



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdergisi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdergisi
Cilt: 14, Sayı: 3, Eylül 2023 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Bilal GÜMÜŞ
Abdulkadir ALBAYRAK
Atilla Gencer DEVEÇİOĞLU
İdris BEDİRHANOĞLU
Erhan ÇETİN
Ömer TÜRK
Fevzi ÖNEN
Felat DURSUN

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

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

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

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

Hakem Listesi / *Reviewers List*

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

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

Nurettin KÖRÖZLÜ (Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi)

Zafer ÖZER (Mersin Üniversitesi)

Cengiz HARK (İnönü Üniversitesi)

Selim BUYRUKOĞLU (Çankırı Karatekin Üniversitesi)

Mücahit SÜTÇÜ (Celal Bayar Üniversitesi)

Metin YURDDAŞKAL (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Veysel Süleyman YAVUZ (Siirt Üniversitesi)

Hamit ADİN (Batman Üniversitesi)

Oktay ADIYAMAN (Batman Üniversitesi)

Pınar İNCİ (İstanbul Kültür Üniversitesi)

Pınar ÖZYİĞİT (Bozok Üniversitesi)

Hasan TUTUMLU (Gaziantep Üniversitesi)

Mahmut Temel ÖZDEMİR (Fırat Üniversitesi)

Burak YILDIRIM (Bingöl Üniversitesi)

İbrahim UĞUR (Süleyman Demirel Üniversitesi)

Mahmut YAVUZ (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi)

Emrah IRMAK (Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi)

Abidin ÇALIŞKAN (Batman Üniversitesi)

Umut OKKAN (Balıkesir Üniversitesi)

İsmail DABANLI (ITU)

M. Fethi GÜLLÜ (Harran Üniversitesi)

Fatih AVCIL (Bitlis Eren Üniversitesi)

Kadir GÜÇLÜER (Adıyaman Üniversitesi)

Mesut GÖR (Fırat Üniversitesi)

Tümay KADAKÇI KOCA (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)

Fırat GÜMGÜM (DU)

Erol KILIÇKAP (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- İçi Boş Silindirlerden Oluşan Farklı Örgü Yapılarına Sahip Fononik Kristallerin Bant Yapılarının İncelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of Band Structures of Phononic Crystals Consisting of Hollow Cylinders with Different Lattice Structures (Research Article)
Mehtap Demir 401
- Centrality with Entropy in Hypergraphs Based on Similarity Measures
(Research Article)
İhsan Tuğal, Zeydin Pala 407
- Bulanık Mantık Tip-3 Kullanılarak Mikro Şebeke Frekans Regülasyonu
(Araştırma Makalesi)
Microgrid Frequency Regulation Using Fuzzy Logic Type-3 (Research Article)
İsmail Türk, Heybet Kılıç 421
- Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Eğitim Başarısının Tahmini Modeli (Araştırma Makalesi)
Prediction Model Of Educational Success With Machine Learning Method (Research Article)
Deniz Zilyas, Atınç Yılmaz 437

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

- Dental implantlar için farklı yüzey modifikasyon tekniklerinin titanyumun yüzey özelliklerine etkilerinin karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)
Comparison of the effects of different surface modification techniques on the surface properties of titanium for dental implants (Research Article)
Mustafa Kıрман, Tuncay Dikici, Halit Doğan 449
- Experimental examination of the axial compression conduct of filament-wound cylindrical composite tubes at different wall thicknesses and orientation angles (Research Article)
Hayri Yıldırım 455
- Merkez alıcılı güneş kulesi-buhar güç tümleşik sisteminin performans parametrelerinin incelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of the performance parameters on the central receiver solar tower-steam power integrated system (Research Article)
Mehmet Zerakki Işık, Hasan Oktay, Hüsna Topkaya 461

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

- Görüntü İşleme ile Doğal Taş Seleksiyonunda İşlem Süresini Azaltan Yeni Bir Yöntem Önerisi (Araştırma Makalesi)
A New Method to Reduce Computing Time on Natural Stone Classification by Image Processing (Research Article)
Özgür Akkoyun, Yaser Fırat 471

Sodyum bentonit kilini güçlendirmede maksimum dayanım için optimum bazalt fiber oranının belirlenmesi (Araştırma Makalesi)
Determination of the optimum basalt fiber ratio for maximum strength in sodium bentonite clay reinforcement (Research Article)
Yasemin Aslan Topçuoğlu, Zülfü Gürocak **479**

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Yağış-Akış İlişkisinin GEP ve ANFIS İle Modellenmesi (Araştırma Makalesi)
Modelling The Rainfall-Runoff Relationship With GEP & ANFIS Methods (Research Article)
Yunus Yaman, Fevzi Önen **489**

Dynamic Analysis Of Historical Sultan Hamit Masonry Arch Bridges (Research Article)
Çağrı Onur Öztürk, Senem Yılmaz Çetin, Erkut Sayın **499**

Gördes Alt Havzası Akışlarının Modellenmesinde Era5-Land Verilerinin Performans Değerlendirmesi (Research Article)
Performance Evaluation of Era5-Land Data for Modeling Gördes Basin Flows (Research Article)
Destina Dilan Ekinci, Okan Fıstıkoğlu **507**

Sismik dirençlilik ve spektral parametrelerin etkisi (Araştırma Makalesi)
Seismic resilience and the influence of spectral parameters (Research Article)
İbrahim Baran Karaşın **519**

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

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



İçi Boş Silindirlerden Oluşan Farklı Örgü Yapılarına Sahip Fotonik Kristallerin Bant Yapılarının İncelenmesi

Investigation of Band Structures of Phononic Crystals Consisting of Hollow Cylinders with Different Lattice Structures

Mehtap DEMİR^{1*}

¹ Adıyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, mehtapdemir@adiyaman.edu.tr
Orcid No: 0000-0001-6568-6080

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 10 Ocak 2023
Revizyon 11 Haziran 2023
Kabul 2 Temmuz 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Fononik Kristal, Bant Yapısı, Sonlu Elemanlar Metodu, Metamalzeme.

ÖZ

Fononik kristaller, farklı akustik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemeden meydana gelen akustik metamalzemelerdir. Günümüzde mikro/nano-mekanik boyutlardaki tasarımlarla, MHz/GHz frekanslarda kablosuz iletişim, algılama, perdeleme, ultrasonik görüntüleme, ses odaklaması, dalga hapsedme, dalga kılavuzu gibi birçok uygulaması vardır. Bu çalışmada, duyarlı ses frekansı aralığında (100Hz-20kHz), içi boş Alüminyum silindirlere oluşan farklı örgü yapılarına sahip iki boyutlu fononik kristallerde bant yapıları incelendi. Fononik kristalin bant yapısı Sonlu Elemanlar Metodu ile teorik olarak hesaplanarak Hızlı Fourier Dönüşümü ile bu analizin geçerliliği test edildi.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 January 2023
Received in revised form 11 June 2023
Accepted 2 July 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Phononic Crystal, Band Structure, Finite Element Method, Metamaterial.

ABSTRACT

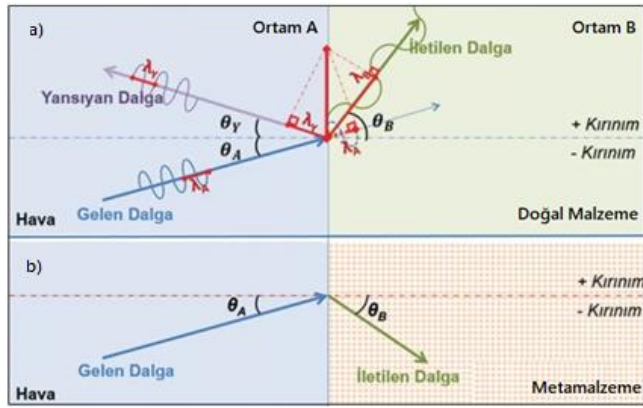
Phononic crystals are acoustic metamaterials composed of two or more materials with different acoustic properties. Today, it has many applications such as wireless communication at MHz/GHz frequencies, sensing, shielding, ultrasonic imaging, sound focusing, wave trapping, waveguide, with designs in micro/nano-mechanical dimensions. In this study, band structures were investigated in two-dimensional phononic crystals with different lattice structures consisting of hollow aluminum cylinders in the audible frequency range (100Hz-20kHz). The band structure of the phononic crystal was calculated theoretically by Finite Element Method and the validity of this analysis was tested by Fast Fourier Transform.

Doi: 10.24012/dumf.1232151

* Sorumlu Yazar

Giriş

Fononik kristaller (FKr), farklı mekanik özelliklere sahip iki esnek malzemeden yapılmış periyodik yapılardır. FKr'in temel özelliği, frekansları belirli bir aralıkta olan mekanik (esnek veya akustik) dalgaların periyodik yapı içinde ilerleyememesidir. Bu yasaklanmış frekans aralığına, fononik bant aralığı denir. Bu, klasik dalgaların periyodik olarak modüle edilmiş malzeme parametrelerine sahip bir yapıda yayıldığı bir kristaldeki elektronlara benzer [1]. Mutlak fononik bir boşluk Bragg sınırının oldukça altında frekanslarda görülebilen bir Bragg tipi boşluk veya bir rezonans tipi boşluk olabilir. Akustik metamalzeme olarak bilinen bu yapı, ses yalıtımı, negatif kırılma ve alt dalgaboyu görüntülemesi amacı ile mükemmel yansıtıcı ayna özelliğine sahip fononik kristaller için önemli bir sorun teşkil etmektedir [2,3]. Amaç, sesin havada dalga boyundan daha küçük kaldığı bir örnek üzerinde yayılmasını azaltan yapılar bulmaktır [4]. Son çalışmaların çoğu, rezonans malzemeler olarak adlandırılan yeni bir fononik kristaller sınıfına yoğunlaşmıştır [5].



Şekil 1. Bragg Yasası'na göre, A ortamından B ortamındaki a) doğal malzemeye ve b) metamalzemeye iletilen ses dalgasının kırınımı [6].

Dalga formundaki enerji bir ortamdan farklı bir fiziksel ortama geçiş yaparken enerjisinin bir kısmı geri yansır, bir kısmı ise diğer ortama iletilir [6]. Şekil 1'de akustik metamalzeme üzerine gelen ses dalgasının negatif endekse sahip olması nedeni ile kırınım açısının eksi düzlemde oluştuğu görülmektedir.

FKr, fononik kristallerin akustik veya esnek dalga benzeri olup homojen bir malzeme içerisine yerleşmiş çubuklardan oluşan bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) periyodik yapılardır. FKr, belirli aralıklardaki akustik frekanslardaki dalgaların ilerlemesinin yasaklandığı "akustik bant boşluğu" denilen yasak bant aralıklarına sahiptirler. Akustik veya esnek dalgaların yayılması, çubukların ses hızı, yoğunluğu veya esneklik özellikleri, şekli ve yapısı (kare örgü, üçgen örgü, petek örgü vb.) yayılmasını önemli ölçüde etkiler. Farklı malzeme, farklı örgü veya farklı çubukların seçimi ile FKr'in bant yapısı değiştirilebilir. FKr dağılım (dispersiyon) özellikleri incelendiğinde, belirli frekanslardaki dalgaların ilerlemesinin yasaklandığı tam bantlar veya belirli yöndeki ilerlemenin yasaklandığı kısmi

bantlar elde edilebilirler. [7, 8]. Önceki çalışmalarda, periyodik olarak yerleştirilmiş kompozit silindirelerden oluşan kare örgü ve yarı-periyodik yapıdaki 2B fononik kristaldeki bant yapıları incelenmiştir [7]. Benzeri bir çalışmada ise Sonlu Eleman Metodu (SEM) kullanılarak farklı örgü piezoelektrik FKr'ler için geniş bant aralıklı FKr tasarımları yapılarak bu yapıların bant aralığı özellikleri incelenmiştir [9]. Farklı kafes ve farklı kapanımlar ve geometrilere sahip piezoelektrik malzeme FKr üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bazılarında birinci bant aralığında tam geniş bant aralığı elde edilebildiği görülmüştür [10]. Palaz ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, bir hava matrisindeki kare LiNbO_3 çubuklardan oluşan 2B fononik kristali dikkate alınmıştır [11]. Bir başka çalışmada, teorik ve deneysel olarak, kare örgülü sudaki paralel çelik çubuklardan oluşan 2B FKr'de tam bant boşluklarının varlığı incelenerek, bu kristalin bant yapısı, bir düzlem dalga genişletme yöntemiyle hesaplanmıştır [12]. Son yıllarda ise, Zafer ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, multiferroik tabanlı Sierpinski-halı fononik kristalindeki bant yapısı ve iletim spektrumları, sonlu elemanlar simülasyonuna dayalı olarak incelenmiştir. FKr'nin bant yapısını elde etmek için birim hücrenin kenarlarına Floquet periyodiklik koşulları uygulanan çalışmada, kare örgü FKr, dairesel ve üçgen çaprazlı bir kauçuk matriste çeşitli piezoelektrik etkiler incelenmiştir [13]. Atasever, 2B katı/katı fononik kristallerde esnek bant yapısını incelemiştir. Bunun için iç malzeme olarak yarıçapı r olan silindir çubuk geometriye sahip Tungsten ve dış malzeme olarak kare geometriye sahip naylon kullanmıştır [14]. Bir başka çalışmada, T-kare fraktal iki boyutlu fononik kristal modeli tasarlanmıştır, bu fraktal tasarımın 2B FKr'in bant yapıları üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir [15].

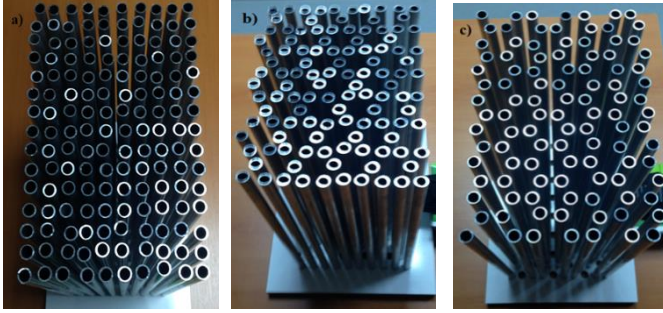
Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak, homojen Alüminyum içi boş silindirelerden oluşan farklı bir malzeme daha önce kare örgü ile yapılan çalışmaya alternatif olarak üçgen örgü ve petek örgü olmak üzere farklı örgü yapılarında fononik kristalin bant yapıları incelendi. Böylelikle bu çalışmadan bir önceki çalışmadaki aynı malzeme ile farklı örgü yapılarına sahip tasarlanan çubukların seçimi ile fononik kristalin bant yapısına etkileri tartışıldı.

Materyal ve Metot

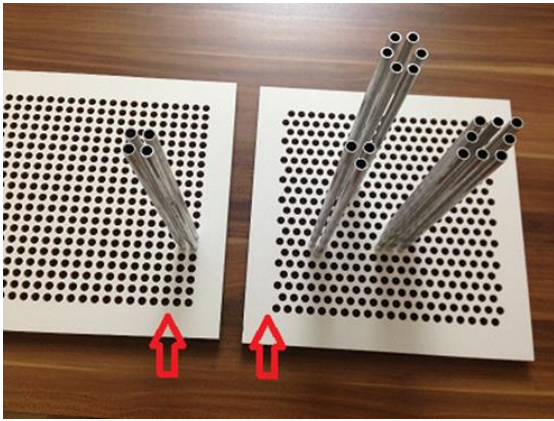
Bu çalışmada, 2B fononik bir kristal için, Zafer ve diğerleri tarafından yapılan çalışmadaki [16] kare örgü yapının farklı örgü yapıları tasarlanarak deneysel ve simülasyon ölçümleri alınıp karşılaştırılması yapıldı.

Önceki çalışılan bu yapıda, farklı ortamlarda, içi boş Alüminyum silindirelerden oluşan kare örgüdeki 2B fononik kristaldeki tam bant boşluklarının varlığı deneysel olarak gösterilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi dışta 10 mm, içte 8 mm olmak üzere 150 Alüminyum borudan oluşan bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Boru boyları 29,5 mm'dir. Fiber platform üzerinde, 150 adet ve 10*15 adet delik bulunmaktadır. Bu çalışmada ilk aşamada, deneysel olarak Şekil 2'de görülen deney düzenekleri kuruldu. Hava zemininde, içi boş Alüminyum silindirelerden oluşan kare, üçgen ve petek örgüde fononik kristaller yapıldı. Şekil 3'te

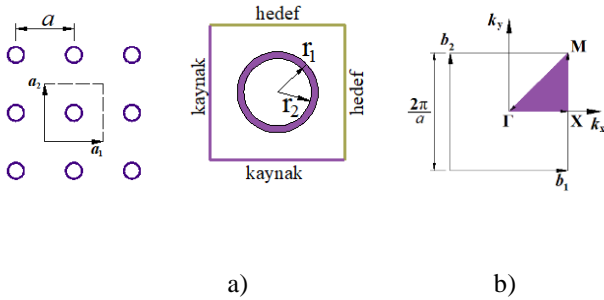
kare örgü, üçgen örgü ve petek örgünün elde edilebilmesi için CNC (Computer Numerical Control) ile özel tasarlanan fiber platform ve dizilimi gösterildi.



Şekil 2. 2B fononik kristalin, a)kare örgü b)üçgen örgü c)petek örgü olmak üzere, deney düzeneğinin gösterimi.



Şekil 3. Kare örgü dizilim ile üçgen örgü ve petek örgü dizilimleri.



Şekil 4. a) Boş uzaydaki birim hücredeki dikdörtgen örgü içindeki fononik kristal b) ters örgü indirgenemez Brillouin Bölgesi yüksek simetri noktaları (Γ -X-M).

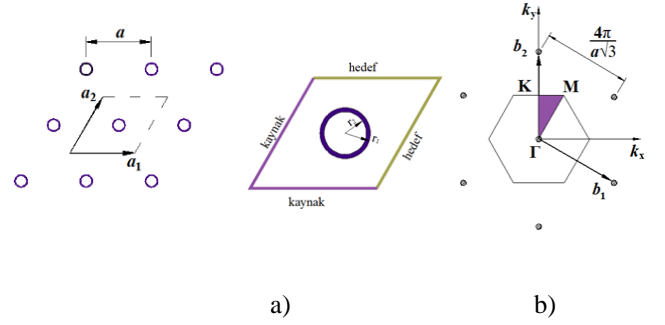


Şekil 5. SEM modeli sonlu dizinin sınır koşulları.

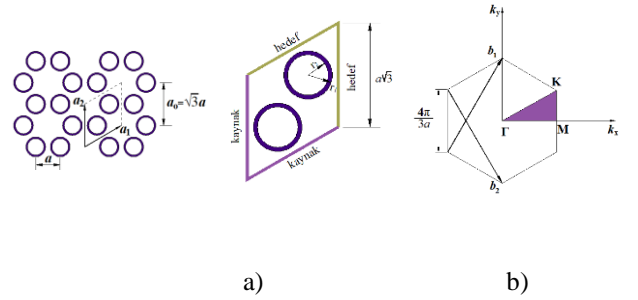
Yapılan deneysel çalışmada, 100 Hz-20 kHz arasında ses sinyali üreten yazılım vasıtasıyla hoparlörden 1m uzaktaki fononik kristale doğru 5 sn süreyle 100 Hz'den 20 kHz'e

kadar doğrusal olarak artan ses sinyali gönderildi. Örnekleme zamanı, 0.03125 ms'dir. Mikrofon yardımı ile fononik kristal olmadan yapılan kayıt P_1 ve fononik kristali yerleştirdikten sonra elde edilen kayıt P_2 olarak kaydedildi. Her iki kayıt da Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) ile frekans domenine çevrildi. Daha sonra iletim kaybı (transmission loss-TL) değeri Denklem (1)'e göre hesaplanıp deneysel iletim kaybı elde edildi.

$$TL=20*\log_{10}(abs(P_2/P_1)) \quad (1)$$



Şekil 6. a) Üçgen örgü birim hücre b) Ters örgü indirgenemez Brillouin Bölgesi yüksek simetri noktaları (Γ -K-M)



Şekil 7. a) Petek (honeycomb) örgü birim hücre b) ters örgü indirgenemez Brillouin Bölgesi yüksek simetri noktaları (Γ -K-M)

FKr'de, akustik Bloch dalgalarının yayılımı, Denklem (2)'deki gibi akustik dalgası ile ifade edilebilir.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = -\frac{1}{\rho c^2} [\omega(\vec{k})]^2 \cdot p \quad (2)$$

Burada, $c=c(\vec{r})$ FKr içindeki akustik dalgaların boyuna hızı, $\rho=\rho(\vec{r})$ malzemenin yoğunluğu ve $p = p_k(\vec{r})$ ise $p_k(\vec{r}, t)$ dalgası vektörü \vec{k} ile fononik kristal içinde bir akustik Bloch dalgasıdır. Şekil 4(a)'da, kare örgünün temel vektörleri $a_1 = a\hat{x}$, $a_2 = a\hat{y}$ ve şekil 4(b)'de $b_1 = \frac{2\pi}{a}\hat{x}$, $b_2 = \frac{2\pi}{a}\hat{y}$ ters örgü vektörleri ve yüksek simetri noktalarıdır; $\Gamma=0,0$, $X=\frac{\pi}{a}, 0$, $M=\frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a}$. Şekil 5'deki sonlu dizide FKr'de dalganın ilerleme yönüne göre periyodik yapının önünde ve arkasında tanımlanan A ve B noktalarında yapılan ölçümlerle denklem 1'e göre deneysel iletim kaybı hesaplanmıştır. Denklem 1'deki P_1 ve P_2 , A ve B gözlem noktalarıdır. SEM'le iletim kaybı hesaplamalarında, Şekil

4'de kesikli çizgilerle gösterilen birim hücre kullanılmıştır. Birim hücrenin önüne ve arkasına PML (Perfectly Matched Layer Mükemmel Uyumlu Katman) sınır koşulları, alt ve üst noktalarına Simetri Sınır Koşulları (Symmetry Boundary Condition) uygulanmıştır. PML, özellikle SEM'de açık sınırlarla ilgili sorunları simüle etmek ve sayısal yöntemlerde hesaplama bölgelerini kesmek için yaygın olarak kullanılan, dalga denklemleri için yapay bir emici katmandır. Bu emici katman, PML olmayan bir ortamdan gelen dalgaların arayüzde yansımaya sebep olmadan şekilde tasarlanır. Bu özellik, PML'nin dışarıdan gelen dalgaları güçlü bir şekilde emmesine izin verir.

Analizde kullanılan malzemelere ait parametreler 16 nolu referansta verildiği gibidir. Kullanılan malzemelerin özellikleri (kütle yoğunluğu ve ses hızı) için [16] baz alınmıştır.

Şekil 6 ve 7'de görülen üçgen ve petek örgüye sahip içi boş Alüminyum silindirlere oluşan 2B FKr'de, SEM kullanılarak bant yapıları elde edildi, bant yapıları ile deneysel olarak elde edilen iletim kayıpları karşılaştırıldı.

Şekil 8'de üçgen örgünün bant yapısı görülmektedir. Şekil 9'da, üçgen örgü FKr için a) deneysel olarak elde edilen iletim kaybı, b) benzetim (simülasyon) sonucu elde edilen iletim kaybı grafiği verildi. Şekil 11'de, petek örgü FKr için a) deneysel olarak elde edilen iletim kaybı, b) benzetim sonucu elde edilen iletim kaybı grafiği verildi. Bant yapısı, sonlu yapılara ait benzetim ve deneysel iletim kayıplarının birbiri ile uyumlu oldukları görüldü.

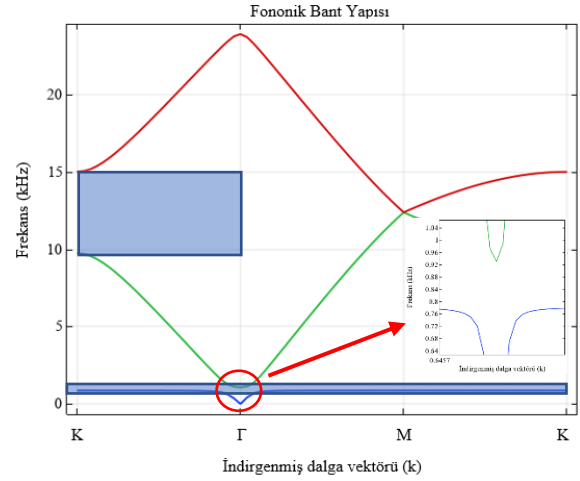
Araştırma Bulguları

Bu çalışmada, SEM kullanılarak farklı örgüye sahip FKr'ler için geniş bant aralıklı FKr tasarımları yapıldı ve bu yapıların bant yapıları incelendi.

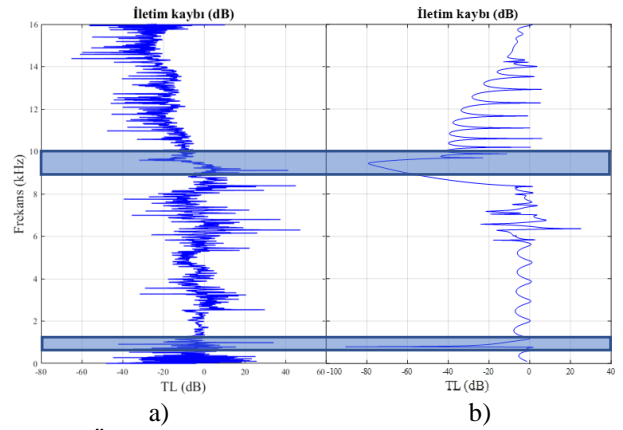
Bant yapısı ve iletim kaybı için elde edilen grafiklerde, 100 Hz-20 kHz arasında Γ -X yönünde bant görünmektedir. Kare örgünün Brillouin bölgesinde elde edilen akustik bant yapısı, şekil 4'te görüldüğü gibi 2B FKr için M - Γ - X - M yolu boyunca çizilmiştir, 13.2-13.8 kHz arasındaki dağılım eğrilerinde dar tam bant ve Γ -X yönünde 8-14 kHz arasında kısmi bir bant gözlenmiştir [16]. Üçgen örgünün Brillouin bölgesinde elde edilen akustik bant yapısı, Şekil 6'da görüldüğü gibi Γ - K - M yolu boyunca çizildi. Şekil 8'deki bant yapısından görüldüğü gibi 0.77-0.92 kHz arasında tam bant, 9.7-15 kHz frekansları arasında K - Γ yönünde kısmi bant oluştuğu görülmektedir. Petek örgünün Brillouin bölgesinde elde edilen akustik bant yapısı, Şekil 7'de görüldüğü gibi Γ - K - M yolu boyunca çizildi. Şekil 9'da görüldüğü gibi bant yapısındaki 0.77-0.92 kHz aralığında ve 9.7-15 kHz aralığında sinyalde zayıflama olduğu görülmektedir. Şekil 10'daki petek örgü bant yapısında 0.86-0.98 kHz arası, 6.4-9 kHz arası ve 13.7-14.15 kHz arasında tam bantlar oluştuğu görülmektedir.

Şekil 11'de görüldüğü gibi bant yapısındaki 0.86-0.98 kHz, 6.4-9 kHz ve 13.7-14.15 kHz aralığında sinyalde zayıflama olduğu görülmektedir.

Üçgen örgü

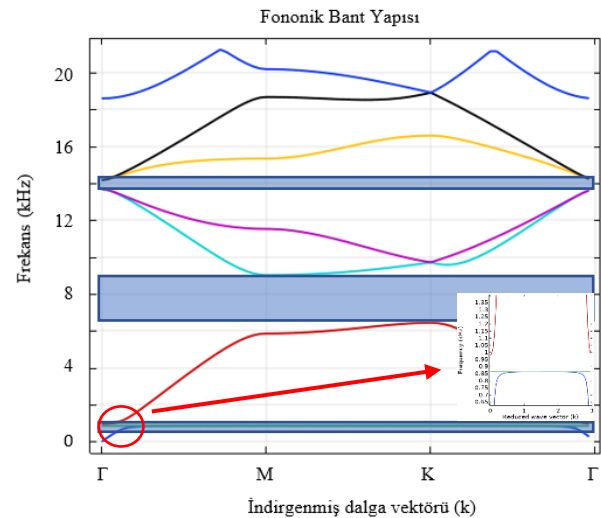


Şekil 8. Üçgen örgü bant yapısı

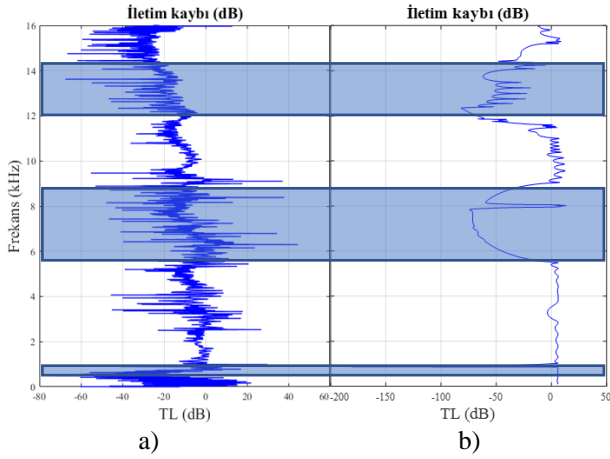


Şekil 9. Üçgen örgü iletim kaybı a) deneysel ölçüm sonucu b) simülasyon sonucu

Petek (honeycomb) örgü



Şekil 10. Petek örgü bant yapısı



Şekil 11. Petek örgü örgü iletim kaybı a) deneysel ölçüm sonucu b) simülasyon sonucu

Sonuçlar

Bu çalışmada, içi boş Alimünyum silindirlerle elde edilen farklı örgü yapılarına sahip FKr'ler sunuldu ve araştırıldı. Bant yapıları SEM yöntemi kullanılarak hesaplandı. Ayrıca 2B FKr'nin bant yapısının, simülasyon ve deneysel ölçümle elde edilen iletim kayıpları ile uyumlu olduğu da gösterildi. Üçgen örgü ve petek örgünün özellikle düşük frekanslarda sinyalde önemli ölçüde zayıflama sağlamaları bu yapıların alt dalga boyu (subwavelength) uygulamalar için kullanılabileceğini göstermektedir. Rezonatör tasarımında kullanılan, yoğunluk ve ses hızı gibi parametrelerle, örgü yapısı değiştirilerek akustik ses seviyesinin düşürüleceği farklı frekans aralığına sahip yapılar geliştirilebilir.

Etik Kurul İzni

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Teşekkür

Prof. Dr. Amirullah Mamedov'a ve Doç. Dr. Zafer Özer'e, sağladıkları destek için teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması

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

Kaynaklar

- [1] P. Deymier, *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [2] M. S. Kushwaha, P. Halevi, "Giant Acoustic Stop Bands in Two-Dimensional Periodic Arrays of Liquid Cylinders", *Applied Physics Letters*, vol. 69, no. 1, pp. 31-33, 1996, <https://doi.org/10.1063/1.118108>
- [3] A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J. O. Vasseur, Y. Pennec, P. A. Deymier, J. H. Page, "Experimental and Theoretical Evidence for Subwavelength Imaging in Phononic Crystals", *Physical Review Letters*, vol. 102, no. 15, 154301, 2009, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.154301>

- [4] C. He, H. Zhao, R. Wei; B. Wu, "Existence of Complete Band Gaps in 2D Steel-Water Phononic Crystal with Square Lattice". *Frontiers of Mechanical Engineering in China*. vol. 5, no. 4, pp. 450–454, 2010, <https://doi.org/10.1007/s11465-010-0105-y>
- [5] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y.Y. Zhu, Z. Yang, C.T. Chan, P. Sheng, "Locally resonant sonic materials". *Science* 289, vol. 289, no. 5485, pp. 1734–1736, 2000, doi:10.1126/science.289.5485.1734.
- [6] Figs. Akustik Meta Malzemeler – Yeni Ufuklar Açan Malzeme Teknolojisi. Snell Yasası ve Negatif Kırınım, Erişim Tarihi: 27.05.2019. [Online]. <https://figes.com.tr/akustik-meta-malzemeler-yeni-ufuklar-acan-malzeme-teknolojisi>
- [7] Z. Özer, "Fononik Kristallerde Ses Dalgasının Dispersiyon Özellikleri: Sonlu Elemanlar Analizi". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 33, no. 3, pp. 145 - 152, 2018, <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.504561>
- [8] D.P. Elford, "Band Gap Formation in Acoustically Resonant Phononic Crystals", Doctoral thesis, Loughborough University Institutional Repository, Loughborough, 2010.
- [9] Z. Özer, "Dispersion Features of Elastic Waves in Phononic Crystals: Finite Element Analysis". *Ferroelectrics*, 2019, vol. 544, no. 1, pp. 68-74, <https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1598187>
- [10] Jr E. J. P. disper, J. M. C. Dos Santos, "Complete Band Gaps in Nano-piezoelectric Phononic Crystals", *Materials Research*, vol. 20, no. 1, pp. 15-38, 2017, doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-0298
- [11] S. Palaz, O. Oltulu, A. M. Mamedov, "Dönen Kare Çubuklu İki Boyutlu Fononik Kristalin Dispersiyon Özellikleri". *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 19, pp. 536 - 543, 2019, doi: 10.35414/akufemubid.577855.
- [12] C. He, H. Zhao, R. Wei & B. Wu , "Existence of Complete Band Gaps in 2D Steel-Water Phononic Crystal with Square Lattice", *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, vol. 5, no. 4, pp. 450-454, 2010, doi: 10.1007/s11465-010-0105-y
- [13] Z. Özer, S. Palaz, A. M. Mamedov, E. Özbay, "Band Structure and Transmission Spectra in Multiferroic Based Sierpinski-Carpet Phononic Crystal". *European Physical Journal-Applied Physics*, vol. 90, no. 2, pp. 1-6, 2020, <https://doi.org/10.1051/epjap/2020190355>
- [14] G. Atasever, "İki boyutlu katı/katı fononik kristallerde elastik band yapıları", Y.L. tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2019. <http://hdl.handle.net/11513/2446>.
- [15] X.J. Liu, Y.H., Fan, "Band Structure Characteristics of T-square Fractal Phononic Crystals", *Chin. Phys. B*, vol. 22, no. 3, 036101, 2013, doi:10.1088/1674-1056/22/3/036101
- [16] Z. Özer, M. Demir, A. M. Mamedov, E. Özbay, "Band Structure of Phononic Crystal Consist of Hollow Aluminum Cylinders in Different Media; Finite Element Analysis", presented at the 5th International Conference on Competitive Materials and Technology Processes, Miskolc-Lillafüred, Hungary Citation Sci., Oct. 8–12, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 613, 012018, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/613/1/012018



Centrality with Entropy in Hypergraphs Based on Similarity Measures

İhsan TUĞAL^{1*}, Zeydin PALA²

¹ Muş Alparslan University, Software Engineering Department, i.tugal@alparslan.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1898-9438

² Muş Alparslan University, Software Engineering Department, z.pala@alparslan.edu.tr, Orcid No 0000-0002-2642-7788

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 January 2023
Received in revised form 5 July 2023
Accepted 6 July 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

centrality, hypergraphs, entropy, similarity

Doi: 10.24012/dumf.1241450

* Corresponding author

ABSTRACT

Hypergraphs and simplicial complexes can be used to model higher-order interactions. Graphs are limited to model and describe pairwise interactions. In this study, the issue of centrality in hypergraphs was studied. We introduce centrality measures based on the entropy of nodes and hyperedges in the hypergraphs. Until now, a lot of measures from various perspectives have been proposed to identify influential nodes, yet non provides a complete solution to the centrality problem. Because there are different perspectives on centrality. It is important to try different models to reach a solution in centrality problems. Entropy, which is a measure of uncertainty, is a guide in centrality measurements. It can produce ideal solutions for centrality. In complex systems, the entropy can be measured by different methods. In this study, the entropy calculation was made according to the union, intersection, and jaccard similarity values for nodes. The way that similarity is measured indicates the type of centrality. Local centralities were detected more precisely when the degree and union similarity values were used. The intersection and jaccard similarities showed us the global centralities. Traditional methods of centrality were also compared with the results of the proposed method. The accuracy of the method was tested with different hypergraph datasets. It has been shown that we can produce efficient results with different similarity parameters according to our wishes in hypergraphs.

Introduction

Graphs are very powerful modelling tools and widely used to represent data and systems in a connected world, yet representing systems with pairwise interactions via graphs is a challenge where describing group interactions explicitly is not possible [1]. However, real-world systems, such as collaboration networks, gene interaction networks, computer networks, social networks involve the interaction of more than two units, dependencies between more than two variables, or properties of collections of more than two objects [2]. For example, co-authorship publication data, collaboration datasets, chemical processes, neural systems seem to display group interactions. For such representative structures, hypergraphs and simplicial complexes are suitable for modeling, analyzing, and expression of complex systems [3]. Hypergraph theory was introduced by Berge [8]. It has a strong theory for solving real world problems. It can be used to model complex, group structured relational data. We can say that hypergraphs offer better solutions for modeling group interactions. Unlike a graph, the idea of a hypergraph is to widen the edges to connect more than two nodes as seen in Figure 1 [4]. Hypergraphs have identities related to a number of

other mathematical structures important in data science, including finite topologies, simple complexes, and Sperner systems. A suitable structure enables the use of a wider range of mathematical methods. Some interactions, when simplified into pairwise relations and modeled using a graph, can exhibit a very different nature than when their actual complexity is modeled using a hypergraph [5].

We need to learn more information about the structure of systems. The similarity of system elements provides information about the structure. In this study, similarity of nodes or hyperedges was measured by using intersection and union which is set operations. Jaccard similarities of nodes and hyperedges were obtained. For centrality, these values were used for entropy calculations.

The entropy of node explains which nodes play an important role [6]. Entropy, which measures variation, amount of information, uncertainty, offers a convenient way of centrality. The entropy value of each node or hyperedge also provides a value for centrality. Parameters determine whether centrality is a local or global [7]. We know that the degree is a local measure. We will see

whether the centrality measures with union, intersection and jaccard values will give local or global results.

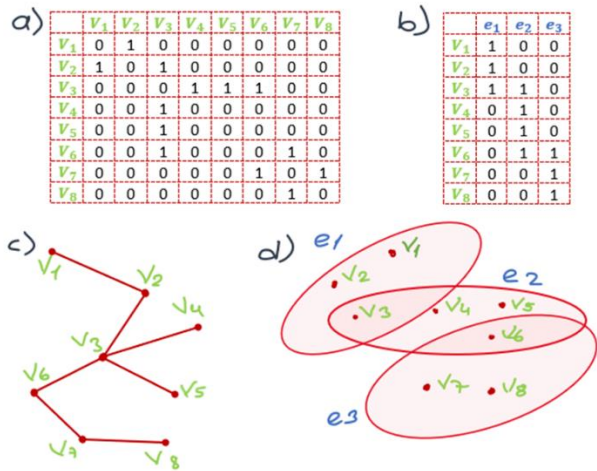


Figure 1. Representation of graph and hypergraph.

In this study, a method was proposed to identify influential nodes or hyperedges within the hypergraphs. The importance of the subject studied has been tried to be emphasized with the questions given below. What advantages do hypergraphs offer us? When should it be preferred to use hypergraphs instead of graphs? How to solve centrality problems with hypergraphs? The role of hypergraph models in solving various problems in higher-order systems was investigated.

The contribution of this study to the literature can be listed as follows:

1. A new method is proposed for the identification of central nodes and hyperedges in hypergraphs.
2. It has been shown that entropy is an efficient method for centrality calculations in hypergraphs.
3. It has been shown that node and hyperedge entropies can be measured using similarity values over neighborhood.
4. A method has emerged where hypergraph structures can be solved with same role for nodes and hyperedges.
5. Local and global centrality measures can be made by our method.

This paper is structured as follows: In section 2, the literature was reviewed. Section 3 describes the basic concepts that used in the proposed method. In Section 4, the method is explained with an example application. Section 5 presents experimental results and analyzes with 3 datasets, and Section 6 provides concluding remarks.

Preliminaries

In the study, Feng et al. found that hypergraph betweenness centrality is a superior method for identifying important genes. Hypergraph models were used to identify critical

genes of biological networks. A comparison was made between the graphs and hypergraphs centrality measures. It was aimed to find critical genes effective in viral infection from genomic expression data sets. Networks extracted from correlation or mutual information [8].

Zhou et al. generalized the powerful spectral clustering methodology working on undirected graphs to hypergraphs. They developed algorithms for transductive classification and hypergraph embedding based on the spectral hypergraph clustering approach. The advantages of hypergraphs over graphs were demonstrated with applications [9].

In Ref. [10], it shows how the concept of network centrality can be adapted to supra-binary networks. The use of the technique was demonstrated by data on the attacks of inhabitants of the Caribbean islands on Spanish settlements in the period 1509-1700.

Hypergraph convolution and hypergraph attention which are two end-to-end trainable operators were introduced to the family of graph neural networks to efficiently learn deep embeddings on higher order graph-structured data. With two operators, a graph neural network is extended to a more flexible model and applied to various applications where non-binary relationships are observed. Extensive experimental results with semi-supervised node classification demonstrated the effectiveness of hypergraph convolution and hypergraph attention [11].

Ramadan et al used hypergraphs to model the yeast proteome, where proteins are nodes and complexes are hyperedges. To define the core proteome, they applied an algorithm that finds tightly connected nodes [12].

Zhou and Nakhleh examined the claim that metabolic networks are hierarchical and small-world networks. The reason for this claim was the graph model, Zhou and Nakleh modeled the metabolic networks of *E. coli* as hypergraphs rather than graphs, showing that the claimed hierarchy and scaling properties were not supported. This means: When biological interactions are simplified into binary relationships and modeled using a graph, they can exhibit a very different structure than when their actual state is modeled using a hypergraph [5].

Multi-morbidity refers to a health condition of having two or more concurrent chronic conditions. In the study [13], the centrality of the diseases according to the multiple status was measured using the hypergraph structure. Compared with the graph structure. It has been shown that hypergraphs can be used as a valuable tool for analyzing poorly understood relationships.

