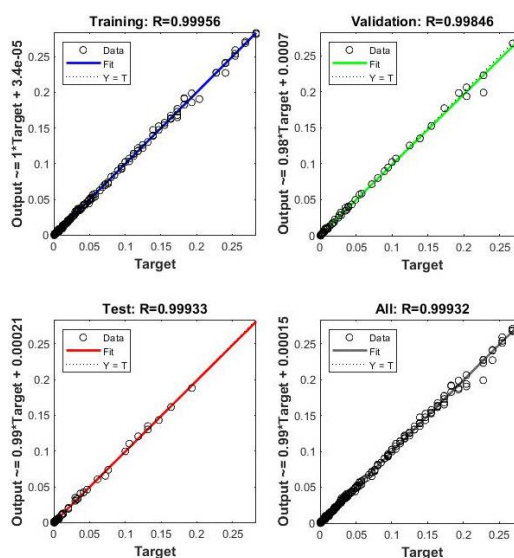
Figure 6 demonstrates how well the model's predicted outputs align with the target values across training, validation, test, and overall datasets. Each graph displays target (actual) values on the horizontal axis and the model's predicted output values on the vertical axis. A black dashed line ( $Y = T$ ), representing the ideal relationship between outputs and targets, is overlaid with colored lines showing the linear fit of the model's predictions.

For the training data, the R values (correlation coefficients) are found to be 0.99995 and 0.99956, indicating that the model's predictions are very close to the targets. The blue line shows that the model's outputs almost perfectly overlap with the actual targets.

For the validation data, the R values are 0.9998 and 0.99846, demonstrating that the model generalizes well on the validation data, accurately predicting target values without overfitting. The green line also nearly coincides with the targets.



(a)



(b)

**Figure 6.** Regression curves of ANN Models of **a)** the real part ( $\epsilon'$ ) and **b)** the imaginary part ( $\epsilon''$ ) of the complex permittivity of XLPE

For the test data, the R values are 0.99992 and 0.99933, showing that the model performs well even on unseen data. This indicates that the model has strong generalization capabilities and can make consistent predictions across different datasets.

Finally, both figures include a fourth graph, which provides a general analysis of the entire dataset, with R values calculated as 0.99992 and 0.99932. This result shows that the model establishes a strong linear relationship across the entire dataset. The high

agreement between predictions and actual values in all graphs suggests that the model performs well and accurately predicts the targets.

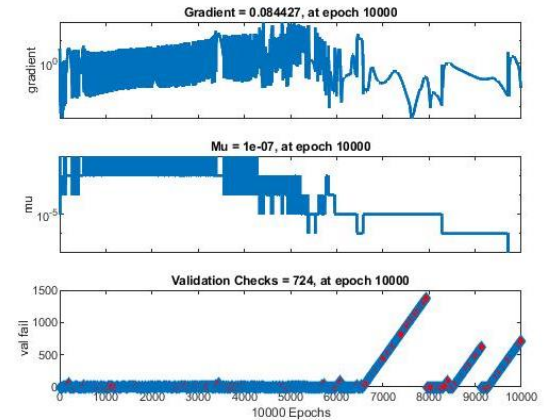
In summary, the model demonstrates strong performance, as evidenced by the high R values and the close alignment between predicted outputs and target values in each graph.

According to the graph, the factors affecting the error bars are as follows: in the top graph, the gradient values initially exhibit high fluctuations but gradually decrease and stabilize over time, indicating that the model encountered optimization issues during the learning process but later began to improve. In the middle graph, the Mu parameter starts at high values and decreases over time, showing that the model achieved more stable learning through adaptive optimization. In the bottom graph, the Validation Checks increase consecutively, indicating that the validation error rises at certain epochs, suggesting a risk of overfitting. This parameter helps detect overfitting and allows the model to stop early. These factors reveal how learning rate, model complexity, and data distribution impact the training process.

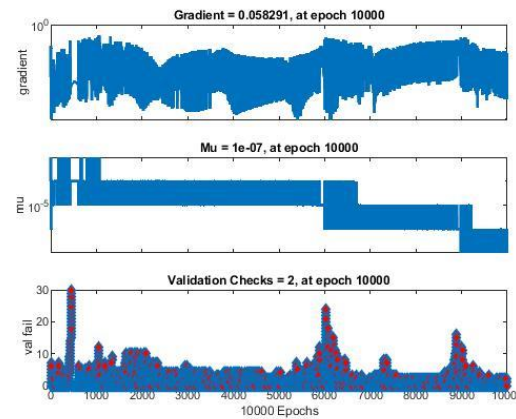
Figure 7 compares the model's state during the training process over 10,000 epochs. Each set consists of three sub-graphs: the first graph shows the gradient magnitude, the second graph displays the "Mu" parameter (adaptation parameter), and the third graph presents the number of validation checks.

**Neural Network Training State of XLPE  $\epsilon'$  Graph:** In the first set of graphs, the gradient value at the end of 10,000 epochs is recorded as 0.084. Although the gradient values fluctuate throughout the training process, there is an overall downward trend. This indicates that the model is gradually approaching the lowest error level and is being optimized. In the second graph, the "Mu" value decreases to  $10e-7$ , signifying that the model is entering a more refined learning phase

by reducing the adaptation rate. In the third graph, the number of validation checks is 724, indicating that the model failed to maintain improvement on the validation set several times during training. This suggests some fluctuations in validation performance, but the model is generally stable.



(a)



(b)

**Figure 7.** Neural Network Training State of ANN Models of **a)** the real part ( $\epsilon'$ ) and **b)** the imaginary part ( $\epsilon''$ ) of the complex permittivity of XLPE

**Neural Network Training State of XLPE  $\epsilon''$  Graph:** This graph shows the changes over time of three main metrics (gradient, Mu, and validation checks) during the training process of a neural network. The gradient plot determines the update speed of model parameters, and values fluctuating between  $10^{-1}$  and 10 indicate that learning is progressing in a controlled and stable manner. The low range of gradients suggests that the model avoids making excessively large updates. In the middle plot, the Mu (adjustment factor) values, which start at a higher level  $10^{-5}$  to ensure stability during

optimization, gradually decrease to a smaller value  $10^{-7}$ . This reduction shows that the model continues learning with finer, smaller steps.

The bottom plot of validation checks monitors the model's performance on validation data. Only two early stopping checks occurred, indicating that validation loss generally decreased steadily or fluctuated minimally. This suggests that the model is well-adapted to the validation data and avoids overfitting. Overall, the graphs indicate that the model undergoes a stable and controlled training process.

The Coefficient of Determination ( $R^2$ ) is a measure that indicates how much of the variance in the dependent variable is explained by the model. It takes values between 0 and 1. If the  $R^2$  value is close to 1, the model fits the data very well, and the relationship between the variables is strong. If it is close to 0, the model is insufficient in explaining the data. The  $R^2$  value is generally used in regression models and is important for evaluating the model's generalization capability.

Mean Absolute Deviation (MAD) represents the average of the absolute deviations between predicted values and actual values. This metric is used to evaluate the magnitude of prediction errors. Small MAD values indicate that the model's predictions are close to the target values. MAD is interpreted through the mean for easy understanding of the error amount.

Mean Squared Error (MSE) is the average of the squared differences between predicted values and actual values. Squaring the differences penalizes larger errors more, making the model more sensitive to minimizing errors. Small MSE values indicate a high accuracy of the model's predictions.

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) represents the average of the absolute errors between predicted values and actual values as a percentage. It is used to evaluate the model's prediction performance in

percentage terms. The lower the MAPE value, the more accurate the model's predictions are.

RMSE (Root Mean Squared Error) is obtained by taking the square root of the MSE and it expresses the magnitude of prediction errors in the original units. RMSE allows for a direct interpretation of the error amount and is sensitive to large errors. Small RMSE values indicate that the predictions are close to the target values.

These concepts are widely used, especially in regression analysis and for evaluating the performance of predictive models such as artificial neural networks. The regression analysis results of this study are presented in Table 2 and Table 3.

The  $R^2$  value for the training set is 0.979, indicating that the model explains 97.9% of the variance in the target variable. This high  $R^2$  value shows that the model fits the training data well and that the learning process has been effective. The low MAD (0.000919) and MSE ( $5.99e-06$ ) values indicate that the model's error rates are very low and that predictions are generally close to the target values. Additionally, the MAPE value is as low as 0.041%, reflecting the model's relatively high accuracy and strong predictive performance on the training data.

The  $R^2$  value for the validation set is 0.994, suggesting that the model can generalize the features learned during training to the validation data effectively. The low MAD (0.002174) and MSE ( $1.05e-05$ ) values indicate that the model's predictions on the validation data are close to the targets, with no signs of overfitting. Although the MAPE value is slightly higher than that of the training set at 0.098%, it is still quite low, indicating high relative accuracy on the validation data.

For the test set, the  $R^2$  value is 0.9998, demonstrating that the model can make highly accurate predictions on new, unseen data. However, the MAD (0.004514) and RMSE (0.008947) values are slightly higher than those

of the training and validation sets, indicating larger errors in some test examples. Although the MAPE value is 0.273%, which is slightly higher than the other datasets, it remains low and reflects good relative accuracy. The high  $R^2$  and low error rates indicate that the model has strong generalization capability on the test set as well.

The  $R^2$  value for the training set is 0.998, indicating that the model explains approximately 99.8% of the variance in the target variable. This suggests that the model fits the training data well and has learned the data effectively. The low MAD (0.000933) and MSE (0.5E-05) values show that most of the model's errors are small. However, the high MAPE in the training set suggests that there are relative errors in some cases, though overall performance remains strong.

For the validation set, the  $R^2$  value is as high as 0.934, indicating that the model generalizes well during training. The low MAD (0.002673) and MSE (2,07E-04) values show that the model's predictions on the validation set are also close to the target values. The MAPE is lower than in the training set, indicating relatively higher accuracy.

In the test set, the  $R^2$  value is 0.996, which is very high, indicating that the model makes accurate predictions on previously unseen data. However, the MAD (0.002673) and RMSE (0.003394) values are higher compared to the validation and training sets, suggesting larger errors in some test examples. Nevertheless, the MAPE value is lower than in other datasets, indicating relatively better accuracy.

**Table 2.** The Performance of single output ANNs for the data of  $\mathcal{E}'$

Set ( $\mathcal{E}'$ )	$R^2$	MAD	MSE	MAPE (%)	RMSE
Training	0,979884	0,000919	5,99E-06	0,040982	0,002448
Validation	0,994232	0,002174	1,05E-05	0,098213	0,003245
Test	0,999806	0,004514	8,01E-05	0,273253	0,008947

**Table 3.** The Performance of single output ANNs for the data of  $\mathcal{E}''$

Set ( $\mathcal{E}''$ )	$R^2$	MAD	MSE	MAPE (%)	RMSE
Training	0,998624	0,000933	0,5E-05	12,3593	0,002234
Validation	0,934651	0,002673	2,07E-04	17,8101	0,014382
Test	0,996515	0,002673	1,2E-05	22,8482	0,003394

The high RMSE indicates that the model's predictions in some test instances show larger deviations, though overall performance remains high.

The calculated MSE (Minimum Square Error),  $R^2$  (Regression), and MAPE values of the components of Complex permittivity. Lewis classifies ANN models with their MAPE value as follows (Lewis, 1982).

- If they have a MAPE value lower than 10%, they are 'very good'.
- If they have a MAPE value between 10% and 20%, they are 'good'.

- If they have a MAPE value between 20% and 50%, they are 'acceptable'.
- If they have a MAPE value higher than 50%, they are 'wrong and inaccurate'.

The accuracy of the ANN prediction can be seen in Tables 2 and 3. The low MAPE values obtained and given in Tables 2 and 3 indicate that the deviation between the actual data and the forecast data is small. However, the ANN model for the data of  $\mathcal{E}''$  has a lower performance than the ANN model for the data of  $\mathcal{E}'$ .



#### 4. The Conclusion

In this study, the complex permittivity of XLPE material is predicted using ANNs. Using an ANN allows easy interpolation of the complex permittivity components of XLPE without the difficulty of curve-fitting of the complex Cole-Cole models. Levenberg-Marquardt method is used in the training of the ANN. A sigmoid function is chosen as the activity function of the perceptrons. A different ANN is used to model each component of the complex permittivity.

It has been found that A three-layer ANN has given better results than a two-layer ANN in the optimization process.

The error in the predicted cable parameters was calculated based on mean absolute percent error (MAPE). The ANN model of the real part of the complex permittivity of XLPE gives a maximum error of 0.273253% while The ANN model of the imaginary part of the complex permittivity of XLPE gives a maximum error of 22.8482%.