In the study [14], eigenvector centrality was applied to uniform hypergraphs. When the obtained results were examined, it was shown that hypergraphs could be

analyzed, and different information could be revealed about real-world data.

In the study [15], the authors argue that existing methods, which rely on the pairwise correlations between stocks, are not sufficient. They propose a new method that uses hypergraphs to model the relationships between stocks. The authors propose a new model called the hypergraph tri-attention network (HGTAN). HGTAN is a hierarchical attention model that can learn the importance of nodes, hyperedges, and hypergraphs during the information propagation among stocks. This allows HGTAN to fully exploit the potential synergies between stock movements.

The study [16] proposes a new method for learning brain functional connectome (FC) features using a dynamic weighted hypergraph convolutional network (dwHGCN). The dwHGCN is able to learn the importance of hyperedges and assign larger weights to hyperedges with higher discriminative power. This weighting strategy also improves the interpretability of the model by identifying the highly active interactions among ROIs shared by a common hyperedge.

Compared to the previous studies, here, we proposed new, effective, and accurate ways to measure centrality in hypergraphs. The similarities of the nodes and hyperedges were measured in the hypergraphs. Their entropies were found with these values and their centrality was shown.

Methodology

This section provides the necessary technical background, definitions and information for this work. The definitions of these methods and metrics are as follows.

Hypergraphs

A hypergraph is a generalization of a graph in which an edge can contain any number of nodes. Formally, a hypergraph H can be defined as $H = (V, E)$, where V is the set of nodes and E is the set of non-empty subsets of V called hyperedges or edges. Therefore, E is a subset of $P(V)$, where $P(V)$ is the power set of V . In graphs, edges connect pair of nodes, while hyperedges are sets of nodes and thus can contain many nodes depending on the situation.

An $H = (V, E)$ undirected hypergraph has the sets $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ and $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. The union of the e_i elements give the set V . Then H has an incidence matrix with $n \times m$ dimension. The incidence matrix ($I(H)$) is a matrix that shows the relationship between two object classes. If the first class is V and the second is E , the matrix has one row for each element of V and one column for each element of E . For any value of i and j in the I_{ij} incidence matrix, if $I_{ij} = 1$ then $v_i \in e_j$, otherwise $I_{ij} = 0$. These values can be taken as weighted values.

$$I_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } v_i \in e_j \\ 0 & \text{if } v_i \notin e_j \end{cases} \quad (1)$$

Some data structures can be given as an example to understand the hypergraphs. For example, a hypergraph can be created where each node represents an author and each hyperedge represents an article written by several co-authors. An article with k authors has a hyperedge containing k nodes. This way, authors with closer collaboration are connected by more hyperedges. Considering a human brain network, if brain regions are defined as nodes, the neurological interaction of these brain regions can be expressed as a hyperedge. If proteins are defined as nodes and protein complexes can be thought of as hyperedges.

The hypergraphs provide a rich modeling framework, algorithms will necessarily be problem-specific and differ in complexity from algorithms used for graphs [17].

Similarity

The similarity rates of the nodes give us various information about the network. Similarity metrics are important for recommendation systems, link prediction etc. Similarity values used in this study were measured over neighborhoods. Two nodes are neighbors if there is an edge connecting them. If they have large overlap between their neighboring set of nodes, nodes are considered similar [18]. The common neighbor adopts the idea that two strangers with mutual friends are more likely to meet than those without mutual friends. Nodes with many common neighbors have high similarity. Most similarity-based algorithms use common neighbor information. It is widely used in the predictions of whom nodes can connect with in the future [19][20].

Let x and y be nodes. Let $\Gamma(x)$ be the set of nodes connected to x . Let $\Gamma(y)$ be the set of nodes connected by y . Accordingly, the common neighbor value is the intersection of the two sets as,

$$CN_{xy} = S_{xy} = |\Gamma(x) \cap \Gamma(y)| \quad (2)$$

The sum of neighbors is the union of the sets of neighbors of x and y as,

$$SN_{xy} = S_{xy} = |\Gamma(x) \cup \Gamma(y)| \quad (3)$$

Jaccard similarity is the number of common neighbors of two nodes divided by the number of union sets of neighbors. If two nodes have the same neighbors, the

jaccard similarity value is 1. Conversely, if they have no common neighbors, their similarity is 0.

$$Jaccard_{xy} = S_{xy} = \frac{|\Gamma(x) \cap \Gamma(y)|}{|\Gamma(x) \cup \Gamma(y)|} \quad (4)$$

Entropy

The traditional measure of uncertainty is entropy, commonly referred to as the measure of Shannon information [21]. The entropy value tells the uncertainty of a system or, conversely, the amount of information it contains. It is possible to measure and interpret the network complexity in this way. It is a probabilistic calculation method [22]–[24]. If there is a probability of n states occurring in a system, and the probability of each state occurring is represented by p , the entropy of the system is calculated as

$$Entropy = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

When one of the probabilities is 1 and the others are 0, its value is zero and the entropy is minimal. If all probability values are the same and $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$, then entropy is also maximum.

While calculating entropy, node or hyperedge degrees in the incidence matrix (I_{ij}) is used in the equations below. The link weight of *node* i and *hyperedge* j is represented by the value w_{ij} . It must be noted that the node and the hyperedge can switch roles.

$$d(v_i) = \sum_{j=1}^m w_{ij}, \quad d(e_i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (6)$$

$$p(v_{ij}) = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^m w_{ij}}, \quad p(e_{ij}) = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Entropy(v_i) &= - \sum_{j=1}^m p(v_{ij}) \log_2 p(v_{ij}), \\ Entropy(e_i) &= - \sum_{j=1}^n p(e_{ij}) \log_2 p(e_{ij}) \end{aligned} \quad (8)$$

How to measure the entropy has attracted much attention [25]. The entropy calculation was made according to the union, intersection and jaccard similarity values. It transforms from incidence matrix to weighted adjacency matrix (A) that is, similarity matrix (S) in a sense while performing union, intersection and jaccard calculations. The incidence matrix of measure $n \times m$ becomes $n \times n$ for

nodes and $m \times m$ for hyperedges. The method is better understood if the sample application in Section 4 is examined. Let S_{ij} be our jaccard, intersection and union similarity matrix. Let it be $n \times n$ in size for nodes. Probability values for entropy are calculated as

$$p(v_{ij}) = \frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij}}, \quad p(e_{ij}) = \frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}} \quad (9)$$

Centrality

Centrality measures are used to identify the most important nodes of a network. While expressing centrality, we can describe it as influential nodes in a social network, nodes that accelerate the spread of information, points we call hubs in a transportation network, nodes that strengthen the network or key elements that direct the operation of the system. Generally, centrality measures are used in networks to estimate the potential monitoring and control capabilities that nodes may have over the communication flowing in the network [26]. In the dynamic behavior of the network system, the effect of central nodes in the organizational structure is more [27], [28].

Centrality is one of the most studied topics in network analysis. Many methods for centrality have been proposed in the literature to analyze the internal topology of a particular network and to find active nodes. Degree [29], closeness [30], betweenness [30], eigenvector [31] and pagerank [32] are the most commonly used measures of centrality [33]–[37].

Degree centrality allows us to evaluate based on the number of neighbors. It doesn't offer much information about the network. It is restricted to the node.

Betweenness centrality looks at how many times the shortest path between any pair of nodes in the network passes over a node and selects critical nodes accordingly. The critical node indicates how well it mediates the communication of other nodes.

Closeness centrality is a measure in a network that is calculated as the sum of the length of the shortest paths between the node and all other nodes in the network. The central node is the closer to the other nodes. These nodes have the shortest distances to all other nodes and can spread information very efficiently through a network.

This eigenvector centrality is based on the value of the immediate neighbours of each node. The importance of a node is related to how important its neighbors are. It is based on the eigenvalue. The value of a node depends on the value of the nodes linked to it. This measure is not preferred in large networks [38].

The purpose of pagerank is to identify nodes that have many connections to other important nodes. It indicates the probability that the node will be visited in a random walk. It works better for directional networks. It is similar to eigenvector centrality.

Entropy is used in centrality measurements. If we want to measure the effect of a node on the network, entropy values can guide us in this regard. Entropy centrality allows for state-of-the-art centrality in centrality analyses, thus distinguishing network nodes locally central and globally central. It generates the centrality result according to the selected link parameters.

Method with Sample Application

In our study, analysis was performed on data suitable for the hypergraphs. Most tabular real-world data are in this format. The proposed method was tried to be shown on the sample data set. The synthetic data with 4 nodes and 3 hyperedges used in this study are given in Table 1 and visualization in Figure 2.

Table 1. Incidence matrix of the sample dataset

	e_0	e_1	e_2	Node degree
v_0	1	1	1	3
v_1	1	0	1	2
v_2	1	1	0	2
v_3	0	0	1	1
v_4	1	1	0	2
Hyperedge degree	4	3	3	Sum=10

The nodes degree or hyperedges degree are calculated as follows.

$$Node_{degree} = d(v_i) = \sum_{j=1}^m w_{ij} \quad (10)$$

$$Hyperedge_{degree} = d(e_i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (11)$$

In hypergraphs, the roles can be changed for hyperedges and nodes in the process steps. In the example, operations for nodes can be done for hyperedges. We denote the transpose of Incidence matrix I by I^T .

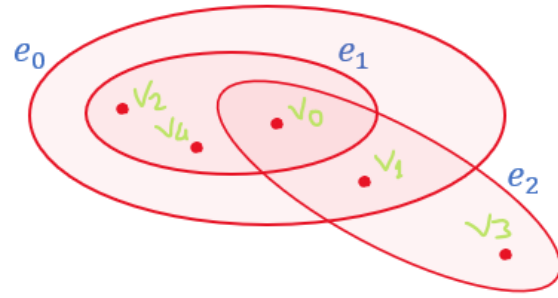


Figure 2. Hypergraph representation of the sample dataset

The intersection and union similarity values were found from the incidence matrix as in Table 2. In addition, one can state that a similarity matrix of nodes and hyperedges was created by intersection or union values. In a sense, hypergraphs were converted into graphs mode.

The intersection values of the nodes were calculated according to how many common hyperedges they were members of. For example, if the value of $intersect(v_0, v_1)$ is 2, that means there are 2 hyperedges where both nodes are elements. The union values of the nodes were calculated according to the total number of hyperedges that these nodes are elements. It suffices for one or both of the nodes to be elements of the hyperedge, for the hyperedge's interior. For example, when $union(v_0, v_1)$ is 3, it indicates that there are 3 hyperedges where either or both two nodes are members.

Table 2. Intersection and union similarity matrices

Nodes intersection						Nodes union					
	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4		v_0	v_1	v_2	v_3	v_4
v_0	0	2	2	1	2	v_0	0	3	3	3	3
v_1	2	0	1	1	1	v_1	3	0	3	2	3
v_2	2	1	0	0	2	v_2	3	3	0	3	2
v_3	1	1	0	0	0	v_3	3	2	3	0	3
v_4	2	1	2	0	0	v_4	3	3	2	3	0

Jaccard similarity values in Table 3 are also calculated from intersection and union similarity values with Eq. 4. From here, the effect of the nodes and hyperedges in the system was identified by the help of entropy. Degree, intersection, union and jaccard similarity values were used while calculating entropy. Accuracy may vary on status as there are different perspectives on centrality calculations. The nodes or hyperedges with a high entropy value are the effective ones.

Table 3. Jaccard similarity matrix

	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4
v_0	0	0,67	0,67	0,33	0,67
v_1	0,67	0	0,33	0,5	0,33
v_2	0,67	0,33	0	0	1
v_3	0,33	0,5	0	0	0
v_4	0,67	0,33	1	0	0

When examined Table 4, it shows the order of centrality with jaccard as $v_0 > v_1 > v_2 = v_4 > v_3$. As it can be seen in the Figure 2, those with the same degrees received equal value in degree centrality. Sorting according to the results obtained with intersection and jaccard was similar. For jaccard and intersection on hyperedges, there is an ordering as $e_0 > e_2 > e_1$. When we look at the entropy values calculated with degrees at the hyperedges, the degrees e_1 and e_2 are the same. An anomaly has occurred in the union entropy. Jaccard and intersection again showed similar behavior.

Table 4. Entropy values with different parameters

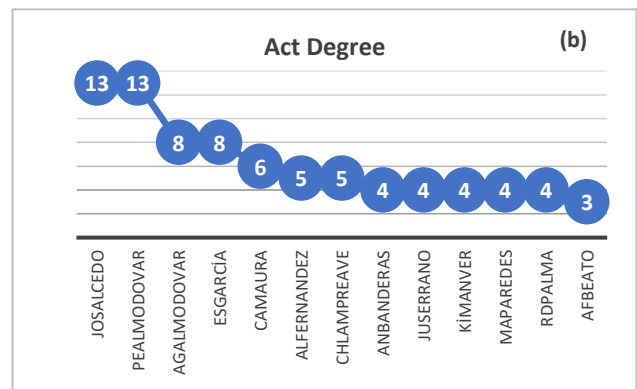
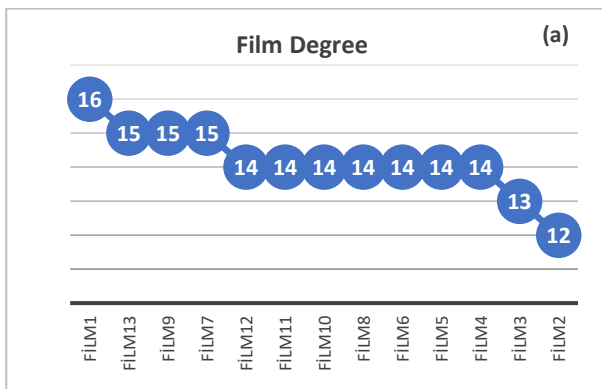
Nodes entropy				
	e_degree	e_intersection	e_union	e_jaccard
v_0	1,58	v_0 1,95	v_0 2	v_0 1,95
v_1	1	v_1 1,92	v_1 1,98	v_1 1,94
v_2	1	v_2 1,52	v_2 1,98	v_2 1,46
v_3	0	v_3 1	v_3 1,98	v_3 0,97
v_4	1	v_4 1,52	v_4 1,98	v_4 1,46

Hyperedges entropy

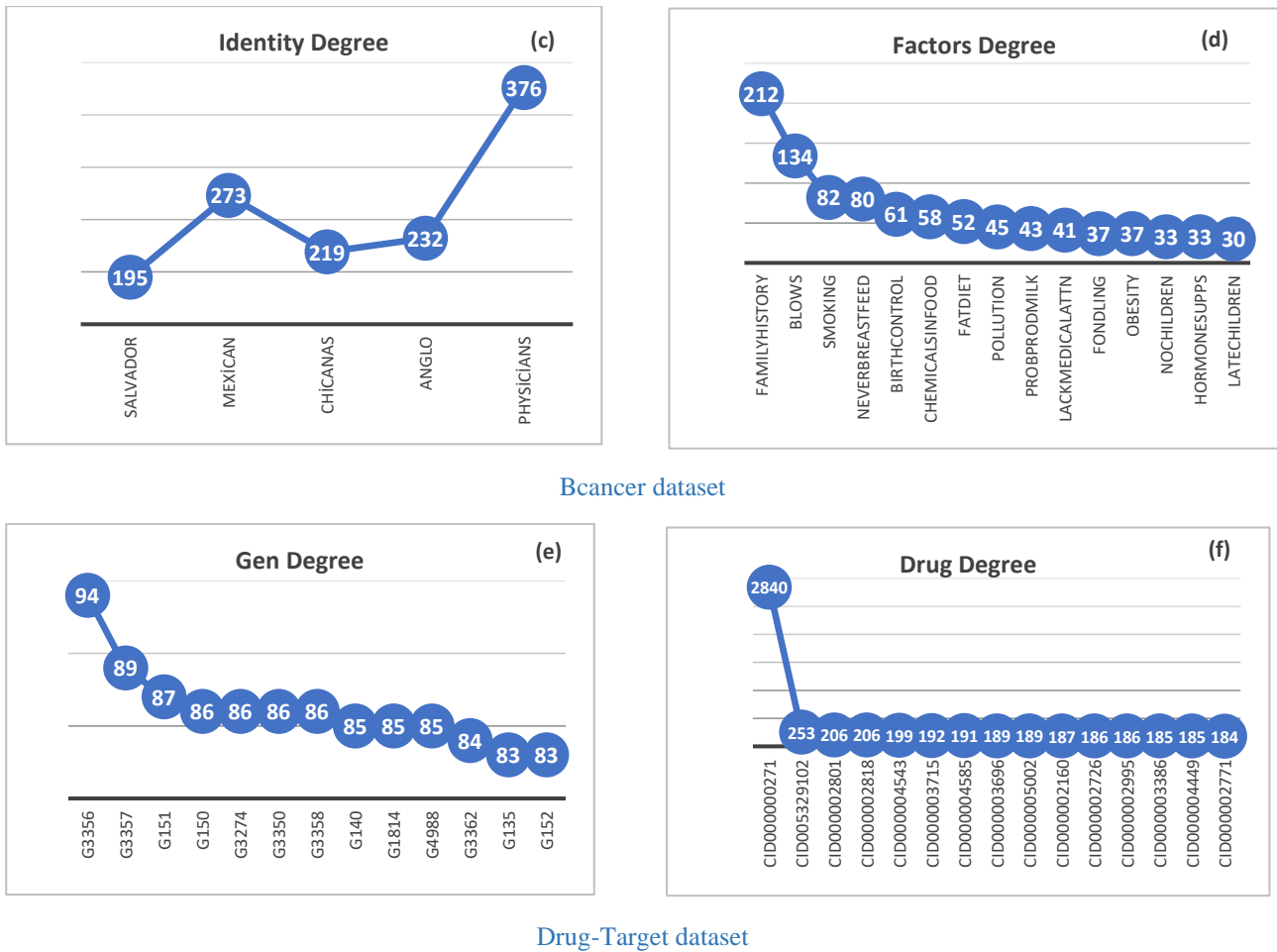
	e_degree	e_intersection	e_union	e_jaccard
e_0	2	e_0 0,97	e_0 0,99	e_0 0,93
e_1	1,58	e_1 0,81	e_1 0,99	e_1 0,74
e_2	1,58	e_2 0,92	e_2 1	e_2 0,92

Experimental Results

The proposed model for centrality was applied to three different datasets. Two of them are Almo incidence and Bcancer datasets in hypergraph structure from Ucinet [39]. The other is a drug-target interaction network that contains information about which genes (i.e., the proteins encoded by the genes) are targeted by drugs on the US market [40]. Results show the effectiveness of our proposed method. Since our aim is to calculate centrality, examining degree centrality values, which is the most basic centrality calculation, can be supportive to evaluate the results. These values can be seen in the Figure 3. Almo incidence dataset contains weighted values. In this dataset, the results are calculated and evaluated using the weighted values.



Almo incidence dataset



Bcancer dataset

Drug-Target dataset

Figure 3. Nodes and hyperedges with the highest degrees in datasets: Almo incidence dataset (a, b), Bcancer dataset (c, d), Drug-Target dataset (e, f)

Degree centrality provides a local measure for centrality. This can be used to compare the results obtained with the proposed method. The top nodes and hyperedges with the highest degree are shown in Figure 3.

Almo incidence

This dataset contains the actors/actress and the movies they acted. The network consists of 94 nodes and 13 hyperedges. In addition, for this dataset, measurements were made with closeness, betweenness, eigenvector and pagerank, which are popular centrality measurements used to give an idea. It is important that which similarity matrix was used when calculating these centralities. There exist challenges to overcome while utilizing the jaccard, for example, a fully connected structure can occur. In this case, centrality measures may not be discriminative. In order to pass this problem, the mean of the jaccard values can be

taken as the threshold value and the similarity values can be converted to 0 and 1 accordingly. It can be done with traditional centrality measurements over the generated neighborhood matrix. When tried, traditional centrality measurements with jaccard for this dataset lost data, the most central node such as JoSalcedo could not be found. When considered logically and tried, it was seen that the intersection should be chosen as the most suitable matrix for these traditional centrality measurements. The results obtained according to the intersection are given in the Table 5.

When the results are compared with the ranking obtained by the proposed method, they show very close similarity.

Table 5. Top 15 centrality measure values for actors/actress

betweenness		closeness		eigenvector		pagerank	
JoSalcedo	0.219234	JoSalcedo	1	JoSalcedo	0.2969519	JoSalcedo	0.043025
PeAlmodovar	0.219234	PeAlmodovar	1	PeAlmodovar	0.2969519	PeAlmodovar	0.043025
AgAlmodovar	0.0585377	AgAlmodovar	0.75	AgAlmodovar	0.2275763	AgAlmodovar	0.0286903
EsGarcia	0.0585377	EsGarcia	0.75	EsGarcia	0.2275763	EsGarcia	0.0286903
CaMaura	0.0385087	CaMaura	0.6888889	CaMaura	0.1912972	CaMaura	0.0239346
ALFernandez	0.0261302	ALFernandez	0.6503497	ChLampreave	0.1670298	ALFernandez	0.0207551
MaParedes	0.021283	ChLampreave	0.6413793	KiManver	0.1649636	ChLampreave	0.0194753
KiManver	0.0196501	KiManver	0.6369863	ALFernandez	0.1645402	MaParedes	0.0190321
ChLampreave	0.0193637	MaParedes	0.6369863	MaParedes	0.1637093	KiManver	0.018881
JuSerrano	0.0187646	JuSerrano	0.6283784	JuSerrano	0.1550742	JuSerrano	0.0181879
CeRoth	0.0179644	CeRoth	0.615894	RdPalma	0.1500216	CeRoth	0.0172539
RdPalma	0.0100128	RdPalma	0.6118421	AnBanderas	0.1421031	RdPalma	0.0162173
AnBanderas	0.0084787	AnBanderas	0.6038961	CeRoth	0.1348246	AnBanderas	0.0154106
NaMartinez	0.007604	BeBonezi	0.5923567	BeBonezi	0.1307885	ViAbril	0.0143355
ViAbril	0.0065776	BiAndersen	0.5923567	NaMartinez	0.1268467	BiAndersen	0.0142692

Table 6. The ranking of hyperedge and node centralities for Almo incidence

Columns (Hyperedges) entropy values									
degree		e_degree		e_union		e_intersection		e_jaccard	
Film1	16	Film1	4	Film2	3.58378	Film6	3.54583	Film6	3.52849
Film13	15	Film13	3.90689	Film1	3.58314	Film2	3.53608	Film2	3.52568
Film9	15	Film9	3.90689	Film11	3.58251	Film1	3.52729	Film1	3.50982
Film7	15	Film7	3.90689	Film3	3.58247	Film11	3.52331	Film11	3.50375
Film12	14	Film12	3.80735	Film6	3.58228	Film3	3.5106	Film3	3.48715
Film11	14	Film11	3.80735	Film12	3.5819	Film7	3.50841	Film7	3.47162
Film10	14	Film10	3.80735	Film10	3.5817	Film13	3.4771	Film13	3.43673
Film8	14	Film8	3.80735	Film9	3.58146	Film9	3.47038	Film9	3.4358
Film6	14	Film6	3.80735	Film13	3.5814	Film4	3.45854	Film10	3.42041
Film5	14	Film5	3.80735	Film8	3.58103	Film8	3.45414	Film4	3.41549
Film4	14	Film4	3.80735	Film7	3.58092	Film10	3.45363	Film12	3.40769
Film3	13	Film3	3.70044	Film4	3.58062	Film5	3.44618	Film8	3.40231
Rows (Nodes) entropy values									
e_degree		e_intersection		e_union		e_jaccard			
JoSalcedo	3.70044	JoSalcedo	6.08382	JoSalcedo	6.53916	JoSalcedo	6.08382		
PeAlmodovar	3.70044	PeAlmodovar	6.08382	PeAlmodovar	6.53916	PeAlmodovar	6.08382		
AgAlmodovar	3	AgAlmodovar	5.55895	AgAlmodovar	6.52975	AgAlmodovar	5.63864		
EsGarcia	3	EsGarcia	5.55895	EsGarcia	6.52975	EsGarcia	5.63864		
CaMaura	2.58496	CaMaura	5.37144	CaMaura	6.51482	CaMaura	5.48868		
ALFernandez	2.32193	ALFernandez	5.18042	ChLampreave	6.50696	ALFernandez	5.30048		
ChLampreave	2.32193	KiManver	5.13573	ALFernandez	6.50025	MaParedes	5.26779		
AnBanderas	2	MaParedes	5.1334	RdPalma	6.49291	KiManver	5.26249		
JuSerrano	2	ChLampreave	5.10723	AnBanderas	6.49226	ChLampreave	5.23232		
KiManver	2	JuSerrano	5.07424	KiManver	6.48835	JuSerrano	5.1861		
MaParedes	2	CeRoth	5.03418	MaParedes	6.48745	CeRoth	5.03378		
RdPalma	2	RdPalma	4.86	JuSerrano	6.48614	RdPalma	4.99562		
AfBeato	1.58496	AnBanderas	4.81727	BeBonezi	6.45845	AnBanderas	4.93421		

The similarities of the methods can be explained by comparing the number of order-independent common nodes for the first 15 nodes. As illustrated in Figure 4 that jaccard entropy centrality and betweenness centrality show similar behavior. And, intersection entropy centrality and eigenvector centrality show similar behavior.

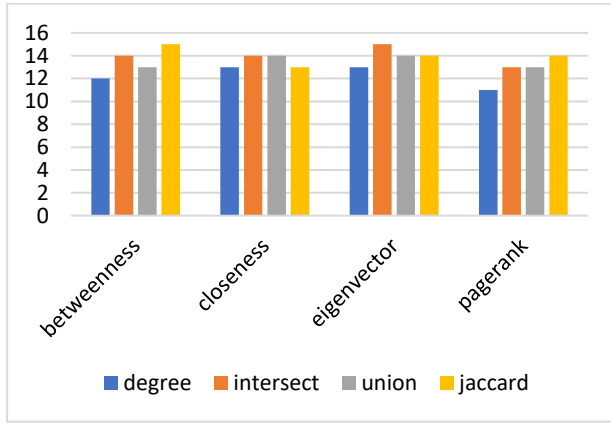


Figure. 4. Comparison of traditional and proposed methods over Almo incidence nodes

When Table 6 is examined, intersection and jaccard gave similar results for hyperedges. There are 13 hyperedges in total. When we examine Film6, which seems to be the most

effective in intersection and jaccard, it hosts nodes (PeAlmodovar, ALFernandez, AgAlmodovar, AnBanderas, BiAndersen, CaMaura, EsGarcia, EuPoncela, HeLine, JoSalcedo, MAPCAmpos, MaVelasco, MiMolina, NaMartinez). Those are the elements of 3 or more hyperedges. In other words, they acted in 3 or more movies. That's why the centrality of Film6 turned out to be high. As the number of nodes or hyperedges increases and their similarity decreases, the ranking will be more discriminative.

Bcancer

Breast cancer is the most common cancer among Hispanic/Latino women and is the leading cause of cancer death among this group in the United States [41]. Bcancer data from Ucinet database is in weighted hypergraph structure. The results of the proposed method were evaluated by including weighted values in the calculation. The causes of cancer were analyzed over the created hypergraph.

The network consists of 33 nodes and 5 hyperedges. Accordingly, the values obtained by the proposed method are given in the Table 7. Smoking was the central node in all calculations. Jaccard and intersect gave similar results again.

Table 7. The ranking of hyperedge and node centralities for Bcancer

Columns (Hyperedges) entropy values									
degree		e_degree		e_intersection		e_union		e_jaccard	
Physicians	376	Mexican	3.51035	Anglo	1.9699	Physicians	1.99488	Anglo	1.92586
Mexican	273	Salvador	3.48718	Mexican	1.94908	Salvador	1.99338	Mexican	1.91209
Anglo	232	Physicians	3.38983	Chicanas	1.94566	Mexican	1.99242	Physicians	1.90489
Chicanas	219	Chicanas	3.35887	Physicians	1.93291	Chicanas	1.99199	Chicanas	1.90475
Salvador	195	Anglo	3.19052	Salvador	1.83659	Anglo	1.9917	Salvador	1.79108
Rows (Nodes) entropy values									
e_degree		e_jaccard		e_intersection		e_union			
Smoking	2.3049	Smoking	4.76513	Smoking	4.76513	Smoking	5		
Birthcontrol	1.9647	Familyhistory	4.76513	Familyhistory	4.76513	Familyhistory	5		
Neverbreastfeed	1.8728	Birthcontrol	4.63419	Birthcontrol	4.59708	Birthcontrol	4.99131		
Familyhistory	1.8077	Blows	4.47119	Blows	4.44228	Blows	4.99114		
Blows	1.7997	Neverbreastfeed	4.47119	Neverbreastfeed	4.44228	Neverbreastfeed	4.99114		
Fatdiet	1.4059	Nochildren	4.40815	Nochildren	4.40386	Fatdiet	4.96807		
Chemicalsinfood	0.9991	Fatdiet	4.37386	Fatdiet	4.30423	Chemicalsinfood	4.96069		
Fibrocystic	0.995	Fibrocystic	4.11798	Fibrocystic	4.0958	Lackmedicalattn	4.96069		
Pollution	0.9825	Chemicalsinfood	4.00621	Chemicalsinfood	4.00182	Pollution	4.95784		
Illegaldrugs	0.9819	Lackmedicalattn	4.00621	Lackmedicalattn	4.00182	Nochildren	4.93597		
Nochildren	0.9673	Probprod milk	3.95958	Probprod milk	4.00163	Probprod milk	4.93479		
Fondling	0.9569	Fondling	3.95958	Fondling	4.00163	Fondling	4.93479		
Lackmedicalattn	0.9474	Lackhygiene	3.95958	Lackhygiene	4.00163	Lackhygiene	4.93479		

Lackhygiene	0.9457	Illegaldrugs	3.95958	Illegaldrugs	4.00163	Illegaldrugs	4.93479
Probprodmilk	0.9103	Pollution	3.78052	Pollution	3.72193	Fibrocystic	4.92809
Implants	0	Breast-Feeding	3.54759	Breast-Feeding	3.70044	Largebreasts	4.91239
Wildlife	0	Alcohol	3.54759	Alcohol	3.70044	Caffeine	4.91239
Abortions	0	Obesity	3.3674	Obesity	3.58496	Radiation	4.90318
Dirtywork	0	Hormonesupps	3.3674	Hormonesupps	3.58496	Diet	4.90318
Breast-Feeding	0	Latechildren	3.3674	Latechildren	3.58496	Justhappens	4.90318
Alcohol	0	Cancerhistory	3.3674	Cancerhistory	3.58496	Breast-Feeding	4.90215
Largebreasts	0	Age	3.3674	Age	3.58496	Alcohol	4.90215
Caffeine	0	Ethnicity	3.3674	Ethnicity	3.58496	Implants	4.87561
Radiation	0	Earlymenses	3.3674	Earlymenses	3.58496	Wildlife	4.87561
Diet	0	Implants	3.22661	Implants	3.45943	Abortions	4.87561
Justhappens	0	Wildlife	3.22661	Wildlife	3.45943	Dirtywork	4.87561
Obesity	0	Abortions	3.22661	Abortions	3.45943	Obesity	4.84096
Hormonesupps	0	Dirtywork	3.22661	Dirtywork	3.45943	Hormonesupps	4.84096
Latechildren	0	Largebreasts	3.11291	Largebreasts	3.32193	Latechildren	4.84096
Cancerhistory	0	Caffeine	3.11291	Caffeine	3.32193	Cancerhistory	4.84096
Age	0	Radiation	3.04719	Radiation	3.32193	Age	4.84096
Ethnicity	0	Diet	3.04719	Diet	3.32193	Ethnicity	4.84096
Earlymenses	0	Justhappens	3.04719	Justhappens	3.32193	Earlymenses	4.84096

Drug-Target Interaction Network

Drug targets are molecules that play a critical role in drug transport, delivery, or activation. For drug target discovery, drug design, drug docking or screening, drug

metabolism prediction, drug interaction prediction, and general pharmaceutical research, drug target information is used [40]. The network consists of 284 nodes and 3648 hyperedges.

Table 8. The ranking of hyperedge and node centralities for Drug-Target Interaction

Columns (Hyperedges) entropy values							
e_degree		e_jaccard		e_intersection		e_union	
G3356	6.5546	G55244	11.6245	G7155	11.5844	G3356	11.8323
G3357	6.4757	G1576	11.5811	G7018	11.583	G3357	11.8323
G151	6.4429	G4215	11.5575	G6326	11.5604	G3358	11.8323
G150	6.4263	G5604	11.5575	G1021	11.5576	G135	11.8322
G3274	6.4263	G51347	11.5519	G140469	11.5576	G140	11.8322
G3350	6.4263	G57551	11.5519	G1612	11.5576	G150	11.8322
G3358	6.4263	G6198	11.5519	G1613	11.5576	G151	11.8322
G140	6.4094	G146802	11.5513	G23604	11.5576	G152	11.8322
G1814	6.4094	G7018	11.5488	G23678	11.5576	G153	11.8322
G4988	6.4094	G120892	11.5443	G27330	11.5576	G155	11.8322
G3362	6.3923	G6790	11.5399	G340156	11.5576	G1814	11.8322
G135	6.375	G316	11.5319	G5585	11.5576	G3274	11.8322
G152	6.375	G1021	11.5286	G5588	11.5576	G3350	11.8322
G153	6.3576	G140469	11.5286	G5592	11.5576	G3351	11.8322
G155	6.3576	G1612	11.5286	G57118	11.5576	G3362	11.8322
Rows (Nodes) entropy values							
e_degree		e_jaccard		e_intersection		e_union	
CID000000271	11.4717	CID000002812	6.9733	CID000002812	7.00897	CID000000271	8.14421
CID005329102	7.98299	CID000004932	6.9457	CID000003198	6.96694	CID005329102	8.04102

CID000002801	7.6865	CID000002156	6.9412	CID000004601	6.88436	CID000002801	8.02022
CID000002818	7.6865	CID000003198	6.8822	CID000004932	6.88323	CID000002818	8.02009
CID000004543	7.63662	CID000003117	6.8818	CID000002156	6.88286	CID000004543	8.01574
CID000003715	7.58496	CID000002756	6.796	CID000003957	6.86086	CID000003715	8.01144
CID000004585	7.57743	CID000002153	6.6629	CID000002267	6.82818	CID000004585	8.00802
CID000003696	7.56224	CID000005035	6.6602	CID000124087	6.81632	CID000005002	8.00627
CID000005002	7.56224	CID000005253	6.5964	CID000005035	6.8	CID000003696	8.00559
CID000002160	7.54689	CID000004601	6.573	CID000002099	6.79511	CID000002726	8.00406
CID000002726	7.53916	CID000124087	6.5128	CID000005530	6.77392	CID000002160	8.00377
CID000002995	7.53916	CID000002267	6.4922	CID000004473	6.77196	CID000002995	8.00259
CID000003386	7.53138	CID000004543	6.4908	CID000003042	6.73112	CID000036811	8.00257
CID000004449	7.53138	CID000002818	6.4876	CID000004178	6.70111	CID000002520	8.00232
CID000002771	7.52356	CID000002801	6.4826	CID000003117	6.69876	CID000004449	8.0018

When gene centrality was examined, degree and union showed similar behavior. The number of genes with similar values in intersection was high. In this dataset, the difference was more for jaccard and intersection for ranking order as seen in Table 8. G7018, G1021, G140469, G1612 are the common genes in the top 15 for jaccard and intersection.

The degree entropy value of the drug CID000000271 was higher than the others. This became the highest influential node or hyperedge for degree and union. The most influential for jaccard and intersection was CID000002812. The number of common elements in the top 15 for the jaccard and intersection results indicates the similarity of the calculation method.

Although CID000000271's rating is too high, it did not appear in the top positions in jaccard and intersection. This shows that when global measurements are desired, intersection and jaccard similarity parameters can be used.

Discussions

Since hypergraphs contain multidimensional information, more factors are effective in the measurement of centrality. It allows the inclusion of relevant data with any number of conditions. Therefore, a multidimensional and detailed centrality measure is obtained. Changing the representation of nodes and hyperedges allows centralities to be viewed from two angles. In addition, measuring weights over similarity is a measure obtained by considering the whole network. It can be a guide in analyzing relationships that cannot be seen, especially as the data grows. The computational cost is also lower in hypergraphs. Hypergraphs are more flexible than graphs, which can make them easier to use in a variety of applications. More is said with less data. Centrality calculation for all data with multidimensional interaction can be easily done in this way. The entropy used for centrality provided a convenient solution for interpreting the local and global potential of the node or hyperedge in the network. Although the most

influential nodes are located at the center of the network, it is difficult to distinguish what type of influence they exert on the network [42], [43]. The effect type of nodes on the network was tried to be understood with the results of different entropy calculations. The choice of similarity type used for entropy indicated the direction of the effect.

Conclusions

This paper presented a new efficient centrality measurement for the nodes of a hypergraph. A new method for measuring centrality over entropy using the neighborhood-based similarity values of nodes and hyperedges. In order to investigate the efficiency of the proposed method, we carried out experiments on several networks and demonstrated the effectiveness. Applying the method to different types of datasets yielded accurate results. It enabled us to reach global and local results according to our similarity choice in hypergraphs. Centrality measurement was performed separately for nodes and hyperedges. Since the hypergraphs were converted into graphs over similarity, the weight value, which in a sense expresses the importance of the edge, was given. Therefore, loss of information was reduced. Since these weights are used in entropy measurements, their effects on the whole system were measured. Measuring centrality in hypergraphs that contain multiple aspects of the interaction environment gave us more information. This analysis can be applied to a wide variety of networks. Hypergraphs can be more scalable than graphs for certain problems, such as clustering and recommender systems. This is because hyperedges can represent multiple relationships between vertices, which can help to reduce the number of vertices and edges that need to be considered. They are able to model complex relationships, they can be more scalable, and they are more flexible. As a result, hypergraphs are becoming increasingly popular in a variety of applications.

Ethics Committee Approval

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

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared. References

References

- [1] F. Battiston *et al.*, “Networks beyond pairwise interactions: Structure and dynamics,” *Phys. Rep.*, vol. 874, pp. 1–92, Aug. 2020.
- [2] S. G. Aksoy, C. Joslyn, C. Ortiz Marrero, B. Praggastis, and E. Purvine, “Hypernetwork science via high-order hypergraph walks,” *EPJ Data Sci.*, vol. 9, no. 1, p. 16, Dec. 2020.
- [3] K. Bouafia and B. Molnár, “Hypergraph Application on Business Process Performance,” *Information*, vol. 12, no. 9, p. 370, Sep. 2021.
- [4] E. Busseniers, “General Centrality in a hypergraph,” *arxiv*, Mar. 2014.
- [5] W. Zhou and L. Nakhleh, “Properties of metabolic graphs: biological organization or representation artifacts?,” *BMC Bioinformatics*, vol. 12, no. 1, p. 132, Dec. 2011.
- [6] İ. Değirmenci, “Entropy measures and the maximum entropy principle,” Hacettepe University, 2011.
- [7] A. Ullah, B. Wang, J. Sheng, J. Long, N. Khan, and Z. Sun, “Identifying vital nodes from local and global perspectives in complex networks,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 186, p. 115778, Dec. 2021.
- [8] S. Feng *et al.*, “Hypergraph models of biological networks to identify genes critical to pathogenic viral response,” *BMC Bioinformatics*, vol. 22, no. 1, p. 287, Dec. 2021.
- [9] D. Zhou, J. Huang, and B. Schölkopf, “Learning with hypergraphs: Clustering, classification, and embedding,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2007.
- [10] P. Bonacich, A. Cody Holdren, and M. Johnston, “Hyper-edges and multidimensional centrality,” *Soc. Networks*, vol. 26, no. 3, pp. 189–203, Jul. 2004.
- [11] S. Bai, F. Zhang, and P. H. S. Torr, “Hypergraph Convolution and Hypergraph Attention,” Jan. 2019.
- [12] E. Ramadan, A. Tarafdar, and A. Pothen, “A hypergraph model for the yeast protein complex network,” in *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings.*, 2004, pp. 189–196.
- [13] J. Rafferty *et al.*, “Ranking sets of morbidities using hypergraph centrality,” *J. Biomed. Inform.*, vol. 122, 2021.
- [14] A. R. Benson, “Three Hypergraph Eigenvector Centralities,” *SIAM J. Math. Data Sci.*, vol. 1, no. 2, 2019.
- [15] C. Cui, X. Li, C. Zhang, W. Guan, and M. Wang, “Temporal-Relational hypergraph tri-Attention networks for stock trend prediction,” *Pattern Recognit.*, vol. 143, p. 109759, Nov. 2023.
- [16] J. Wang *et al.*, “Dynamic weighted hypergraph convolutional network for brain functional connectome analysis,” *Med. Image Anal.*, vol. 87, p. 102828, Jul. 2023.
- [17] S. Klamt, U.-U. Haus, and F. Theis, “Hypergraphs and Cellular Networks,” *PLoS Comput. Biol.*, vol. 5, no. 5, p. e1000385, May 2009.
- [18] Y. Yang, J. Pei, and A. Al-Barakati, “Measuring in-network node similarity based on neighborhoods: a unified parametric approach,” *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 43–70, Oct. 2017.
- [19] S. Li, J. Huang, Z. Zhang, J. Liu, T. Huang, and H. Chen, “Similarity-based future common neighbors model for link prediction in complex networks,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, p. 17014, Dec. 2018.
- [20] İ. Tuğal, M. Kaya, and T. Tuncer, “Link prediction in disease and drug networks,” in *6-th International Conference of Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application (ACSN 2013)*, 2013, pp. 46–50.
- [21] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell Syst. Tech. J.*, 1948.
- [22] İ. Tuğal and A. Karıcı, “Comparisons of Karıcı and Shannon entropies and their effects on centrality of social networks,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 523, pp. 352–363, 2019.
- [23] Y. Song and Y. Deng, “Entropic Explanation of Power Set,” *Int. J. Comput. Commun. Control*, vol. 16, no. 4, Aug. 2021.
- [24] C. Hark and A. Karıcı, “Karıcı summarization: A simple and effective approach for automatic text summarization using Karıcı entropy,” *Inf. Process. Manag.*, vol. 57, no. 3, p. 102187, May 2020.
- [25] Y. Deng, “Deng entropy,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 91, pp. 549–553, 2016.
- [26] V. Chellappan, K. M. Sivalingam, and K. Krithivasan, “A Centrality Entropy Maximization Problem in Shortest Path Routing Networks,” *Comput. Networks*, vol. 104, pp. 1–15, Jul. 2016.
- [27] Z. Qiu, T. Fan, M. Li, and L. Lü, “Identifying vital nodes by Achlioptas process,” *New J. Phys.*, vol. 23, no. 3, p. 033036, Mar. 2021.
- [28] C. Hark, T. Uçkan, E. Seyyarer, and A. Karıcı, “An Unsupervised Approach Based on Node Centralization for Text Summarization,” *Bitlis Eren Univ. J. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 1109–1118, Sep. 2019.

- [29] L. C. Freeman, "Centrality in social networks conceptual clarification," *Soc. Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 215–239, 1978.
- [30] L. C. Freeman, "A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness," *Sociometry*, vol. 40, no. 1, p. 35, Mar. 1977.
- [31] P. Bonacich, "Some unique properties of eigenvector centrality," *Soc. Networks*, vol. 29, no. 4, pp. 555–564, 2007.
- [32] S. Brin and L. Page, "The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine," *Comput. Networks ISDN Syst.*, vol. 30, no. 1–7, pp. 107–117, Apr. 1998.
- [33] J. P. Scott, *Social Network Analysis: A Handbook*. 2000.
- [34] E. Estrada, *The Structure of Complex Networks*, vol. 45, no. 2. 2011.
- [35] P. Hu, W. Fan, and S. Mei, "Identifying node importance in complex networks," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 429, pp. 169–176, 2015.
- [36] Z. W. Liang and J. P. Li, "Identifying and ranking influential spreaders in complex networks," in *2014 11th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, ICCWAMTIP 2014*, 2014, pp. 393–396.
- [37] S. Wang, Y. Du, and Y. Deng, "A new measure of identifying influential nodes: Efficiency centrality," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 47, pp. 151–163, 2017.
- [38] Y. Yu, B. Zhou, L. Chen, T. Gao, and J. Liu, "Identifying Important Nodes in Complex Networks Based on Node Propagation Entropy," *Entropy*, vol. 24, no. 2, p. 275, Feb. 2022.
- [39] S. P. Borgatti, M. G. Everett, and L. C. Freeman, "UCINET 6 For Windows: Software for Social Network Analysis, Analytic Technologies, Harvard, MA.," *Anal. Technol.*, 2002.
- [40] M. Zitnik, R. Sosi, S. Maheshwari, and J. Leskovec, "BioSNAP Datasets: Stanford Biomedical Network Dataset Collection," 2018. [Online]. Available: <https://snap.stanford.edu/biodata/datasets/10015/10015-ChG-TargetDecagon.html>.
- [41] E. J. Power, M. L. Chin, and M. M. Haq, "Breast Cancer Incidence and Risk Reduction in the Hispanic Population," *Cureus*, Feb. 2018.
- [42] Y. Liu, B. Wei, Y. Du, F. Xiao, and Y. Deng, "Identifying influential spreaders by weight degree centrality in complex networks," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 86, pp. 1–7, May 2016.
- [43] T. Bian and Y. Deng, "A new evidential methodology of identifying influential nodes in complex networks," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 103, pp. 101–110, 2017.



Bulanık Mantık Tip-3 Kullanılarak Mikro Şebeke Frekans Regülasyonu

Microgrid Frequency Regulation Using Fuzzy Logic Type-3

İsmail Türk^{1*}, Heybet Kılıç²¹ Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş., ismailtrk5253@gmail.comORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0686-6769>² Dicle Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, heybet.kilic@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6119-0886>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Haziran 2023
Revizyon 4 Temmuz 2023
Kabul 5 Temmuz 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Dağıtık Üreteçler, PV, Rüzgar,
Yakıt hücresi, Batarya, Tip-3
Bulanık Mantık, Frekans
Kontrol, Mikro şebekeler

ÖZ

Geleneksel enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevreye zarar vermesi gibi dezavantajlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artmasına neden olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları süreksizlik sorunuyla karşı karşıyadır. Bu sorunu çözmek için mikro şebeke sistemleri önerilmektedir. Mikro şebekeler güç dengesizliği, jeneratör hızı ve yük değişiklikleri gibi durumlarda frekans problemleri yaşayabilir, bu da teknik ve ekonomik sorunlara yol açar. Bu makalede, güç dengesizliği sorununu çözmek için tip-3 bulanık mantık kontrolör (T3-BMK) temelli bir kontrol şeması sunulmaktadır. Bu kontrol şeması, matematiksel modellere dayanmaz ve değişken hava koşulları ve üretim ve tüketimdeki değişimi hesaba katarak kontrol etme imkanı sağlar. Önerilen kontrol şeması, kurallara ek olarak bulanık kümelerin parametrelerini hızlı bir şekilde ayarlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca, önerilen T3-BMK tabanlı kontrol şeması, güç dengesizliklerini etkin bir şekilde çözebilir ve mikro şebekelerin istikrarını artırabilir. Bu çalışmada, önerilen yöntem, bir mikro şebeke üzerinde gerçekleştirilen bir vaka çalışmasıyla test edilmiş ve T1-BMK, T2-BMK ve klasik PID yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen şemanın frekans stabilizasyon performansının diğer yöntemlere göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, değişken yük, bilinmeyen dinamikler ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki değişiklikler gibi zorlu koşullar altında da başarılı bir şekilde frekans stabilizasyonu sağlayabilmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 June 2023
Received in revised form 4 July 2023
Accepted 5 July 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Distributed generations, PV, Wind,
Fuel cell, Battery, Type-3 fuzzy logic,
Frequency control, Microgrids

ABSTRACT

The rise in use of renewable energy sources can be attributed to the presence of drawbacks, such as the depletion of conventional energy sources and the adverse impact on the environment. Renewable energy sources have the challenge of intermittency. In order to address this issue, the implementation of microgrid systems is suggested. Frequency issues can arise in microgrids due to factors such as power imbalances, fluctuations in generator speed, and changes in load. These issues can lead to both technical and economic challenges. This article presents a control strategy that utilizes a type-3 fuzzy logic controller (FLC) to address the issue of power imbalance. The control technique in question does not rely on mathematical models and offers the potential to incorporate changeable weather conditions as well as fluctuations in production and consumption. The control technique that has been proposed is specifically designed to efficiently modify the parameters of fuzzy sets, as well as the associated rules. Additionally, the control method based on T3-FLC that has been suggested demonstrates the capacity to efficiently address power imbalances and enhance the stability of microgrids. The suggested methodology has undergone testing through a case study conducted on a microgrid, and has been compared to T1-FLC, T2-FLC, and standard PID approaches. The results collected from the study demonstrate that the proposed system exhibits superior frequency stabilization performance compared to alternative techniques. Furthermore, it has the capability to effectively ensure frequency stabilization in demanding scenarios characterized by fluctuating loads, uncertain dynamics, and variations in renewable energy sources.

Doi: 10.24012/dumf.1318132

* Sorumlu Yazar

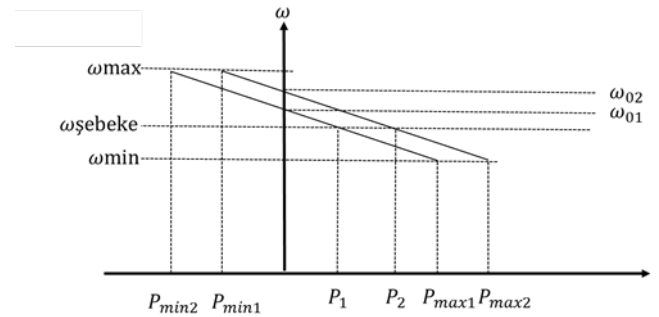
Giriş

Fosil yakıtların sınırlı kaynaklara sahip olması, çevresel zararlar yaratması, aynı zamanda dünya genelinde artan petrol fiyatları gibi nedenler, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK'lere) yönelmeye itmiştir [1]. Özellikle fosil yakıt rezervlerinin sürekli azalması ve karbon emisyonlarının artışı, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş hızını her geçen gün artırmaktadır [2],[3]. YEK'lerin geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla daha temiz ve son yıllardaki teknolojik gelişmelerin katkısıyla daha ekonomik olması, bu geçişi daha da hızlandırmıştır [4]. Bu noktada, YEK'lerin kullanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan elde edilen faydalara işaret etmektedir. Bu faydalar, fosil yakıtlarda olduğu gibi sera gazı emisyonlarına yol açmadan enerji üretimi sağlayarak hava kirliliğini azaltmayı içerir. Ayrıca, enerji arzını çeşitlendirerek ithal yakıtlara olan bağımlılığı azaltır. YEK'lerin üretimi, kurulumu ve farklı sektörlerde uygulanması, ekonomik büyümeyi ve istihdamı destekleme potansiyeli taşır. Ayrıca, yenilenebilir enerji (YE) kullanımının daha düşük termal, taşıma ve dönüşüm kayıpları nedeniyle enerji verimliliğini artırdığını belirtmektedir [7]. Bu olumlu etkilerin ötesinde, ulusal hükümetler de YEK yatırımlarını teşvik etmektedir. Örneğin, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi, 2030 yılına kadar emisyonları 1990 seviyelerinin en az %40 altına indirme hedefini ortaya koymuştur [5].

Mikro şebekeler (MŞ'ler), YEK'lerin artan kullanımı ve enerji talebinin sürekli yükselmesi sebebiyle günümüzde önemli bir enerji dağıtım stratejisi olarak öne çıkmaktadır [6]. MŞ'ler, depolama cihazları (volanlar, enerji kapasitörleri ve piller) ile esnek yüklerin birleştiği, dağıtılmış enerji kaynaklarına (DEK) (örneğin mikro türbinler, yakıt hücreleri, fotovoltaik paneller vb.) dayalı sistemlerdir. Bu sistemler hem şebekeye bağlı (on-grid) hem de bağımsız şebekeden (off-grid) işleyebilme kapasitesine sahiptirler [7]. MŞ'lerin genel faydaları, güvenilirlik, düşük enerji maliyetleri, enerji güvenliği, temiz enerji kullanımı ve esnek çalışma yapısı gibi faktörlerden oluşmaktadır [8],[9]. Ancak, MŞ'lerin YEK'lerin şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmasına rağmen, bazı teknik zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorlukların büyük bir kısmı, YEK'lerin kesintili bir doğaya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. MŞ'ler, enerji depolama çözümleriyle kısmen bu sorunları aşmaya çalışsa da sistemin kararlılığını etkileyen kritik teknik problemler hala varlığını sürdürmektedir. Bir mikro şebekede iki tür kararlılık vardır: kararlı durum kararlılığı ve dinamik kararlılık. Kararlı durum kararlılığı, MŞ'nin normal ve anormal koşullar altında bile belirli sınırlar içinde sabit bir voltaj ve frekansı koruma yeteneğini ifade eder [10]. Dinamik kararlılık ise, yük veya üretimdeki değişiklik gibi bir bozulmadan sonra sistemin kararlı duruma geri dönme yeteneğini içerir. MŞ'lerin kararlılık seviyesini ve arıza olasılığını etkileyen ve sürekli izlenmesi gereken en önemli meselelerden biri, frekans dalgalanmalarıdır

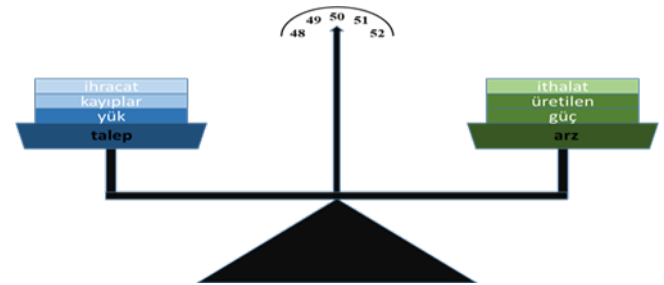
Geleneksel güç sistemlerinde olduğu gibi, MŞ'lerde de enerji arzı (üretim) ve enerji talebi (yük) olmak üzere iki temel unsur büyük önem taşımaktadır. Bu iki bileşen, şebeke frekansını direkt olarak etkiler ve frekans regülasyonunun temelini oluşturur. MŞ'lerde enerji arzı ve talebi, sürekli değişen koşullar altında dinamik bir yapı sergiler. Enerji

üretimindeki dalgalanma, örneğin güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi veya diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı jeneratörlerin etkisinden kaynaklanabilir. Yük azaldığında veya üretim arttığında, jeneratör hızı/frekansı artma eğiliminde olurken, artan yük ve üretim talebi durumunda ise jeneratör hızı/frekansı düşer. Aynı şekilde, enerji talebi, kullanıcıların tüketim alışkanlıkları ve etkinlikleri nedeniyle zaman içinde değişiklik gösterebilir. Yük ve üretimdeki değişiklikler, jeneratör hızı veya frekansı üzerinde anlık değişikliklere yol açar. Frekans regülasyonunun amacı, enerji arzı ve talebini sürekli olarak dengeleyerek frekansın nominal değerinde kalmasını ve şebekenin kesintisiz işleyişini sağlamaktır. Bu, MŞ sistemlerinin kararlılığı ve güvenilirliği için son derece kritik bir önem taşır. Sonuç olarak, MŞ sistemleri istikrarlı ve güvenilir bir şekilde faaliyet gösterebilir ve enerji verimliliği ile sürdürülebilirliği artırılabilir.



Şekil 1. Güç ve frekans grafiği

Şekil 1'deki grafiğe baktığımızda, enerji arzı ve talebinin birbirine eşit olduğu durumda mikro şebeke frekansı (ω_{grid}) nominal değerinde bulunmaktadır. Ancak, zaman içinde enerji talebi artış gösterir ve enerji arzı ile dengesizlik meydana gelir. Enerji talebi, enerji arzını aştığında (artan yük durumunda), enerji arzı talebi karşılayamaz ve frekans düşüş göstermeye başlar. Tersine, enerji talebi azalmışsa (azalan yük ile beraber), frekans artış göstermeye başlar.



Şekil 2. Arz-talep frekans etkisi

Şekil 2 incelendiğinde, başlangıçta enerji arzı ve talebinin birbirine eşit olduğu ve frekansın nominal değeri olan 50 Hz seviyesinde olduğu görülmektedir. Ancak, zaman içinde enerji talebinde artış meydana gelir ve enerji arzı ile dengesizlik ortaya çıkar. Enerji talebi, enerji arzını aştığında

(artan yük durumunda), enerji arzı talebi karşılayamaz ve frekans düşmeye başlar. Bu durumda, frekans nominal değeri olan 50 Hz'nin altına düşer. Diğer yandan, enerji talebinde azalma gerçekleştiğinde ve enerji arzı talebi aşan bir seviyeye yükseldiğinde (azalan yük durumunda), enerji arzı fazladan güç üretmek zorunda kalır ve frekans artış göstermeye başlar. Bu durumda, frekansın nominal değeri olan 50 Hz'nin üstüne çıkar.

MŞ sistemlerinde, dağıtılmış üretime dayalı yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek payıyla birlikte yerel enerji talebi yönetimi, genel güç güvenliği, kalitesi ve güvenilirliğinin artırılması gibi hedefler için çeşitli yük frekans kontrol (LFC) yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar öne çıkmaktadır [11]. Bu çalışmalar genellikle geleneksel kontrol ve akıllı kontrol yöntemleri olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Tablo 1'e bakınız). Geleneksel yöntemlerde farklı stratejiler benimsenmiştir. MŞ'nin voltajı ve frekans regülasyonunun temel teorilerine dayalı bir kontrol şeması [12]'de sunulmuştur. Bu kontrol şeması, enerji depolama sistemlerinin (BESS) tepkisini içermektedir. [13]'te hızlı yanıt veren invertör tabanlı dağıtık enerji kaynaklarının yavaş etkili jeneratör setleri ile koordineli çalışmasını sağlamak amacıyla bir yöntem önerilmiştir. Frekans düzenlemesi, farklı dağıtık enerji kaynakları arasında yük paylaşımını içermektedir. Çift beslemeli endüksiyon generatörünün güç kontrol yöntemi [14]'te ele alınmıştır. Güç sarkması sorununu aşmak için, jeneratör güç marjı ayrılmıştır. [15]'de, beklenmedik durumlar sırasında elektrik şebekesinin sistem frekansını stabilize etmek için rastgele talep yanıt algoritması önerilmiştir. MŞ için çevresel koşulların göz önünde bulundurulduğu bir frekans tabanlı talep yönetim sistemi [16]'da sunulmuştur. [17]'de, rüzgâr enerjisi santrallerinin birincil frekans kontrolüne katılımının değerlendirilmesi yapılmış ve volan tabanlı bir depolama sistemi ile donatılmıştır. MŞ'de daha fazla atalet sağlamak amacıyla geleneksel senkron jeneratörün dinamik davranışını taklit eden bir birincil kontrolör önerilmiştir [18]. Adalı bir MŞ'ye entegre edilmiş elektrikli araçların (EV) yük frekans kontrolüne (LFC) katılacakları şekilde kontrol etmek için bir yöntem [19]'da önerilmiştir. Yakıt hücreli MŞ'nin istenen dinamik özellikleri sağlayacak bir kontrolör parametrelerinin belirlenmesi esasına dayandırılmış ve kontrolörün kararlı parametreleri, kazanç ve faz marjı kararlılık sınır konumu yöntemi ile belirlenmiştir [20].

Akıllı (intelligent) veya yumuşak hesaplamalı (soft computing) yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda ise, daha özgün ve sofistike yaklaşımlar görülmektedir. [21]'de, sensör tabanlı hataya dayanıklı bir kontrol şeması önerilmiştir. Bu çalışmada ayrıca kayan kipli kontrol yöntemi ile siber saldırılara da karşı koruma sağlanmıştır. Frekansa duyarlı sanal atalet kontrol teknikleri tartışılmış ve atalet kazançlarını modüle etmek temelinde iki kontrol şeması [22]'de önerilmiştir. Bulanık potansiyel fonksiyonu temelleri, mikro şebeke ikincil seviye kontrolünde her bir dağıtık enerji kaynağı ünitesinin ayar noktasının belirlenmesi için gradyan düzgün yöntemiyle minimize edilen potansiyel fonksiyonunu tanımlamak için kullanılmıştır [23]. Kontrol edilebilir kaynaklar için frekans salınımlarını sönmölemek amacıyla PI kontrolörlerinin uygulandığı bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, sistemin kontrolü için Particle Swarm Optimization ile Optimal Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) kontrol

algoritması [24]'te kullanılmıştır. [25]'te, genel Tip II Bulanık Mantık Kümeleri (GT2FLS) ve Değiştirilmiş Harmony Arama Algoritması (MHSA) tekniğinin birleştirilerek orantılı-integral (PI) denetleyicinin uyarlamalı ayarına odaklanılmıştır. Adalı modda çalışan MŞ'nin yük frekans kontrolünün doğrusal ikinci dereceden diferansiyel oyunlar teorisi temelinde incelenmiştir [26]. MŞ'nin yük değişikliği sonrasında en uygun çalışma noktasını belirlemek için optimizasyon temelli bir PI kontrolör [27]'de tasarlanmıştır. [28]'de, gemi güç sistemindeki adalı mikro şebekeler için bir optimal kesirli sıralı bulanık PD+I yük frekans kontrolörü tasarlanmıştır. Ada modunda çalışan bir MŞ'nin yük frekans kontrolü için Sinüs Lojistik haritası tabanlı kaotik sinüs kosinüs algoritması (2D-SLCSA) ile optimize edilmiş klasik PID denetleyici [29]'da önerilmiştir. [30]'da, bir bulanık düşün denetleyicisinde yapay arı kolonisi (ABC) algoritmasının kullanıldığı görülmüştür. [31]'de frekans regülasyonu için derin öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. [32]'de, tamsayı derece yaklaşımlı kesir dereceli PID kontrolörünün (IOA FOPID) farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak tasarlandığı gözlemlenmiştir. Çift giriş aralıklı tip-2 bulanık kesir dereceli PI (SIT2-FFOPI) denetleyicisinin önerildiği ve çevrimdışı bir yöntemle denetleyici parametrelerinin belirlendiği görülmüştür [33]. [34]'te, kademeli çift giriş aralığı tip 2 bulanık mantık denetleyicisinin (C-DIT2-FLC) frekans regülasyonu için tasarlandığı bulunmuştur.

Bu çalışmada, daha yüksek kapasiteli hesaplamalar kullanılarak T3-BMK tabanlı bir denetleyici önerilmektedir. Bu yaklaşım, daha karmaşık sistem dinamiklerini etkin bir şekilde modellemeye imkân tanır. Önerilen yöntem, özellikle MŞ'nin dinamiklerine özgü gereksinimleri göz önünde bulundurarak tasarlanmıştır, bu nedenle dinamikler hakkında derinlemesine bilgi gereksinimi azaltılmıştır. Bu da denetleyicinin geniş bir uygulama yelpazesi için kullanılabilirliğini artırır. Geleneksel BMK tabanlı denetleyicilerden farklı olarak, önerilen yöntem doğrusal olmayan özellikleri içerir ve bu sayede MŞ sistemlerindeki belirsizliklere daha iyi uyum sağlayabilir. Kural tabanının yanı sıra, üyelik fonksiyonları da hızlandırılmış öğrenme algoritmaları ile ayarlanır. Bu özellik, denetleyicinin hızlı ve etkili bir şekilde öğrenme yeteneğini artırır. Ayarlar çevrimiçi bir yaklaşımla sürekli olarak güncellenir ve her örnekleme zamanında adaptasyon sağlanır. Bu da değişken koşullar altında bile denetleyicinin performansını optimize etmeyi mümkün kılar. Tüm kazançlar aynı anda ayarlanarak denge ve kararlılık sağlanır. Tekil olmayan bulanıklaştırma, hatalarının etkisini azaltarak daha güvenilir bir kontrol sağlar. Yük değişiklikleri, rüzgâr/güneş güçlerinin dalgalanmaları ve diğer dinamik bozulmalar gibi farklı zorlu koşullarda önerilen yöntemin daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Tablo 1. Kontrol yöntemleri avantaj ve dezavantajları

Referanslar	Yıl	Grup	Avantajlar/Faydalar	Dezavantajlar/Sınırlamalar
[12]	2017	Geleneksel	(i) sarkma tabanlı yöntemin zayıf geçici yanıt zayıflıklarının önüne geçilmesi	(i) iletim için yüksek bant aralığı gerekli olması
[13]	2018	Geleneksel	(i) jeneratörler arasında eşit olmayan geçici yük paylaşımı	(i) geçici yüklenmenin aşırı olması durumunda DEK' ler zarar görebilmesi ve tüm sistemin çökebilmesi
[14]	2016	Geleneksel	(i) Her bir mikro kaynağın çalışma özellikleri dikkate alınması	(i) arıza anında rüzgâr türbin frekans düzenlenmesine en uygun garanti sağlanmıyor olması
[15]	2014	Geleneksel	(i) merkezi kontrol gerektirmesi (ii) üst üste bindirilmiş iletim altyapısı gerektirmesi	(i) ekonomik uygulanabilirlik sorunu
[16]	2014	Geleneksel	(i) yüklerin kategorizasyonu (ii) yük frekans kontrolü olmayan sistemlere uygulanabilirliği	(i) müşteri memnuniyetsizliği
[17]	2015	Geleneksel	(i) rüzgâr türbin ve volan güç rezervlerinin koordinasyonu	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınıma etkisine değinilmemesi
[18]	2015	Geleneksel	(i) dizel tahrikli jeneratör ve PV koordinasyonu	(i) her kontrolör yerel olarak çalışsa da kontrolörler ve parametreler merkezi olarak tasarlanması
[19]	2018	Geleneksel	(i) elektrikli araçların (EV) yük frekans kontrolüne katılması	(i) K sabitesi büyüdüğünde sistem kararlılığı garanti edilemeyebilir.
[20]	2021	Geleneksel	(i) Yakıt hücrelerinin yedek jeneratör olarak kullanımı	(i) matematiksel tabanlı denklemler de GPM değeri belirlenen sınırın üzerine çıkması durumunda frekans bozunumu.
[21]	2018	Akıllı	(i) kayan kipli kontrol ile siber saldırı ve hata etkisinin azaltılması	(i) sensör tabanlı yaklaşımda sensör başarısız olursa tüm kontrol ve veriler kaybolabilmesi
[22]	2018	Akıllı	(i) bulamak tabanlı şema kullanımı (ii) rüzgâr türbini stabilitesi	(i) PV gibi diğer üretim kaynaklarının sistem etkileri değerlendirilmemesi
[23]	2013	Akıllı	(i) ikincil seviye kontrolünde dağıtılan her bir enerji kaynağı birimi için ayar noktası hesaplanması	(i) hesaplamada K sabitesi artarsa, eigen değerler kararsız bölgeye doğru hareket eder, bu da sistemde salınım yapması ve kararsızlığa yol açılabilir
[24]	2014	Akıllı	(i) mikro şebekedeki bozulmadan kaynaklanan frekans salınımını en aza indirecek kontrol matrislerini bulmak için PSO tekniği uygulanması	(i) sistem transient zaman durumundayken kontrolör ilk anda harekete geçip frekans salınımları oluşturabilmesi

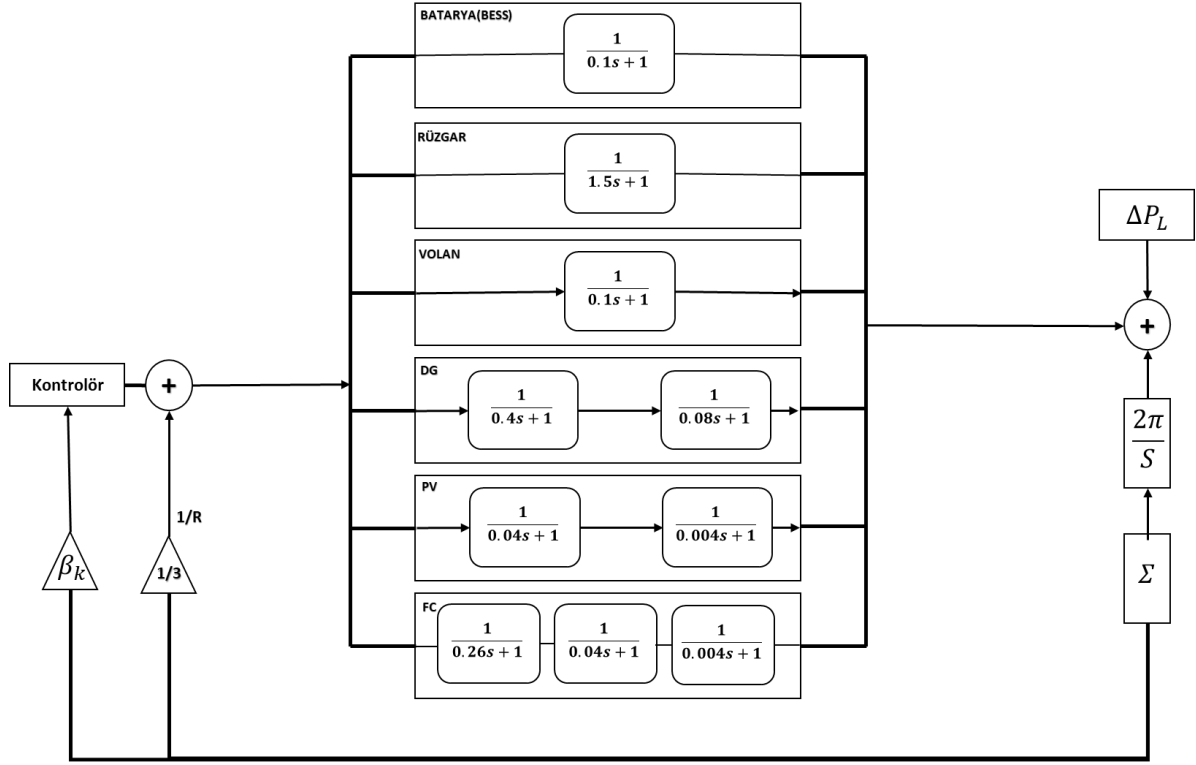
Tablo 1. Kontrol yöntemleri avantaj ve dezavantajları devamı

Referanslar	Yıl	Grup	Avantajlar/Faydalar	Dezavantajlar/Sınırlamalar
[25]	2016	Akallı	(f) yöntemin farklı şebeke topolojileri, yenilenebilir kaynaklar ve farklı yükler için kullanılabilirliği (i) Her bir mikro kaynağın çalışma özellikleri dikkate alınması (ii) Mikro şebeke sistemindeki mikro DG'lerin koordinasyonu düzenlemesinin gerçekleştirilebilmesi için tüm bileşenlerin faydası göz önünde bulundurulması	(i) uzun süreli durumlarda sistem kararlılığını sağlayamayabilmesi
[26]	2018	Akallı	(i) amaç fonksiyonları, bulanık üyelikler kullanılarak birleştirilmiştir (ii) Optimizasyon problemini çözmek için Hybrid Big Bang-Big Crunch algoritması (HBB-BC) kullanılması (iii) yöntem yük değişimleri sırasında sistem voltaj/frekansını düzenlemesi	(i) bu yöntem yalnızca merkezi olmayan kontrol yöntemi için geçerli olması
[27]	2017	Akallı	(i) tamsayı olmayan bulanık PD+H denetleyicisi katsayılarının ayarı için değiştirilmiş bir kara delik optimizasyon algoritması kullanılması (ii) yöntemde denetleyici, Fractional-Order Fuzzy adlı iki seviyeden ve geleneksel bir PD+H denetleyiciden oluşturulması	(i) büyük reaktif güç değişimlerinde, diğer arızalardan daha fazla salınım görülmesi
[28]	2017	Akallı	(i) iki boyutlu bir Sinüs Lojistik haritası tabanlı kaotik sinüs kosinüs algoritması (2D-SLSCA) ile optimize edilmiş klasik PID denetleyici kullanımı (ii) hibrit izole bir mikro şebekenin yük frekans kontrolü (LFC) şemasında FESS, DEG, FC ve WTG dahil edilmesi (iii) Bulanık düşünüş denetleyicisinde ise, yapay arı kolonisi (ABC) algoritması, çok amaçlı bir işleme dayalı üyelik fonksiyonlarının parametrelerini belirlemekte kullanılması	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınım etkisine değinilmemiştir (ii) farklı mikro şebeke organizasyonlarında şebekeye bağlı olma durumunda ki sorunlara değinilmemesi
[29]	2021	Akallı	(i) spike sinir ağı (SNN) ile entegre geri adımlama (NIB) denetleyicisi (ii) redoks akışlı akü (RFB)	(i) ESS veya DEG gibi MG bileşenlerinin güç çıkışı sınırlamaları dikkate alınmamıştır
[30]	2019	Akallı	(i) lig şampiyonası algoritması (LCA), karmaşık koloni optimizasyonu (ACO) ve optikten esinlenen optimizasyon (OIO) üç farklı optimizasyon kullanımı (ii) tip-2 bulanık kesirli sıralı PI (SIT2-FFOPI) denetleyici	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınım etkisine değinilmemiştir (ii) farklı mikro şebeke organizasyonlarında şebekeye bağlı olma durumunda ki sorunlara değinilmemesi
[31]	2023	Akallı	(i) Kademeli Çift Giriş Aralığı Tip 2 Bulanık Mantık Denetleyicisi (C-DIT2-FLC)	(i) daha yüksek dereceli bulanık sistemlerin kullanımı
[32]	2021	Akallı	(i) Tip-3 BMK, model bağımsız olması, üyelik fonksiyonu sınırlaması olmaması, (ii) BESS, FESS, DEG, FC, PV ve WTG dahil edilmesi	(i) Rüzgar güneş ve yük için skotastik değişimlerin dikkate alınmaması
[33]	2021	Akallı		
[34]	2022	Akallı		
[önerilen yöntem]	2023	Akallı		

Mikro Şebekenin Modellenmesi

Farklı MŞ'lerde, tasarımlarına, nasıl çalıştıklarına ve hangi nesil teknolojileri devreye aldıklarına bağlı olarak farklı DEK'ler kullanılabilir. DEK'ler hem rüzgar türbini jeneratörleri (WTG'ler) ve fotovoltaik sistemler (PV'ler) gibi YEK'leri hem de dizel jeneratörler (DEG'ler) gibi geleneksel enerji kaynaklarını içerebilir. WTG ve PV aralıklı güç üretirken çıkışları kontrol edilemez, dolayısıyla DEG gibi bir

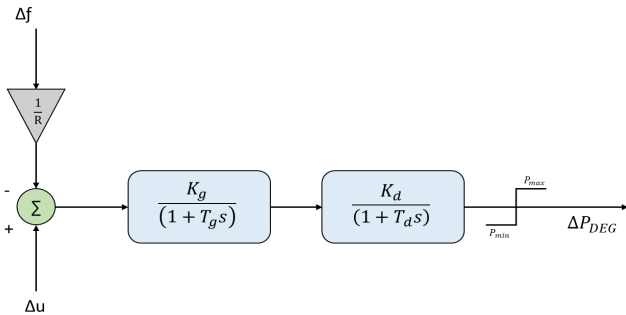
üreteç kullanılması sistem güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca, yakıt hücreleri (FC'ler) de MŞ'lerde kullanılan en yaygın enerji üretim birimleri arasındadır. Bu çalışmada WTG, PV, BESS, FESS, DEG ve FC gibi üretim kaynakları ve depolama sistemlerinin bağlı olduğu bir mikro şebeke modellenmiştir. Modellenen mikro şebeke Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Mikro şebeke modeli

Dizel jeneratör

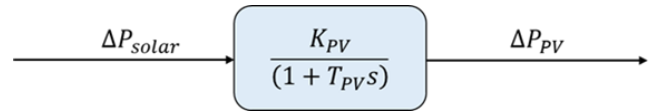
Şekil 3'ta verilen MŞ'de, DEG katsayıları verilmiştir. Ayrıca Şekil 1'de kullanılan DEG sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 4. Dizel jeneratör modeli

Fotovoltaik sistem (PV)

Son yıllarda PV sistemlerin temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları olması nedeniyle şebeke entegrasyonu ciddi oranda artmıştır. [35]. PV sistemlerde elektrik üretiminde güneş ışınımı kullanılmaktadır. Çalışılan MŞ'de PV ve invertör cihazından oluşmaktadır. Şekil 2'de PV'nin Sistem modeli verilmiştir.

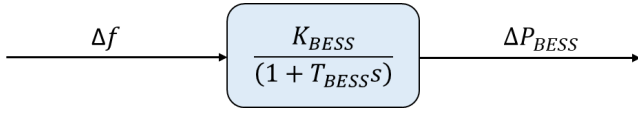


Şekil 5. PV sistem modeli

Batarya enerji depolama sistemi

Güç şebekelerinde batarya enerji depolama sistemleri (BESS) entegrasyonu dünya çapında artmaktadır. Popülariteleri, bunlarla sınırlı olmayan geniş boyut

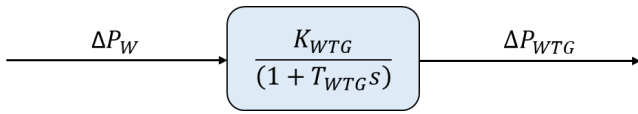
aralıklarından kaynaklanmaktadır. Topografya ve tek bir tesis olarak veya dağıtılmış kaynaklar olarak entegre edilebilme yeteneği, onları neredeyse her tür sistem için ideal kılar [36]. Çalışılan MŞ'deki BESS modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Batarya enerji depolama sistem modeli

Rüzgâr türbin sistemleri

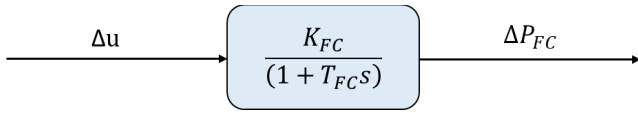
Rüzgâr türbin jeneratörü(WTG) sistem modeli şekil 5'te transfer fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 7. Rüzgâr türbin jeneratörü sistem modeli

Yakıt pili

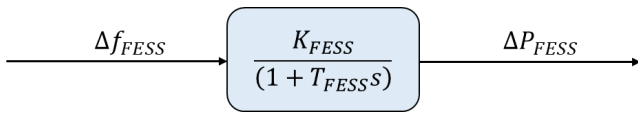
FC'ler, hidrojen veya diğer yakıtların kimyasal enerjisini kullanarak elektrik üretirler, ayrıca depolama sistemi gibi davranırlar. Şekil 3'te verilen MŞ'de FC katsayıları verilmiştir. Ayrıca Şekil 8'de FC sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 8. Yakıt pili sistem modeli

Volan enerji depolama sistemi

Çalışılan MŞ'deki FESS modeli Şekil 7'te verilmiştir.



Şekil 9. Volan enerji depolama sistem modeli

Bulanık Mantık Kontrol (BMK)

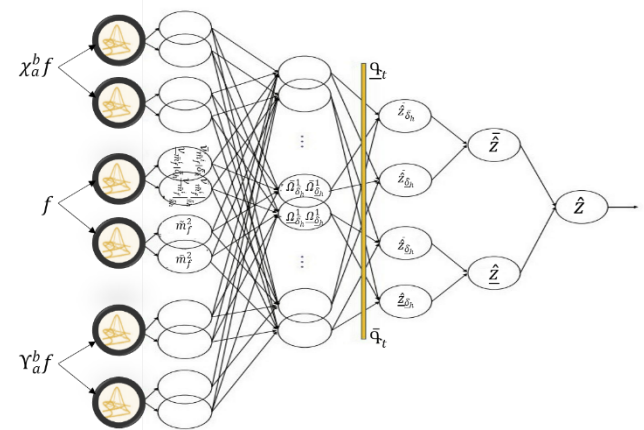
PID aslında bir kontrol geri bildirim mekanizmasıdır. Bir PID denetleyici ölçülü bir süreç içinde değişen ve istenilen ayar noktası ile arasındaki farkı olarak bir "hata" değerini hesaplar. Kontrol giriş ayarı yapılarak bu hata en aza indirilmesi sağlanır. PID'ler, basitlikleri ve kapasiteleri nedeniyle çoğu endüstriyel kontrol sisteminde yaygın olarak kullanılır. Geleneksel PID'lerin kontrol performansı, doğrusal

olmayan değerler, belirsizlikler ve parametre değişiklikleri altında düşer.

Geleneksel BMK tabanlı PID'lerde, BMK'lar PID kazançlarını değiştirmek için kullanılır. Kapalı döngü hatası ve türevi genellikle BMK'ların girdileri olarak kullanılır. BMK'nın çıktısı, PID'lerin kazançlarını belirler. Tip-2 BMK'lar MŞ'de nadiren kullanılmıştır [37]. T2-BMK tabanlı kontrol tekniğinin etkinliği doğrulanmıştır. PID'yi optimize etmek için T2-BMK'lar formüle edilmiş ve performansı, MŞ'lerde stabilizasyon problemi için PID denetleyicisinin parametrelerini ayarlamak için kullanılmıştır. T2-BMK'lar kullanılarak PID geliştirilmiştir ve yüksek dereceli BMK'ların doğruluğu arttırdığı gösterilmiştir [38].

Tip-3 bulanık mantık kontrol

Tip-3 BMK'lar ve genelleştirilmiş BMK'lar gibi yüksek dereceli BMK'ların gerçek dünya mühendislik problemlerinde daha iyi verimlilik sağladığı gösterilmiştir. Bulanık sistemlerin genel yeteneği yaklaşıklık yeteneğidir, bulanık sistemler doğrusal olmayan bir fonksiyonu tahmin etmek veya bir veri setinden dinamik bir model üretmek için kullanılır. Tip-1 ve tip-2 bulanık mantık kontrolörler(T1-BMK, T2-BMK) geniş çapta incelenmiştir [37],[38]. Son yıllarda ise bulanık sistemlerin yaklaşım kabiliyetini geliştirmek için bazı girişimlerde bulunulmuştur. Bu motivasyona dayalı olarak, daha fazla düzeydeki belirsizliği ele almak için bir Tip-3 BMK önerilmiştir. Tip-3 bulanık sistemler oldukça nadiren çalışılmıştır. N tipi bulanık kümeler için bulanık alt küme tanımı geliştirilmiştir. Bu makalede,klasik PID, tip-1 ve tip-2 bulanık sistemlerin (T1-BMK, T1-BMK) kavramları ve uygulamaları gözden geçirilmiş ve tip-3 daha yüksek seviyeli bulanık kümelerin başarısı hakkında bir tartışma sunulmuştur. Kullanılan bulanık mantık kontrolör giriş değişkenleri ve çıkışı şekil 10'da verilmiştir.



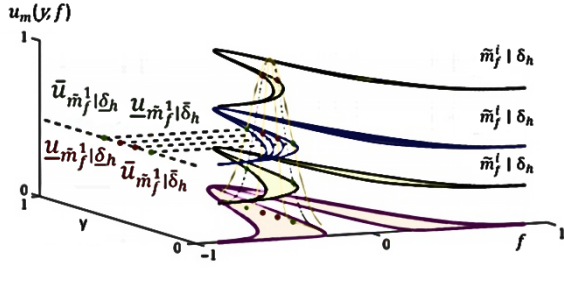
Şekil 10. Bulanık mantık kontrolör

Şekil 10'da ki gösterilen giriş değişkenlerimiz f , $x_a^b f$ ve $y_a^b f$ dir.