ANN usage in modeling XLPE can make modeling of insulators easier without resorting to the well-known permittivity models such as the Cole-Cole, Maxwell-Wagner, Bruggeman, Rosenkranz, Turner, and Stogryn models. The experience gained here can also be used for modeling other types of power cable insulators.

#### Author Contributions

#### Declaration of Competing Interest

The authors declared no conflicts of interest concerning the research, authorship, and/or publication of this article.

#### Acknowledgments

This study has been supported by the research and development center of Ünika Üniversal Kablo Sanayi ve Tic. A.Ş.; Project number: **UPN-2003**.

#### ORCID

*Rabia Korkmaz Tan, 0000-0002-3777-2536*

*Hakan Çanta, 0009-0004-2013-1478*

*Reşat Mutlu, 0000-0003-0030-7136*

#### References

- Arikan, O., Uydu, C. C., & Kumru, C. F. (2022). Prediction of dielectric parameters of an aged MV cable: A comparison of curve fitting, decision tree and artificial neural network methods. *Electric Power Systems Research, 208*, 107892. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107892>
- Ashok, N., Soman, K. P., Samanta, M., Sruthi, M. S., Poornachandran, P., Devi V. G, S., & Sukumar, N. (2024). Polymer and Nanocomposite Informatics: Recent Applications of Artificial Intelligence and Data Repositories. *Advanced Machine Learning with Evolutionary and Metaheuristic Techniques*, 297-322. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-9718-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-99-9718-3_12)
- Boukezzi, L., & Boubakeur, A. (2013). Prediction of mechanical properties of XLPE cable insulation under thermal aging: neural network approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20*(6), 2125-2134. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678861>
- Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *The Journal of chemical physics, 9*(4), 341-351. <https://doi.org/10.1063/1.1750906>
- Çanta, H., Mutlu, R., & Korkmaz Tan, R. (2024). Yeni Üretilen XLPE İzolasyonlu Tek Damarlı Bir Güç Kablosunun Kaçak Empedansının Hesabı. *EMO Bilimsel Dergi, 14*(1), 19-26.
- Das, A. K., Chatterjee, S., Pradhan, A. K., Chatterjee, B., & Dalai, S. (2022). Estimation of moisture content in XLPE cable insulation using electric modulus. *IEEE Transactions on Dielectrics and*

- Electrical Insulation*, 29(3), 1030-1037.  
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3173485>
- Dessouky, S. S., El Faraskoury, A., El-Mekki, S., & El Zanaty, W. (2014). The Optimal Classification of Partial Discharge Defects within XLPE Cable by Using ANN and Statistical Techniques. *Port-Said Engineering Research Journal*, 18(2), 1-7.  
<https://doi.org/10.21608/pserj.2014.45254>
- Du, Y., Geng, P., Song, J., Tian, M., & Pang, D. (2016, September). Influence of temperature and frequency on leakage current of XLPE cable insulation. In *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* (pp. 1-4). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800648>
- Ge, X., Given, M., & Stewart, B. G. (2022, September). Determining accelerated aging power cable spatial temperature profiles using Artificial Neural Networks. In *2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)* (pp. 1-4). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICHVE53725.2022.9961792>  
<https://getdata-graph-digitizer.software.informer.com/>  
(Access date: June 02, 2023)
- Gouda, O. E., & Matter, Z. (1992, August). Effect of the temperature rise on the XLPE dielectric properties. In *[1992] Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems* (pp. 95-98). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/MWSCAS.1992.271325>
- Haykin, S. (1998). *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR.
- Hedir, A., Bechouche, A., Moudoud, M., Tegar, M., Lamrous, O., & Rondot, S. (2020). Experimental and predicted XLPE cable insulation properties under UVRadiation. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(3), 1763-1775. 10.3906/elk-1910-58
- Karhan, M., & Uğur, M. (2016). XLPE izoleli tek damarlı orta gerilim kablolarında elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisinin incelenmesi. *Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016)*, İstanbul.
- Karhan, M., Çakır, M. F., Arslan, Ö., Issı, F., & Eyüpoğlu, V. (2021). XLPE dielektrik malzemelerde elektrik alanının temas açısına ve damlacık şekline etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1747-1760.  
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.700362>.
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*, Butterworth-Heinemann.
- Liang, P., & Bose, N. K. (1996). *Neural network fundamentals with graphs, algorithms, and applications*. Mac Graw-Hill.
- Liu, Y., Wang, H., Zhang, H., & Du, B. (2022). Thermal aging evaluation of XLPE power cable by using multidimensional characteristic analysis of leakage current. *Polymers*, 14(15), 3147.  
<https://doi.org/10.3390/polym14153147>
- Moore, G. F. (Ed.), *Electric cables handbook*. Blackwell Science, UK, 1997, Blackwell Science, UK, 1997.
- Öztürk, P., Alisoy, H., & Mutlu, R. (2019) Yapay Sinir Ağları Kullanarak İkili ve Üçlü Büküm Makinaların Ürettiği CAT 6A U/FTP Kabloların Parametrelerinin Tahmini ve Tahmin Edilen Sonuçların Karşılaştırılması. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 41-51.
- Öztürk, P., Alisoy, H., & Mutlu, R. (2020). CAT 6A U/FTP Data Kablosunun Yüksek Frekans Parametrelerinin YSA ile Tahmin Modeli. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16-30. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.728791>
- Rajagopalan, R., & Rajagopalan, P. (1996, January). Applications of neural network in manufacturing.