Burada;

$$\chi_a^b f(a) = \frac{\int_0^a (f(t)/(a-t)^b) dt}{\tau(1-b)} \quad (1)$$

$$\Upsilon_a^b f(a) = \frac{\int_0^a (a-t)^{b-1} f(t) dt}{\tau(b)} \quad (2)$$



Şekil 11. T3-bulanık mantık üyelik fonksiyonları

$f, \chi_a^b f,$ ve $\Upsilon_a^b f,$ girişleri için üyelik fonksiyonları şu şekilde kabul edilmiştir. Sırasıyla $\tilde{m}_f^1 - \tilde{m}_f^2, m_{\chi_a^b f}^1 - \tilde{m}_{\chi_a^b f}^2,$ ve $m_{\Upsilon_a^b f}^1 - \tilde{m}_{\Upsilon_a^b f}^2$ dir. Şekil 11’de gösterildiği gibi, her bir üyelik fonksiyonu yatay olarak n seviye bölünmüştür. Yatay dilim düzeyi üyelikleri, δ_h Şekil 11’te gösterildiği gibi her bir girdi için hesaplanmıştır. δ_h seviyesinde üst ve alt üyelikler f girişi için aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (4)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (5)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (6)$$

Burada;

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 c_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (8)$$

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 p_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (9)$$

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 p_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (10)$$

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 p_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (11)$$

burada, $h = 1, \dots, n, i = 1, 2, p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}$ değerleri $\tilde{m}_f^i | \delta_h$ üyelik fonksiyonunun merkezidir. $\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}$ ve $\underline{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}$ ise $\tilde{m}_f^i | \delta_h$ üyelik fonksiyonunun üst ve alt standart bölümlerdir. δ_h seviyesinde üst ve alt üyelikler $\chi_a^b f$ girişi için ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (12)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (13)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (14)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (15)$$

Burada;

$$\chi_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \bar{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 c_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (16)$$

$$\chi_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \underline{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (17)$$

$$\chi_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \bar{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (18)$$

$$\chi_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \underline{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (19)$$

burada, $h = 1, \dots, n, i = 1, 2, p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ değerleri $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun merkezidir. $\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ve $\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ise $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun üst ve alt standart bölümlerdir. δ_h seviyesinde üst ve alt üyelikler Y_{af}^b girişi için ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h \right)^2}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (20)$$

$$\bar{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h \right)^2}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (21)$$

$$\underline{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h \right)^2}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (22)$$

$$\underline{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h \right)^2}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (23)$$

Burada;

$$Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 c_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (24)$$

$$Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (25)$$

$$Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (26)$$

$$Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (27)$$

burada, $h = 1, \dots, n, i = 1, 2, p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ değerleri $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun merkezidir. $\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ve $\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ise $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun üst ve alt standart bölümlerdir.

$\bar{\delta}_h$ şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \end{aligned} \quad (28)$$

$\underline{\delta}_h$ şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h}
 \end{aligned} \tag{29}$$

Üst ve alt değerlendirme seviyelerinde kuralların alt derecesi şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h}
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Tip indirgeme dikkate alınarak, kontrol sinyalinin üst ve alt sınırları şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 \bar{\hat{z}}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{n=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^t \bar{Q}_k}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)}, \\
 \bar{\hat{z}}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{l=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^k \bar{Q}_t}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)}, \\
 \bar{\hat{z}}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{t=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^k \underline{Q}_t}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)}, \\
 \hat{z}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{l=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^k \underline{Q}_t}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)},
 \end{aligned} \tag{32}$$

Burada k kural sayısını belirtir ve \bar{Q}_t ve \underline{Q}_t , t dereceden kural parametrelerinin alt ve üst değeridir. İkinci tip indirgeme şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 \bar{\hat{z}} &= \frac{\sum_{r=1}^l \bar{\delta}_h \bar{\hat{z}}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)} + \frac{\sum_{r=1}^l \underline{\delta}_h \bar{\hat{z}}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)}, \\
 \hat{z} &= \frac{\sum_{r=1}^l \bar{\delta}_h \hat{z}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)} + \frac{\sum_{r=1}^l \underline{\delta}_h \hat{z}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)}.
 \end{aligned} \tag{33}$$

Çıkış \hat{z} (kontrol sinyali) şu şekilde hesaplanır:

$$\hat{z} = \frac{\bar{\hat{z}} + \hat{z}}{2} \tag{34}$$

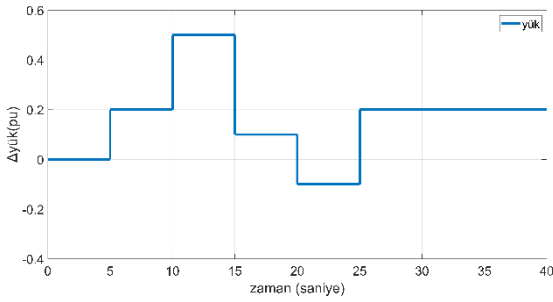
Çalışılan denklemlerin çıkışları Şekil 10’da gösterilmiştir.

Bulgular

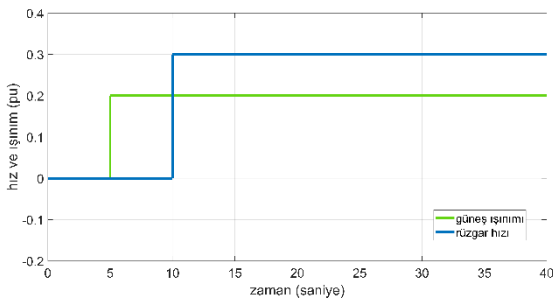
Bu bölümde MATLAB/Simulink ortamında Şekil 3'te verilen mikro şebeke modeli gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PID, Tip-1, Tip-2, Tip-3 kontroller de MATLAB/simulink ortamında tasarlanmıştır. Kontrolörler farklı yük-güç değişimlerin yanı sıra batarya enerji depolama sistemi (BESS), volan enerji depolama sistemi (FESS), yakıt pili (FC) ve dizel jeneratör (DG) gibi farklı mikro şebeke elemanlarının devreden çıkarılması gibi senaryolar altında da denenmiştir.

Deneysel sonuçlar

Tüm durumlar için şekil 12'deki yük değişimi ve şekil 13'te güneş ve rüzgâr santrallerindeki sırasıyla güneş ışınımı ve rüzgâr hızı değişimleri geçerlidir.



Şekil 12. Mikro şebeke yük değişimi

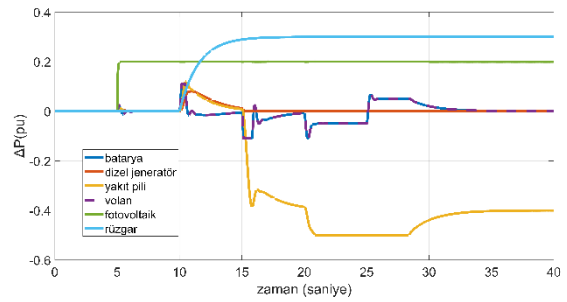


Şekil 13. Solar ışınım ve rüzgâr hızı değişimi

Durum 1: yakıt pili, volan, batarya ve dizel jeneratörün devrede olduğu durum

Şekil 14'te Tip-3 BMK uygulamasının mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 14'ün analizi, 5. saniyede fotovoltaiik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan, batarya ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0.5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için FESS, BESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın

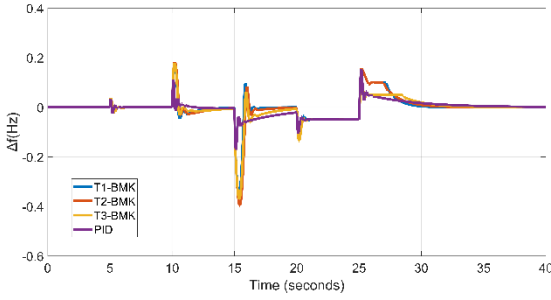
dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla FESS, BESS, FC ve DG gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte BESS ve FESS, 0.05 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS yük artışı dengelemiştir. FC ise 28. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve BESS ile FESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 14. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 15 'te Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 15'in analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 15'te görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, BESS ve FESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.5 pu enerji depolanmışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS, yük artışı dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 (BMK) yöntemi ise daha düşük

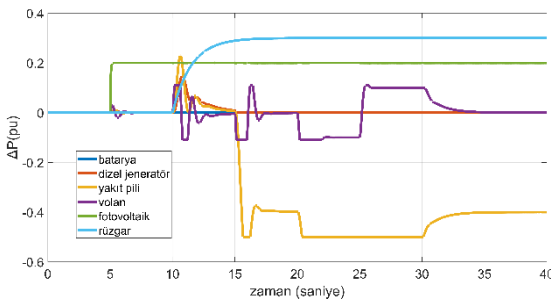
seviyede ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. saniyede her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.



Şekil 15. Frekans değişimi

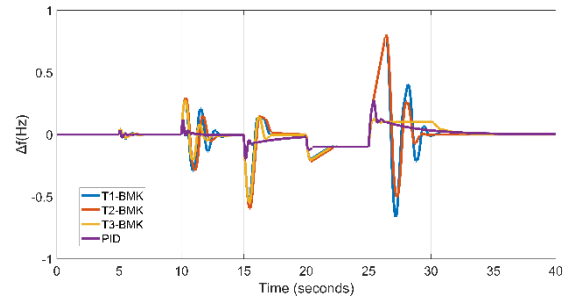
Durum 2: yakıt pili, volan ve dizel jeneratörün devrede olduğu bataryanın devreden çıkarıldığı durum

Şekil 16'da Tip-3 BMK uygulamasının BESS'in devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 16'nın analizi, 5. saniyede fotovoltaik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0,5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için FESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken aynı zamanda rüzgâr santralinin devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla FESS, FC ve DG gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte FESS, 0.1 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle FESS yük artışını dengelemiştir. FC ise 30. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve FESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 16. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 17 'de Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 17'nin analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 17'de görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, FESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.1 pu enerji depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle FESS, yük artışını dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 (BMK) yöntemi ise daha düşük seviyede ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. Saniyeden sonra her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.

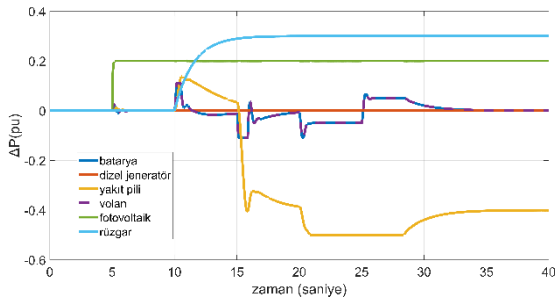


Şekil 17. Frekans değişimi

Durum 3: yakıt pili, volan ve bataryanın devrede olduğu dizel jeneratörün devreden çıkarıldığı durum

Şekil 18'de Tip-3 BMK uygulamasının DEG'in devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 18'in analizi, 5. saniyede fotovoltaik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan, batarya ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0.5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için FESS, BESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken

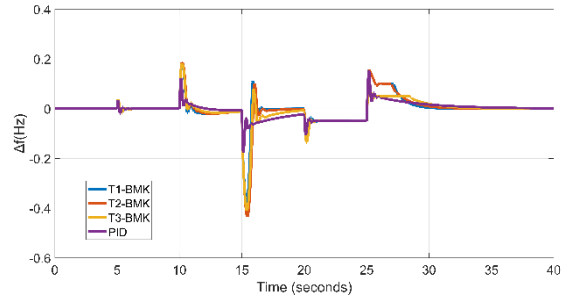
aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla FESS, BESS, FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte BESS ve FESS, 0.05 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS yük artışı dengelemiştir. FC ise 28. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve 32. Saniyeden sonra BESS ile FESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 18. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 19 'da Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 19'un analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 19'da görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, BESS ve FESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.5 pu enerji

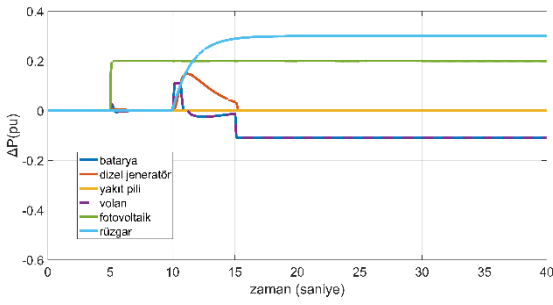
depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS, yük artışı dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 BMK yöntemi ise daha düşük seviyede bir salınım göstermiş ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. saniyede her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.



Şekil 19. Frekans değişimi

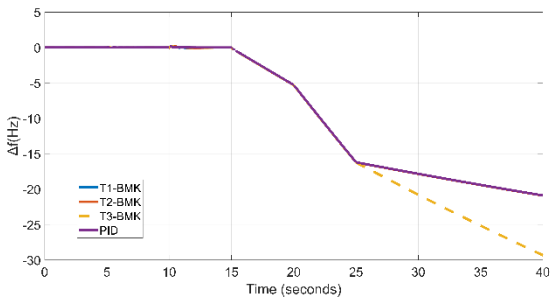
Durum 4: dizel jeneratör, volan ve bataryanın devrede olduğu yakıt pilinin devreden çıkarıldığı durum

Şekil 20'de Tip-3 BMK uygulamasının FC'nin devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 20'in analizi, 5. saniyede fotovoltak (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan ve batarya gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0,5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışı dengelediği için FESS ve BESS gibi enerji depolama sistemleri devre dışı kalmıştır. 10 saniyede yük 3 pu artmıştır. Aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bunun sonucunda rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlayana kadar FESS, DEG ve BESS devreye girmiştir. Rüzgâr tam devreye girdiği 15. den itibaren BESS ve FESS 0.1 pu depolama yapmıştır. Bu noktadan sonra yükün azalması veya yapılan üretim sistem davranışında herhangi bir değişime neden olmamakla beraber arz-talep dengesi sağlanamamıştır.



Şekil 20. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 21 'de Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 21'in analizi 15. Saniye ye kadar frekans sabit görünmektedir. Bunun nedeni yükün azalıp artması veya yapılan üretim sistem davranışında herhangi bir değişime neden olmaması ve arz-talep dengesi sağlanamamasıdır. Sistem senkronizasyonu sağlanamayıp frekansta çökme meydana gelmiştir.

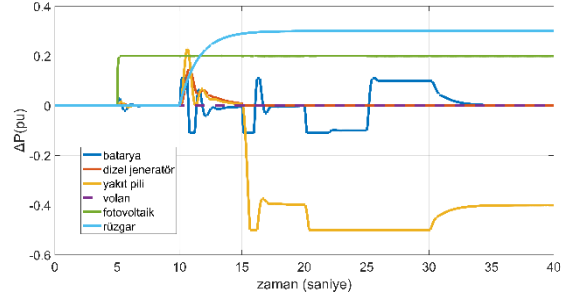


Şekil 21. Frekans değişimi

Durum 5: dizel jeneratör, batarya ve yakıt pilinin devrede olduğu volanın devreden çıkarıldığı durum

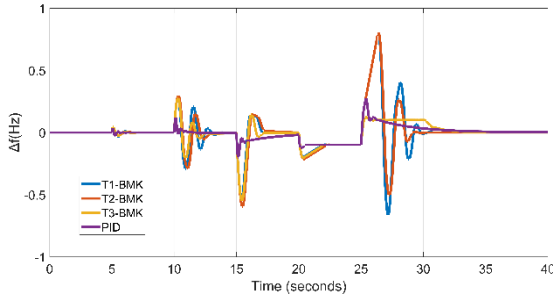
Şekil 22'de Tip-3 BMK uygulamasının FESS'in devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 22'nin analizi, 5. saniyede fotovoltaik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0,5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için BESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken aynı zamanda rüzgâr santralinin devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla BESS, FC ve DEG gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu

nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte BESS, 0.1 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS yük artışı dengelemiştir. FC ise 30. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve BESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 22. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 23 'te Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 23'ün analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 23'te görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, BESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.1 pu enerji depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS, yük artışını dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 (BMK) yöntemi ise daha düşük seviyede ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. Saniyeden sonra her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.



Şekil 23. Frekans değişimi

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, şebekeden bağımsız hibrit mikro şebekeler için Tip-3 BMK tabanlı bir frekans regülasyon yöntemi önerilmiştir. Zaman içinde değişen dinamik faktörler, farklı enerji sistemlerinin güç değişimleri ve güneş ışınımı, rüzgâr hızı gibi etkiler ile frekans regülasyonunun sistem performansına etkileri bu çalışmada değerlendirilmiştir. Ayrıca yük değişimleri de dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, rüzgâr hızı ve güneş ışınımındaki değişimlerin sistem frekansına olan etkileri T1-BMK, T2-BMK, T3-BMK ve PID denetleyici sistemleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, PID, Tip-1 bulanık mantık kontrol ve tip-2 bulanık mantık kontrol ile karşılaştırıldığında önerilen yaklaşımın genel performans ve doğruluk açısından üstün olduğu tespit edilmiştir. Önerilen denetim sistemi, güneş ve rüzgâr güç değişiklikleri ile yük dalgalanmalarına karşı etkili bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, önerilen yaklaşımın frekans regülasyonundaki salınımların diğer denetleyicilere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Stabilite süresi açısından yapılan incelemeler, önerilen yaklaşımın diğer tekniklere göre daha hızlı bir şekilde dengeye ulaştığını göstermektedir. Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttığı günümüzde mikro şebekelerin frekans regülasyonu ihtiyacına yönelik bir öneri sunmaktadır. İlerleyen çalışmalarda, sabit yük, ışınım ve rüzgâr hızı yerine stokastik değişimleri göz önünde bulunduran ve gerçek dünya koşullarına daha yakın senaryolar içeren analizlerin yapılması önerilmektedir. Bu sayede kontrol stratejilerinin daha gerçekçi ve genelleyici bir perspektifle değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Kaynaklar

[1] Razmjoo, A., Kaigutha, L. G., Rad, M. V., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. (2021). A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area. *Renewable Energy*, 164, 46-57.

[2] Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.

[3] Karunathilake, H., Perera, P., Ruparathna, R., Hewage, K., & Sadiq, R. (2018). Renewable energy integration into community energy systems: A case study of new urban residential development. *Journal of Cleaner Production*, 173, 292-307.

[4] Anwar, A., Siddique, M., Dogan, E., & Sharif, A. (2021). The moderating role of renewable and non-renewable energy in environment-income nexus for ASEAN countries: Evidence from Method of Moments Quantile Regression. *Renewable Energy*, 164, 956-967.

[5] Holzleitner, M., Moser, S., & Puschnigg, S. (2020). Evaluation of the impact of the new Renewable Energy Directive 2018/2001 on third-party access to district heating networks to enforce the feed-in of industrial waste heat. *Utilities Policy*, 66, 101088.

[6] Hatziargyriou, Nikos, ed. *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.

[7] Mondal A, Illindala MS. Improved frequency regulation in an islanded mixed source microgrid through coordinated operation of DERs and smart loads. *IEEE Trans Ind Appl*. 2018;54:112–120.

[8] Shahzad, S., Abbasi, M. A., Ali, H., Iqbal, M., Munir, R., & Kilic, H. (2023). Possibilities, Challenges, and Future Opportunities of Microgrids: A Review. *Sustainability*, 15(8), 6366.

[9] R. Majumder, "MODELING, STABILITY ANALYSIS AND CONTROL OF MICROGRID," Doctor of Philosophy Dissertation, Faculty of Build and Environment Engineering, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.

[10] Gulzar, M. M., Iqbal, M., Shahzad, S., Muqet, H. A., Shahzad, M., & Hussain, M. M. (2022). Load frequency control (LFC) strategies in renewable energy-based hybrid power systems: A review. *Energies*, 15(10), 3488.

[11] Pepermans, Guido, et al. "Distributed generation: definition, benefits and issues." *Energy policy* 33.6 (2005): 787-798.

[12] Zhao H, Hong M, Lin W, et al. Voltage and frequency regulation of microgrid with battery energy storage systems. *IEEE Trans Smart Grid*. 2017;99:1–12

[13] Mondal A, Illindala MS. Improved frequency regulation in an islanded mixed source microgrid through coordinated operation of DERs and smart loads. *IEEE Trans Ind Appl*. 2018;54:112–120.

[14] Zhao J, Lyu X, Fu Y, et al. Coordinated frequency regulation strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG variable coefficient combined virtual inertia and primary frequency control. *IEEE Trans Energy Convers*. 2016;8969:1–1.

[18] V. A. K. Pappu, B. H. Chowdhury, and R. Bhatt, "Implementing frequency regulation capability in a solar photovoltaic power plant," in *North American Power Symposium (NAPS)*, 2010, 2010, pp. 1-6.

[19] R. Majumder, "MODELING, STABILITY ANALYSIS AND CONTROL OF MICROGRID," Doctor of Philosophy

Dissertation, Faculty of Build and Environment Engineering, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.

[15] Moghadam, Mohammad R. Vedady, Richard TB Ma, and Rui Zhang. "Distributed frequency control in smart grids via randomized demand response." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.6 (2014): 2798-2809.

[16] Lekshmi, R. R., et al. "Frequency based demand management system in residential context." *Bonfring Internation Journal of Industrial Engineering and Management Science* 4.2 (2014): 57-61.

[22] Rafiee, A., Batmani, Y., Ahmadi, F., & Bevrani, H. (2021). Robust load-frequency control in islanded microgrids: Virtual synchronous generator concept and quantitative feedback theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(6), 5408-5416.

[17] Díaz-González, F., Hau, M., Sumper, A., & Gomis-Bellmunt, O. (2015). Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 68, 313-326.

[18] Gong, K., Lenz, E., & Konigorski, U. (2015, June). Decentralized frequency control of a DDG-PV microgrid in islanded mode. In *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 292-297). IEEE.

[19] Kiliç, H., Khaki, B., Gumuş, B., Yilmaz, M., & Asker, M. E. (2018, November). Stability analysis of islanded microgrid with EVs. In *2018 Smart Grid Conference (SGC)* (pp. 1-5). IEEE.

[20] Yildirim, B. (2021). Advanced controller design based on gain and phase margin for microgrid containing PV/WTG/Fuel cell/Electrolyzer/BESS. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(30), 16481-16493.

[21] Gholami S, Saha S, Aldeen M. Fault tolerant control of electronically coupled distributed energy resources in microgrid systems. *Int J Electrical Power Energy Syst.* 2018;95:327–340.

[22] Pradhan C, Bhende CN, Samanta AK. Adaptive virtual inertia-based frequency regulation in wind power systems. *Renewable Energy.* 2018;115:558–574

[23] Sanjari MJ, Gharehpetian GB. Small signal stability based fuzzy potential function proposal for secondary frequency and voltage control of islanded microgrid. *Electr Power Compon Sys.* 2013;41:485–499.

[24] Keshtkar, H., Mohammadi, F. D., Ghorbani, J., Solanki, J., & Feliachi, A. (2014, May). Proposing an improved optimal LQR controller for frequency regulation of a smart microgrid in case of cyber intrusions. In *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1-6). IEEE.

[25] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., & Dragicevic, T. (2016). A robust adaptive load frequency control for micro-grids. *ISA transactions*, 65, 220-229.

[26] Zhang, J., Gao, Y., Yu, P., Li, B., Yang, Y., Shi, Y., & Zhao, L. (2018). Coordination control of multiple micro sources in islanded microgrid based on differential games

theory. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 97, 11-16.

[27] Sedighzadeh, M., Esmaili, M., & Eisapour-Moarref, A. (2017). Voltage and frequency regulation in autonomous microgrids using Hybrid Big Bang-Big Crunch algorithm. *Applied Soft Computing*, 52, 176-189.

[28] Khooban, M. H., Dragicevic, T., Blaabjerg, F., & Delimar, M. (2017). Shipboard microgrids: A novel approach to load frequency control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(2), 843-852.

[29] Khokhar, B., Dahiya, S., & Parmar, K. S. (2021). Load frequency control of a microgrid employing a 2D Sine Logistic map based chaotic sine cosine algorithm. *Applied Soft Computing*, 109, 107564.

[30] Abazari, A., Monsef, H., & Wu, B. (2019). Coordination strategies of distributed energy resources including FESS, DEG, FC and WTG in load frequency control (LFC) scheme of hybrid isolated micro-grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 535-547.

[31] Yildirim, B., Razmi, P., Fathollahi, A., Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H. (2023). Neuromorphic deep learning frequency regulation in stand-alone microgrids. *Applied Soft Computing*, 144, 110418.

[32] YILDIRIM, B. (2021). Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü için Tamsayı Derece Yaklaşımli Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(1), 79-87.

[33] Yildirim, B., Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H. (2021). A robust non-integer controller design for load frequency control in modern marine power grids. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 6(4), 852-866.

[34] Yıldız, S., Gunduz, H., Yildirim, B., & Özdemir, M. T. (2022). An islanded microgrid energy system with an innovative frequency controller integrating hydrogen-fuel cell. *Fuel*, 326, 125005.

[35] Kiliç, Heybet, et al. "A Robust Data-Driven Approach for Fault Detection in Photovoltaic Arrays." *Proceedings of the 10th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe* (2020).

[36] Heidary, J., Gheisarnejad, M., Rastegar, H., & Khooban, M. H. (2022). Survey on microgrids frequency regulation: Modeling and control systems. *Electric Power Systems Research*, 213, 108719.

[37] Fan, W., Mohammadzadeh, A., Kausar, N., Pamucar, D., & Id, N. A. D. (2022). A New Type-3 Fuzzy PID for Energy Management in Microgrids. *Advances in Mathematical Physics*, 2022.

[38] Shakibjoo, A. D., Moradzadeh, M., Din, S. U., Mohammadzadeh, A., Mosavi, A. H., & Vandeveld, L. (2021). Optimized type-2 fuzzy frequency control for multi-area power systems. *IEEE access*, 10, 6989-7002.



Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Eğitim Başarısının Tahmini Modeli

Prediction Model Of Educational Success With Machine Learning Method

Deniz Zilyas^{1*}, Atınc Yılmaz²¹ İstanbul Beykent Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği A.B.D.,
kilitogludeniz@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9454-9410>² İstanbul Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
atincyilmaz@beykent.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0038-7519>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 3 Temmuz 2023
Revizyon 2 Ağustos 2023
Kabul 25 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Makine Öğrenimi,
Tahmin,
Regresyon,
Eğitim Başarısı

Günümüzde makine öğrenmesi yöntemleri etkin bir biçimde kullanılarak pek çok alanda yüksek performanslar ve etkili sonuçlar göstermektedir. Bu nedenle makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanması, çeşitli sektörlerde son yıllarda daha da yaygınlaşmıştır. Makine öğrenmesi modellerinden elde edilebilecek çıkarımlar ile birçok sorun öngörülüp çözüme ulaştırılabilir. Çalışmadaki amaç, ortaokul öğrencileri ile yapılan anket üzerinden elde edilen veriler kullanılarak; eğitim başarı tahminini yapacak bir makine öğrenmesi modeli ortaya koymak ve öğrenciyi olumsuz etkileyebilecek faktörleri belirlemektir. Anket soruları, öğrencinin başarısına tesir edebilecek etkenler literatürde araştırılarak oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında, çeşitli ortaokullarda eğitim gören 519 farklı öğrenciden kişisel verilerin korunması kanunu kapsamında 13 sorudan oluşan anket aracılığıyla veri toplanmıştır. Bu veriler hiçbir kurumla paylaşılmamış olup, gizlilik korunmuştur. Veri seti ön işleme ve görselleştirme işlemlerinden sonra modelleme için, K-En Yakın Komşu (K-NN), Rastgele Ormanlar (RO), Lineer Regresyon, Bagged Trees Regression (BTR - Torbalanmış Ağaçlar), Gradient Boosting Regressor (GBM - Gradyen Arttırıcı Regresyon) ve Karar Ağaçları (KA) algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmada, veri ön işleme adımları gerçekleştirildikten sonra makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımı ile oluşturulan model ile öğrencinin Türkçe notu üzerinden eğitim başarısının tahmini yapılmıştır. Çalışmada, ders seçiminin belirlenmesi, ana dilin Türkçe olması ve eğitim hayatından itibaren her dönem Türkçe dersi ile karşılaşılmasından dolayı Türkçe dersi bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Çalışma neticesinde, rastgele orman yöntemi 0.88 doğruluk oranı ve 0.98 R-Kare değeri ile en etkin sonuçlar veren yöntem olmuştur. Öğrencinin eğitim durumunu etkileyen en önemli faktörler Türkçe notuna bağlı olarak aralarındaki korelasyon ile aile geliri ve ders çalışma saati olarak bulunmuştur.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 3 July 2023
Received in revised from 2 August 2023
Accepted 25 September 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Machine Learning,
Prediction,
Regression,
Educational Success

Doi: 10.24012/dumf.1322273

* Sorumlu Yazar

Today, machine learning methods are used effectively and show high performances and effective results in many areas. For this reason, the application of machine learning algorithms has become more widespread in various industries in recent years. With the inferences that can be obtained from machine learning models, many problems can be predicted and solved. The aim of the study is to use the data obtained from the questionnaire made with secondary school students; To introduce a machine learning model that will predict educational success and to determine the factors that may negatively affect the student. The questions of the questionnaire were created by investigating in literature that the factors that may affect the success of the student. Within the scope of the study, data were collected from 519 different students studying in various secondary schools through a questionnaire consisting of 13 questions within the scope of the law on the protection of personal data. This data has not been shared with any institution and confidentiality is preserved. For modeling after dataset preprocessing and visualization, K-Nearest Neighbor (K-NN), Random Forests (RO), Linear Regression, Bagged Trees Regression (BTR), Gradient Boosting Regressor (GBM - Gradient Increasing Regression) and Decision Trees (CA) algorithms were used. In the study, after the data preprocessing steps were carried out, the model created by the use of machine learning methods was used to predict the educational success of the student over the Turkish grade. In the study, the Turkish lesson was chosen as the dependent variable because of the determination of the lesson selection, the fact that the mother tongue is Turkish and Turkish lesson is taken every semester since the education life. As a result of the study, the random forest method was the most effective method with an accuracy rate of 0.88 and an R-Square value of 0.98. The most important factors affecting the educational status of the student were found to be the correlation between them depending on the Turkish grade, family income and study hours.

Giriş

Türkiye’de eğitim sistemi 12 yıllık zorunlu eğitim olarak 3 kademeye ayrılmıştır. Şu anda 4+4+4 eğitim sistemini kullanılmaktadır. Son yıllarda eğitim sistemi birçok kez değiştirilmiştir. Eğitim sistemindeki değişiklikler bazı konularda öğrencileri olumlu ve/veya olumsuz yönde etkilemiştir.

Lise eğitimine geçmeden önce son basamak 8.sınıftır. Öğrenci bu aşamada hayatını etkileyecek bir döneme girmekte olup, lise eğitimi sayesinde üniversiteye girişe hazır hale gelecektir. Öğrenci üzerinde önceki senelere göre daha fazla baskı olabilmektedir. Sosyal çevre, aile ilişkisi, öğretmeniyle etkileşimi, özel ders desteği, ailelerin geliri, oyun oynama ve televizyon izleme süresi, uyku düzeni ve bunun gibi birçok etken öğrencinin başarı durumunu doğrudan etkileyebilmektedir [1]. Çelenk’in bulguları, ailelerinden eğitim desteği alan ve okulla yakın bağları olan evlerdeki çocukların okumada daha iyi performans gösterdiği yönündedir. Ailenin öğrenciye karşı ilgisizliği, öğretmen tarafından verilen ödevlerde öğrencinin yetersiz kaldığı noktalarda gerekli yardımlaşmanın sağlanmaması da başarıyı etkilemektedir. Öğretmenler her ne kadar velilerin daha özverili olmalarını isteseler de gerek ailenin eğitim konusundaki yetersizliği gerek iş yoğunluğu kaynaklı sebeplerden öğrenci bu konuda eksik kalmaktadır [2]. Çelenk, aileleri eğitime destek veren, okulla düzenli iletişim halinde olan ve ortak programları kabul eden çocukların daha başarılı olduğunu araştırmada ortaya koymuştur. Çalışma ortamı, maddi yetersizlik, ailenin kalabalık olması öğrencinin başarısızlığını ortaya çıkaran etkenlerden olabilmektedir.

Literatürde Makine Öğrenmesi yöntemleri araştırılarak benzer algoritmalarla yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yavuz, çalışmada, K-NN, Rastgele Orman, Doğrusal Regresyon modellerini kullanarak enerji tüketimi üzerinde tatminkâr sonuçlar üretmeyi ve enerji yönetiminde kolaylık sağlamayı amaçlamıştır [3]. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 0,0067 MSE değeri ile KNN yönteminin en başarılı algoritma olduğunu ifade edilmiştir. Gök, makalesinde, öğrencilerin yaşam koşullarının ve sosyal çevrelerinin Türkçe notunu nasıl etkilediğini belirlemek için ilk olarak 6, 7 ve 8. sınıflardaki öğrencilere 24 maddelik demografik özellikler içeren bir anket uygulanmış ve etkisini değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonunda Genel Başarı ortalamasına ait puan tahmininde ortalama karesel hatanın karekökü hata metriği ile değerlendirmiştir. Bu metrik baz alındığında en iyi sonucu veren algoritma 10.68 hata oranına göre Rastgele Orman algoritması olmuştur [4]. Akşehir ve ark. çalışmada denetimli öğrenme yöntemlerinden Çoklu Lineer Regresyon, Rastgele Orman ve Karar Ağaçları kullanmıştır. Sonuç olarak, borsa endeks tahminlerinden yola çıkılarak, banka hisse senetlerinin bir gün sonraki kapanış değeri tahmininde oldukça başarılı olduğunu, yapılan analizlerden çıkan R – kare değeri göz önünde bulundurularak kullanılan tüm metodlardan %98 oranında başarı elde ettiğini ortaya çıkarmıştır [5]. Sevlî,

çalışmasında göğüs kanseri teşhisinde 5 farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanarak algoritmaların performans karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada Destek Vektör Makinesi (DVM), Naive Bayes (NB), Rastgele Orman, K –En Yakın Komşu ve Lojistik Regresyon (LR) algoritmalarının test başarılarını karşılaştırmıştır. Göğüs kanserinin teşhisinde, %98.24 doğruluk oranı ile en iyi performansı gösteren Lojistik Regresyon algoritması olduğunu belirlemiştir [6]. Yağcı, çalışmada, lisans öğrencilerinin ara sınav notları kaynak olarak göstermiştir. Rastgele Orman, KNN, Destek Vektör Makineleri, Lojistik Regresyon, Naive Bayes algoritmaları kullanılmıştır. Tahminler 3 tip parametre (ara sınav notları, bölüm verileri, fakülte verileri) kullanılarak yapılmıştır. Algoritmaların sonuçları birbirine yakın çıkarak %70-%75’lik bir doğruluk oranı göstermişlerdir. Random Forest algoritması, %75.2 başarı oranı ile en iyi performansı gösteren yöntem olarak belirlenmiştir [7]. Cruz-Jesus ve ark. çalışmada, yaş, cinsiyet, derse katılım, internet erişimi, bilgisayara sahip olma ve ders sayısı gibi 16 öznelik ve 110627 gözlem ile öğrenci akademik performansını tahmin etmek istemiştir. Rastgele Orman, KNN, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri algoritmalarını kullanarak öğrencilerin performansını %50 ile %81 arasında değişen doğruluk oranlarıyla tahmin etmişlerdir. Lojistik Regresyon %51.2 doğruluk oranı ile en düşük performansı gösteren algoritma iken Destek Vektör Makineleri %81.1 ile en yüksek performansı gösteren algoritma olmuştur [8]. Fernandes ve ark. Sürdürdükleri çalışmalarında, sınıf kullanım ortamı, cinsiyet, yaş, öğrenci yardımı, şehir, mahalle, not, devamsızlık gibi özellikleri barındıran demografik bir model geliştirmişlerdir. Bu etkenlere bağlı olarak öğrencinin akademik başarısını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Gradient Boosting Machine algoritmasını kullanarak 2 veri seti üzerinde çalışmışlardır. Birinci veri seti 19000, ikinci veri setinde 19834 gözlem sayısı bulundurarak modelleme yapmışlardır. Çalışmalarının sonunda algoritmanın, birinci veri setindeki başarısı %85.9, ikinci veri setinde ise %91.9 başarı oranına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [9]. Xu ve ark. çalışmada, üniversite öğrencilerinin internet kullanım davranışları ile akademik performansları ve makine öğrenimi yöntemleriyle öğrencilerin performansını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Öğrencilerin internet kullanım süresini, internet bağlantı sıklığını, internet trafik hacmini ve çevrim içi zamanı değerlendirmiştir. Karar Ağaçları ve Destek Vektör Makineleri algoritmalarını kullanarak, 4000 gözlem sayısı elde etmişlerdir. Destek Vektör Makineleri yöntemi %73 başarı performansı ile en tatminkâr algoritma seçilmiştir [10]. Hofait ve ark. çalışmada, cinsiyet, Uyruk, Eğitim, Önceki eğitim, matematik, burs, başarı gibi demografik özellikleri öznelik olarak belirlemiştir. Başarısız öğrencileri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağları, Lojistik Regresyon algoritmalarını kullanarak 2244 gözleme sahip bir veri setiyle çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Yapay Sinir Ağları yöntemi %70.4 ile en düşük başarı performansını gösterirken, Rastgele Orman %90 başarı oranı ile en yüksek performansı göstermiştir [11]. Chui ve ark. çalışmalarında, Destek Vektör Makineleri algoritmasını kullanarak risk altındaki öğrencilerin akademik başarı performanslarını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmanın sonunda, 32.593 gözlem sayısına sahip veri seti ile model performansını %93.5 olarak belirlemişlerdir [12]. Nieto ve ark. makalelerinde,

ortaokul öğrencilerinin performansını tahmin etmek için Destek Vektör Makineleri ve Yapay Sinir ağları

algoritmalarının performanslarını karşılaştırmıştır. Veri setinde Microsoft Showcase School tarafından toplanan 5520 öğrencinin performans verileri bulunmaktadır. Destek Vektör Makinesinin %84.54 oranında başarı performansı olduğunu ortaya çıkarmışlardır [13]. Ahmad ve ark. öğrencilerin akademik başarılarının risk altında olup olmadığı sorusuna cevap aramıştır. MPNN yöntemini seçerek, 300 gözlem sayısına sahip veri setiyle çalışmıştır. Demografik olarak önceki derece notları, ev ortamı, çalışma alışkanlıkları, öğrenme beceri özelliklerini değerlendirmiştir. Çalışmanın sonunda, %95 model performansı elde etmişlerdir[14]. Bu çalışmada öğrencinin eğitim başarısını etkileyecek etmenler üzerine yoğunlaşarak anket sorularının oluşturulmasında araştırma makaleleri ve bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Dam, araştırmasında, otobiyografi tekniği ile öğrencilerden veri toplamıştır. Öğrencilerin aileleriyle yaşadıkları iletişimsizlik, diğer kişilerle kıyaslanma durumu, ailelerinin fazla beklenti içerisine girdikleri, aile içi huzursuzluk, boşanma, ailede yaşanan ölüm, uygun çalışma ortamının bulunmaması, ekonomik durumlar başarıya etki eden faktörlerden olduğu sonucuna ulaşmıştır [15]. Aslanargün ve ark. çalışmasında, öğrencilerin başarısını etkileyen aile eğitimi, öğrenci cinsiyeti, ekonomik durum, kardeş sayısı gibi faktörlerin başarıyla nasıl bir ilişki içerisinde olduğu yönünde bir araştırma yapmıştır. Öğrencilere ulaştırılan anket soruları ile veriler toplanmış ve analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonunda, tek çocuk veya çok kardeşe sahip olma durumunun, 2 kardeşe sahip olma durumuna oranla daha az başarılı olduğu, gelirin öğrenci başarısında pozitif etkisinin olduğu, cinsiyet faktörünün erkekler için olumlu yönde olduğu sonuçlarına ulaşmıştır [16].

Literatürde yer alan benzer araştırmalardan farklı olarak bu çalışmada, plot ders olarak seçilen Türkçe dersi için öğrencinin başarı durumunu doğrudan olumsuz etki eden etmenlerin tespit edilmesidir. Bunun yanında, makine öğrenmesi yöntemleri ile modellenen sisteme sunulan yeni öğrenci bilgileri ile öğrencinin Türkçe notunun tahmin edebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca eğitim başarımı öngörüsü ve başarımı olumsuz etkileyen unsurların tespiti konularında makine öğrenmesi yöntemlerinin etkin olarak kullanımının ortaya konması çalışmadaki hedeflerdendir.

Çalışmayı kapsayan 13 farklı anket sorusu bulunmaktadır. Anket soruları ve öğrencinin başarısını etkileyen parametreler literatürde yer alan araştırmalar incelenerek

belirlenmiştir. Genel olarak ankette; aile durumu ve geliri,

özel ders durumu, ders çalışma, oyun oynama, uyku düzeni, kardeş olma durumu, kendine ait oda durumu gibi sorulara yer verilmiştir. Ortaokul 8.sınıf öğrencileri üzerinden yapılan anket ile 519 gözlem elde edilmiştir. Buna bağlı olarak oluşturulan veri setinde 13 sütun ve 520 satır bulunmaktadır.

Çalışmada veriyi modellemek için benzer problemlerde en sık kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri olan Çoklu Lineer Regresyon, Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu ve Torbalanmış Ağaçlar, Karar Ağaçları ve Gradyen Arttırıcı Regresyon yöntemleri kullanılmıştır. Makine öğrenmesi algoritmaları ile modellenen sistem, Türkçe notunu tahmin etmesi beklendiği için 13 değişken içerisinde Türkçe notu hedef değişken ve model çıktısı olarak seçilmiştir. Verisetinin %80'i eğitim seti, %20'si test seti olarak kullanılmıştır. Eğitim sonrasında modelin tahmin başarısını değerlendirmek için model doğrulama (tuning) işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri açıklanmış, veri setinde yapılan ön işleme adımları sonrasında elde edilen temiz verilerle çalışmada kullanılan 6 makine öğrenmesi algoritması ile modellenmiştir. Son olarak; öğrencinin cevapladığı anket sorularına karşılık sistem Türkçe notunu tahmin edebilecek bir modelleme ortaya çıkarmıştır.

Materyal ve Metot

Veri seti

Çalışmada kullanılan veri seti ortaokul öğrencilerine uygulanan 13 soruluk anket aracılığı ile oluşturulmuştur. Jupiter Notebook'ta modelleme ve manipülasyon işlemlerinin yapılabilmesi için .csv formatıyla işlenmiştir. Anket sorularını cevaplayan 519 öğrenciden 273 tanesi kız, 246 tanesi erkek öğrenci olarak belirlenmiştir. Veri setine ait öznitelik bilgileri Tablo1'de gösterilmiştir.

Çalışmada Çoklu Lineer Regresyon, Rastgele Orman, K-NN ve Torbalanmış Ağaçlar, Karar Ağaçları ve Gradyen Arttırıcı Regresyon yöntemleri ile modellenmiştir. Veri setindeki gözlem sayısı göz önünde bulundurulduğunda modelin daha iyi öğrenebilmesi ve test verilerinin daha güvenilir sonuçlar verebilmesi için %80 eğitim, %20 test seti olarak veri kümesi ayrılmıştır. Modellerin tahmin başarısı RMSE, MSE, R-kare metrikleriyle değerlendirilmiştir. Model performanslarını daha doğru ve objektif değerlendirebilmek için K-Cross Validation (Çapraz Doğrulama) yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 1.Öz niteliklerin Anket Sorularına Karşılıkları

Anket Soruları	Öz nitelik Bilgileri İngilizce Karşılıkları	Öz nitelik Bilgileri Türkçe Karşılıkları
Cinsiyetiniz	Sex	Cinsiyet
Kardeşiniz var mı ?	Sibling	KardeşSayısı
Özel eğitim alıyor musunuz?	Coaching	ÖzelDers
Kendine ait bir odanız var mı?	HaveRoom	KendineAitOda
Anneniz ve babanız ayrı mı?	FamSep	AileAyrılıkDurumu
Anneniz veya babanız hayatta mı?	FamilyAlive	AileYaşamaDurumu
Üvey anneniz veya babanız var mı?	StepFM	ÜveyAnneBaba
Hafta sonları ders çalışıyor musunuz?	WStudying	HaftasonuDersÇalışma
Günde kaç saat ders çalışıyorsunuz?	Studying	DersÇalışmaSüresi
Günde kaç saat ders uyuyorsunuz?	Sleeping	Uyku
Ortalama kaç saat oyun oynuyorsunuz?	Playing	Oyun
Aile geliriniz nedir?	Income	Gelir
Türkçe Notunuz nedir ?	TurkNote	TürkçeDersNotu

Makine Öğrenmesi Ve Yapay Zeka

Makine öğrenimi, 1959'da yapay zekada sayısal öğrenme ve model tanıma çalışmalarından doğan, esasen bilgisayar biliminin bir alt alanıdır. Makine öğrenimi, bir yapı işlevi olarak verilere dayalı tahminler yapabilen algoritmalar oluşturma sistemidir. Bu tür algoritmalar statik program yönergelerini sıkı sıkıya takip etmek yerine, veriye dayalı tahminler ve kararlar almak için örnek girdilerden modeller oluşturarak çalışır [17]. Makine öğrenimi temel bir sorundan doğmuştur. Bilgisayarların bizim çalışma şeklimizin ötesine geçip belirli işlemleri kendi başlarına gerçekleştirmeyi öğrenmeleri mümkün müdür? Geliştiricilerin verilerinden öğrenen kuralları manuel olarak oluşturması yerine bilgisayar verilerine bakar [18].

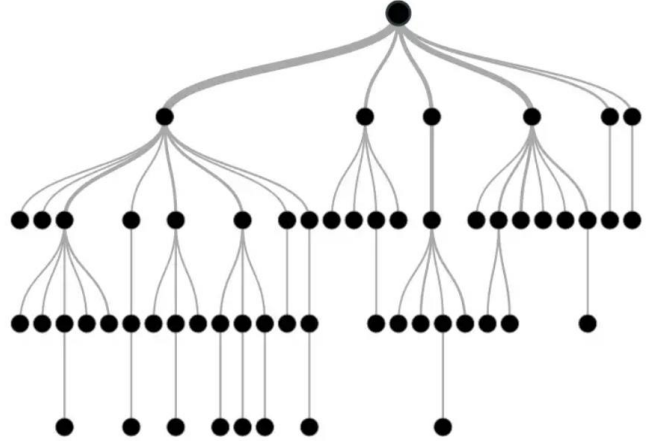
Makine Öğrenmesi yaklaşımları; Denetimli Öğrenme, Denetimsiz Öğrenme, Pekişmeli Öğrenme, Yarı Gözetimli Öğrenme olarak ayrılmıştır.

Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine öğrenmesinde kullanılan birçok algoritma mevcuttur. Bu çalışmada sonuç değişkeni (Türkçe Notu) sürekli değişken (sayısal) olduğu için makine öğrenmesi algoritmalarından regresyon modelleri seçilmiştir.

Karar Ağaçları

Sınıflandırma ve regresyon yöntemlerinin bir metodu olan karar ağacı, yorumlama kolaylığı olması, veri tabanı sistemleriyle entegrasyon kolaylığı ve yüksek güvenilirliği nedeniyle sınıflandırma yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemdir [19]. Karar ağaçları algoritmasının kök, düğüm ve yapraklarının şematik gösterimi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Karar Ağaçları Şematik Gösterimi

K-En Yakın Komşu

K-en yakın komşuluk algoritması, uygulaması kolay gözetimli öğrenme algoritmalarındandır [20]. Yöntem uygulanırken öncelikle en yakın sınıflı veri sayısını ifade eden bir K değeri belirlenmektedir. Sınıf değeri bilinmeyen yeni bir değer tahmin için sisteme sunulduğunda, K kadar en yakın sınıf değeri bilinen elemanın bu değer arasındaki uzaklık hesabı ile sınıf tahmini yapılmaktadır. Uzaklık hesaplama işlemlerinde genelde Öklid uzaklık hesaplaması kullanılır.

Euclidean (Öklidyen) uzaklık hesaplamasında kullanılan k değeri boyut sayısını, x_i veri seti içerisindeki değerleri, y_i tahmin edilecek değerleri temsil eder.

$$\text{Öklid} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

Gradyen Arttırıcı Regresyon- Gradient Boosting Machines

Çoklu Lineer Regresyon

İki veya daha fazla bağımsız değişken (X) ile bir bağımlı değişken (y) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için kullanılan yöntemdir.

Denklemden y değişkenini bağımlı değişkenin tahmin edilen değerini, β_0 kesişim sabitini, $\beta_1 X_1$ birinci bağımsız değişkenini, $\beta_n X_n$ son bağımsız değişkeninin regresyon katsayısını, ϵ model hatasını temsil etmektedir.

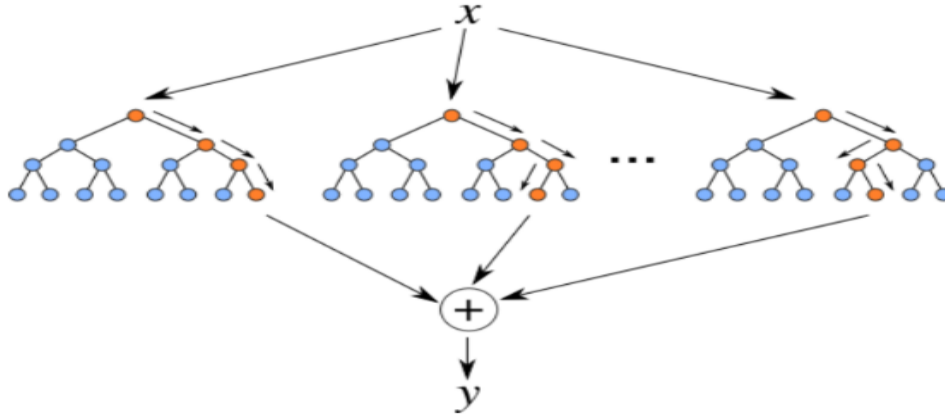
$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (2)$$

Çoklu doğrusal regresyon modelinde, bazı bağımsız değişkenlerin birbiriyle ilişkili içinde olması mümkündür. Bu nedenle regresyon yönteminde geliştirmeden önce bunları kontrol etmek gerekmektedir. Eğer iki bağımsız değişken çok yüksek oranda ilişkiliyse o zaman regresyon yönteminde sadece biri kullanılmalıdır.

Makine öğrenmesine ait bu yöntem hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinin çözümünde kullanılan bir algoritmadır. Bu yöntemin yaklaşımı, tek bir karar ağacının yeteri kadar kuvvetli olmadığı yönündedir. Bir karar ağacı yöntemi uygulanır. Ortaya çıkan hata ile yeni bir karar ağacı oluşturulur. İşlem hata minimuma ininceye kadar devam ettirilir.

Rastgele Orman

Rastgele Orman, sınıflandırma, eğitim aşamasında çok sayıda karar ağacı üreten ve sorunun türüne bağlı olarak sınıfı veya sayıyı tahmin eden, sınıflandırma, regresyon, ve diğer görevler için eş zamanlı öğrenme yöntemidir.[21] Rastgele Orman yöntemi birden fazla ağacın bir araya gelerek en yüksek puan alan yöntemin seçilmesidir ve şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Rastgele Orman Algoritmasının Yapı

Torbalanmış Ağaçlar-Bagged Trees

Birkaç karar ağacından gelen tahminleri birleştiren makine öğrenmesi algoritmasıdır. Bir karar ağacının en büyük sorunu yüksek varyansa sahip olmasıdır. Yani veri setindeki herhangi küçük bir değişiklik modelde veya yapılacak tahminlerde büyük değişikliklere neden olabilir. Varyansı en aza indirmek için Torbalanmış Ağaçlar- Bagged Trees algoritmaları kullanılabilir.

DeneySEL Çalışmalar

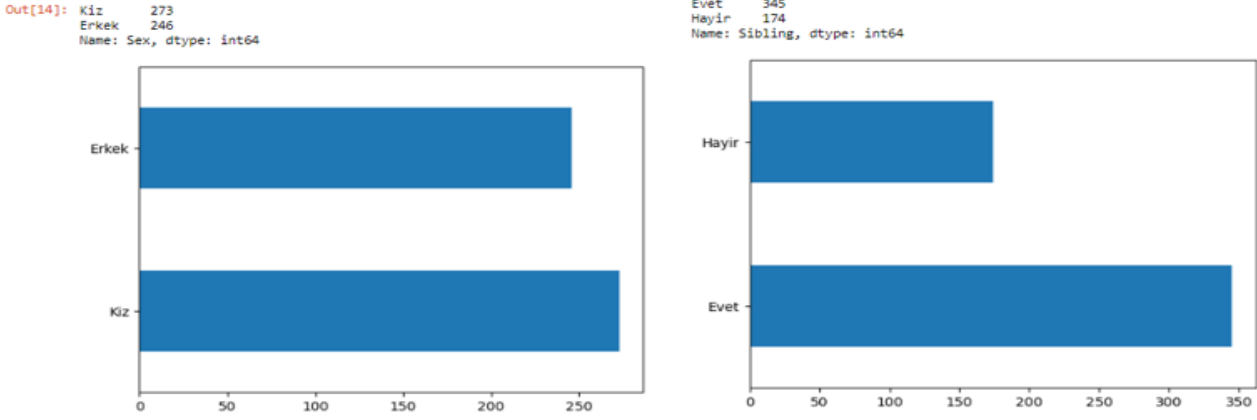
Anket sorularının her biri için değişken ismi tanımlanmıştır. Veri seti 8 kategorik ve 5 sayısal değişken içermektedir. Veri seti içerisinde performansı etkileyecek durumlar göz önünde bulundurulmuş; gerekli ön işleme adımları uygulanmıştır. Eksik bir değer olması modelin başarısını etkileyen en kritik etkenlerden biridir. Veri seti içerisinde eksik bir veri olup olmadığı Python programlama dili ile, isnull

parametresi ile kontrol edilmiş ve eksik veriye rastlanmamıştır.

Şekil 3'te "value_counts().plot.barh()" parametresi ile Veri setinden örnek olarak cinsiyet (Sex) ve kardeşe sahip olma (Sibling) kategorik değişkenleri grafiksel olarak betimlenmiştir. Bu grafiklere göre anket sorularını cevaplayan 519 öğrenciden 273 tanesi kız öğrenci, 246 tanesi erkek öğrencidir. Ayrıca, 343 öğrenci kardeşe sahip, 174 öğrencinin ise kardeşi olmadığı sonucuna varılmıştır. Böylelikle anketi cevaplayan daha fazla kız öğrenci olduğu ve kardeşe sahip olma öğrencilerin çoğunlukta olduğu gözlemlenmiştir.

Veri seti üzerinde aykırı gözlem analizi yapılmıştır. Grubbs'a göre aykırı gözlem; "Aynı örneklem içindeki diğer gözlemlerden belirgin derecede farklı olan veya sapma gösterendir". Bu sapmalar ve farklılıklar modelin elde edeceği başarıyı etkilemektedir [22]. Bu nedenle çalışmada, kutu grafiği (boxplot)yöntemi ile aykırı gözlem analizi yapılmıştır. Kutu grafiği yöntemi; veri çeyreklerini

(yüzdeleri) ve ortalamaları görüntüleyerek sayısal verilerin ve değişkenliğin görsel olarak dağılımını



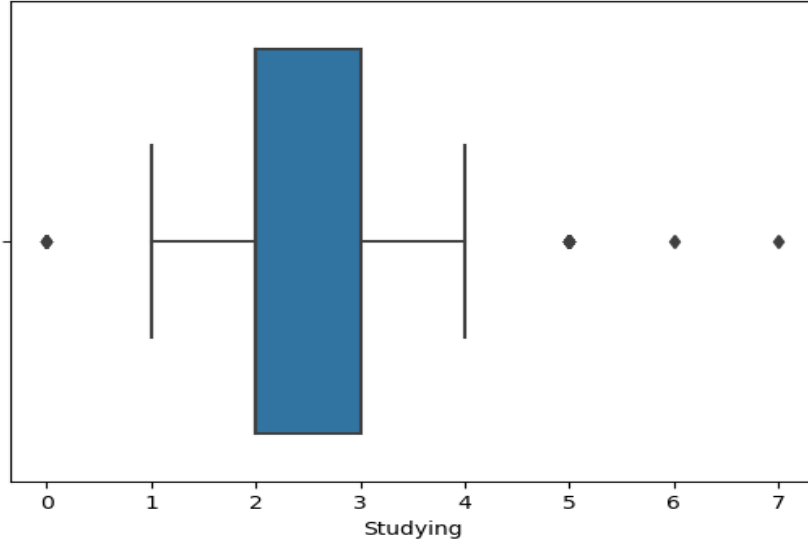
göstermek için kullanılmıştır.

Şekil 3. Cinsiyet(Sex) Ve Kardeşe Sahip Olma(Sibling) Değişkenlerinin plot.barh() İle Gösterimi

Kutu grafiği yöntemi ile görselleştirilen değişkenler arasında studying(Ders Çalışma Süresi) ve income(gelir) değişkenlerinde aykırı gözleme rastlanmıştır. Baskılama yöntemi ile alt sınır değerleri belirlenmiş ve alt sınır değerinden aşağıda kalan değerler baskılanmıştır. Bununla

birlikte modelin başarısında 0.01 değerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 4'te kutu grafiği uygulanması gereken aykırı değere sahip studying (Ders Çalışma Süresi) değişkeni gösterilmiştir. Veri setindeki değişkenlerin sahip olduğu ilk 10 değer örnek olarak Tablo 2'de gösterilmiştir.

```
: sns.boxplot(x = df_studying);
```



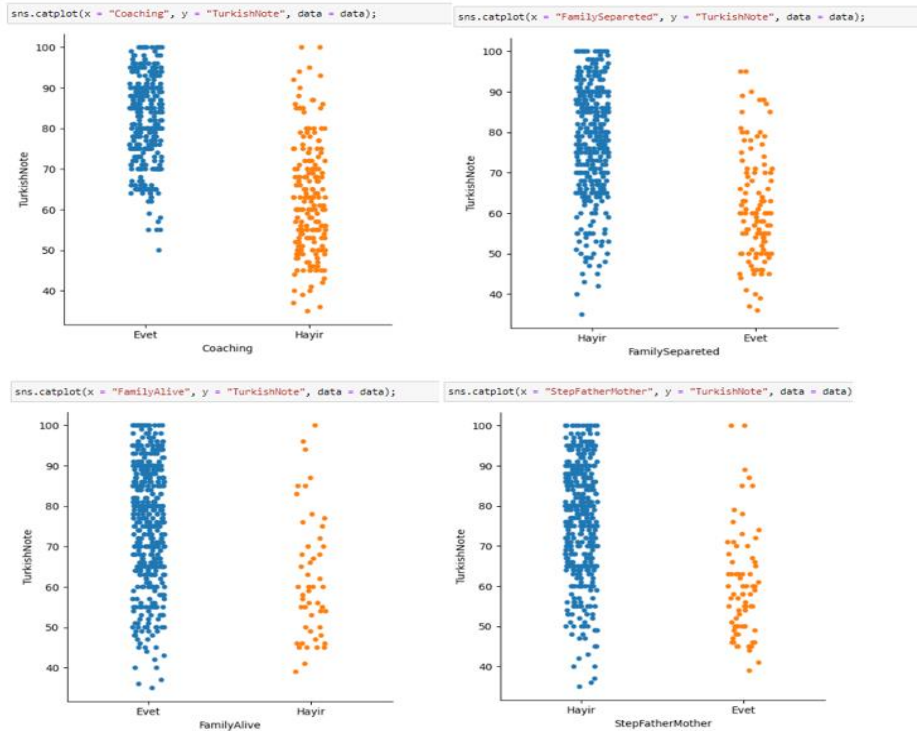
Şekil 4. Aykırı değere sahip Ders Çalışma Süresi (studying) değişkeninin Boxplot yöntemiyle gösterimi

Tablo 2. Veri Setinin Detayları

Sex	K	K	K	Er	Er	K	Er	K	K	Er
Sibling	E	E	H	E	E	H	E	H	E	E
Coaching	E	H	H	E	H	E	H	H	H	H
HaveRoom	E	H	E	H	E	E	E	E	H	H
FamSep	H	H	H	E	H	E	H	E	H	H
FamilyAlive	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
StepFM	H	H	H	E	H	H	H	E	H	H
WStudying	E	H	E	H	H	E	E	E	E	H
Studying	2	1	3	4	3	3	5	2	4	2
Sleeping	9	10	8	9	6	9	7	8	8	7
Playing	1	1	0	3	5	0	1	1	3	4
Income	9000	8900	11000	9200	9800	8500	11000	7000	10000	6000
TurkNote	85	67	94	50	72	87	80	76	85	56

Veri setinin içeriğini daha iyi analiz etmek için modelleme aşamasına geçmeden önce değişkenler arasında ilişki grafikleri kurulmuştur. Şekil 5'te Seaborn kütüphanesine ait catplot parametresi kullanılarak özel eğitim alma durumu (Coaching), ailenin ayrılık durumu (FamilySeparated), ailenin hayatta olma durumu (FamilyAlive) ve üvey anne babaya sahip durumu (StepFatherMother) değişkenleri "sns.catplot()" parametresiyle görsel olarak Türkçe notuyla ilişkilendirilmiştir. Görseller göz önünde bulundurulduğunda;

- i) Veri seti içerisinde ağırlıklı olarak özel eğitim desteği alan öğrencilerin notlarının 70 ile 100 aralığında olduğu,
 - ii) Ailesi ayrı olmayan öğrencilerin Türkçe notunun 60 ile 98 arasında olduğu,
 - iii) Ailesi hayatta olan öğrencilerin notlarının 50 ile 100 arasında yoğunlukta olduğu,
 - iv) Üvey anne babaya sahip olmayan öğrencilerin 60 ile 100 arasında not aldığı,
- Sonuçlarına ulaşılmıştır.



Şekil 5. Catplot parametresi ile kategorik değişkenlerin gösterilmesi

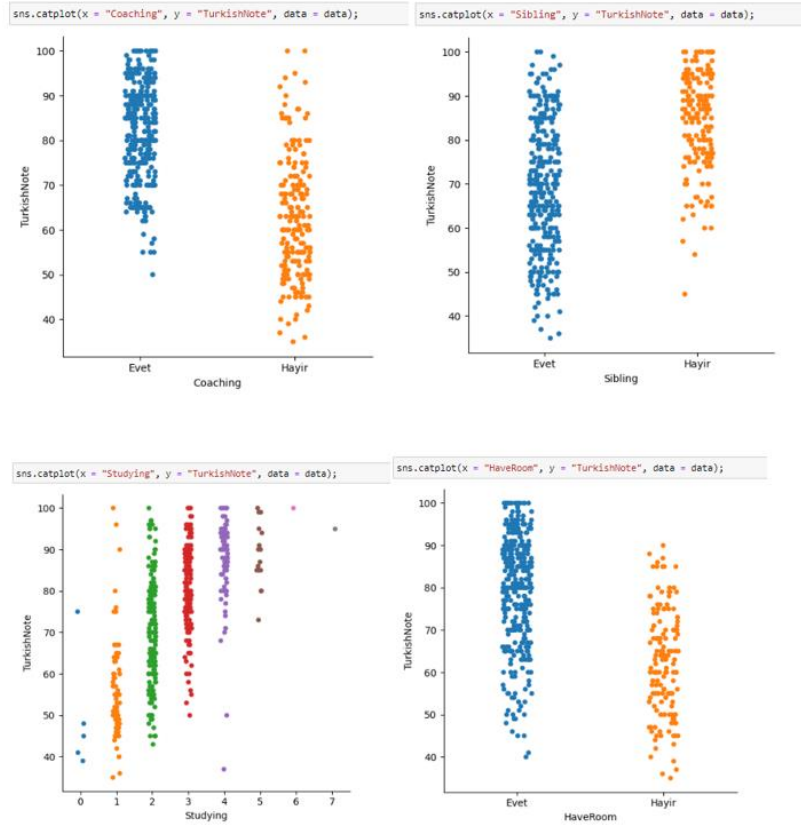
Şekil 6'da Odaya sahip olma (HaveRoom), özel eğitim alma (Coaching), kardeşe sahip olma (Sibling), ders çalışma (Studying) değişkenlerinin catplot parametresi ile görsel olarak betimlenmesi gösterilmiştir. Görsel yorumlandığında;

- i) Özel eğitim alan öğrencilerin not aralığının 65 ile 100, almayan öğrencilerin 45 ile 75 arasında olduğu,
- ii) Kardeşe sahip öğrencilerin ağırlıklı olarak 45 ile 90, olmayan öğrencilerin 75 ile 100 arasında ağırlıklı olduğu,
- iii) Genellikle 2,3,4 saat ders çalışan öğrencilerin notlarının 55 ile 100 arasında olduğu,
- iv) Kendi odasına sahip öğrencilerin notlarının 65 ile 100, olmayan öğrencilerin 50 ile 75 arasında olduğu sonucuna

varılmıştır.

Türkçe Dersi notu bağımlı değişkeniyle sayısal değişkenlerin arasındaki korelasyon hesaplanmıştır; negatif yönde etki eden 2 değişken Oyun, hafta sonu ders çalışma (Playing, WeekendStudying) veri setinden çıkartılmıştır. Veri seti içerisindeki kategorik değişkenleri sayısal değişkenlere dönüştürebilmek için Label Encoder olarak adlandırılan Etiket Kodlayıcı yöntemi kullanılmıştır. Evet-Hayır ve Erkek-Kız kategorik değişkenleri bu yöntemle 0-1 olarak dönüşüme uğramıştır.

Çalışmada, makine öğrenmesi yöntemleri destekli modelleme için uygulanan işlem adımları Şekil 7' de gösterilmiştir.



Şekil 6. Catplot parametresi ile kategorik değişkenlerin gösterilmesi

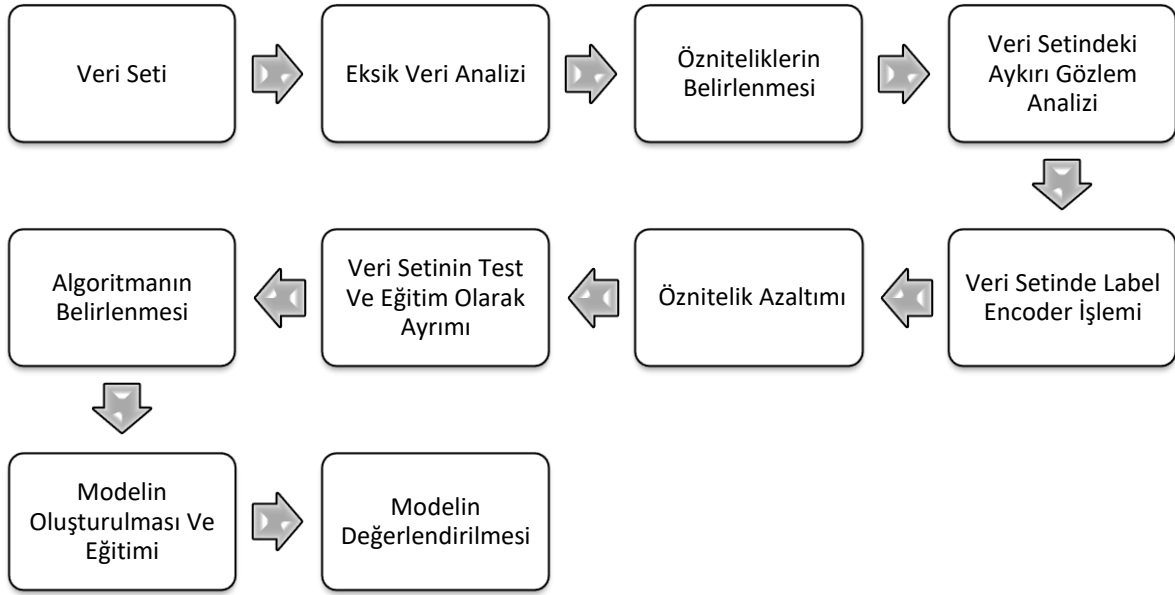
Çalışmada 6 adet denetimli öğrenme türü olan Rastgele Orman, Çoklu Linear Regresyon, Karar Ağaçları, Torbalanmış Ağaçlar, Gradyen Arttırıcı Regresyon, K-NN algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalarının seçilmesinin nedeni, yapılan literatür taraması sonucunda en çok tercih edilen ve model başarı performansları yüksek olacağı öngörülen yöntemler olmasından kaynaklıdır. Kullanılan algoritmalar model başarı yüzdeliği, başarı metrikleri RMSE, MSE, R^2 'ye göre değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

RMSE değeri, bir veri kümesindeki öngörülen \hat{y}_i değerleri ile gerçek y_i değerleri arasındaki ortalama kare farkının karekökünü hesaplamaktadır. RMSE düşükse, model veri kümesine o kadar iyi uymaktadır. RMSE değeri, MSE değerinin kareköküdür.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

R^2 değeri, verilerin regresyon hattına ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir metriğidir. Belirleme katsayısı olarak da bilinmektedir. Özetlemek gerekirse R-kare, doğrusal regresyon metodları için uygunluk ölçüsüdür. Explained Variation değeri toplam hatalar karesini, Total Variation değeri tüm toplam kareleri temsil etmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Explained Variation}}{\text{Total Variation}} \quad (4)$$



Şekil 7. Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Uygulanması Aşamaları

Bulgular

Denetimli öğrenme algoritmalarının her biri için bir model oluşturulmuş ve eğitilmiştir. 6 adet algoritmanın; model başarıları, R-kare değerleri (model uyumluluğu), Çapraz Doğrulama değerleri, RMSE ve MSE metrikleri Tablo 3'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 3 göz önünde bulundurulduğunda en yüksek model performansını gösteren model Rastgele Orman yöntemi olmuştur. Algoritmaların RMSE ve MSE değerleri de sisteme hesaplatılmıştır. Tablo 3'e göre RMSE değeri düşük olan algoritmanın performansı yüksektir. RMSE metrik değeri göz önünde bulundurulduğunda Rastgele Orman algoritması en iyi performansı gösteren model, K-NN algoritması en düşük performansı gösteren model olarak belirlenmiştir. Regresyon hattına yakınlığı temsil eden R-Kare (R²) değerlerinin karşılaştırılması tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3'te model uyumluluklarına bakıldığında Rastgele Orman algoritması regresyon hattına en yakın yöntemdir. K-NN algoritması ise 0.29 R-kare değeri ile regresyon hattına en uzak yöntem olmuştur. Modelin performansını değerlendirmek ve genelleştirme yeteneğini test etmek için model doğrulama yöntemi olarak çapraz doğrulama Çapraz Doğrulama veri setini daha küçük alt katmanlar halinde bölmektedir. Bu alt katmanlar dönüşümlü olarak kullanılır.

Karar Ağaçları ve GBM algoritmalarının model başarıları yüksektir. Ancak R-kare değerinin düşük olmasından kaynaklı yeni girdiler sisteme verildiğinde yanıltıcı çıktı üretebileceğinden bu algoritmalar tercih edilmemiştir.

K-NN algoritması düşük başarı ve regresyon hattına sahiptir. İyi sonuç çıktısı alınması oldukça güçtür. Algoritma bu sebeple tercih edilmemiştir. BTR ve ÇLR algoritmalarının başarı yüzdesine bakıldığında yüksek olsa da, model uyumluluğu en yüksek algoritma değildir. Daha iyi tahmin üretebilecek yeni girdilerle uyum sağlayabilecek bir algoritma modeli sonucuna ulaşıldığı için BTR ve ÇLR yöntemleri kullanılmamıştır.

Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda çalışmada, %88 başarı oranı, %98 model uyumluluğu ve en düşük RMSE değerine sahip olduğu için en etkin sonuç üreten algoritma rastgele orman yöntemi olmuştur. Kullanılan diğer 5 algoritmanın Rastgele Orman modeli kadar başarılı olmamasının sebebi veri setinde kullanılan gözlem sayısının az olmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Değişken sayısının artması modelin başarısını negatif yönde etkileyebilmektedir.

GBM yöntemi, literatürde en çok kullanılan algoritmalar kadar başarı (%77) göstermiştir. Ancak R-kare (model uyumluluk) değerinin düşük olmasından kaynaklı model seçiminde elenmiştir. Çalışmada, beklenen çıktı değeri sürekli değişken olduğundan uygulamada modele doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri uygulanmıştır. En iyi sonucu elde etmek için model, farklı senaryolarda defalarca test edilmiştir. Sonuç olarak Playing(Oyun) ve WeekendStudying(Haftasonu Ders Çalışma) değişkenleri modelin tahmin performansını negatif yönde etkileyen parametre olarak bulunmuş ve veri seti içerisinde çıkarılmıştır. Model bu değişkenler çıkarıldıktan sonra tekrar test edilmiştir. Test sonucunda algoritma daha yüksek performanslı sonuç üretmiştir.

Tablo 3. Algoritmaların model başarısı

	K-NN	ÇLR	RO	BTR	KA	GBM
Model Score(Model Başarısı)	0,44	0,67	0,88	0,8	0,83	0,77
RMSE	12,77	8,56	9,06	9,53	11,34	10,29
MSE	61,48	61,46	82,16	61,46	61,55	75,46
R-kare	0.29	0.98	0.66	0.61	0.34	0.33
Çapraz Doğrulama	0,49	0,7	0,92	0,83	0,86	0,79

Ayrıca literatür araştırması ile incelenen benzer çalışmalarda elde edilen doğruluk oranları kıyaslaması Tablo 4'te gösterilmektedir. Her çalışmanın farklı veri seti ve farklı parametreler ile çalışıldığı da göz önüne alındığında çalışmada elde edilen doğruluk oranları ve başarı metriklerinin literatürde geçerliliği ve uygulanabilirliği olduğu ortaya konmaktadır.

Tablo 4. Benzer çalışmaların karşılaştırılması

Çalışma	Yöntem	Doğruluk Oranı (%)
Yağcı [7]	Rastgele Orman	75.2
Jesus [8]	Destek Vektör Makineleri	81.1
Fernandes ve ark. [9]	GBM	85.9
Nieto ve ark. [13]	Destek Vektör Makineleri	84.54
Önerilen model	Rastgele Orman	88

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, öğrencilerden anket yolu ile toplanan verilerle bir veri seti oluşturulmuş; 6 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılarak yapılan modellemelerde en etkin sonuç üreten yöntemin Rastgele Orman algoritması olduğu ortaya konmuştur. Rastgele Orman yöntemi uygulanan model, %88 başarı oranı ve %98 R-Kare oranı elde etmiştir.

Bu çalışma Türkiye'de mevcut eğitim sistemindeki öğrencilerin hangi etkenlere bağlı olarak başarılı ya da başarısız olduğu sonucuna ulaşmak için yapılmıştır. Elde edilen bulgular incelendiğinde, gelir durumu yüksek olan ya da daha çok ders çalışan bir öğrencinin notunun daha yüksek olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Veri setinde toplamda 519 gözlem vardır. Ancak veri seti büyütülürse modelin performansı pozitif yönde olacaktır. Bunun sebebi eğitim ve test için ayrılan veri setinde kullanılacak verinin çok daha fazla olmasından kaynaklıdır.

Daha büyük bir veri seti ile çalışıldığında öğrencinin notunu etkileyecek farklı etmenler belirlenebilir, ayrıca modellerin performansının yükseltilebileceği düşünülmektedir. Bu şekilde model daha iyi eğitilecek ve çok daha yüksek başarılı tahmin sonuçları elde edilebilecektir.

Anket yolu ile elde edilen veriler 2021 aralık ayında toplanmıştır bu sebeple test aşamasında gelir değişkeni göz önünde bulundurulurken 2021 yılı baz alınarak test edilmiştir. Ortaokul öğrencilerine yöneltilen ve cevaplanması beklenen anket soruları bilimsel makaleler araştırılarak oluşturulmuştur. Çalışma ortaokul öğrencileri üzerinde yapılmıştır. Bu sebeple gelecek çalışmalar, eğitim düzeyi ortaokul kapsamından genişletilerek lise ve üniversite öğrencileri üzerinde eğitim başarısının ya da eğitim kurumlarında motivasyon etmenlerinin araştırılarak daha kapsamlı hale getirilebilmesi planlanmaktadır.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede veri setinin oluşturulmasında öğrencilere yöneltilen anket soruları için Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu 7 üyesi, 1 başkan yardımcısı, 1 başkan tarafından değerlendirilmiş ve onay alınmıştır. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, çalışmaya değerli vakitlerini ayırdıkları, çalışmaya katkıları için dergi editörlerine ve hakemlerine teşekkür etmektedir. Bu çalışma, Doç.Dr. Atınç Yılmaz'ın danışmanlığında yürütülen Deniz Zilyas'ın yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Yazar Katkıları

Tüm yazarlar usulüne uygun olarak makaleye katkıda bulunmuştur. Bu makale yüksek lisans tezine dayanmaktadır. Yazarlar yüksek lisans tez öğrencisi ve tez danışmanıdır.

- Çalışma kavramı ve dizaynı (Z, Y)
- Veri elde etme (Z)
- Veri çözümlenme ve tefsiri (Z, Y)
- Taslağın oluşturulması (Z)
- Revizyon (Y)

Kaynakça

- [1] Çelenk, Süleyman. 2003. "Okul Başarısının Ön Koşulu: Okul Aile Dayanışması", *Çelenk, S. İlköğretim-Online 2 (2), 2003 sf. 28-34*
- [2] Çelenk, Süleyman. 2003. "Okul Başarısının Ön Koşulu: Okul Aile Dayanışması", *Çelenk, S. İlköğretim-Online 2 (2), 2003 sf. 28-34*
- [3] Yavuz, Erol. "Konutlarda Enerji Tüketimi Kestirimi İçin Derin Öğrenme Ve Makine Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması", 2020, İstanbul, *Yüksek Lisans Tezi*
- [4] Gök, Murat. 2017. "Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Akademik Başarının Tahmin Edilmesi", *Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 77100, YALOVA*
- [5] Akşehir, Zinnet Duygu ve Kılıç, Erdal. 2019 "Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Banka Hisse Senetlerinin Fiyat Tahmini", *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi (2019 Cilt:12- Sayı:2)*
- [6] Onur Seveli ve Ali Tezcan Sarızeybek. 2019. "Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Banka Müşterilerinin Kredi Alma Eğiliminin Araştırma Analizi." , *Zeki Sistemler Teori ve Uygulamaları Dergisi 5(2) 2022 137-144*
- [7] Yağcı, Mustafa. 2022. "Eğitsel Veri Madenciliği: Makine Öğrenimi Algoritmalarını Kullanarak Öğrencilerin Akademik Performansının Tahmini", *Smart Learning Environments 9:11 2022, Kırşehir*
- [8] Cruz-Jesus, F., Castelli M., Oliveira, T., Mendes, R., Nunes, C., Sa-Velho, M., & Rosa-Louro, A. 2020 "Using artificial intelligence methods to assess academic achievement in public high schools of a European Union country." *Heliyon*.
- [9] Fernandes, E., Holanda, M., Victorino, M., Borges, V., Carvalho, R., & Van Erven, G. (2019). "Educational data mining : Predictive analysis of academic performance of public school students in the capital of Brazil" *Journal of Business Research*, 335–343
- [10] Xu, X., Wang, J., Peng, H., & Wu, R. (2019). "Prediction of academic performance associated with internet usage behaviors using machine learning algorithms." 166–173.
- [11] Hofait, A., & Schyns, M. (2017). "Early detection of university students with potential difficulties" *Decision Support System 1–11*
- [12] Chui, K.; Fung, D.; Lytras, M.; Lam, T. 2020, "Predicting at-risk university students in a virtual learning environment via a machine learning algorithm", 107
- [13] Nieto, Y.; García-Díaz, V.; Montenegro, C.; Crespo, R.G. 2019, "Supporting academic decision making at higher educational institutions using machine learning-based algorithms", 4145–4153
- [14] Ahmad, Z., & Shahzadi, E. (2018) "Prediction of students' academic performance using artificial neural network", *Bulletin of Education and Research*, 40(3)
- [15] Dam, Hasan . 2008. "Öğrencinin Okul Başarısında Aile Faktörü", *Hitit Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi*, 2008/2, c. 7, sayı: 14, ss. 75-99.
- [16] Aslanargun, Engin, Bozkurt, Sinan, Sarıoğlu, Selma. 2016 "Sosyo Ekonomik Değişkenlerin Öğrencilerin Akademik Başarısı Üzerine Etkileri", *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 9/3*
- [17] Nilsson, Nils J. 1998. "Introduction To Machine Learning", Stanford University
- [18] Chollet, François. 2019. "Deep Learning With Python", *Buzdağı Yayınevi, p.5*
- [19] Ayık Ziya, Özdemir Abdulkadir, Yavuz Uğur. 2007. "Lise Türü Ve Lise Mezuniyet Başarısının, Kazanılan Fakülte İle İlişkinin Veri Madenciliği Tekniği İle Analizi", *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. 10(2): 441-454*
- [20] Ulgen, Kaan .2017, "Makine Öğrenimi Bölüm-2(K-NN)", <https://l24.im/1kg4>
- [21] Breiman, Leo. 2001. "Random Forest", University Of California Berkeley, CA 94720, p.2
- [22] Grubbs, 1969. "Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*"



Araştırma Makalesi / Research Article

Dental implantlar için farklı yüzey modifikasyon tekniklerinin titanyumun yüzey özelliklerine etkilerinin karşılaştırılması

*Comparison of the effects of different surface modification techniques on the surface properties of titanium for dental implants*Mustafa Kırmızı^{1*}, Tuncay Dikici², Halit Doğan³¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, mustafa.kirman@cbu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0138-5606>² Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, tuncay.dikici@deu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7004-9788>³ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, halit.dogan@cbu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9263-8068>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 4 Mayıs 2023
Revizyon 25 Ağustos 2023
Kabul 1 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Dental implant, titanyum, yüzey özellikleri, osseointegrasyon

Dental implantlarda en fazla kullanılan malzeme olan titanyumun yüzey morfolojisinin geliştirilmesi konusu birçok araştırmacının ve üretici firmaların üzerinde çalıştığı önemli konulardan biridir. Titanyumun biyouyumluluğu, üstün mekanik özellikleri, korozyon direnci ve osseointegrasyondaki başarısı biyomedikal uygulamalarda yoğun olarak kullanılmasının sebeplerindedir. Bu konuda yürütülen çalışmalar, implantın kemik ile olan etkileşiminde yüzey morfolojisinin doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda implant malzemenin yüzey pürüzlülüğü, kimyasal bileşimi ve ıslanabilirliği de iyileşme aşamasında önemli rol oynar. Bu çalışma kapsamında saf titanyuma; kumlama, dağlama ve iki farklı çözelti ve voltajda anotlama olmak üzere toplamda dört farklı yüzey modifikasyon işlemi uygulanmıştır. Yüzeysel işleme tabi tutulan titanyum numunelerin, osseointegrasyonda önemli rol oynayan özelliklerden olan yüzey morfolojisi, faz yapısı ve yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Dört farklı yüzey uygulamasının sonucunda yüzey morfolojileri başta olmak üzere farklı yüzey pürüzlülük sonuçları ve faz yapıları gözlemlenmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received May 4 2023
Received in revised form 25 August 2023
Accepted September 1 2023
Available online September 30 2023

Keywords:

Dental implant, titanium, surface properties, osseointegration

Improving the surface morphology of titanium, the most widely used material in dental implants, is one of the most important issues that many researchers and manufacturers are working on. Titanium's biocompatibility, superior mechanical properties, corrosion resistance and success in osseointegration are the reasons why it is used extensively in biomedical applications. Studies on this subject have shown that surface morphology is directly effective in the interaction of the implant with bone. At the same time, the surface roughness, chemical composition and wettability of the implant material also play an important role in the healing phase. In this study, four different surface modification processes were applied to pure titanium: sandblasting, etching and anodizing in two different solutions and voltages. The surface morphology, phase structure and surface roughness values of the surface treated titanium samples, which play an important role in osseointegration, were examined. As a result of four different surface treatments, different surface roughness results and phase structures, especially surface morphologies, were observed.