- In *Proceedings of HICSS-29: 29th Hawaii International Conference on System Sciences* (Vol. 2, pp. 447-453). IEEE. DOI: [10.1109/HICSS.1996.495430](https://doi.org/10.1109/HICSS.1996.495430)
- Shen, Z., Yang, L., Tang, H., & Lai, Y. (2021). Contact-free dielectric response measurement based on limit fitting by neural network. *IET Science, Measurement & Technology*, 15(6), 499-507. <https://doi.org/10.1049/smt2.12050>
- Slimani, F., Hedir, A., Moudoud, M., DURMUŞ, A., Amir, M., & Megherbi, M. (2021). Prediction of long-term physical properties of low density polyethylene (LDPE) cable insulation materials by artificial neural network modeling approach under environmental constraints. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 29(5), 2437-2449. DOI: 10.3906/elk-2105-27 <https://doi.org/10.3906/elk-2105-27>
- Selvamany, P., Varadarajan, G. S., Chillu, N., & Sarathi, R. (2022). Investigation of XLPE cable insulation using electrical, thermal and mechanical properties, and aging level adopting machine learning techniques. *Polymers*, 14(8), 1614. <https://doi.org/10.3390/polym14081614>
- Thue, W. A. (Ed.). (2017). *Electrical power cable engineering*. Crc Press.
- Uydur, C. C., Arikan, O., & Kalenderli, O. (2018, September). The Effect of insulation defects on electric field distribution of power cables. In *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: [10.1109/ICHVE.2018.8641936](https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8641936)
- Wang, X., Mo, F., Zhang, J., & Zhao, G. (2015). Study on the Parameters of Cole-Cole Model, International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015).
- Wang, Y., Kang, N., Lin, J., Lu, S., & Liew, K. M. (2022). Cross-heating-rate prediction of thermogravimetry of PVC and XLPE cable insulation material: a novel artificial neural network framework. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(24), 14467-14478. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11635-7>
- Zhang, Y., Wu, Z., Qian, C., Tan, X., Yang, J., & Zhong, L. (2020). Research on lifespan prediction of cross-linked polyethylene material for XLPE cables. *Applied Sciences*, 10(15), 5381. <https://doi.org/10.3390/app10155381>
- Zhou, T., Zhu, X., Yang, H., Yan, X., Jin, X., & Wan, Q. (2023). Identification of XLPE cable insulation defects based on deep learning. *Global Energy Interconnection*, 6(1), 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.02.004>



## Afet Sonrası Etkilenenlerin Coğrafi Bilgi Sistemiyle İzlenmesi: Kahramanmaraş Depremi Örneği

Yener TÜREN<sup>1\*</sup>, Eylül MALKOÇ<sup>2</sup> ve Hilmi KUŞÇU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trakya Üniversitesi, Edirne Tek. Bil. MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 22130, Edirne, Türkiye

<sup>2</sup> Trakya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 22130, Edirne, Türkiye

<sup>3</sup> Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 22130, Edirne, Türkiye

**Makale Künye Bilgisi:** Türen, Y., Malkoç, E., Kuşçu, H. (2024). Afet Sonrası Etkilenenlerin Coğrafi Bilgi Sistemiyle İzlenmesi: Kahramanmaraş Depremi Örneği, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 25(2), 143-150

### Öne Çıkanlar

- Afet sonrası acil destek sistemlerinin mekânsal veriye dayalı oluşturulması.
- Coğrafi Bilgi Sistemlerinin karar destek aşamalarında ve dijital tematik harita yapımında kullanılması.
- Afetten etkilenenlerin Coğrafi Bilgi Sistemleri aracılığıyla ihtiyaçlarının ve konumunun tespiti.
- Afetten etkilenenlere ulaşılacak rotaların oluşturulması ve arama-kurtarma faaliyetlerine destek sağlanması.

### Makale Bilgileri

### Öz

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş:  
10 Aralık 2024  
Kabul:  
23 Aralık 2024

#### Anahtar Kelimeler:

Afet Yönetimi;  
Afet Destek Sistemi;  
Coğrafi Bilgi  
Sistemleri;

Coğrafi Bilgi Sistemleri öznitelik verilerini konumsal olarak ve dijital tematik haritalar üzerinde anlık olarak analiz etme imkânı sunar. Bu sayede afet sonrası destek merkezlerinin çok hızlı karar verme ve yönlendirme yapmaları söz konusu olabilmektedir. Çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli deprem sonrası Trakya Üniversitesi öğrencilerinin izlenmesi amaçlanmıştır. Deprem sonrası bölgedeki öğrencilere kısa mesaj gönderilerek, online anketlerle ihtiyaç ve transfer bilgileri konuma dayalı olarak toplanmıştır. Bulut ortamda toplanan verileri anlık olarak veriyi işleyen, verileri dijital veri tabanında saklayan ve dijital tematik harita olarak sunmaya olanak tanıyan ArcGIS-Online yazılımı kullanılmıştır. Bu sayede, afet sonrasında Trakya Üniversitesi bünyesinde kurulan destek merkezinde öğrencilerin ihtiyaçlarının ortaya konması ve karşılanması, onlara ulaşılacak rotaların oluşturulması ve arama-kurtarma faaliyetlerine destek sağlanması gibi birçok işlev karşılanmıştır. Bu çalışmanın diğer doğal afetler (ör. sel, erozyon, yangın) için de uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.

## Monitoring of Affected Individuals After The Disaster Using Geographic Information Systems: The Case of The Kahramanmaraş Earthquake

### Article Info

### Abstract

#### Article History:

Received:  
December 10, 2024  
Accepted:  
December 23, 2024

#### Keywords:

Disaster  
Management;  
Disaster Monitoring  
System;  
Geographic  
Information Systems;

Geographic Information Systems provide the opportunity to analyze attribute data spatially on digital thematic maps in real-time. This allows post-disaster support centers to make quick decisions and directions. In the study, it was aimed to monitor Trakya University students after the earthquake centered in Kahramanmaraş on February 6, 2023. After the earthquake, text messages were sent to the students in the region, and online surveys collected their needs and transfer information based on location. ArcGIS-Online software, which processes the data in real-time in the cloud environment, stores the data in a digital database, and presents it as a digital thematic map, was used. In this way, many functions such as identifying and meeting the needs of students, creating routes to reach them, and supporting search and rescue activities were fulfilled at the support center established within Trakya University after the disaster. This work is also considered to be applicable to other natural disasters (e.g. floods, erosion, fire).

## 1. Giriş

Son dönemlerde, afet yönetimi amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanımı literatürde geniş yer bulmaktadır. Afet ve sonrası yönetimin temelinde şüphesiz kamu güvenliği yer almaktadır (Amdahl, 2001). Bunun en belirgin örneklerinden biri olarak, CBS teknolojilerinin çıkış noktası konumunda yer alan Amerika Birleşik Devletleri'nde meydana gelen, 11 Eylül Dünya Ticaret Merkezi saldırısından sonra acil durum müdahalesi için CBS ve uygulamalarının, kamu güvenliğini riske atan yapay (terör saldırısı vb.) ya da doğal (deprem, sel, erozyon, ormana yangını vb.) karşı kullanılması gösterilebilir (Cutter, 2003). CBS kullanılarak felaketlere ve sonrası oluşan acil durumlara yerel yönetim müdahaleleri (Gunes and Kovel, 2000), acil destek ve arama kurtarma ağlarının geliştirilmesi önemli ölçüde koordine edilebilmektedir (Meissner vd., 2002). Afet sonrası için yerel yönetimlerin bilgi yayma konusunda oluşturdukları acil durum merkezlerinin ve insani yardım çalışanlarının rolünü anlamak ve belirlemek, bu amaçlar için veri toplama ve bilginin rolünü daha iyi anlamak şüphesiz CBS uygulamalarının ve konum bilgilerini belirli bir süre boyunca diğer iş veri kümelerinin özellikleri veya öznitelikleriyle birleştiren Jeouzamsal teknolojilerin olumlu bir getirisi (Comfort, 2000).