Doi: [10.24012/dumf.1284880](https://doi.org/10.24012/dumf.1284880)

* Sorumlu Yazar

1. Giriş

Titanyum ve titanyum alaşımları sahip oldukları fiziksel, mekanik, korozif ve biyouyumluluk özelliklerinden dolayı dental ve ortopedik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum yüzeyinin morfolojik ve kimyasal modifikasyonu osseointegrasyon sürecini hızlandıran etmenlerdendir [1]. Kemik ile implant yüzeyi arasında yapısal ve fonksiyonel bağlantıyı ifade eden osseointegrasyon, iyileşme süreci için oldukça kritik bir öneme sahiptir [2]. Bu süreçte proteinler, kalsiyum fosfat kristalleri gibi kemik bileşenlerinin hiçbir katkı maddesi kullanmadan oksitle etkileşimi, kemikle implant arasında kalıcı bir bağlanma sağlar [3].

Titanyum implantlar tasarlanan boyuta getirildikten sonra, yüzey pürüzlülüğünü arttırmak için alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum oksit (SiO_2) ve titanyum oksit (TiO_2) gibi aşındırıcı parçacıklarla kumlamaya tabi tutulurlar [4]. İmplantın yüzey pürüzlülüğü, ıslanabilirliği ve kimyasal bileşimi, iyileşme sürecini etkileyen faktörlerdendir [5]. Ayrıca implant üreticileri yüzey pürüzlülüğünü arttırmak, osseointegrasyon sürecini hızlandırmak ve yüzey alanını arttırabilmek için nitrik asit (HNO_3), hidrojen florür (HF), hidroklorik asit (HCl), sülfürik asit (H_2SO_4) gibi aşındırıcı asidik çözeltiler ve bunların kombinasyonlarını kullanmaktadırlar [6], [7]. Bu işlemlerden sonra yüzeyde mikro porlar oluşmakta ve yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri 1-2,7 μm aralığında değişiklik göstermektedir [8]. Kum püskürtme ve asidik dağlama işlemleri ile yüzey modifikasyonuna tabi tutulan titanyum yüzeyi, kan trombositlerinin aktivasyonu ve kemik-implant arayüzüne osteojenik hücre göçü için elverişli bir duruma gelmektedir [9], [10].

Titanyum yüzeyinde mikro ölçekte yapıların oluşturulduğu yöntemleri nano ölçekli yapıların elde edildiği yeni teknikler takip etmiştir. Anotlama tekniği titanyum yüzeyinde nano yapıların oluşturulmasında hızlı kolay ve tekrarlanabilir yöntemlerden biridir. Bu yöntemle titanyum yüzeyinde nano ölçekte TiO_2 yapılar (nanotüp, nanopor vb.) oluşturulabilmektedir. Titanyum nanotüplerin boyutları uygulanan elektrokimyasal yöntemin parametreleri değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Bu yöntemde anotlama süresi, akım miktarı, elektrolit sıcaklığı, uygulanan voltaj ve elektrolitin kimyasal bileşimi, TiO_2 nanotüplerinin çapını ve uzunluğunu etkilemektedir. Bu işlemlerden sonra yüzeyde mikroporlar oluşmakta ve bu porların iç çapı 20-100nm arasında değişmektedir [1], [11], [12]. Dental implant yüzeyinde TiO_2 nanotüplerin oluşumu kemik ile temas yüzey alanını arttırmaktadır ve osseointegrasyon sürecini hızlandırmaktadır [13], [14]. Buna bağlı olarak proteinlerin ve iyonların adsorpsiyonunda artış meydana gelmektedir [15]-[17].

İmplantların yüzeyinde oluşan nanotüplerin içerisine antimikrobiyal maddelerin tatbik edilmesi sayesinde, implantı çevreleyen bakteri içeriğinde azalmalar gözlenmiş ve buna bağlı olarak da implantın erken kayıp riskleri azaltılmıştır [18], [19].

Anotlanmış titanyum örnekler ısı işlem uygulandığında 450 °C'de anataz 550-600°C civarında ise rutil faz gözlemlenir [20]. Anotlama işleminde, anataz fazın yüksek voltajlarda düşük voltaja göre yüzeyde oluşması daha yüksektir. Lokal spark oluşumundan kaynaklı meydana gelen ısı artışı bu

oluşumun sebebidir. Bu durum, protein adsorpsiyonunda ve yüzeyin ıslanabilirliğinde artışa neden olmaktadır [21]. Ayrıca anataz fazın biyouyumluluğu rutil fazından daha iyi olduğu çalışmalarla ortaya koyulmuştur [3], [22]. Anotlama işlemi titanyum yüzeyindeki temas açısını $3.25 \pm 1^\circ$ 'ye kadar süper hidrofilik değere düşürebilir [12]. Bu çalışmada mekanik, kimyasal ve elektrokimyasal gibi farklı yüzey modifikasyon teknikleri kullanılarak titanyum yüzeyinin modifiye edilmesi ve bu yüzeylerin birbiri ile karşılaştırılması çalışmanın özgün tarafı olarak açıklanabilir.

Bu çalışmada implant malzemesi olarak yoğun bir şekilde kullanılan titanyumun, implantasyon sonrası biyouyumluluğunu arttırmak ve biyolojik etkileşimini hızlandırmak için farklı yüzey modifikasyon teknikleri ile yüzeyde mikro ve nano yapıların oluşturulması hedeflenmiştir. Elde edilen yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiş, XRD grafiklerinde oluşan faz yapıları rapor edilmiş ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 25mm çapında, 5mm et kalınlığında saf ticari titanyum kullanılmıştır. Numuneler SiC ile #250-1200 kum aralığındaki zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler etanol, aseton, saf su karışımında ultrasonik banyoda 10 dakika boyunca temizlenmiştir.

2.1. Kumlama

Temizlenen örnekler kumlama cihazında 3,2 bar basınç altında, 100 μm boyutunda Al_2O_3 ile kumlanmıştır (Reitel marka Sanduret 2K (Şekil 1.)). Kumun türü, boyutu, şekli, yoğunluğu ve kum püskürtme hızı yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğü osseointegrasyon sürecinin başarısını etkileyen önemli faktörlerden biridir [6].



Şekil 1. Reitel marka Sanduret 2K kumlama cihazı

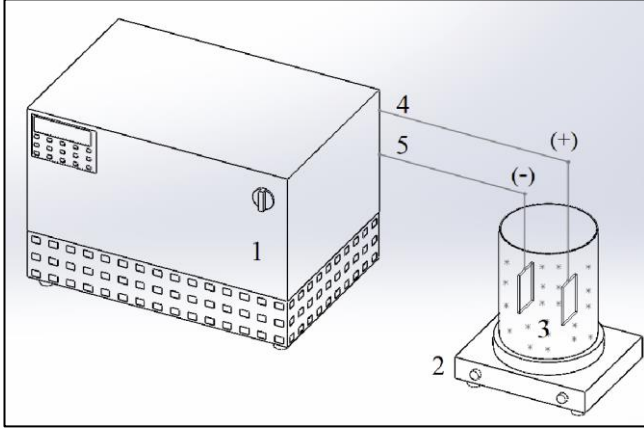
2.2. Asidik Dağlama

Dağlama işlemi için HCl ve H_2SO_4 asitlerinden oluşan bir çözelti (1:1 oranında) kullanılmıştır. Titanyum örnekler hazırlanan bu çözelti içerisinde 15 dk boyunca bekletilmiş ve işlem bittikten sonra saf suyla yıkanmıştır.

2.3. Anotlama

Anotlama ile metal yüzeyinde farklı formlarda daha kalın oksit tabakası oluşturulabilmektedir. Bu oksit yapının özellikleri; voltaj değeri, anotlama süresi, elektrot tipi ve

sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Bu çalışmada saf ticari titanyum (Cp-Gr2) kullanılmıştır. Literatür taraması sonucu başarılı sonuçlar elde edilen 20V-30V [23], [24] değerlerinin rapor edildiği görülmüştür. Bu aralıktan başarılı sonuçlar elde edilen 20V değeri farklı derişimde bir çözelti kullanılarak ve uygulama süresi daha kısa tutularak oluşacak nano yapılar üzerine etkisi incelenmiştir. Nano yapılı TiO₂ filminin anotlama işlemi; ağırlıkça % 0.5 HF çözeltisi içinde, 20 V gerilimde 30dk süresince oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Anotlama işlemi deney düzeneği (1) güç kaynağı (2) manyetik karıştırıcı (3) elektrolit (4) anot (5) katot

2.4. Spark Anotlama

Anodik oksidasyon işleminde voltaj dielektrik kırılma (dielectric breakdown) limitini geçerse spark (kıvılcım) miktarında artış olur. Kullanılan çözeltiye göre değişmekle birlikte bu değerler titanyum ve alaşımlarında, 150-200V ve üstündeki gerilim değerleridir. Oksit film kalınlığı bu

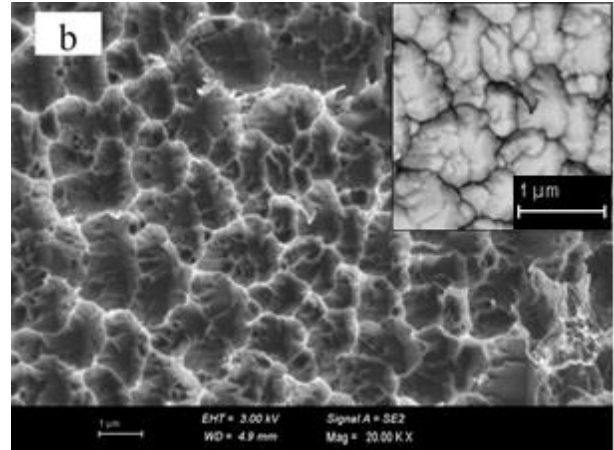
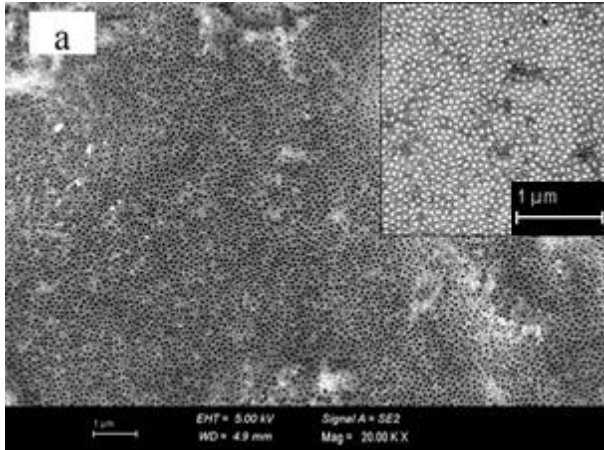
yöntemle 20 µm değere kadar ulaşabilmektedir [25]. Spark anotlama işlemi, H₂SO₄ ile hazırlanan çözelti içinde 250-300 V gerilim altında 5 dk sürede gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç sürenin ve uygulanan yüksek voltajın por çapına etkisinin incelenmesidir.

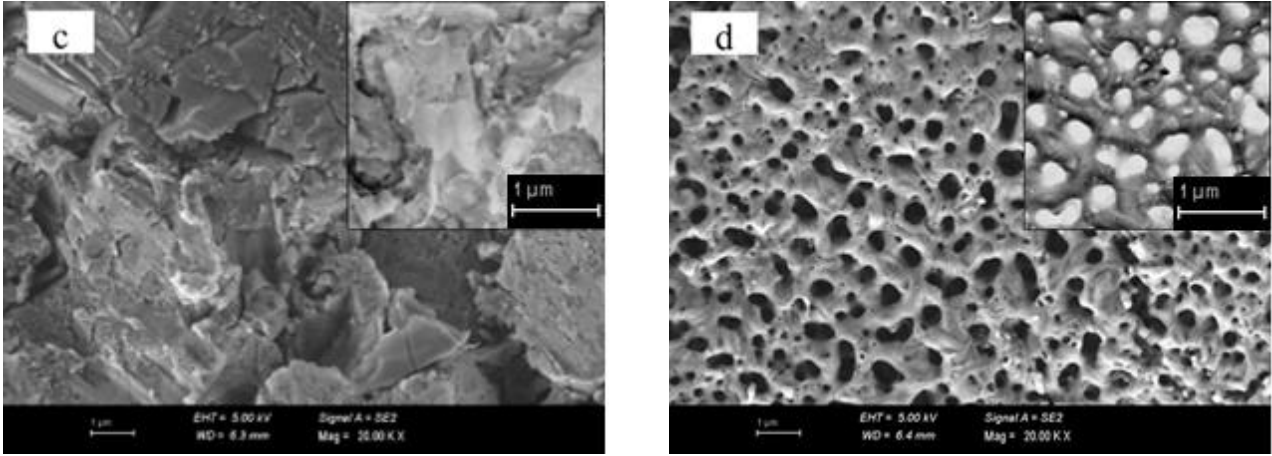
3. Karakterizasyon çalışmaları

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri SurfTest SJ-301 marka cihazda 3'er ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi Araştırma Laboratuvarında bulunan Carl Zeiss 300VP SEM cihazıyla yüksek vakum koşulları altında analiz edilmiştir. Numunelerin XRD analizi Elektronik Malzemeler Üretim ve Uygulama Merkezi'nde Thermo Scientific ARL X'TRA marka cihazla gerçekleştirilmiştir.

3.1. Yüzey Morfolojisi

Şekil 3'de kumlama, asidik dağlama ve anotlama yapılmış numunelere ait yüzey morfolojileri gösterilmiştir. HF çözeltisi içinde düşük voltajda gerçekleştirilen anotlama sonucu titanyum yüzeyinde nanotüp yapılarının oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 3a). Titanyumun yüzeyinde uniform bir dağılım gösteren nanoporların çapları ~60 nm'dir. Asidik çözelti içinde dağlamaya tabi tutulan yüzeyde ise (Şekil 3b), mikro ölçekte gözenekler (micropits) oluşmuştur. Bu yapı kemiğin süngerimsi morfolojisi ile de adeta bir benzerlik sergilemektedir. Kumlama yapılan yüzeyde pürüzlü bir yapının hakim olduğu ve girinti-çıkıntılardan oluşan rastgele bir yüzey formunun oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 3c). H₂SO₄ çözeltisi içinde anotlanan titanyum yüzeyinde mikro ölçekli porların varlığı söz konudur (Şekil 3d). Bu porlar, anotlama esnasında yüksek voltajın oksitte dielektrik kırılımı sonucu meydana gelmektedir. Yüzeyde oluşan mikro ölçekteki porların ortalama çapı ~500 nm olup, genel anlamda homojen bir dağılım göstermektedir.





Şekil 3. (a) Anotlama (b) dağlama (c) kumlama ve (d) spark anotlama

3.2. YüzeY Pürüzlülüğü

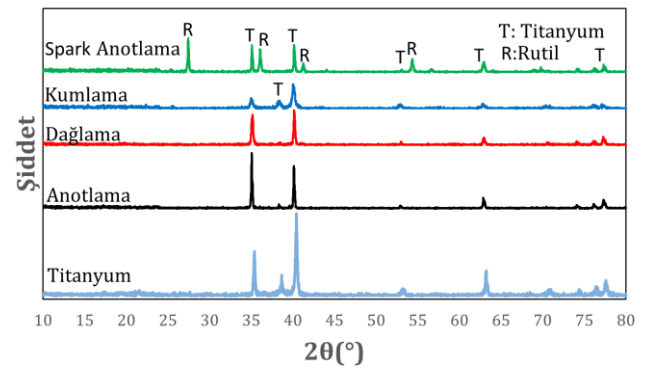
Dental implantlarda ideal yüzeY pürüzlülük değerleri $Ra=0,5-2 \mu\text{m}$ olarak kabul edilmektedir [26]. Deneysel çalışmada farklı yüzeY modifikasyonları ile elde edilen yüzeYlerin pürüzlülük değerlerine bakıldığında (Tablo 1.) genel olarak tüm yüzeYlerin bu aralıkta olduğunu belirtebiliriz. En yüksek pürüzlülük değeri kumlama yapılan yüzeYde tespit edilirken, en düşük pürüzlülük değeri nano yapıly TiO_2 filmine aittir.

Tablo 1. YüzeY modifikasyon işlemleri sonrası yüzeY pürüzlülük değerlerindeki değişim.

Uygulanan yüzeY modifikasyon işlemleri	Ortalama yüzeY pürüzlülük değeri ($Ra \mu\text{m}$)
Anotlama	0.43 ± 0.01
Spark-anotlama	0.58 ± 0.03
Dağlama	0.68 ± 0.02
Kumlama	0.90 ± 0.03

3.3. XRD analizi

Saf titanyum oda sıcaklığında hekzagonal sıkı paket (HSP) yapıda ve α (alpha) fazındadır [27]. TiO_2 ; rutil, anataz ve brokit olmak üzere üç farklı kristal faza sahiptir. En çok görülen fazlar anataz ve rutildir [28]. Farkly yüzeY işlem modifikasyonlarının uygulandığı numunelere ait XRD sonuçları Şekil 4.'de verilmiştir. Genel olarak tüm örneklerde Ti fazı bulunmaktadır ve bu faz titanyum altlıktan kaynaklanmaktadır. Anotlanan ve nano ölçekly TiO_2 yapının oluşturulduğu tabakada anataz ve rutil fazının gözlemlenmemesinin nedeni amorf yapıda olmasındandır [29]. En belirgin fark H_2SO_4 içinde anotlanarak mikroporoz yapının oluşturulduğu örnekte rutil fazına ait piklerin varlığıdır. Rutil fazının oluşumu, yüksek voltajda oluşan kıvılcımın (spark) neden olduğu yüksek sıcaklık nedeniyle faz dönüşümüne sebep olması olarak açıklanabilir.



Şekil 4. XRD analiz sonucu

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada; biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan saf titanyum yüzeYine kumlama, asidik dağlama ve farklı çözeltilerde iki farklı anotlama işlemi olmak üzere toplamda 4 farklı modifikasyon uygulanmıştır. XRD analiz sonucunda genel olarak elde edilen pikler metalik Ti fazıdır ve sadece yüksek voltajda anotlanan örnekte rutil fazı gözlemlenmiştir. YüzeY morfolojileri farklı modifikasyon işlemlerine bağlı olarak birbirinden ayrı morfolojilere sahiptir. Kumlanan titanyumun yüzeYi en yüksek pürüzlülük değerine sahip iken en düşük pürüzlülük değeri nanoporların bulunduğu titanyum yüzeYinde ölçülmüştür. Dağlanan yüzeYde ise mikro gözeneklerin hakim olduğu ve kemiğin süngerimsi yapısına benzer bir yapı tespit edilmiştir. 20V değerinde anotlanan yüzeYde ise nanoporlar mevcut olup, yüksek voltajda ise mikro ölçekly porlar oluşmuştur. Bu sonuçlar, saf ticari titanyum üzerine uygulanabilecek kompozit kaplamalar için farklı yüzeY modifikasyonlarının yüzeY morfolojisine etkisi adına literatüre katkı niteliğindedir. Bu çalışmanın bir sonraki aşaması, biyomedikal alanda nano kompozit kaplamaların bu yüzeYlere uygulanması olacaktır.

Kaynaklar

- [1] J. C. M. Souza *et al.*, “Nano-scale modification of titanium implant surfaces to enhance osseointegration,” *Acta Biomater*, vol. 94, pp. 112–131, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ACTBIO.2019.05.045.
- [2] M. Gajiwala *et al.*, “Influence of surface modification of titanium implants on improving osseointegration: An in vitro study,” *J Prosthet Dent*, vol. 126, no. 3, pp. 405.e1–405.e7, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2021.06.034.
- [3] E. Ünal *et al.*, “Saf Titanyum İmplantın Asit ve Alkali İşlemler ile Yüzey Modifikasyonu,” *AKU J. Sci. Eng*, vol. 15, pp. 37102–37108, 2015, doi: 10.5578/fmbd.10294.
- [4] A. E. Medvedev, H. P. Ng, R. Lapovok, Y. Estrin, T. C. Lowe, and V. N. Anumalasetty, “Effect of bulk microstructure of commercially pure titanium on surface characteristics and fatigue properties after surface modification by sand blasting and acid-etching,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 57, pp. 55–68, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.JMBBM.2015.11.035.
- [5] C. Vasak *et al.*, “Early bone apposition to hydrophilic and hydrophobic titanium implant surfaces: a histologic and histomorphometric study in minipigs,” *Wiley Online Library*, vol. 25, no. 12, pp. 1378–1385, Dec. 2013, doi: 10.1111/clr.12277.
- [6] B. Chrcanovic *et al.*, “Factors influencing early dental implant failures,” *journals.sagepub.com*, vol. 95, no. 9, pp. 995–1002, Aug. 2016, doi: 10.1177/0022034516646098.
- [7] B. Klein, MO; Al-Nawas, “For which clinical indications in dental implantology is the use of bone substitute materials scientifically substantiated?,” Mar. 2011.
- [8] K. Y. Hung, Y. C. Lin, and H. P. Feng, “The effects of acid etching on the nanomorphological surface characteristics and activation energy of titanium medical materials,” *Materials*, vol. 10, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.3390/MA10101164.
- [9] E. M. Lotz, M. B. Berger, Z. Schwartz, and B. D. Boyan, “Regulation of osteoclasts by osteoblast lineage cells depends on titanium implant surface properties,” *Acta Biomater*, vol. 68, pp. 296–307, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.ACTBIO.2017.12.039.
- [10] M. Mallaiah, M. Manjaiah, and R. F. Laubscher, “A review of the surface modifications of titanium alloys for biomedical applications,” *researchgate.net*, vol. 51, no. 2, pp. 181–193, 2017, doi: 10.17222/mit.2015.348.
- [11] A. Butt *et al.*, “A Novel Investigation of the Formation of Titanium Oxide Nanotubes on Thermally Formed Oxide of Ti-6Al-4V,” *Journal of Oral Implantology*, vol. 41, no. 5, pp. 523–531, Oct. 2015, doi: 10.1563/AAID-JOI-D-13-00340.
- [12] Q. Wang *et al.*, “Recent advances on smart TiO₂ nanotube platforms for sustainable drug delivery applications,” *Int J Nanomedicine*, vol. 12, pp. 151–165, 2017, doi: 10.2147/IJN.S117498.
- [13] C. Ferreira, J. Babu, A. Hamlekhan, S. Patel, and T. Shokuhfar, “Efficiency of Nanotube Surface-Treated Dental Implants Loaded with Doxycycline on Growth Reduction of *Porphyromonas gingivalis*,” *Int J Oral Maxillofac Implants*, vol. 32, no. 2, pp. 322–328, Mar. 2017, doi: 10.11607/JOMI.4975.
- [14] S. A. Alves *et al.*, “Synthesis of calcium-phosphorous doped TiO₂ nanotubes by anodization and reverse polarization: A promising strategy for an efficient biofunctional implant surface,” *Appl Surf Sci*, vol. 399, pp. 682–701, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.APSUSC.2016.12.105.
- [15] E. Beltrán-Partida *et al.*, “Disinfection of titanium dioxide nanotubes using super-oxidized water decrease bacterial viability without disrupting osteoblast behavior,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 60, pp. 239–245, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.MSEC.2015.11.042.
- [16] J. Grotberg *et al.*, “Thermally oxidized titania nanotubes enhance the corrosion resistance of Ti6Al4V,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 59, pp. 677–689, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.MSEC.2015.10.056.
- [17] S. A. Alves *et al.*, “Synthesis of calcium-phosphorous doped TiO₂ nanotubes by anodization and reverse polarization: A promising strategy for an efficient biofunctional implant surface,” *Appl Surf Sci*, vol. 399, pp. 682–701, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.APSUSC.2016.12.105.
- [18] M. K. Ji *et al.*, “Effects on antibacterial activity and osteoblast viability of non-thermal atmospheric pressure plasma and heat treatments of tio₂ nanotubes. Journal of Nanoscience and Nanotechnology,” *ingentaconnect.com*, vol. 17, no. 4, pp. 2312–2315, 2017, doi: https://doi.org/10.1166/jnn.2017.13328.
- [19] W. Liu *et al.*, “Optimizing stem cell functions and antibacterial properties of TiO₂ nanotubes incorporated with ZnO nanoparticles: Experiments and modeling,” *Int J Nanomedicine*, vol. 10, pp. 1997–2019, Mar. 2015, doi: 10.2147/IJN.S74418.

- [20] J. Grotberg *et al.*, “Thermally oxidized titania nanotubes enhance the corrosion resistance of Ti6Al4V,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 59, pp. 677–689, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.MSEC.2015.10.056.
- [21] A. Butt *et al.*, “A novel investigation of the formation of titanium oxide nanotubes on thermally formed oxide of Ti-6Al-4V,” *Journal of Oral Implantology*, vol. 41, no. 5, pp. 523–531, Oct. 2015, doi: 10.1563/AAID-JOI-D-13-00340.
- [22] J. Pan, D. Thierry, and C. Leygraf, “Hydrogen peroxide toward enhanced oxide growth on titanium in PBS solution: Blue coloration and clinical relevance,” *J Biomed Mater Res*, vol. 30, pp. 393–402, 1996, doi: 10.1002/(SICI)1097-4636(199603)30:3.
- [23] S. R. Fardi, H. Khorsand, R. Askarnia, R. Pardehkorram, and E. Adabifiroozjaei, “Improvement of biomedical functionality of titanium by ultrasound-assisted electrophoretic deposition of hydroxyapatite-graphene oxide nanocomposites,” *Ceram Int*, vol. 46, no. 11, pp. 18297–18307, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2020.05.049.
- [24] N. Karimi, M. Kharaziha, and K. Raeissi, “Electrophoretic deposition of chitosan reinforced graphene oxide-hydroxyapatite on the anodized titanium to improve biological and electrochemical characteristics,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 98, no. May 2018, pp. 140–152, 2019, doi: 10.1016/j.msec.2018.12.136.
- [25] Ö. Sıcakyüz, “Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Anodik Oksidasyon Davranışı Ve Karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007. Accessed: Aug. 14, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11527/9303>
- [26] C. Elias, Y. Oshida, and J. Lima, “Relationship between surface properties (roughness, wettability and morphology) of titanium and dental implant removal torque,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 1, no. 3, pp. 234–242, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.12.002>.
- [27] John Martin, *Materials for Engineering Third Edition*. Woodhead Publishing, 2006. Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: https://www.google.com.tr/books/edition/Materials_for_Engineering/ALxQAwwAAQBAJ?hl=tr&gbpv=1&dq=materials+in+engineering+martin&printsec=frontcover
- [28] B. Coşkun, F.-E. Fakültesi, and K. Üniversitesi, “İki Bileşenli Metal Oksit Yarı iletkenlerin Üretilmesi ve Optik Özelliklerinin Belirlenmesi,” 2020. Accessed: Mar. 23, 2023. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/fumbd/article/686474>
- [29] J. Liu, Z. Y. Liu, T. R. Zhang, J. Zhai, and L. Jiang, “Low-temperature crystallization of anodized TiO₂ nanotubes at the solid-gas interface and their photoelectrochemical properties,” *Nanoscale*, vol. 5, no. 13, pp. 6139–6144, 2013, doi: 10.1039/c3nr01286g.



Experimental examination of the axial compression conduct of filament-wound cylindrical composite tubes at different wall thicknesses and orientation angles

Hayri YILDIRIM*

¹ Dicle University, Diyarbakir Technical Sciences Vocational School Department of Machinery and Metal Technologies, hvildirim@dicle.edu.tr. Orcid No: 0000-0003-0343-2928

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 May 2023
Received in revised form 23 June 2023
Accepted 27 June 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

thin-walled cylindrical tubes, filament winding process, mechanical analysis, failure behavior, polymer reinforcements

Doi: 10.24012/dumf.1304413

* Corresponding author

ABSTRACT

This study presents the results of experimental research on the behavior and stretching of hollow cylindrical epoxy tubes made of glass, carbon, and kevlar fibers subjected to axial compression load. Hollow cylindrical tubes were fabricated by fiber winding method using glass, carbon, and kevlar fiber-reinforced composite materials. In this study, hollow cylindrical composite tubes with constant outer ($\varnothing 17$ millimeters), two different inner diameters ($\varnothing 12$ and $\varnothing 13$ millimeters; 2 ve 2,5 millimeters wall thickness), and 80 millimeters in height. Experimental research was carried out for two dissimilar wall thicknesses and four fiber orientation angles. The compressive strengths of all samples were investigated experimentally by applying loads in the axial direction. Twenty-four configurations of composite specimens were fabricated (three reinforcement materials, four winding angles, and two wall thicknesses) to research the impact of axial compression stress. Experimental results revealed that polymer reinforcement material, fiber winding angle, and wall thickness have a significant impact on the compressive stress of cylindrical composite tubes as a result of applied load in the axial direction. The conclusions show that the compressive stress of all reinforcement rises as the orientation angle and wall thickness increase under an axial compression load, and the compressive stress reaches a maximum when the orientation angle is 90° under an axial compression load. It was observed that the axial compressive stress was highest in glass/epoxy samples with 217 MPa, followed by carbon/epoxy samples with 173 MPa and kevlar/epoxy samples with 145 MPa, respectively. The axial compressive stress of all samples was highest at a 90° orientation angle and lowest at a 15° orientation angle. were found to have low values. It was observed that the axial compressive stress value increased in all reinforcement materials as the wall thickness increased.

Introduction

Composite materials design variability besides different material combinations, have high specific strength and make them highly appropriate to meet the different requirements of aerospace, defense industry, automobile, construction, marine, infrastructure, and sports products or electric motors. In many engineering fields, composite materials are preferred over conventional materials due to their superior properties such as high conductivity, rigidity, lightness, and thermal and corrosion resistance. These tubes can be better designed by varying the winding angle to meet the desired performance requirements. Composite tubes began to replace metal products in many engineering applications. Great emphasis was placed on the production and testing of composite tubes with different methods. There is a substantial amount of published data on the response of composite tubes to axial compression. Fiber winding is one of the composite production methods with relatively higher capacity and automation and lower production costs. It is mainly used in the manufacture of axisymmetric composite products such as tubes, ships, and domes used in the aerospace, military, and defense industries. The fiber winding method is widely used in the manufacture of axisymmetric composite parts such as tubes,

shafts, pipes, and cylinders [1]. In recent years, many scientists have researched these superior materials and presented many scientific publications on these subjects for the use of industry and researchers. Zhangxiang P., et al. [2] numerically investigated the effects of braid angle and manufacturing errors on compression properties of three-dimensional (3D) carbon fiber/epoxy resin circular braided composite tubes. Compressed properties include initial modulus, compressive strength, failure stress, and both intact and defective damage propagation of composite models. According to the finite element analysis, it was observed that the compression properties decreased with the increase of the knitting angle and the error content. It has been observed that the braid angle, random errors in reinforcement, and resin have a great influence on the compression behavior of the three-dimensional (3D) braided composite pipe. Gang Z., Liqiu Z., [3] et al. experimentally investigated the local deterioration and harm mechanism under the effect of transverse low velocity of triaxial braided composite pipes with axial threads at dissimilar amounts and locations. In situ and real-time defect modes of composite tubes transversal low-speed impact, a new perspective has been successfully studied using high-velocity thermal imaging technology to capture the progressive damage behavior of composite structures

during a temporary case. Yang W., [4] et al. analyzed the multiaxial mechanical conduct of orderly Kelvin and Octet-B closed-cell suds. The impacts on the stress-strain reaction, defect mode, and first yield behavior of the two suds, as well as their related density, were investigated by comparing them. It was observed that under compression-shear loading at 15° and 30° , the deterioration features of both foams were quite like compared to those of single-axis compression. Hilburger et al. [5] analyzed 24 dissimilar types of bamboo composite tube groups, 6 groups circumferentially and 18 groups longitudinally under axial compression. The load-displacement curves, stress-strain relation, and defect modes of bamboo composite tubes were researched. The impacts of dissimilar factors such as diameter, wrapping layers, length-to-diameter ratio, and fiber winding on the mechanical features of bamboo composite tubes were analyzed. It was sighted that the top tension of the longitudinal bamboo composite tubes was influenced by the number of wrapping layers in the bamboo segment. Jia X, et al. [6] analyzed the behavior of rectangular bore composite cylindrical shells beneath axial compression. The impacts of the laminate properties and hollow dimension of the hollow composite shell on the axial compression behavior were researched. It was analyzed that the response under axial compression is severely affected by the inner load dispersion near the bores and regional displacements. It was observed that the inner load dispersions and regional displacements are affected by the material properties, the dimension of the bores, and the defects in the skin. Ochelski and Gotowicki [7] analyzed the impact of the geometric factor and the orientation angle on the crushing behavior of the CFRP cylinder and found that the compressive modulus, compressive strength, and crack length diminished with the rise of the orientation angle. Curtis S., et al. [8] investigated the energy absorption talent of conical tubes made of glass-epoxy and carbon-epoxy composites. They observed that the environmentally oriented fibers in the specimens had a crucial impact on increasing energy absorption and decreasing the number of interlayer cracks. Kim J-S, et al. [9] have researched the influence of penetration exposure on the damage formation, deterioration, and strength of filament-wrapping composite tubes. They compared the static penetration and low-velocity impact results. Azeem M., et al. [10] compared the axial crushing reactions of cylindrical composite tubes reinforced with carbon/Kevlar hybrid woven fabrics. The results indicated that the specific energy absorption (SEA) of the interlayer hybrid structures was at smaller yields than that of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and Kevlar. Nevertheless, the post-crush integrity of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) tubes can be improved, as simply a minor quantity of fiber waste is created during crushing. Majid and Krishnan et al. [11,12] analyzed the impact of wrapping angle on the glass/epoxy composite tubes exposed to multiaxial cyclical loading. The authors established the distinct ring-to-axial stress ratios using the indicated angles: $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, and $\pm 63^\circ$. The resulting stress-strain relationship revealed a strong dependence between the wrap angle and strain ratio. The composite pipe advantage in particular is corrosive resistant so good used

to transport corrosive fluids [13]. Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) has the advantages of high specific modulus, high specific strength, wide damping ratio, and fatigue resistance. A hollow shaft made of CFRP is particularly appropriate for long-span, high rotational speed transmission systems and large torque [14, 15]. Abu Talib et al. [16] improved a finite element analysis model to analyze the composite transmission shaft and observed the impacts of stacking sequence and winding angle on the crucial bending velocity. Babamohammadi et al. [17] studied an analysis of the mechanical characterization of the fiber-reinforced hollow circle based on a three-dimensional (3D) shell model noting only in-plane stress. Mirzaei et al. [18] summarized experimentally and analytically the behavior of aluminum/epoxy hybrid circular tubes exposed to quasi-static axial compression loads. They established that the stacking sequence had a significant impact. It was observed that the tubes obtained as hybrid absorbed more than three times the tubes obtained from aluminum. Nan et al. [19] different lengths of CFRP cylindrical shells with an outer diameter of 20 mm and a wall thickness of 1 mm produced by pultrusion used in axial compression tests. The stiffness, ultimate strength, and medium-scale failure modes of the cylindrical shells were determined. Adin H. et al. [20] numerically investigated the fatigue behavior of composite patched and unpatched Al 5083 aluminum sheets. They applied the Finite Element Method for numerical work. As a result of the numerical study, they determined that the highest fatigue life (1593,2 N) was in the 30° angled "V" notched and patched sample. They emphasized that the contribution of the composite patch is very important. Adin H. et al. [21] numerically investigated the fatigue behavior of unpatched and patched aluminum pipes. They used the Finite Element Method for fatigue analysis in their work. As a result of the numerical study, it was determined that patch size is an effective parameter of fatigue strength and that quarter-circle and semi-circle composite patches increase fatigue life. Adin H. et al. [22] studied the mechanical properties of composite materials produced from woven jute. Samples produced according to ASTM D procedures were subjected to tensile and three-point bending loads. They found that the tensile and bending fracture loads of the composite materials obtained by using particle-reinforced adhesive increased. Adhesive joints are increasingly used in the marine, construction, automotive, and aerospace industries due to their low cost and lightweight, ease of application compared to traditional joining methods such as soldering, rivets, welding, and bolts [23].

In this study, hollow cylindrical composite tubes have different inner diameters of 12, and 13 millimeters with constant outer diameters of 17 millimeters and 80-millimeter height were used. All specimens were manufactured at four different orientation angles by filament winding machine. Glass, carbon, and kevlar fibers were used as reinforcement material and epoxy resin was used as matrix material. The axial compressive stresses of the samples were calculated theoretically using Equation (1). The axial compressive loads of the samples were obtained from the test device experimentally. The obtained

axial compressive stress was compared depending on reinforcement materials, orientation angle, and wall thickness.

Materials and Methods

Materials and Geometry

The specimens used in the experiments were manufactured at the Izoreel Composite Inc., İzmir, Türkiye. In this study for hollow cylindrical composite tubes the reinforcement material used is glass, carbon and kevlar fibers, and Araldite MY 740 epoxy resin matrix with HY 918 hardener. A mixture of epoxy resin and hardener at a ratio of 100:25 was used as the adhesive. Polymerization is carried out at 80°C for 5 hours then 130°C for 15 hours. The mechanical and physical features of the composite fibers used in production are given in Table 1. The inner diameters of the tubes were 12 and 13 mm, while their wall thicknesses varied from 2 to 2.5 mm. Hollow cylindrical composite tubes with two different inner ($D_{inner}=12$ and 13 millimeters) and constant outer diameters ($D_{outer}=17$ millimeter) and $H=80$ -millimeter height were used (Figure 2).

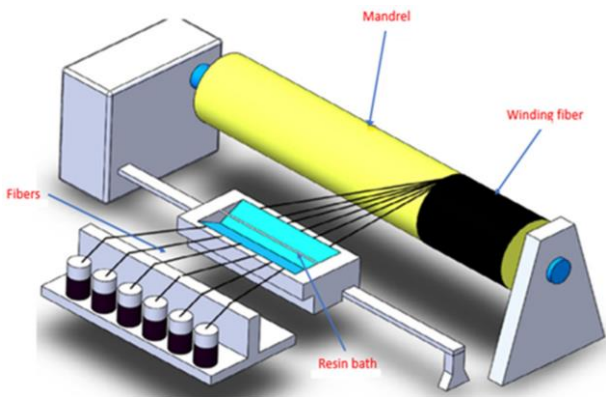


Figure 1. Filament winding process of hollow cylindrical tubes

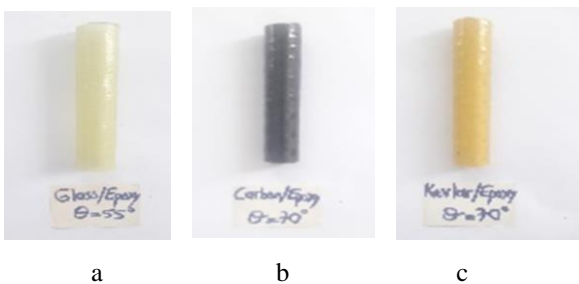


Figure 2. Test specimens of a) glass/epoxy, b) carbon/epoxy, c) kevlar /epoxy

Table 1. Shear modulus values, fiber volume, and Poisson's ratio of glass/epoxy, carbon/epoxy, and kevlar/epoxy composite materials

Materials	Shear modulus (G) MPa	Poisson's ratio ν	Fiber volumetric fraction % V_f
Glass/epoxy	7100	0,30	45
Carbon/epoxy	4760	0,27	67
Kevlar/epoxy	3580	0,23	86

Experimental studies

Test Setup

Before starting each test, the upper and lower jaws were positioned to contact the upper and lower surfaces of the specimen under test, respectively. During the axial compression test, the upper jaw was moved downward at a constant speed while the lower jaw of the test machine was held static/stationary. The machine's computerized data acquisition system automatically recorded the loading values.

The height and outer diameter of the hollow cylindrical composite specimens were kept constant for all three reinforcement materials (Figure 3). For axial compression tests, AG-X SHIMADZU universal tensile tester with 250 kN capacity shown in Figure. 4 was used. The loading speed was taken as $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ in all experiments. All tests were repeated three times for consistency (Figure 4). All experiments were performed at a test speed of $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ and at room temperature. According to ASTM D 695 standard, axial compressive stress was obtained from Equation (1) by applying an axial force to all specimens after being placed between two supports, lower jaw fixed and upper jaw movable All hollow cylindrical composite tubes were tested until failure (Figure 5-7).

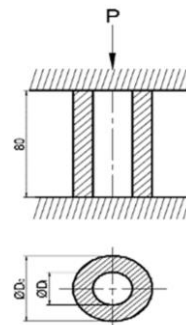


Figure 3. Schematic of test samples



Figure 4. Test setup for the axial compression

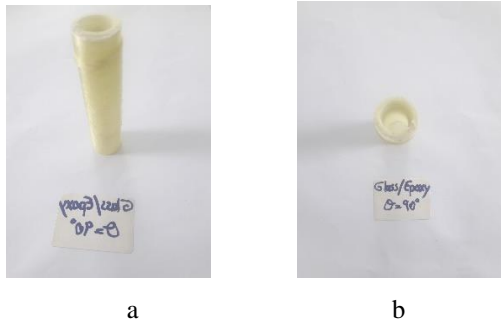


Figure 5. Damage formation of glass/epoxy specimen under axial compression load; a) front view, b) top view

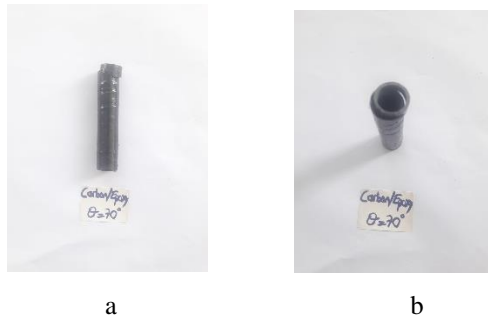


Figure 6. Damage formation of carbon/epoxy specimen under axial compression load; a) front view, b) top view

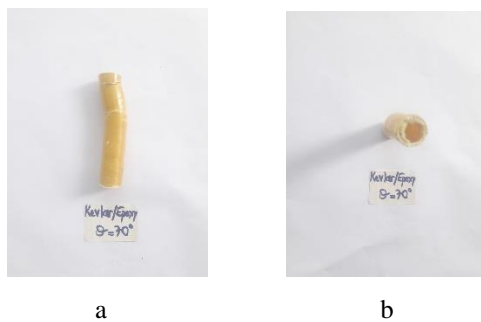


Figure 7. Damage formation of kevlar/epoxy specimen under axial compression load; a) front view, b) top view

$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \tag{1}$$

$$A = \pi \frac{D_o^2 - D_i^2}{4} \tag{2}$$

Results and discussion

Influences of reinforcement materials on axial compressive stress

In this section, the results of quasi-static axial compression tests performed on composite tubes produced using different reinforcing materials, winding angles, and wall thicknesses are classified, presented, and discussed. The effect of strengthening composite tubes with glass, carbon, and kevlar, and changing the wall thickness and fiber winding angle on the quasi-static axial compressive stress was investigated in detail.