## 2. Afet Yönetimine Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin Katkısı

Sürekli artan nüfusa sahip dünyamızdaki afetlerin büyüklüğü ve sıklığı da artmaktadır. Hükümetler, sivil toplum kuruluşları ve afet müdahale kurumları, afetleri hafifletmek, afetlere hazırlanmak, müdahale etmek ve afetlerden kurtulmak için afet süreçlerini ve sonuçlarını etkin bir şekilde yönetme eğilimindedir. Etkili afet yönetimi ve müdahale, birçok kaynaktan gelen bilgi ve verilerin hızlı kullanımını gerektirir. Afet sırasında ve sonrasında hızlı değerlendirme ve analiz için dijital verileri sorunsuz bir şekilde entegre etme ve mekânsal olarak ilişkilendirmede Jeo-uzamsal teknolojiler paketi

(CBS, Uzaktan Algılama, GPS ve İnternet vb.) giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Afet yönetimi için CBS kullanımında ilerlemeler kaydedilse de teknolojiyi uygulama ve CBS verilerinin analiz için en iyi şekilde nasıl kullanılacağı her an gelişmeye açık bir konudur. Bu nedenle, her ne kadar istenmeyen bir durum olsalar da yaşanan her bir yapay ya da doğal afet özellikle internet tabanlı CBS'nin afetler için nasıl kullanılacağını daha iyi anlamak için yeni bir öğretilerdir (Hewitt, 1997). İnternetin CBS uygulamaları ile entegrasyonu, üç boyutlu gerçek zamanlı acil durum gibi alanlara uygulanmaktadır (Kwan and Lee, 2005). Acil kaçış yolları için internette haritaların sunulması (Hardin, 1998), hatta imar planlarında yer alan ada ve parsel bilgilerinin vektörel hale getirilip altlık olarak kullanılması (Taşkaya, 2022) ve yerel afet yönetimi için mobil CBS ve dijital video kullanımı bu alanlara örnek verilebilir (Montoya, 2003).

## 3. İnternet Tabanlı Coğrafi Bilgi Sistemi Yazılımlarının Önemi

Öte yandan çevrimiçi haber raporlama, acil durum bilgi hizmetleri gibi resmi ağlar ve gayri resmi sosyal iletişim ağları felaketin ilk elden anlatıldığı, fotoğraf ve videoların yayınlandığı bir platform geliştirmiştir (Kodrich and Laituri, 2006). Dünyanın dört bir yanında yaşayan insanlar internet erişimine sahip olmaları koşuluyla, afetler sonrası ortaya çıkan insanlık trajedisini öğrenme fırsatına sahiptirler ve bu da küresel bir topluluk duygusunu teşvik etmektedir (Kodrich and Laituri, 2006). Bu tartışmanın temelinde insanların internete erişimi olduğu varsayımı yatmaktadır. Bağlanabilirlik, özellikle İnternet CBS'nin ve genel olarak İnternet erişiminin çok önemli bir yönüdür [Laituri and Kodrich, 2008]. Bununla birlikte, afet sırasında ve sonrasında, yeni ve yenilikçi sosyo-teknolojik ağların oluşturulması yoluyla dijital kaynaklara, becerilere ve yeteneklere yüksek düzeyde erişim, havuzlama ve paylaşım ortaya çıkmaktadır (Ivefors, 1997). Bu ağ etkileşimleri, bulut veri

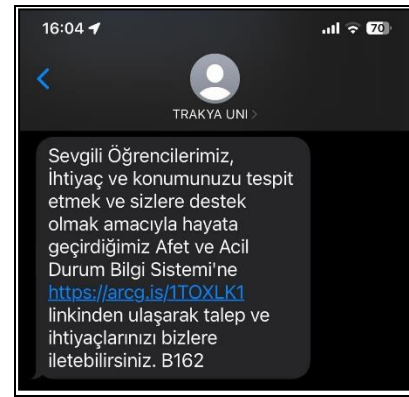
tabanlarının sorgulanmasına ve veri tabanlarından veri indirme veya ekleme yapılmasına internet tabanlı olarak tanır. Bulut veri tabanlarının İnternet CBS'nin interaktif bir aracı olarak kullanılması, afet sonrası acil yönetim merkezi, sahada arama kurtarma faaliyetleri ve afetzedeler arasında köprü vazifesi görmektedir (Paul, 2001). Özellikle GPS modülü olan akıllı telefonlar ile, internet tabanlı mobil CBS etkinliği için gerçek zamanlı veri toplanabilmesi, ilk müdahale ya da arama-kurtarma ekiplerinin afetzedelere kolay bir şekilde erişimini hızlandırmaktadır (Brown vd., 2003). Söz konusu afet sonrası yönetim için toplum temelli çözümlerin bütünleştirilmesine yönelik çabalar önceden planlandığı takdirde olası bir gerçek felakette kayıpları azaltma da etkili rol oynayacaktır. Aynı zamanda yerel yönetimler ve sivil toplum kuruluşlarının hızlı bir şekilde organize olmasına katkı sağlayacaktır. Bu nedenle, CBS uygulamalarını kapsayan hızlı müdahale tatbikatlarının geliştirilmesi son derece önemlidir (Johnson, 2000 - Schlossberg, 2004). Sonuçta afetle ilgili bilgiler, son derece dinamik ve belirsiz koşullardan dolayı her zaman önceden hazır olmayabilir (La Porte, 1999). Ama günün sonunda, afetlerin anlaşılması ve yönetilmesi, afet sonrası planlama ve risk değerlendirmesinin yapılabilmesi amaçlı önceden veri, veri ağları ve bilgi işleme yöntemlerini ortaya koyacak afet simülasyonu niteliğinde tatbikatların yapılması önem arz etmektedir (Newkirk, 1993). Unutulmamalıdır ki simülasyonlar gerçek olayları taklit etmede kullanılacak en uygun araçlardır.

#### 4. Uygulama

Uygulama çalışmasında, 06.02.2023 tarihinde Ülkemizi yasa boğan Kahramanmaraş merkezli 7.2 ve 7.5 şiddetindeki depremlerden sonra Trakya Üniversitesi Rektörlüğü'nce oluşturulan destek hattına katkı sağlamak amacıyla ArcGIS-Online Deneme sürümü ile Trakya Üniversitesi Afet Takip sistemi oluşturulmuştur. ArcGIS-Online Deneme sürümü 08.04.2023 tarihinde sona erdiğinden web ortamından

sisteme erişim maalesef sonlanmıştır. Proje kapsamında uygulanacak yöntemler, öncü niteliğinde olan proje aşamaları açıklanarak anlatılmıştır.

ArcGIS-Online Deneme sürümü aracılığıyla hazırlanan örnek anket formu linki, Öğrenci İşleri Daire Başkanlığı tarafından öğrenci kayıtlarından tespit edilen bölgede ikamet eden öğrencilere yönelik, Trakya Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı'na SMS yoluyla iletilmiştir (Şekil-1).



**Şekil 1.** Hedef kitleye yönelik hazırlanan anket formu linkinin SMS ile gönderilmesi.

ArcGIS-Online Deneme sürümü aracılığıyla hazırlanan örnek anket formu Şekil-2'de görüldüğü gibidir. Anket formunda, bölgede depremden etkilenen öğrencilerimize yönelik Kişisel Verilerin İşlenmesi Aydınlatma Metni onayı alınması suretiyle (URL-1), öğrenim düzeyi bilgileri, Ad-Soyad, Öğrenci Numarası, Cep Telefonu Numarası, deprem anında bulunduğu İl, deprem anında bulunduğu yapının durumu, Acil İhtiyaç Duyulan Eşya bilgileri, anketi doldurduğu sıradaki mevcut konum bilgileri (Harita üzerinden ekrandan seçmeli ya da manuel giriş), anketi doldurduğu sıradaki isteğe bağlı bulunduğu yerinde gösteren mevcut öğrenci fotoğrafı gibi bilgiler sorulmuştur.

Anket sonuçlarından toplanan veriler, ArcGIS-Online Deneme sürümü aracılığıyla hazırlanan tematik Afet Takip Sistemi haritası üzerinde anlık olarak gösterilmiştir. Özellikle afet bölgesinde bulunan arama

kurtarma ekiplerince kullanılması öngörülen web tabanlı bu dijital harita üzerinden, farklı harita altlıkları (Cadde, sokak, uydu vb. görünümü) kullanılarak ilgili öğrencilerin gönderdikleri konumları işaretlenmiş ve arama kurtarma ekiplerince kendi konumlarına göre en kısa yol gibi çeşitli çizim araçları modüllere eklenmiştir. Yine öğrencilerin depreme yakalandıkları İl bazında sayısal istatistiksel bilgi sorgu butonları ve ekranları eklenmiştir (Şekil-3). Bu siteye kolay ulaşım için, Trakya Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığınca (afetverisi. trakya.edu.tr) adresi ile maskeleye yapılmıştır. ArcGIS-Online Deneme sürümü 08.04.2023 tarihinde sona erdiğinden siteye erişim son bulmuştur.

Yine anket sonuçlarından toplanan veriler, ArcGIS-Online Deneme sürümü aracılığıyla hazırlanan tematik

Afet Takip Sistemi haritası üzerinde özellikle afet yönetim ya da destek merkezlerinde geniş ekranlarda ya da projeksiyon cihazıyla duvara yansıtılmak suretiyle anlık olarak canlı veri akışı izlenebilmesine olanak sağlayan Dashboard ekranı tasarlanmıştır. Bu ekranda öncelikli görülmesi istenilen veriler ön plana çıkarılmıştır. İstenildiğinde bu ekrandan da ihtiyaç sahiplere ve ihtiyaç bilgileri görüntülenebilmektedir (Şekil-4). Bu siteye kolay ulaşım için, Trakya Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığınca (afettakip. trakya.edu.tr) adresi ile maskeleye yapılmıştır. ArcGIS-Online Deneme sürümü 08.04.2023 tarihinde sona erdiğinden siteye erişim son bulmuştur. ArcGIS-Online yazılımı ile hedef kitleden toplanan bilgilerin kullanıcı etkileşimli olarak tasarlanıp son durum bilgisi olarak sorgu ekranından görülmesi sağlanmıştır. (Şekil-5).

Şekil 2. Hedef kitleye yönelik hazırlanan anket soruları ve formu.