This study, it is aimed to investigate the variation of the axial compressive stress values obtained experimentally and the relationship between the reinforcement materials. Figures 8 and 9 consist of experimentally obtained axial compressive stress and orientation angle curves, taking into account the effect of the reinforcement material. The highest axial compressive stress values obtained in the whole orientation angle were observed to occur in glass/epoxy, carbon/epoxy, and kevlar/epoxy specimens, respectively, when Figures 8 and 9 were examined together. In other words, it was understood that the axial compressive stress value of the glass/epoxy specimens obtained according to Equation (1) was higher than the others. It was determined that kevlar/epoxy specimens had the lowest axial compressive stress values obtained.

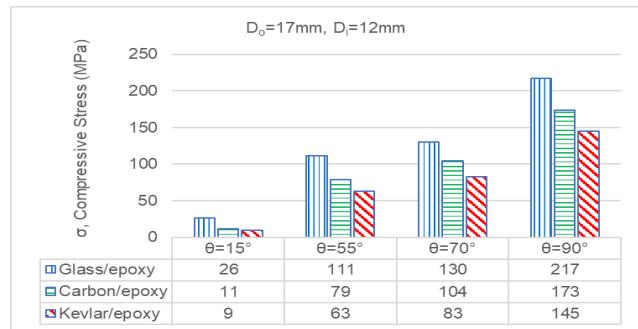


Figure 8. Compressive stress-reinforcement materials curve

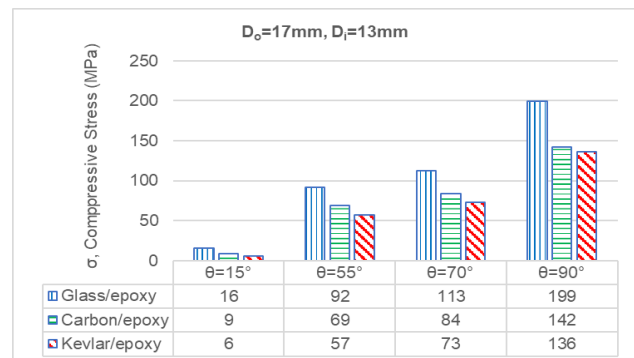


Figure 9. Compressive stress-reinforcement materials curve

Influences of orientation angle on axial compressive stress

The effect of the orientation angle on axial compressive stress values obtained from the test device experimentally was examined together with Figures 10 and 11. Accordingly, it was observed that the axial compressive stress values obtained experimentally increased in glass/epoxy, carbon/epoxy, and kevlar/epoxy specimens as the orientation angle increased. It was seen that the highest axial compressive stress values obtained for all reinforcement materials were obtained at an orientation angle of 90° and the smallest at an orientation angle of 15°. It was observed that the axial compressive stress obtained for all three reinforcement materials and both inner

diameters increased approximately two times when the orientation angle reached 90°. It was determined that the axial compressive stress values obtained in the four orientation angles (15°, 55°, 70°, 90°) were close to each other, and this value increased more sharply than the others at the 90° orientation angle for all reinforcement materials. It was concluded that by placing the fibers vertically (at a 90° orientation angle), the maximum load should be applied to all specimens for axial compression damage to occur. It was observed that increasing the fiber-winding angle from 15° to 90° increased axial compressive stress.

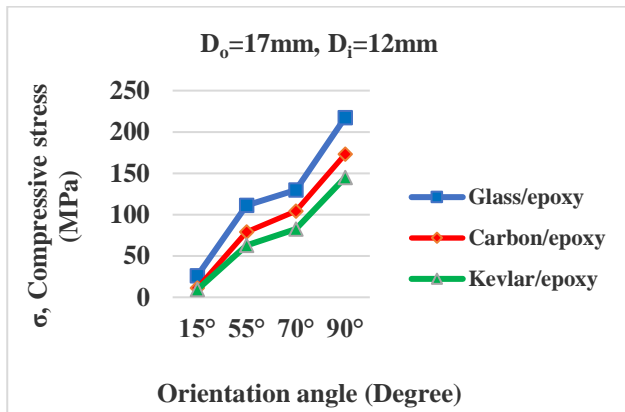


Figure 10. Compressive stress-orientation angle curve

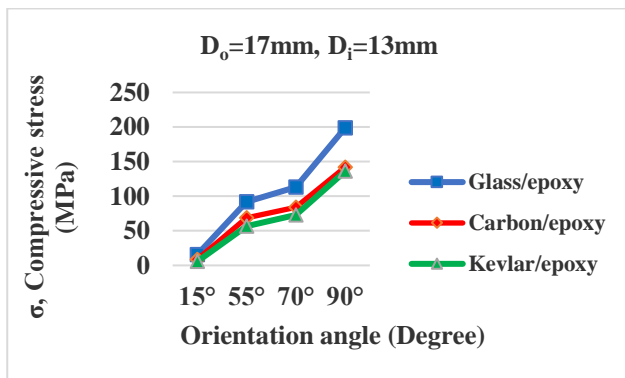


Figure 11. Compressive stress-orientation angle curve

Influences of wall-thickness on axial compressive stress

Figures 12 and 13 show the variation of the axial compressive stress values at all orientation angles of the reinforcement materials according to the wall thickness. As seen in Figures 12 and 13, it was observed that the axial compressive stress at all orientation angles increased as the wall thickness increased. It was found that the highest axial compressive stress occurred in all reinforcement materials with both 12- and 13-millimeter inner diameters, glass/epoxy, carbon/epoxy, and kevlar/epoxy specimens at 90° orientation angle, respectively. Similarly, it was determined that the smallest axial compressive stress was at the 15° orientation angle in all reinforcement materials, in kevlar/epoxy, carbon/epoxy, and glass/epoxy specimens, respectively. Here, too, it was determined that the axial compressive stress at a 90° orientation angle increased approximately 2,5 times compared to the 15° orientation angle for all reinforcement materials. In addition, as the

orientation angle increased, it was observed that the axial compressive stress of all reinforcement materials increased in both 12- and 13-millimeter inner diameters.

When Figures 12 and 13 are examined together, it is concluded that the effect of the wall thickness on the axial compressive stress is quite significant. As can be seen from these graphs, it was determined that the axial compressive stress increased as the wall thickness of the specimens increased.

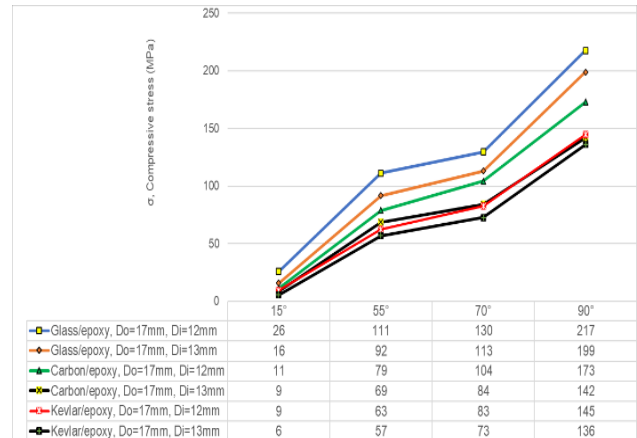


Figure 12. Influences of wall-thickness on axial compressive stress

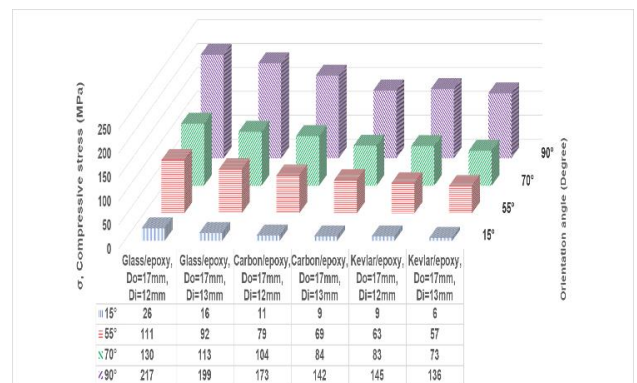


Figure 13. Influences of wall-thickness on axial compressive stress

Conclusions

In this study, hollow cylindrical composite tubes have different inner diameters of 12, and 13 millimeters with constant outer diameters of 17 millimeters and 80-millimeter height were used. All specimens were manufactured at four different orientation angles by filament winding machine. Glass, carbon, and kevlar fibers were used as reinforcement material and epoxy resin was used as matrix material in hollow cylindrical composite tubes. The axial compressive stresses of the specimens were calculated theoretically using Equation (1). The axial compressive stress of the specimens was obtained from the test device experimentally. The obtained axial compressive

stress was compared depending on reinforcement materials, orientation angle, and wall thickness.

The conclusions drawn from this study can be summarized as follows:

1. It was determined that the use of different reinforcement materials had significant effects on axial compressive stress. It was observed that the axial compressive stress was highest in glass/epoxy samples with 217 MPa, followed by carbon/epoxy samples with 173 MPa and kevlar/epoxy samples with 145 MPa, respectively.
2. It was understood that the orientation angle has a significant influence on the axial compressive stress experimentally. It was found that the axial compressive stress increased with increasing orientation angle. It was determined that the axial compressive stress and orientation angle of all specimens had the highest values at 90° and the lowest values at 15°. In addition, it was observed that the axial compressive stress at all orientation angles was the best in glass/epoxy specimens.
3. It was understood that the wall thickness has a significant influence on the axial compressive stress in hollow cylindrical composite tubes. It was observed that the axial compressive stress increased as the wall thickness increased.

References

- [1] Tao Liu A.c, Xianyan Wu, Baozhong Sun, Wei Fan, Wanli Han, Honglei Yi. Investigations of defect effect on dynamic compressive failure of 3D circular braided composite tubes with numerical simulation method. *Thin-Walled Structures*, Vol. 160. 2021.
- [2] Zhongxiang Pan, Feng Qiao, Jiajia Yu, Weihao Ouyang, Zhenyu Wu, Distribution of axial yarns on the localized deformation and damage mechanism of triaxial braided composite tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol. 177. 2022.
- [3] Gang Zheng, Liqiu Zhang, Erdong Wang, Ruyang Yao, Quantian Luo, Qing Li, Guangyong Sun, Investigation into multi-axial mechanical behaviors of Kelvin and Octet-B polymeric closed-cell foams. *Thin-Walled Structures*, Vol. 177. 2022.
- [4] Yang Wei, Si Chen, Shuaifeng Tang, Kaiqi Zheng, Jiaqing Wang, Mechanical behavior of bamboo composite tubes under axial compression. *Construction and Building Materials*, Vol. 339. 2022.
- [5] M.W. Hilburger, J.H. Starnes, A.M. Waas, a numerical and experimental study of the response of selected compression-loaded composite shells with cutouts, in Proceedings of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, *Structural Dynamics, and Materials Conference*, Long Beach, CA., AIAA Paper No. 98-1768, 1998.
- [6] Jia X, Chen G, Yu Y, Li G, Zhu J, Luo X, et al. Effect of geometric factor, winding angle, and pre-crack angle on quasi-static crushing behavior of filament wound CFRP cylinder. *Compos Part B: Eng.*, 45:1336-43. 2013.
- [7] Ochelski, Gotowicki P. Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites. *Compos Struct.*, 87:215-24. 2009.
- [8] Curtis J, Hinton MJ, Li S, Reid SR, Soden PD. Damage, deformation, and residual burst strength of filament-wound composite tubes subjected to impact or quasi-static indentation. *Compos B Eng.*, 31(5):419-33. 2000.
- [9] Kim J-S, Yoon H-J, Shin K-B. A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers. *Int J Impact Eng.*, 38(4):198-207. 2011.
- [10] Azeem M, Ya HH, Kumar M, Stabla P, Smolnicki M, Gemi L, et al. Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review. *J Energy Storage*, 49:103468. 2022.
- [11] Abdul Majid M, Krishnan P, Jia Yi A, Afendi M, Yaacob S, Gibson A. An Automated Portable Multi-axial Pressure Test Rig for Qualifications of Glass/Epoxy Composite Pipes. *Sci Eng Compos Mater*, 25(2):243-52. 2018.
- [12] Krishnan P, Abdul Majid MS, Afendi M, Gibson AG, Marzuki HFA. Effects of Winding Angle on the Behaviour of Glass/Epoxy Pipes under Multi-axial Cyclic Loading. *Mater Des*, 88:196-206. 2015.
- [13] H. Amid, A. A. A. Jeddi, M. Salehi, H. Dabiryan, and R. Pejman, *Autex Research Journal*, vol. 16, (2), pp. 100-108, 2016.
- [14] Roos C and Bakis CE. Multi-physics design and optimization of flexible matrix composite driveshafts. *Compos Struct*, 93: 2231-2240. 2011.
- [15] Eslami S, Esmael RA, and Taheri F. Experimental investigation of the effect of aging on perforated composite tubes under axial compressive loading. *Adv Compos Mater*, 22: 151-164. 2013.
- [16] Abu Talib AR, Ali A, Badie MA, et al. Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft. *Mater Des*, 31: 514-521. 2010.
- [17] Babamohammadi S, Fantuzzi N and Lonardi G. Mechanical assessment of hollow-circular FRP beams. *Compos Struct*, 227: 111313. 2019.
- [18] Mirzaei, M.; Shakeri, M.; Sadeghi, M.; Akbarshahi, H. Experimental and analytical assessment of axial crushing of circular hybrid tubes under quasi-static load. *Compos. Struct*, 94, 1959-1966. 2012.
- [19] B. Nan, Y. Wu, H. T. Sun, J. Buckling behavior of pultruded carbon fiber reinforced polymer pipes under axially compressive load. *Harbin Eng. Univ.*, 36, 779. 2015.
- [20] Hamit ADİN, Zeyni SAĞLAM, Mehmet Şükrü ADİN. Numerical Investigation of Fatigue Behavior of Non-patched and Patched Aluminum/Composite Plates. *European Mechanical Science*, 168-176.2021
- [21] Hamit ADİN, Bilal YILDIZ, Mehmet Şükrü ADİN. Numerical Investigation of Fatigue Behaviors of NonPatched and Patched Aluminum Pipes. *European Journal of Technique*, 60-65.2021
- [22] Adin, H., & Adin, M. Ş. (2022). Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites. *Materials Testing*, 64(3), 401-411.
- [23] Adin, M. Ş., & Kılıçkap, E. (2021). Strength of double-reinforced adhesive joints. *Materials Testing*, 63(2), 176-181.



Merkez alıcılı güneş kulesi-buhar güç tümleşik sisteminin performans parametrelerinin incelenmesi

Investigation of the performance parameters on the central receiver solar tower-steam power integrated system

Mehmet Zerrakki Işık¹, Hasan Oktay², Hüsna Topkaya^{3*}

¹ Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, mehmetzerrakki.isik@batman.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9753-6458>

² Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, hasan.oktay@batman.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0917-7844>

³ Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, hüsna.topkaya@batman.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7867-4086>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Haziran 2023
Revizyon 8 Eylül 2023
Kabul 8 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

*Güneş Enerjisi
Güneş Güç Kulesi
Mühendislik Denklem Çözücü (EES)
Solar II
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
(HAD)
Rankine Çevrimi*

ÖZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek artmakta ve bu alandaki araştırmalar ve uygulamalar önem kazanmaktadır. Güneş enerjisi, birçok kullanım alanı olan önemli bir kaynaktır. Güneş güç kulesi, güneş enerjisini yoğunlaştırarak elektrik üretimi için umut verici bir teknolojidir. Bu çalışmada, merkez alıcılı Solar II güneş-buhar güç santralinin termodinamik analizleri yapılmıştır. Sistem ve çevrim üzerinde etkili olan parametreler ve bu parametrelerin verime etkisi incelenmiştir. Mevcut Solar II sistemi temel alınarak, istenen bir elektrik gücü değerine (10 MW) sahip olacak şekilde tasarım çevrimi oluşturulmuştur. Alıcıdaki ısı transfer akışkanının (HTF) farklı konfigürasyonlarıyla sistemsel çıktılar analiz edilmiştir. Oluşturulan model ve program, Ansys modeli ve EES programı ile gerçek verilerin karşılaştırmasıyla doğrulanmıştır. Farklı parametreler incelenerek tesisin performansı ve gücü artırılmaya çalışılmıştır. Pompa giriş basınç ve sıcaklık değerlerinin verim üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak HTF debi değerinin artması, çevrim ve sistemin enerji verimliliğinde önemli bir artış sağlamıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık uygulamasının kızgınlaştırıcı verimini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Bu çalışma, güneş enerjisi kulelerinin performans ve verimlilik artışı için önemli bilgiler sunmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 June 2023
Received in revised form 8 September 2023
Accepted 8 September 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

*Solar Energy
Solar Power Tower
Engineering Equation Solver (EES)
Solar II
Computational Fluid Dynamics
Rankine Cycle*

Doi: 10.24012/dumf.1317529

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The usage of renewable energy sources is increasing and research and applications in this field are gaining importance. Solar energy is an important resource with numerous areas of application. Solar power tower is a promising technology for concentrating solar energy to generate electricity. In this study, thermodynamic analyses of the central receiver Solar II solar-steam power plant were conducted. The parameters affecting the system and cycle were examined. Based on the existing Solar II system, a design cycle was established to achieve a desired electrical power output (10 MW). The system outputs were analyzed for different configurations of the heat transfer fluid (HTF) in the receiver. The created model and program were validated by comparing them with the Ansys model and EES program using actual data. Various parameters were investigated to enhance the performance and power of the facility. It was observed that the pump inlet pressure and temperature had a negligible impact on efficiency. However, increasing the HTF flow rate resulted in a significant increase of 5% and 9.53% in the energy efficiency of the cycle and the system, respectively. Additionally, it was found that high-temperature application significantly improved the efficiency of the superheater. This study provides important insights for the performance and efficiency improvement of solar power towers.

Giriş

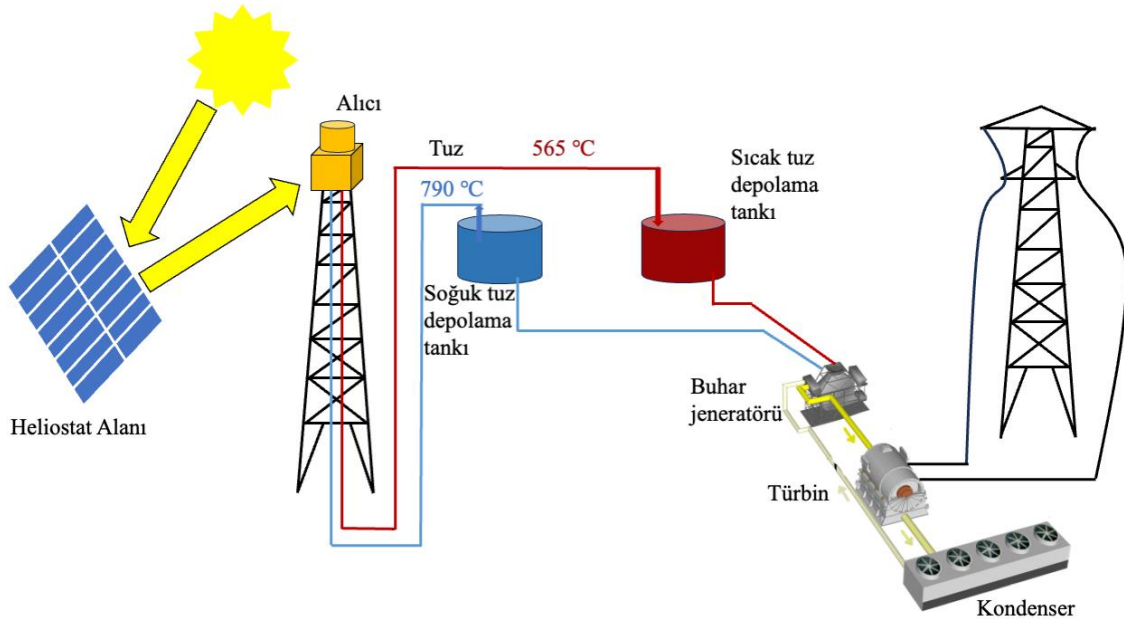
Güneş enerjisi, kolay kurulumu ve kullanıma sahip olan, çevreyi kirletmeyen ve zararlı atık oluşturmeyen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş, hidrojenin helyuma dönüşümüyle gerçekleşen çekirdek füzyon süreci sonucunda ortaya çıkan ışınimsal enerjiyi temsil eder. Güneş, dünyanın enerji ihtiyacının tamamını karşılayabilecek güçte, yaklaşık 3.9×10^{26} W gücünde temiz ve sınırsız bir enerji kaynağıdır [1]. Alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesi artan enerji talebi sebebiyle hız kazanmıştır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki araştırmalar, özellikle 1970'li yıllardan bu yana hızla ilerlemektedir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği artmakta ve maliyetleri düşmektedir [2]. Gelişmiş ülkelerle karşılaştırıldığında ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli açısından epeyce elverişli bir konumdadır. Henüz ülkemizde güneş enerjisinden tam kapasite faydalanılmamaktadır. Ülkemizde sıcak su ısıtma sistemlerinde en fazla güneş enerjisinin kullanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, güneş enerjisinden elektrik üretimi de GW seviyelerine ulaşmıştır [3].

Günümüzde aktif (doğrudan) ve pasif (dolaylı) birtakım yöntemler güneş enerjisini elektriğe dönüştürmek için kullanılmaktadır. Güneş ışınımından doğrudan elektrik üretimini sağlayan aktif sistemler son yıllarda çekiciliğini arttırmasına rağmen, yüksek verimlilik eldesinin çok fazla parametreye bağlı olması tasarım şartlarını oldukça zor ve karmaşık bir hale getirmektedir [4]. Geleneksel olarak, Güneş enerjisini odaklamak için yoğunlaştırıcı sistemlerin kullanımıyla dolaylı olarak elektrik üretimini sağlayan pasif sistemler ise yüksek verimlilik eldesinde büyük bir potansiyeli bulunmaktadır [5]. Aktif sistemlere nazaran daha pahalı kurulum maliyetlerine sahip pasif sistemlerin kullanımı teknolojinin gelişmesi ve malzeme üretim

maliyetlerinin azalması ile birlikte giderek yaygınlaşmaktadır.

Merkezi alıcı sistemleri, güneş kulesi güç sistemleri olarak da bilinir. Bu sistemler, güneş ışınlarını yoğunlaştıran heliostat adı verilen aynaları kullanır. Aynalar, güneş ışınlarını yoğunlaştırıp bir kule üzerindeki alıcıya yansıtarak pasif bir şekilde çalışırlar. Alıcı üzerindeki boru demeti, su/buhar, erimiş nitrat, sıvı metal veya hava gibi bir akışkanın içinden geçen güneş enerjisini üç boyutlu olarak emer. Bu akışkan daha sonra bir Rankine makinesine pompalanarak elektrik üretimi sağlanır. Aynalar, bir bilgisayar yardımıyla devamlı kontrol edilir ve alıcının güneşi devamlı olarak takip etmesini sağlar.

Güneş kulesi alıcılarıyla ilgili yapılan deneysel çalışmalar literatürde yeterli seviyede değildir. Bununla birlikte, Xu vd. güneş kulesi sistemlerinin enerji ve ekserji analizi için tuz çözeltilerini kullanarak teorik bir çerçeve sunmuştur. Çalışmalarında sistemdeki enerji ve ekserji kayıpları ile birlikte her bileşen değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, enerji kaybının esas olarak güç döngüsü sisteminde meydana geldiğini gösterirken, en fazla ekserji kaybının alıcı ve ardından aynalar alan sisteminde olduğunu tespit etmişlerdir. [7]. Yang vd. ise deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmada güneş kulesi tesislerinde tuz eriyiğiyle çalışan alıcıların ısı transfer performansı ve termal verimlilik arasındaki etkileşimi incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda ve ısı akışlarında düz ve sarmal boruların davranışını incelemek için bir deney düzeneği oluşturmuşlardır. Gerçekleştirdikleri deney sonucunda sarmal boruda ısı transferi gelişiminin ve Nusselt sayısının düz boruya kıyasla 3 kat daha fazla olduğunu ve 400-1200 aralığında olduğunu göstermektedir. Çalışma, güneş kulesi sistemlerinde tuz eriyiği kullanılarak elde edilen daha yüksek ısı transfer performansını vurgulamaktadır [8].



Şekil 1. Merkezi alıcı kule sisteminin genel gösterimi [6]

Rodriguez-Sanchez vd. alıcının ısı modelini sunmuştur. Simülasyonu basitleştirmek için, her panel için tek bir boru simüle edilerek çevreleyen boruların etkileri dikkate alınmıştır. Yapılan ısı analizler sonucunda, en yüksek sıcaklık ve ısı gerilmelerin alıcının doğu ve batı panellerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir [9]. Zanino vd., Solar Two merkezi alıcısındaki taşınimsal ısı kaybı üzerinde Fluent'te bulunan Reynolds Mean Navier-Stokes (RANS) tipi türbülans modelinin etkisini araştırmışlardır. Alıcı, 5.1 m iç çapa ve 24 çok kenara sahip olarak modellenmiş ve SA, k-ε ve k-ω türbülans modellerini kullanarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Seçilen türbülans modeline tabi olarak, kararlı durumda hesaplanan taşınimsal kayıplar, güçlü rüzgar hızlarında (%2-3) alıcı tarafından emilen toplam gücün ve zayıf rüzgar hızlarında (%1) olarak ölçülmüştür [10]. Pacheco, Solar II alıcısının verimliliğini araştırırken çalışma sıcaklığına ve rüzgar hızına bağlı hesaplamalar yapmıştır. Alıcıda ısı transferi için nitrat tuzu veya güneş tuzu (%60 NaNO₃, %40 KNO₃) olarak bilinen bir tuz çözeltisi kullanılmıştır. Aynalardan yansıyan radyasyonun %95'ini emen siyah Pyromark boyasıyla kaplanmış alıcı borularının dış yüzeyi yüksek sıcaklığa dayanıklıdır.[11].

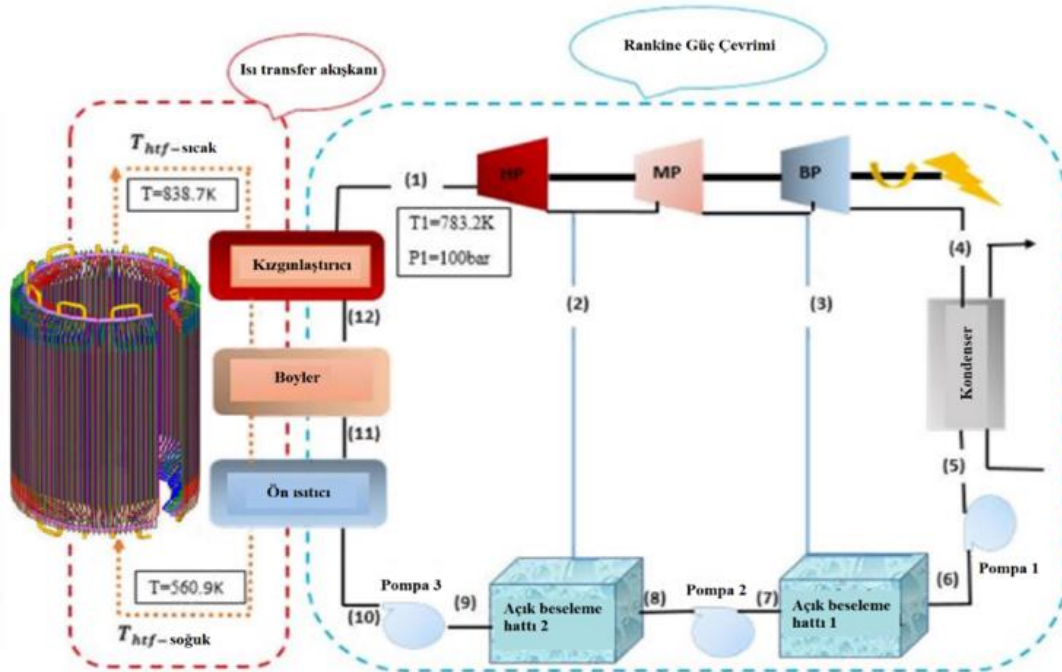
Gül den vd. tarafından yapılan çalışmada, güneş kulelerinde kullanılan harici borulu alıcılar incelenmiştir. Solar II güneş kulesi alıcısı modeli ANSYS Fluent adlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak modellenmiş ve alıcı ısı verimini artırmaya yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, taşınimsal kayıpların yanı sıra ışımaya kayıplarının da önemli olduğu belirlenmiş ve ışımaya kaynaklı kayıpları azaltmak için alıcının dış yüzeyine cam kaplanarak yeni bir alıcı modeli tasarlanmıştır [12].

Literatür çalışmaları incelendiğinde çoğunlukla alıcı kısım ve güç buhar çevriminin ayrı ayrı incelendiği görülmüştür.

Çalışmamızdaki temel amaç ısı transfer akışkanı parametre değişimlerinin güç çevrimindeki etkilerini araştırmaktır. Bu çalışma içeriğinde, Solar II merkezi alıcılı güneş enerji sistemi için dizayn parametrelerinin belirlenmesi ve güç çevrimi analizlerinin yapılmasıyla sistemin performans çıktıları detaylı olarak incelenmiştir. Bu analizler, sistemin verimliliğini, enerji üretimini ve diğer performans metriklerini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, tasarım parametrelerinin sistemin enerji verimliliği, güç üretimi ve performansı üzerindeki etkilerini belirlemeye yardımcı olmuştur. Böylece, Solar II merkezi alıcılı güneş güç sisteminin optimize edilmesi ve daha yüksek performans elde edilmesi için önemli bilgiler sağlanmıştır.

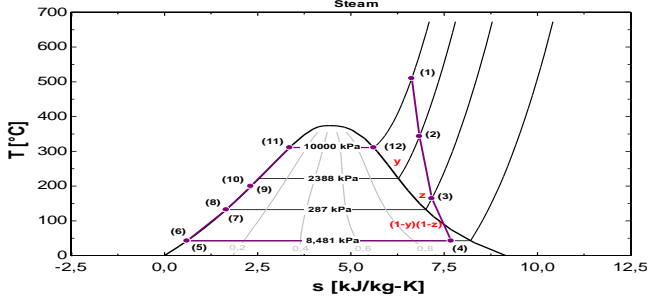
Materyal ve Metot

Solar II merkezi alıcı sisteminin ısı gücü, elektrik enerjisi üretmek için kullanılan bir Rankine buhar çevrimi tarafından işlenmektedir. Bu uygulama, alıcı tarafından sağlanan ısının, belirli bir kütle debisiyle birleşik bir enerji girişiyle türbinlerde elektrik gücüne dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Bu nedenle, en yaygın seçilen üretim çevrimi olan Rankine buhar çevrimi, Solar II merkezi alıcı sistemi için uygulanmaktadır. Şekil 2'de, buhar türbini çevriminin basitleştirilmiş bir şeması Solar II güç santralini göstermektedir. Santralde, güneş kulesi alıcısı, buhar ve ısı transfer akışkanlarının geçtiği bir seri ısı eşanjörü (ön ısıtıcı, ara ısıtma, kızgınlaştırıcı), çoklu türbin aşamaları (yüksek, orta ve düşük basınçlı), bir kondansatör, iki besleme suyu ısıtıcısı ve bu bileşenler arasına yerleştirilen üç aşamalı pompa sistemi içermektedir. Bu yapı, 10 MW net güç üreten bir çevrim oluşturmak için kullanılmıştır.



Şekil 2. Rankine güç çevrimi bloğunun modellenmesinde kullanılan tipik konfigürasyon [13]

Solar II güç çevrimi şemasından uyarlanan çevrim konfigürasyonunun basitleştirilmiş bir sıcaklık-entropi diyagramı Şekil 3'te gösterilmektedir. Solar II merkezi alıcı sisteminde kullanılan Isı Transfer Akışkanı (HTF) eriyik bir tuz (%60 Na-NO₃-%40 KNO₃) olup Rankine çevriminin çalışma akışkanı ise buhardan oluşur.

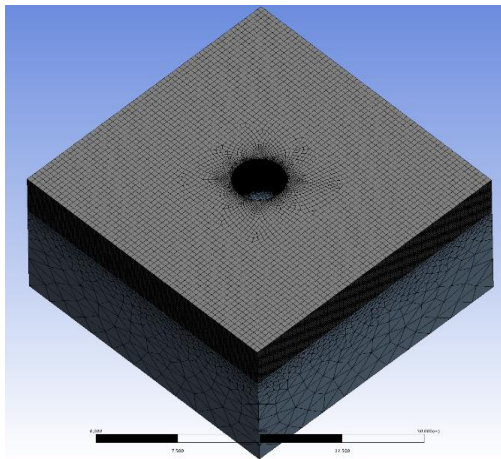


Şekil 3. Rankine güç çevrimi T-s diyagramı

Alıcı sistem Modellemesi

Merkezi alıcı, güneş enerjisi kulesi sistemlerinin önemli bir bileşenidir. Çünkü aynalardan (heliostat) gelen radyasyon doğrudan alıcının ısı transfer sıvısı tarafından emilir. Alıcı sistemi boru şeklinde bir dış silindirin içinde 24 panel ve her bir panelin iki ucundaki giriş-çıkışlara bağlı 32 ince cidarlı boru demetinden oluşmaktadır. Alıcının teknik özellikleri verilen çalışmada [11] mevcuttur.

Çalışmada merkezi alıcıdaki ısı transfer analizi Ansys HAD programı kullanılarak yapılmıştır. Sistemin çözülebilir seviyeye indirgenmesi için literatürde kabul görmüş şekilde boru demeti düz plaka olarak modellenmiştir. Alıcı iç çapı 5.1 m olan 24 adet dikdörtgen panelin birleştirilmesiyle çokgen geometri elde edilmiştir. Hesaplama alanı olarak 36 m yüksekliğinde ve 30 m genişliğinde kare tabanlı bir dikdörtgen prizması kullanılmış olup modelin ağ yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Alıcının hava ile temas halinde olan kısmındaki ağ yapısı artırılarak hassas veri eldesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda modelde 751952 eleman kullanılmıştır.



Şekil 4. Alıcı Modelinin ağ yapısı

Modelde ısı transfer akışkanı alıcının en kuzeydeki iki panelinden girer ve serpantin akışını sağlayacak şekilde güneydeki panellerden çıkar. Sistemdeki enerji kaynağı aynalardan gelen ışınım olup Solar II sistemi için toplam ışınım miktarı 42.2 MW ve bu enerjinin 40 MW'ı alıcı tarafından emilmektedir. Alıcıdaki her bir panel üzerine gelen ışınım miktarı yönlere göre değişim göstermekte ve her bir panel için on parçaya bölünmüş şekilde ısı haritası [10] da verilmiştir.

Işınım haritasından alınan her bir değer cidar kalınlığına bölünmüş ve HAD'da ısı üretimi (W/m³) olarak girilmiştir. Alıcı iç yüzeyi için adyabatik koşullar kabul edilmiş olup alıcı duvarların yayıcılığı 0.83 olarak alınmıştır [14]. Alıcı tarafındaki ısı transfer akışkanı, hava (rüzgar) ve alıcı yüzeyin termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tasarım modelde alıcının her bir yarısından geçen akışkanın kütleli debisi 45 kg/s ve rüzgarın batıdan alıcıya 8.98 m/s hızında aktığı kabul edilmiştir.

Tablo 1. Alıcı akışkan (HTF), hava ve alıcı çeliğin termofiziksel özellikleri [12, 14].

	Özgül ısı c_p (J/kgK)	Yoğunluk ρ (kg/m ³)	Isıl iletkenlik k (W/mK)	Dinamik viskozite μ (kg/ms)
HTF	1516.53	1818.11	0.5242	0.0016
Hava (rüzgâr)	1007	1164	0.0263	1.846×10^{-5}
316H çelik	500	7900	16	—

Alıcı çıkışında yüksek sıcaklıklara ulaşan ısı transfer akışkanı ısıyı eşanjörler vasıtasıyla buhara aktarmaktadır. Bunun için üç farklı eşanjör kullanılmakta olup sonunda suyun kızdırma süreci tamamlanmaktadır. Solar II güç çevrim tasarımı parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

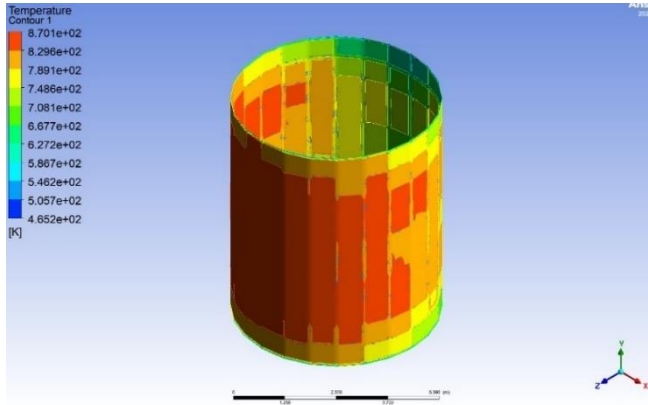
Tablo 2. Güç santralinin dizayn parametreleri [13]

Parametre	Değerler
P_1 (kPa)	10000
T_1 (°C)	510.1
P_5 (kPa)	8.481
$T_{htf,h}$ (K)	838.7
$T_{htf,c}$ (K)	560.9
Tesisin gücü (MW)	10
Türbinlerin ve pompaların izentropik verimliliği	0.7-0.695

Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışma, Solar II merkezi alıcılı güneş enerji sistemi için dizayn şartlarını, parametrelerini ve güç çevrimi analizlerini içermekte olup, sistemin genel performansını detaylı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, öncelikle mevcut Solar II sisteminin özellikleri esas alınarak alıcı modellemesi HAD programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, güç buhar çevrimi sistem denklemleri de EES programı üzerinde tanımlanmış ve farklı

konfigürasyonlarda sistem çıktıları bu program aracılığıyla elde edilmiştir. Model üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. Çalışmada HAD ve EES programlarının doğrulaması için literatürde verilen çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmış ve sonuçlar Tablo 3 ve Tablo 4'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem alıcı için hem de Solar II buhar güç santralinin sonuçların birbirine uyumlu ve hata payının çok az olduğu ispatlanmıştır [10, 13].



Şekil 5. Isı transfer akışkanının alıcı üzerindeki sıcaklık dağılımı

Tablo 3. Ansys model çalışması ile Referans modelin Karşılaştırması.

	Ansys Model	Referans [10]	Hata (%)
Taşınım kayıp (MW)	0.91	0.87	4.38
Işınım kayıp (MW)	1.81	1.79	0.83
$T_{ort, çıkış}$ (HTF) (K)	826.9	823.50	0.89

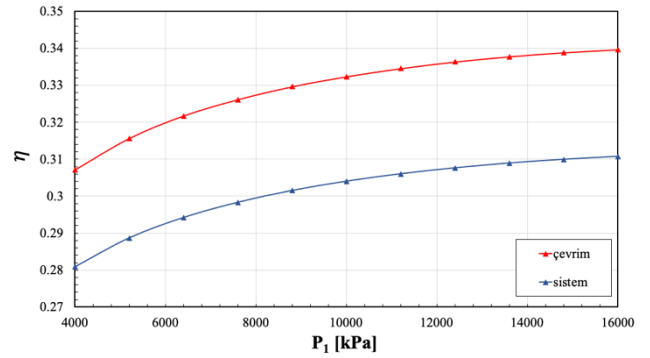
Tablo 4. Rankine çevriminin doğrulaması

Parametre	Solar II modeli [13]	Çalışma modeli	Hata (%)
Buhar debisi (kg/s)	11.84	11.84	-
Toplam ısı transferi (MW)	30.16	30.12	0.1
Çevrim verimliliği	0.33	0.332	0.6

Solar II güç santralının verimliliği, literatürde verilen diğer Rankine güç çevrimlerine kıyasla nispeten düşük olduğu belirtilmektedir. Genel olarak, buhar türbiniyle elektrik üretimi gerçekleştirileceği zaman çevrimin verimliliğini artırmak için farklı teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, çalışmanın bir sonraki aşamasında, Rankine güç çevrimi ve sistem genelindeki verimlilik değerleriyle her bir farklı parametrenin performansa doğrudan etkisinin hesaplanması ve grafiklerle incelenmesi yapılmıştır. Bu analizler, sistemin performansını iyileştirmek için potansiyel odak noktalarını belirlemeye yardımcı olmaktadır.