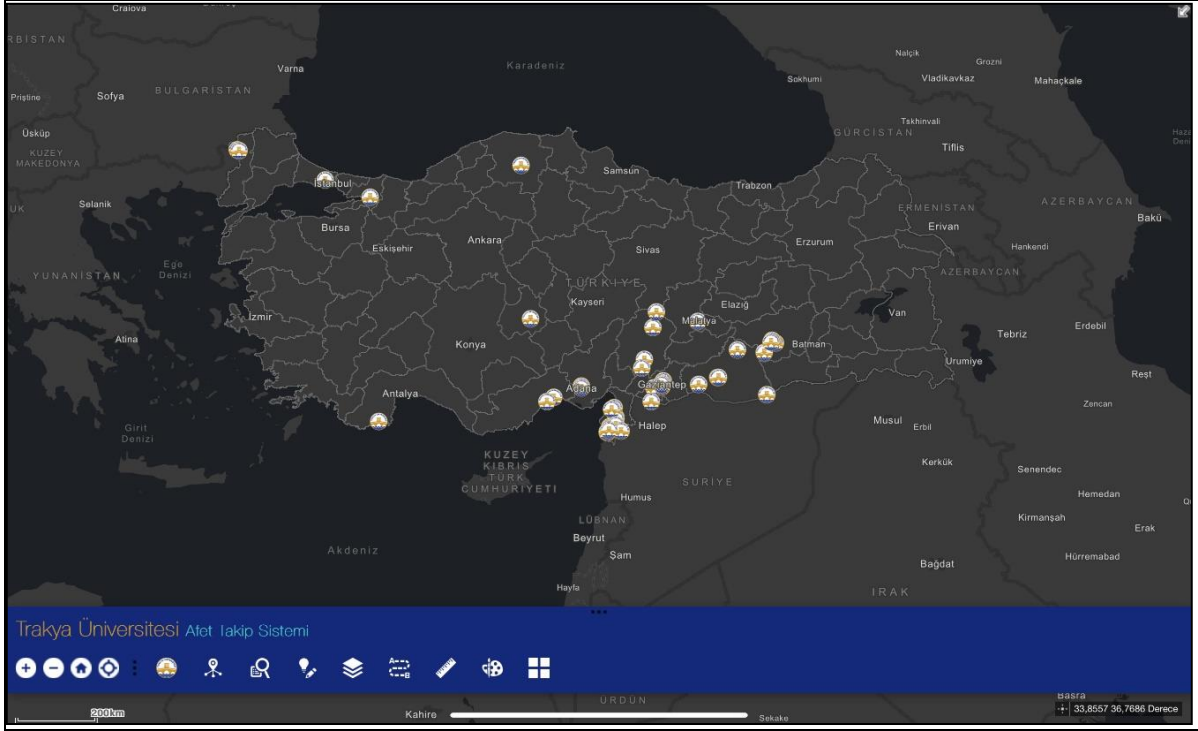
#### 4. Sonuçlar

İnternet tabanlı ve özellikle bulut teknolojisi kullanan Coğrafi Bilgi Sistemlerinin, öncelikli olarak yerel, bölgesel ve sonrası ulusal ölçekte gerçekleştirilecek

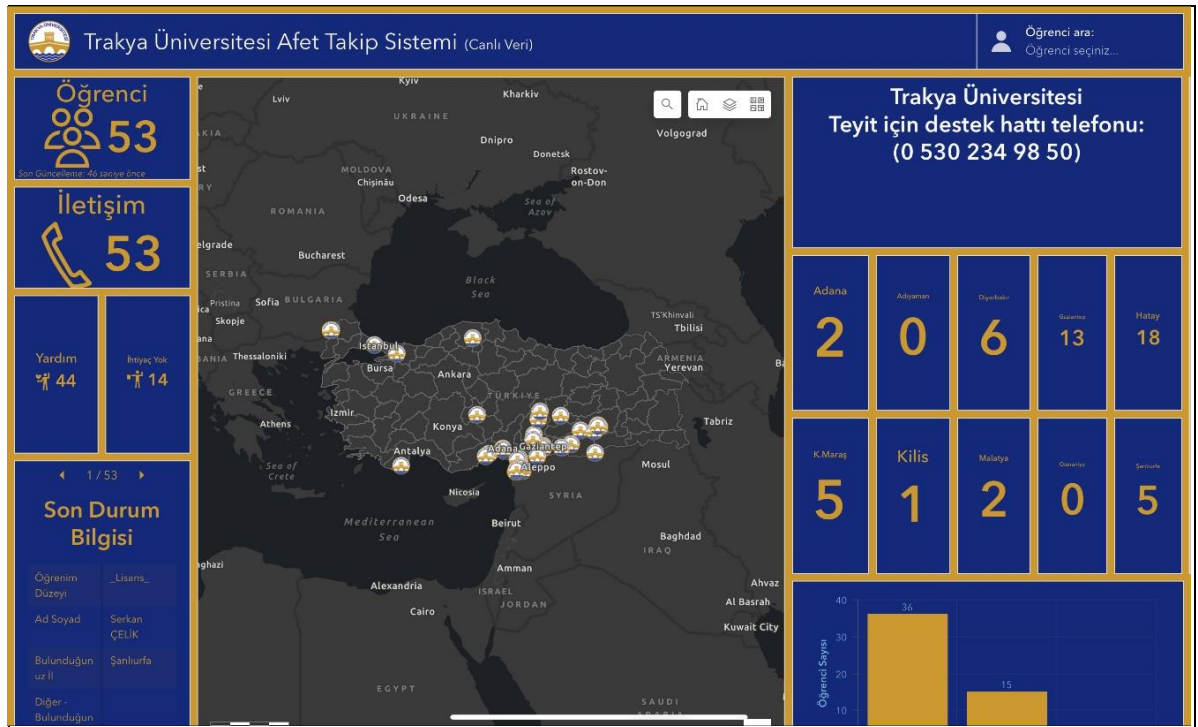
deprem, sel, erozyon, orman yangını, şiddetli fırtına vb. doğal afetler sonrası afetten etkilenenlerin acil durum ihtiyaçlarının karşılanması yönünde, yetkin mercilerin karar alma ve faaliyete geçme aşamasında karar destek



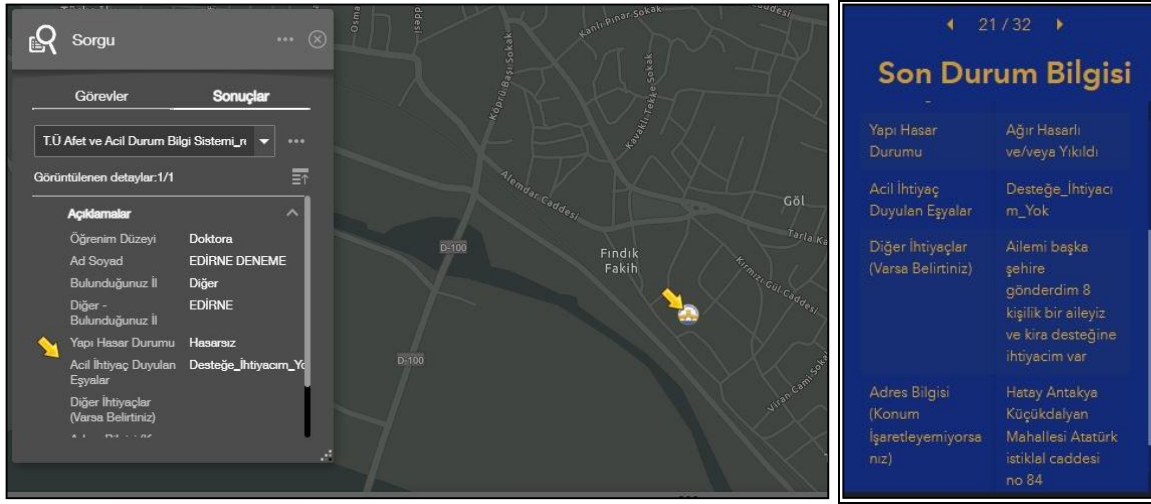
sistemi olarak etkin bir şekilde rol oynadığı, yapılan uygulama sonucunda ortaya konmuştur.



Şekil 3. Hedef kitlenin konuma dayalı takibini sağlayan web arayüzü.



Şekil 4. Hedef kitlenin konuma dayalı takibini sağlayan web-dashboards canlı veri izleme arayüzü.



Şekil 5. Hedef kitlenin anket sonuçlarını gösteren ekran çıktıları.

Olması beklenen büyük İstanbul depreminin etki alanı büyük olmakla birlikte Marmara bölgesini doğrudan etkilemesi söz konusudur. Edirne İline kadar ulaşabilir. Örneğin, bu durumda hem Edirne İlinde bulunan Üniversite Personeli ve hem de Öğrencileri afetten doğrudan etkilenebilirler. Üstelik Üniversitenin öğrenci profilinin büyük bir çoğunluğunun İstanbul İlinde geldiği düşünüldüğünde, yine personelin İstanbul İlinde iş ya da seyahat amaçlı bulunduğu düşünüldüğünde, bu durumda gerçekleşecek bir deprem sonrası kurumsal anlamda çalışan ve öğrencilerin acil ihtiyaç durumlarının konuma dayalı olarak belirlenmesi gerekebilir. Yine başka bir örnek senaryoda Edirne İlinde meydana gelebilecek sel felaketi sonrası kurum personeli ve öğrencilerin acil ihtiyaç durumlarının konuma dayalı olarak belirlenmesi gerekebilir. Bu gibi senaryolar çerçevesinde oluşturulacak tatbikat niteliğinde simülasyonlarla olası gerçek felaketler sonrası acil destek hattının işleyişi hız kazanacaktır. Yine bu gibi senaryo ve simülasyonlar yeryüzünde herhangi bir konumda meydana gelebilecek bir doğal afetin sonrasında, afetten etkilenenlerin acil durum ihtiyaçlarının karşılanması yönünde, karar destek sistemi olarak önemli derecede rol oynayacaktır.

### Teşekkür

Çalışmaya değerli desteği için Trakya Üniversitesi Rektörlüğü'ne (Edirne, Türkiye) teşekkür ederiz.

**Çıkar Çatışması:** Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**Yazar Katkıları:** Kavram: Y.T., E.M., H.K., Tasarım: Y.T., E.M., Uygulama: Y.T., E.M., Malzeme temini: H.K., Veri toplama: Y.T., E.M., H.K., Veri analizi/ yorumlanması: Y.T., E.M., Yazım: Y.T., Eleştirel değerlendirme: Y.T., E.M., H.K.

### ORCID

Yener Türen, 0000-0003-3381-3780

Eylül Malkoç, 0000-0003-1873-2931

Hilmi Kuşçu, 0000-0003-3134-9769

### Kaynaklar

Amdahl, G. (2001). Disaster Response: GIS for Public Safety. Redlands, CA: ESRI Press, Inc.

Brown, S., Crum, S., Foote, V. (2003). GIS and GPS emergency response lessons learned from the space shuttle Columbia disaster. Journal of Extension, 41 (4), <https://archives.joe.org/joe/2003august/iw1>. Php, Retrieved on: 23.12.2024.

- Comfort, L. K., (2000). Information Technology and Efficiency in Disaster Response: The Marmara, Turkey Earthquake, 17 August 1999, Natural Hazards Center, Colorado, USA, <https://hazards.colorado.edu/uploads/basicpage/QR%20130.pdf>, Retrieved on: 23.12.2024.
- Cutter, S., (2003). GIScience Disasters and Emergency Management. *Transactions in GIS* Vol. 7, No. 4, pp. 439-446.
- Gunes, A.; Kovel, J. (2000). Using GIS in Emergency Management Operations. *Journal of Urban Planning and Development.*, 126 (3), 136–149.
- Hardin, C. (1998). *Serving Maps on the Internet*. Redlands, CA: ESRI Press, Inc.
- Hewitt, K. (1997). *Regions of Risk: a geographical introduction to disasters*. New York: Addition Wesley.
- Ivefors, G. (1997). Emergency Information Management & Disaster Preparedness on the Internet, *Human IT: Journal for Information Technology Studies as a Human Science* Vol 1, No 2.
- Johnson, R. (2000). GIS Technology for Disasters and Emergency Management, An ESRI White Paper, <https://www.esri.com/~media/files/pdfs/library/whitepapers/pdfs/disastermgmt.pdf>, Retrieved on: 23.12.2024.
- Kodrich, K., Laituri, M. (2006). The Tsunami and the Internet: The Role of New Media Technologies in Disaster Awareness and Relief, *International Journal of Technology, Knowledge and Society*, 1 (3), 53-62.
- Kodrich, K., Laituri, M. (2005). The Formation of a Disaster Community in Cyberspace: The Role of the Online News Media after the 2001 Gujarat Earthquake. *Convergence*, 11 (3), 40-56.
- Kwan, M., Lee, J. (2005). Emergency response after 9/11: the potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29, 93–113.
- Laituri M, Kodrich K. (2008). On Line Disaster Response Community: People as Sensors of High Magnitude Disasters Using Internet GIS. *Sensors (Basel)*. May 6;8(5):3037-3055. doi: 10.3390/s8053037. PMID: 27879864; PMCID: PMC3675530
- La Porte, T. (1999). Contingencies and communications in cyberspace: the world wide web and nonhierachical co-ordination. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 7 (4), 215–224.
- Meissner, A.; Luckenbach, T.; Risse, T.; Kirste, T.; Kirchner, H. (2002). Design Challenges for an Intergrated Disaster Management Communication and Information System. *The First IEEE Workshop on Disaster Recovery Networks (DIREN 2002)*, New York City. [https://www.ee.columbia.edu/~aurel/workshops/diren02/IEEE\\_DIREN2002\\_Meissner\\_DesignChallenges.pdf](https://www.ee.columbia.edu/~aurel/workshops/diren02/IEEE_DIREN2002_Meissner_DesignChallenges.pdf), Retrieved on: 23.12.2024.
- Montoya, L. (2003). Geo-data acquisition through mobile GIS and digital video: an urban disaster management perspective. *Environment Modelling and Software*, 8, 869-876.
- Newkirk, R. (1993). Extending geographic information systems for risk analysis and management. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 1 (4), 203-206.
- Paul, M. (2001). Interactive disaster communication on the Internet: A content analysis of sixty-four disaster relief home pages. *Journalism and Mass Communications*, 78 (4), 739-753.

- Schlossberg, M. (2004). Enhancing citizen participation with mobile GIS/GPS technology, NWACC A Proposal to the Northwest Academic Computing Consortium (NWACC). Criteria with Vector Technique, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(2), 51-61.
- Taşkaya, S. (2022). Shifting the Island Section Line in Reconstruction Islands According to the Depth URL-1: <https://kvk.trakya.edu.tr/>, Erişim tarihi: 23.12.2024.