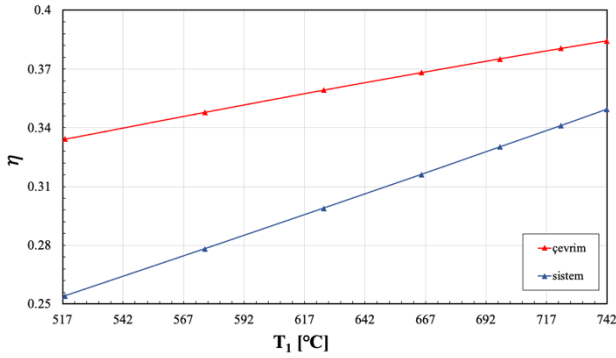
Türbin giriş basınç ve sıcaklığının verimliliklere etkisi

Şekil 6'da sistem ve çevrimin enerji verimliliğine yüksek basınçlı türbin giriş basınç değerinin etkisi incelenmiştir. Türbin giriş basınç değerleri 4 MPa'dan 16 MPa'a kadar değişirken, çevrimin enerji verimliliğinin %31 ila %34 arasında ve sistemin enerji verimliliğinin de %28 ila %31 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Grafikte de gözüktüğü gibi, yüksek basınç değeri arttıkça Rankine çevriminin ve sistemin enerji verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, türbin giriş basınç değeri 4 MPa'dan 7 MPa'a artırıldığı zaman çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinin sırasıyla %3.32 ve %3.33 artış gösterirken, 10 MPa'a artırıldığında çevrim ve sistemin enerji verimlilikleri sırasıyla %5.29 ve %5.30 artmıştır. Ayrıca, 16 MPa'a artırıldığında çevrim ve sistemin enerji verimlilikleri sırasıyla %7.35 ve %7.34 artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek basınç değerlerinin çevrim ve sistemin enerji verimliliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.



Şekil 6. HP türbin giriş basıncının sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi

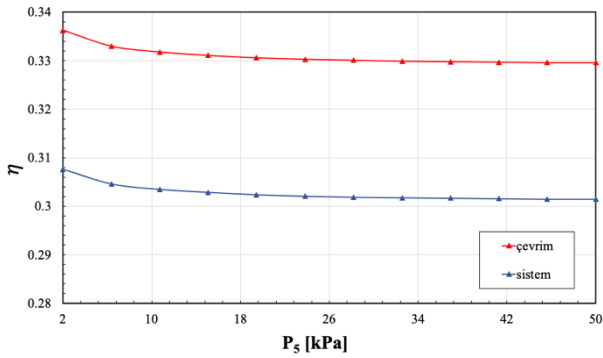
Sistem ve çevrimin enerji verimliliğine yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklık değerlerinin tesiri Şekil 7'de incelenmiştir. Türbin giriş sıcaklık değerleri 518 °C'den 742 °C'ye kadar değişirken, çevrimin enerji verimliliğinin %33 ila %38 arasında ve sistemin enerji verimliliğinin de %25 ila %35 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, yüksek sıcaklık değeri arttıkça Rankine çevriminin ve sistemin enerji verimliliğinin arttığı tespit edilmiştir. Türbin giriş sıcaklık değeri 518 °C'den 742 °C'ye çıkartıldığı zaman çevrim ve sistemin enerji verimlilikleri %15 ve %37.5 artış göstermiştir. Bu sonuçlar, türbin giriş sıcaklığının çevrim ve sistemin enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Düşük verim değerlerine sahip olduğunda bile, sıcaklık değerindeki artışların önemli ölçüde artış oranlarına yol açtığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle, sıcaklık değerinin verimlilik açısından önemli bir faktör olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 7. HP türbin giriş sıcaklığının sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi

Pompa-I giriş basınç ve sıcaklığının verimliliklere etkisi

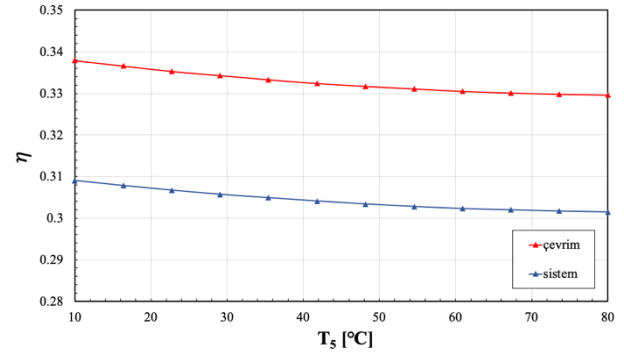
Sistem ve çevrimin enerji verimliliğine Pompa-I giriş basınç değerlerinin etkisi Şekil 8’de verilmiştir. Pompa giriş basınç değerleri 2 kPa'dan 50 kPa'a kadar değişirken, çevrimin enerji verimliliğinin %34 ile %33 arasında ve sistemin enerji verimliliğinin %31 ile %30 arasında %1'lik farkla değiştiği gözlemlenmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, pompa giriş basınç değeri arttıkça Rankine çevriminin ve sistemin enerji verimliliğinin çok düşük miktarda düştüğü gözlemlenmektedir. Örneğin, pompa giriş basınç değeri 2 kPa'dan 50 kPa'a çıktığında çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde %2 ve %1.98 azalış olduğu görülmüştür. Bu azalışlar, basınç artış oranlarının yüksek olmasına rağmen elde edilen verim düşüşlerinin çok düşük seviyede olduğunu göstermektedir. Pratik uygulama açısından, yüksek basınç değerlerinin kullanımının verim açısından önemli bir olumlu veya olumsuz etki yapmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 8. Pompa-I giriş basınç değerlerinin sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi

Şekil 9'da, Pompa-I giriş sıcaklık değerlerindeki değişimin sistem ve çevrimin enerji verimliliğine tesiri incelenmiştir. Sıcaklık değerleri 10 °C ile 80 °C arasında değişirken, çevrimin enerji verimliliğinin %34 ile %33 arasında ve sistemin enerji verimliliğinin %31 ile %30 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, pompa giriş sıcaklık değeri arttırıldıkça Rankine çevriminin ve sistemin enerji verimliliğinin düştüğü gözlemlenmektedir. Örneğin, pompa giriş sıcaklık değeri 15 °C'den 80 °C'e çıkartıldığında çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde

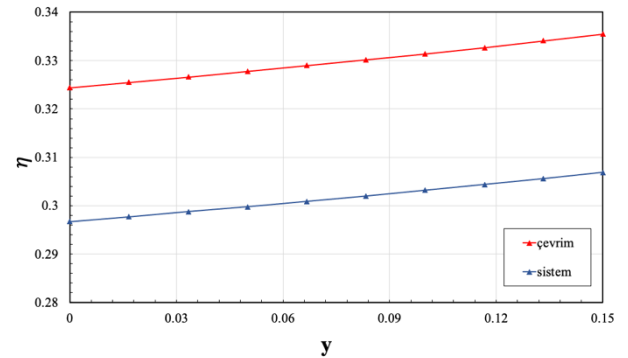
%2.46 ve %2.43 azalış olduğu görülmüştür. Uygulama açısından, pompa giriş sıcaklık değerlerinin artışının verim bakımından önemli bir etki yapmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 9. Pompa giriş sıcaklık değerlerinin sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi

Açık besleme su ısıtıcılarına giren buhar miktarının verimliliklere etkisi

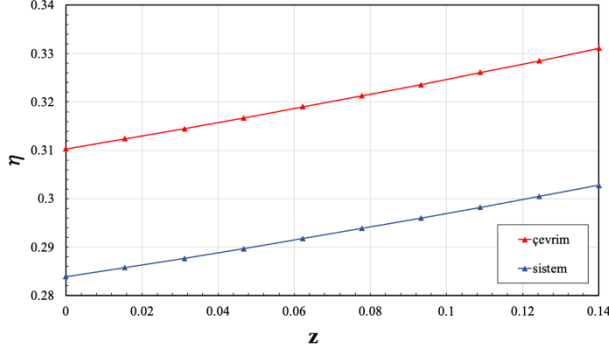
Şekil 10'da, Açık Besleme Hattı II su ısıtıcılarına giren buhar miktarının değişiminin sistem ve çevrimin enerji verimliliğine tesiri incelenmiştir. Buhar miktarının artan değerleri, %0'dan %15'e kadar değişirken, çevrimin enerji verimliliğinin %32 ile %34 arasında ve sistemin enerji verimliliğinin %31 ile %33 aralığında değiştiği gözlemlenmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere, buhar miktarındaki artış Rankine çevrimin ve sistemin enerji verimliliğinin artışına sebep olmaktadır. Örneğin, buhar miktarı %0'dan %15'e çıkartıldığı zaman çevrim ve sistemin enerji verimlilikleri %3.1 ve %3.44 artış olduğu görülmektedir. Termodinamik açıdan, buhar miktarının ısıtıcılara giren miktarının artması sisteme olumlu bir etki yapmaktadır.



Şekil 10. Açık besleme hattı II su ısıtıcılarına giren buhar miktarının sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi

Şekil 11'de, Açık Besleme Hattı I su ısıtıcılarına giren buhar miktarındaki değişimin, sistem ve çevrimin enerji verimliliğine tesiri verilmiştir. Buhar miktarının artan değerleri, %0'dan %15'e kadar değişirken, çevrimin enerji verimliliğinin %31 ile %33 arasında ve %30 ile %29 arasında sistemin enerji verimliliğinin değiştiği tespit edilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, Rankine çevrimin ve sistemin enerji verimliliğinin buhar miktarı değeri ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmektedir. Örneğin, buhar miktarı değeri

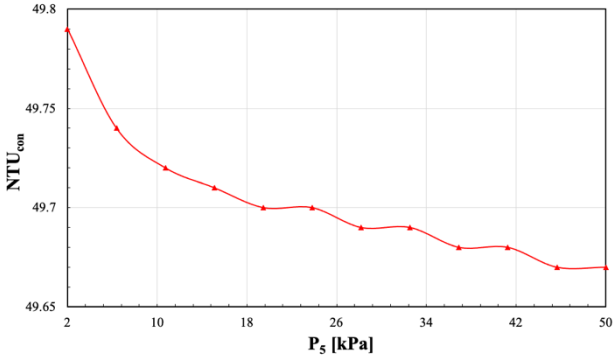
%0'dan %15'e çıktığında çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde sırasıyla %6.7 ve %6.66 artış olduğu görülmüştür. Buhar miktarının artması rejenerasyon miktarını da artırarak sisteme olumlu etki yapmaktadır.



Şekil 11. Açık besleme hattı I su ısıtıcılarına giren buhar miktarının sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi

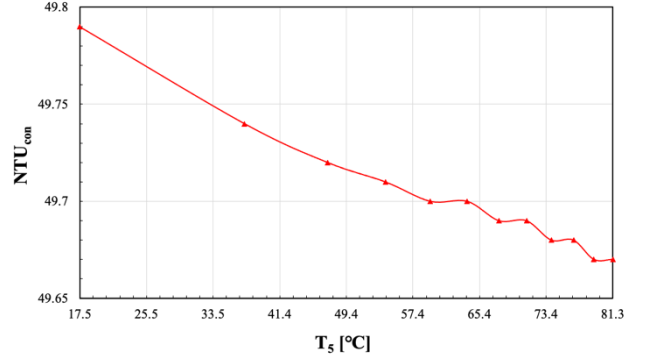
Çevrimde yer alan eşanjörlerin verimliliklere etkisi

Şekil 12'de, Pompa-I giriş basınç değerlerindeki değişimin kondenserin ısı transfer miktarına tesiri incelenmiştir. Pompa giriş basınç değerlerinde 2 kPa'dan 50 kPa'a kadar, kondenserin ısı transfer miktarının 49.79 ila 49.67 aralığında değişim gözlemlenmiştir. Şekilden, pompa giriş basınç değeri ile kondenserin ısı transfer miktarının ters orantılı değiştiği görülmektedir. Örneğin, pompa giriş basınç değeri 2 kPa'dan 50 kPa'a çıktığında ısı transfer miktarında %0.24'lük bir azalma olduğu görülmüştür. Ancak, pompa giriş basınç değerlerinin artışı verimliliklere belirgin bir olumlu veya olumsuz etki yapmamaktadır.



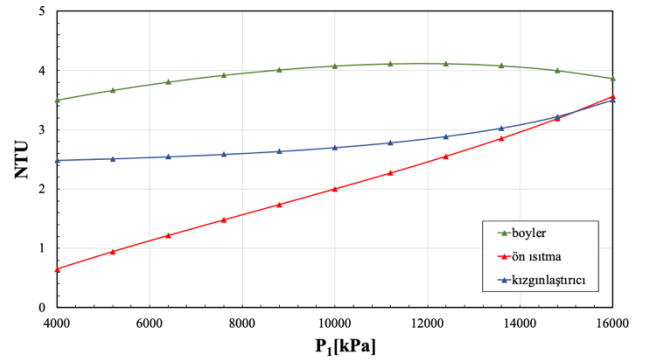
Şekil 12. Pompa-I giriş basınç değerlerinin kondenserin ısı transfer miktarına etkisi

Şekil 13'teki verilere dayanarak, Pompa-I giriş sıcaklık değerlerinin kondenserin ısı transfer miktarına etkisi incelenmiştir. Kondenser çıkış sıcaklık değerlerinde 17.5 °C'den 81.3 °C'ye kadar değişim gözlemlenmiştir. Grafikten açıkça görüldüğü üzere, sıcaklık değeri arttıkça kondenserin ısı transfer miktarının azaldığı gözlemlenmektedir. Sıcaklık değeri 17.5 °C'den 81.3 °C'ye çıktığında, ısı transfer miktarında yaklaşık %0.24 oranında azalma görülmüştür. Bu verilere dayanarak, pompa giriş sıcaklık değerlerinin artışının verimlilik üzerinde olumlu veya olumsuz bir etki yapmadığı sonucuna varabiliriz.



Şekil 13. Pompa giriş sıcaklık değerlerinin kondenserin ısı transfer miktarına etkisi

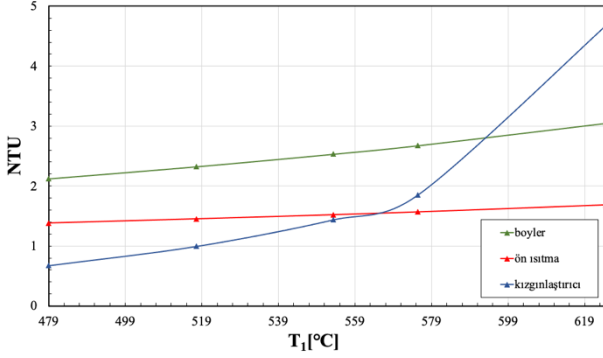
Şekil 14'te yüksek basınçlı türbin giriş basınç değerlerindeki değişimin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ısı transfer miktarına tesiri incelenmiştir. Basınç değerleri 4 MPa'dan 16 MPa'a kadar değişmiştir. Grafikten görüleceği üzere, türbin giriş basınç değeri yükseldikçe kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarında yükseldiği gözlemlenmektedir. Boyler için ise basınç değeri arttıkça NTU değerinin arttığı, 12.4 MPa'da maksimum 4.12 NTU'ya ulaştığı ve daha sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Basınç değeri 4 MPa'dan 10 MPa'a çıkartıldığı zaman, %10.42, %8.6 ve %297 artış sırasıyla boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarında olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, 16 MPa'a çıktığında ise %9.33, %30.12 ve %448 artış sırasıyla boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu verilere dayanarak, türbin giriş basınç değerinin artışının kızgınlaştırıcı ve ön ısıtma için ısı transfer miktarını artırdığı, ancak boyler için NTU değerinde bir maksimum nokta olduğunu ve daha sonra azalmaya başladığını söyleyebiliriz.



Şekil 14. HP türbin giriş basınç değerlerinin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ısı transfer miktarına etkisi

Şekil 15'te yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklık değerlerindeki değişimin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ısı transfer miktarına tesiri incelenmiştir. Sıcaklık değerleri 479 °C'den 619 °C'ye kadar değişmiştir. Grafikten görüleceği üzere, türbin giriş sıcaklık değerindeki artışla boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarında artış tespit edilmiştir. Boyler için ısı transfer miktarı 2.12 ila 3.04 arasında değişmektedir. Kızgınlaştırıcı için ise ısı transfer miktarı 0.67 ila 4.67 arasında değişmektedir. Ön ısıtma için ise ısı transfer miktarı 1.38 ila 1.68 arasındadır.

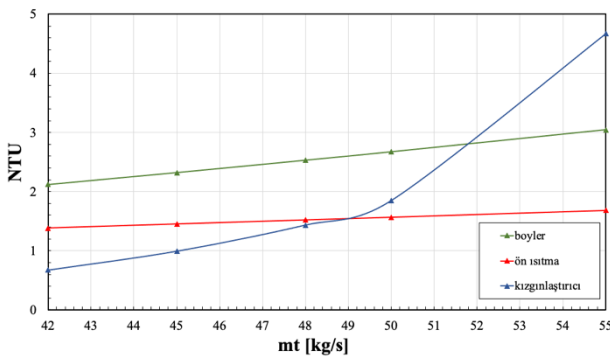
Sıcaklık değeri 479 °C'den 619 °C'ye çıktığında, %43.5, %595 ve %21.6 artış sırasıyla boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarında olduğu görülmüştür. Sonuçta, türbin giriş sıcaklık değerinin artışının boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtma için ısı transfer miktarını artırdığını söyleyebiliriz. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamasının kızgınlaştırıcı verimini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir.



Şekil 15. HP türbin giriş sıcaklık değerlerinin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ısı transfer miktarına etkisi

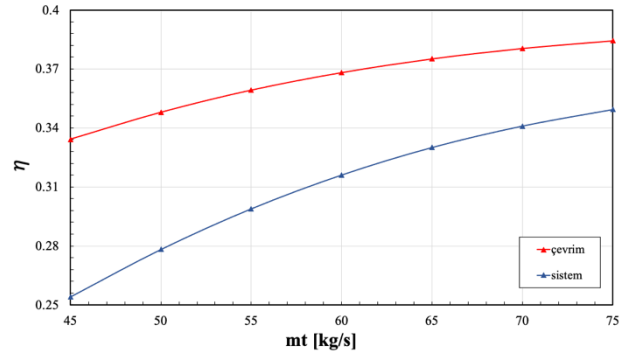
Alıcı ısı transfer akışkanı (HTF) debisinin eşanjör ve sistem verimliliklerine etkisi

Şekil 16'da HTF debi değerlerinin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ısı transfer miktarına tesiri incelenmiştir. Debi değerleri 42 kg/s'den 55 kg/s'ye kadar değişmektedir. Grafikten görüleceği üzere, HTF debi değeri arttıkça boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarının arttığı gözlemlenmektedir. Boyler için ısı transfer miktarı 2.12 ila 3.04 arasında değişmektedir. Kızgınlaştırıcı için ise ısı transfer miktarı 0.67 ila 4.67 arasında değişmektedir. Ön ısıtma için ise ısı transfer miktarı 1.38 ila 1.68 arasındadır. HTF debi değeri 42 kg/s'den 55 kg/s'ye çıktığında, boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarında artış tespit edilmiştir. Özellikle HTF debi artışının kızgınlaştırıcı verimini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak, HTF debi değerinin artışının boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtma için ısı transfer miktarını artırdığını söyleyebiliriz. Özellikle kızgınlaştırıcı veriminde önemli bir artış sağladığı görülmektedir.



Şekil 16. HTF debisinin değerlerinin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ısı transfer miktarına etkisi

Şekil 17'de HTF debisinin sistem ve çevrimin enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir. Debi miktarı 45 kg/s'den 75 kg/s'ye kadar artmaktadır. Grafikten görüleceği üzere, debi miktarı yükseldikçe Rankine çevrimin ve sistemin enerji verimliliğinin yükseldiği gözlemlenmektedir. Çevrimin enerji verimliliği %33 ila %38 arasında değişirken, sistem enerji verimliliği %25 ila %35 arasında değişmektedir. Buhar miktarının artışıyla birlikte enerji verimliliklerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, debinin artması durumunda çevrim ve sistem enerji verimliliklerinde %5 ve %9.53 değerlerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu da alıcı HTF debisindeki artışın verimliliklere, özellikle sistem verimine olumlu bir etki yaptığını göstermektedir. Sonuç olarak, HTF debisinin artmasıyla birlikte Rankine çevrimin ve sistem enerji verimliliğinin arttığı, ayrıca tuz miktarındaki artışın da enerji verimliliklerine pozitif bir etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 17. HTF debisinin eşanjör verimliliklerine etkisi

Sonuç

Mevcut çalışmada, Solar II güneş-buhar santralının bir Rankine çevrimi üzerinde termodinamik analizler gerçekleştirilmiş ve bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre:

- Yüksek türbin giriş basınç değerinin artması (4000 kPa'dan 16000 kPa'a) çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde sırasıyla %7.35 ve %7.34 artış tespit edilmiştir.
- Türbin giriş sıcaklık değerinin artması (518 °C'den 742 °C'ye) çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde %7.35 ve %7.34 artış tespit edilmiştir.
- Açık besleme hattı-I'e giren buhar miktarının artması (%0'dan %15'e) çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde %3.07 ve %3.44 artış tespit edilmiştir.
- Yüksek türbin giriş basınç değerinin artması (4 MPa'dan 16 MPa'a) %9.33, %30.12 ve %448 artış sırasıyla boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtmanın etkinlik katsayılarında olduğu tespit edilmiştir.
- Türbin giriş sıcaklık değerinin artması (479 °C'den 619 °C'ye) boyler, ön ısıtmanın ve kızgınlaştırıcı ısı transfer miktarlarında sırasıyla %43.5, %21.6 ve %595 artış olduğu görülmüştür. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamasının kızgınlaştırıcı verimini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir.

- Pompa giriş basınç ve sıcaklık değerlerinin artışının sistemsel ve kondansatör verimleri üzerinde dikkate değer bir etki yapmadığı ifade edilmiştir.
- HTF'nin debi değerinin artması (42 kg/s'den 55 kg/s'ye) boyler, kızgımlaştırıcı ve ön ısıtmanın ısı transfer miktarlarında belirli aralıklarda değişimler olduğu görülmüştür.
- HTF akışkan debisinin artması (45 kg/s'den 75 kg/s'ye) %5 ve %9.53 artışın sırasıyla çevrim ve sistemin enerji verimliliklerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu artışın özellikle sistem verimine olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Kaynakça

- [1]. Doğan, H., “Fotovoltaik güneş pilleri”, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2014.
- [2]. Akçalı, G., 2001. “Güneş enerjisi sistemleri”, İstanbul Ticaret Odası.
- [3]. Dinçer, F., “Türkiye’de güneş enerjisinden elektrik üretimi potansiyeli- ekonomik analizi ve AB ülkeleri ile karşılaştırmalı değerlendirme”, KSU Mühendislik Dergisi, 14 (1), 2011.
- [4] Riffel, D. B., dos Santos Junior, J. A., & de Moraes Costa, A. L., “Optimum operational conditions of hybrid photovoltaic-thermal systems. Energy for Sustainable Development”, 60, 26-32, 2021.
- [5]. Ginley, D., Green, M. A., & Collins, R., “Solar energy conversion toward 1 terawatt”, MRS bulletin, 33, 355-364, 2008.
- [6]. Leblebicioğlu, E., 2017. “Güneş Güç Kulesi Sistemleri,” Erişim Tarihi: 18/09/2020. <https://muhendistan.com/gunes-kulesi-sistemleri/>.
- [7]. Xu, C., Wang, Z., Li, X., and Sun, F., “Energy and exergy analysis of solar power tower plants,” Applied Thermal Engineering, (31), 3904-3913, 2011.
- [8]. Yang, M., Yang, X., Yang, X., and Ding, J., “Heat transfer enhancement and performance of the molten salt receiver of a solar power tower,” Applied Energy, (87), 2808–2811, 2010.
- [9]. Şenol, R., “Güneş kulelerinden elektrik enerjisi üretiminin araştırılması ve optimizasyonu,” Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, s.3-4, 2009.
- [10]. Zanino, R., Bonifetto, R., Christian, J. M., Ho, C. K., and Savoldi Richard, L., “Effects of RANS-Type turbulence models on the convective heat loss computed by CFD in the solar two power tower,” Energy Procedia, (49), 569-578, 2014.
- [11]. Pacheco, J. E., “Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project” New Mexico: Sandia National Laboratories, 2002.
- [12] Adıyaman, G., Horuz, İ., & Çolak, L. “Technical and Environmental Evaluation of Heat Transfer Fluids Used in Solar Power Towers,” in Proc. ICCE-2018, North Cyprus, 2018.
- [13] Messadi A, Timoumi Y., “Improvement of the Solar Rankine Cycle Applying to the Solar Power Station: Solar II.” Innov Ener Res 7: 198, 2018.
- [14] Zavoico B. “Solar Power Tower Design Basis Document,” California: Sandia National Laboratories, .pp. 23-66, 2001.



Görüntü İşleme ile Doğal Taş Seleksiyonunda İşlem Süresini Azaltan Yeni Bir Yöntem Önerisi

A New Method to Reduce Computing Time on Natural Stone Classification by Image Processing

Özgür Akkoyun^{1*}, Yaser Fırat²

¹ Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, oakkoyun@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9103-8300>

² Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans, firatyaser@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9040-4583>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 22 Haziran 2023
Revizyon 31 Temmuz 2023
Kabul 2 Ağustos 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Görüntü İşleme, Mermer, Yapay Zeka, Yapay sinir ağları

ÖZ

Son yıllarda birçok alanda olduğu gibi doğal taş sektöründe de artan bir hızda, görüntü işleme yöntemlerine dayalı uygulamalar görülmektedir. Bu uygulamalar mermer renklerini bilgisayar ortamına aktarma ile başlamış ve günümüzde mermer numunelerinin renk seleksiyonunun Yapay Zeka (YZ) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) modelleri ile yapılabildiği çalışmalara kadar gelmiştir. Ancak bu çalışmaların uygulamaya dönüşebilmeleri için hala aşılması gereken bazı engeller bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, YSA modellerinin pahalı ve karmaşık profesyonel yazılımlar ile oluşturulup çalıştırılabilmeleridir. Bir diğer sorun işlem sürelerinin fabrikaların olağan iş-akış süresine uygun olması gerekliliğidir. Bu çalışma, problemin ikinci kısmına odaklanmış, süre kısaltma ile ilgili çalışmalar ve öneriler yapılmıştır. Bunun için önce YSA destekli seleksiyon yapan bir model oluşturulmuş, ardından, işlem süresini kısaltmak için iki farklı yöntem önerilmiştir. Her bir yöntem için toplamda 29 YSA modeli tekrar oluşturulup en iyi yöntem aranmıştır. Sonuçta, önerilen yöntem ile örnek doğal taş a ait üç farklı seleksiyonun ayırma işleminin %67-90 oranlarında kısaltıldığı ortaya konulmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 June 2023
Received in revised form 31 July 2023
Accepted 2 August 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Image processing, Marble, Artificial intelligence, Neural networks

ABSTRACT

In recent years, applications based on image processing methods are revealed at an increasing rate in the natural stone industry, as in many other fields. These applications started with digitizing marble colors and today it has reached the studies where the color selection of marble samples can be done with Artificial Intelligence (AI) and Artificial Neural Networks (ANN) models. However, there are still some obstacles to be overcome in order for these studies to be translated into practice. The first of these is that ANN models can be created and run only with expensive and complex professional software. Another problem is that the processing times must be in accordance with the usual processing time of the factories. This study focused on the second part of the problem, studies and suggestions were made about shortening the time. For this, firstly, a model with ANN-assisted selection was created, and then two different techniques were proposed to shorten the processing time. For each proposed method, a total of 29 ANN models were reconstructed and the best method was investigated. As a result, it was revealed that the classification process of three different selections of the natural stone was shortened by 67-90% with the proposed method.

Doi: 10.24012/dumf.1318407

* Sorumlu Yazar

Giriş

Görüntü işleme, son yıllarda hızlı gelişme göstermiş bir bilgisayar destekli çalışma konusu olup, birçok alanda uygulanmaya başlanmış popüler bir alan haline gelmiştir. Bu durumun doğal sonucu olarak da görüntü işleme yöntemlerinin genelde madencilik, özelde de doğal taş sektörüne uygulanması ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır.

Ülkemizde bu alandaki ilk çalışmalardan birisinde [1] mermerlerin renk özelliklerini çıkarabilen MRA ismini verdikleri bir yazılım geliştirilmiştir. Yine bu alandaki ilk ve en popüler çalışmalardan birisinde [2] üretim hattında mermer plakaların farklı gruplara göre sınıflandırılması için gerçek zamanlı otomatik bir sistem önerisinde bulunulmuştur. Bir başka çalışmada [3], mermer parçalarını üç gruba ayırmış bir YSA modeli ile başarılı bir şekilde sınıflandırmışlardır. Sousa ve Pinto [4], seçtikleri mermerler üzerinde hemen bütün esnek hesaplama yöntemleri ile sınıflandırma işlemini gerçekleştirmişler ve genetik algoritma yöntemi ile eğitilen bulanık sınıflayıcı ile en başarılı sonuçları elde etmişlerdir.

Dönmez ve Sarı [5], mermer yüzey parlaklıklarını ölçtüktan sonra bu değerler ile gri seviye değerleri arasında ilişkiler kurmaya çalışmışlardır. Sistemin başarılı olduğu ifade edilmiştir. Bir başka çalışmada [6], mermer bloklarının görüntü işleme ve YSA kullanılarak otomatik sınıflandırılması amacıyla farklı teknikleri incelenmiş ve benzetim sonuçlarına göre tekniklerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Başka bir çalışmada, mermer karoları YSA yardımıyla sınıflandırılmıştır [7]. Spektrometre yardımı ile elde edilen 16 farklı çeşide sahip granit verileri destek vektör makineleri ile sınıflandırılmıştır [8].

Mermer bloklarını kalitelere göre otomatik olarak sınıflandırmak için yeni bir hiyerarşik sınıflandırma yöntemi önerilmiş, yöntem YSA ile karşılaştırmış ve sınıflandırma başarısının daha yüksek olduğunu ifade edilmiştir [9].

Başka bir araştırmacı [10], mermer kalite sınıflaması için görüntü işleme tekniklerinin uygulanabilirliklerini değerlendirdiği çalışmada, mermer kalite seleksiyon işleminin sanıldığından karmaşık bir süreç olduğunu ve tam bir kalite seleksiyonu için renk ayırmadan daha fazlasına ihtiyaç olduğuna vurgu yapmıştır. Destekler nitelikte bir çalışmada [11], homojen desenli olan ve olmayan mermerlerin farklılıklarından ve görüntünün elde edilmesindeki gölge gibi sorunların görüntü işleme çalışmalarına olumsuz etkisine vurgu yapılmıştır.

Mermer küp örneklerin tek eksenli basınç dayanım değerlerini tahmin etmek için görüntü işleme teknikleri önerilmiş [12], çalışmada YSA kullanılmıştır. Başka bir çalışmada [13], traverten numuneleri üzerinde çeşitli sınıflandırma algoritmaları uygulanmıştır. Mermer yüzey pürüzlülüğünün görüntü işleme teknikleri ile tespiti için bir çalışma yapılmıştır [14].

Duvar yazıları (graffiti) ile kirletilen mermer sanat eserlerinin temizlenmesinde kullanılan su jeti teknolojisinin en uygun çalışma parametrelerini tespit etmek için görüntü işleme tekniklerinden yararlanılan bir çalışma yapılmıştır [15]. Matlab paket programı yardımı ile görüntü işleme ve

YSA mermerleri sınıflandırılmış [16], mermer ürünlerinin sınıflandırılması için damar yapılarını temel alan ayrıca kırık tespiti de yapabilen bir sınıflandırma yöntem geliştirilmiştir [17]. Bir çalışmada YSA ile sınıflamanın en iyi sonucu verdiği sonucuna varılmış [18], çok benzer bir çalışma ile YSA kullanarak 600 mermer numunesi görselini sınıflandırmayı başarmışlardır [19]. Her iki çalışmada da çalışma süresi, sınıflandırma süresi ya da mermer üretim süresindeki hız ile uyumlu çalışma gibi bir değerlendirme yapılmamıştır.

Mermer görüntülerini sınıflandırmak için farklı alt teknikler kullanılmış ve karar ağacı yönteminin daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir [20]. Çalışmanın önemli bir sonucu ise geliştirilen ara yüzün sanayide uygulanabilmesi için gömülü sistem bir aracın daha verimli olacağını ifade edilmiştir. Başka bir çalışmada [21], makine ile görme yöntemi kullanılarak mermer seleksiyonu işleminde, işlem süresinden söz edilmiştir. Ancak araştırmacı, işlem süresi olarak yöntemleri kıyaslarken, PC içindeki işlemcilerin işlem sürelerini dikkate almış, işlemcileri kendi aralarında kıyaslamış, gerçek bir mermer işleme tesisindeki bant hızı ve seleksiyon işlem süresinden söz etmemiştir.

Topalova ve Tzokev [22], diğer çalışmalardan farklı olarak, gerçek zamanlı ve süreyi de ölçen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Başka bir çalışmada [23], bir mermer türüne ait kalite sınıflamasını derin öğrenme yöntemlerini kullanarak uygulanmıştır. Benzer şekilde bir derin öğrenme modeli geliştirilerek mermer görüntülerinden sınıflandırması yapılmış ancak sınıflandırma işlem süresi ile ilgili bir değerlendirme yapılmamıştır [24].

Literatürdeki bazı çalışmalar ise farklı mermer türlerinin birbirinden ayrılması üzerine yapılan çalışmalardır. Bu çalışmaların hemen hiç birinde farklı kökene sahip doğal taşların ayrılmasına dayanan çalışmaların mermer üretim sürecindeki karşılığı ile ilgili bir değerlendirme yapılmamıştır, zira mermer üretim sürecinde seleksiyon aynı kökendeki taşın (hatta aynı bloktan kesilen taşların) seleksiyonu şeklinde uygulanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmalara tek tek değinilmemiştir.

Yukarıda ayrıntılı verilen literatürden de anlaşılacağı gibi doğal taşların görüntü işleme ile sınıflandırılması çalışmaları tarihsel süreç içinde;

- I. Görselin sayısallaştırılması
- II. RGB-Gri seviye dönüşümü
- III. Farklı kökendeki doğal taşların sınıflandırılması
- IV. Aynı kökendeki taşların çoğunlukla YSA destekli sınıflandırılması

aşamalarından geçmiştir. Gelineen noktada, 'görüntü işleme ile mermer seleksiyonu' çalışmalarının yaygın bir şekilde uygulanabilir olması için aşılması gereken bir kaç konu kalmıştır; bunlardan birincisi YSA yazılımlarının Matlab gibi görece pahalı ve karmaşık profesyonel yazılımlar ile kullanılabilir olması nedeniyle bu yazılımların mermer fabrikasında seleksiyon masasındaki mavi yakalı çalışanlar tarafından kullanılabilirliklerinin güçlüğüdür. Bu nedenle gömülü sistemler düşünülmelidir.

Bir diğer husus ise bu alandaki başarılı çalışmalarının başarısının ayırma kısmında olması; ancak işlem hızlarının,

belirli bir ışık hızında çalışan mermer fabrikalarının akış hızını yakalamada henüz eksiklikler olmasındır. Nitekim yukarıda anılan çalışmaların hemen tümü başarı ölçütü olarak *mermerleri ayırabilmeyi* almış ancak ayırmanın süresi ile ilgili bir değerlendirme yapmamışlardır. Çalışmaların uygulanabilir olmaları için işlem süreleri de önemli bir etkidir.

Bu çalışmada, YSA tabanlı görüntü işleme teknikleri ile mermer seleksiyonu yapan çalışmalarda işlem süresini kısaltacak ve bu yolla onları daha uygulanabilir kılacak yöntemler önerilmiş ve denenmişlerdir.

Materyal ve Metod

Bu bölümde, önerilen yöntemler, bunların denenmesi sırasında yapılan çalışmalarda kullanılan materyal ve metodlar sunulmaktadır.

Görüntü işleme çalışmaları çok genel ifadeler ile; verinin alınması, görselin bilgisayar ortamına alınarak sayısallaştırılması ve sayısal verinin bir takım matematik, istatistik ve/veya esnek hesaplama yöntemleri ile işlenerek sonuçların elde edilmesi adımlarından oluşmaktadır. Verinin elde edilmesindeki süre, görselin boyutları ile ilgilidir ve görselin tüm pikselleri için konum ve renk değerlerinin elde edilip kaydedilmesi anlamına gelmektedir.

Görsel verisinin elde edilmesi; renk değeri için üç adet ve pikselin koordinatı için iki adet olmak üzere her bir piksel için toplamda beş verinin okunup kaydedilmesi aşamalarını içerir. Sadece 10x10 cm boyutlarında ve ortalama özellikteki bir görüntü kaydedici ile kaydedilmiş bir görselin yaklaşık 90.000 piksel içerdiği düşünülürse küçük bir el örneği diyebileceğimiz bir mermer numunesinin görsel verisi yaklaşık 450.000 veriyi içermektedir. Bu adım için gerekli süre, toplam süre içinde önemli bir yer tutmaktadır.

Bu çalışmada, görsel verisi elde edilirken tüm piksellerinin taranıp veri toplanması yerine, belli sayıdaki piksellerin temsili olarak alınması önerilmiştir. Bunun için görsel yüzeyinden

- I. Rastgele piksellerden veri toplanması
- II. Belli hatlar üzerinden veri toplanması

alternatif yöntemleri ortaya atılmış ve her ikisi de denenerek sonuçlar elde edilmiştir.

Materyal

Çalışmanın uygulanacağı örnek doğal taş olarak, uzun süredir mermer pazarında en çok tercih edilen ve Diyarbakır bölgesi firmalarına ait mermer işleme tesislerinde en çok üretimi yapılan Emperador ticari ismi ile anılan mermer seçilmiştir. Seçilen mermer için üç adet seleksiyon bulunmaktadır; koyu (dark), orta (medium) ve açık (light).

Mermer numunelerine ait veriler, fabrikadaki seleksiyon masasına gelen mermerlerin, kapalı fabrika koşulları altında, ortalama özelliklere sahip bir fotoğraf makinası ile elde edilmişlerdir. Fabrika koşullarında yüzden fazla fotoğraf çekilmiştir. Elde edilen görsel verisi RGB renk uzayında ve grayscale (0-255) ölçeğe değerlendirilmiştir. Verilerin işlenmesinde makalenin birinci yazarı tarafından yazılıp derlenen Windows tabanlı yazılım kullanılmıştır.

Anılan mermer için çok sayıda mermer görseli elde edilmiş, ancak toplanan görsellerin büyük bir bölümü aynı ışık koşullarında elde edilmediği için, değerlendirme dışı tutulmuşlardır. Ayrıca, aynı taşın seleksiyonu olmayan, farklı ocaklara ait mermerlerin görselleri de elenince; eşit koşullarda elde edilmiş, gölgesiz, parlaması olmayanlar 36 adet numune görsel elde edilmiştir. Bu numuneler 10x10cm boyutlarında el numuneleri şeklinde hazırlanmış olup, tamamı fayans hattı cilalı son ürünüdür. Görseller daha sonra söz konusu mermeri yıllardır işleyen bir fabrikanın kalite uzmanlarına gösterilerek sınıflandırmaları istenmiş ve böylece numuneler uzmanlar tarafından koyu, orta ve açık şeklinde üç sınıfa ayrılmışlardır. Bu sınıflamayı temsilen üç örnek Şekil 1'de verilmiştir.

Metod

Çalışmada şu metod izlenmiştir; İlk adım olarak literatürde sıkça karşılaşılan ve mermer yüzeylerinin tamamının taranıp YSA modeli ile seleksiyonun yapıldığı çalışmanın aynısı yapılmıştır. Ardından benzer YSA modeli, önerilen veri azaltma alternatiflerinin tümü ile ayrı ayrı yeniden uygulanarak en iyi alternatif elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. Emperador Mermerine Ait Seleksiyonlar (soldan sağa); Dark, Medium ve Light.

Yapılan Çalışmalar

Bilinen YSA Modeli ile Mermer Seleksiyonu

Başlangıç olarak mermer numunelerine ait görseller 300x300 piksel boyutlarında elde edilerek bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra bir görüntü işleme yazılımı aracılığıyla işlenerek her bir görsele ait 90bin piksel verisi elde edilmiştir. Görüntü işleme yazılımına bu çalışma için eklemeler yapılarak, görüntü tarama-veri toplama **işlem süresini** de hassas olarak hesaplayıp kayıt altına alacak şekilde yeniden derlenmiştir.

Sonraki aşamada her bir görsele ait renk değerleri için; en büyük, en küçük, ortalama, standart sapma, değişim aralığı, mod, medyan, çarpıklık ve basıklık değerleri hesaplanmış ve kaydedilmiştir. Daha sonra uzmanlar tarafından yapılan sınıflamadaki açık, orta, koyu sınıflaması sayısallaştırılarak koyu için 1, orta için 2 ve açık için 3 sayısal değeri yazılarak öznitelik vektörü için korelasyon çalışması yapılmıştır.

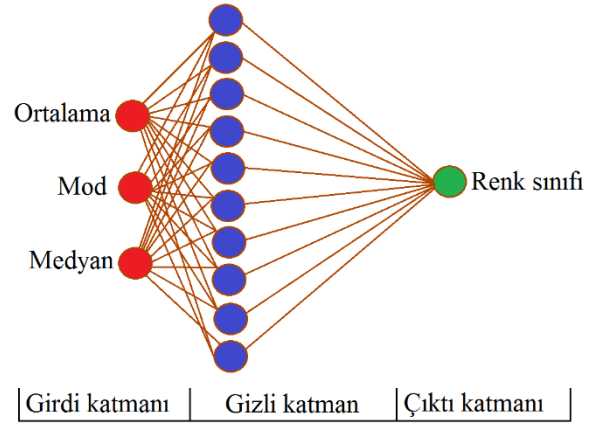
Öznitelik vektörünün amacı, yukarıda sayılan parametrelerden hangilerinin seleksiyon sınıflaması üzerinde pozitif ya da negatif etkisinin olduğunu tespit edilerek YSA çalışmasında girdi parametresi olması için seçmektir. Bunun için tüm girdi değerleri ile çıktı değerleri arasındaki korelasyonlar hesaplanmış ve Pearson korelasyon katsayısı, r değerleri elde edilmiştir. Sonuçta korelasyon katsayıları sırasıyla 0.77, 0,81 ve 0.84 olarak hesaplanan **ortalama, medyan ve mod** parametrelerinin YSA çalışmasında girdi olarak kullanılmasına karar verilmiştir (Tablo1).

Tablo1. Girdi verileri ve hedef arasındaki ilişki

Girdi değeri	Korelasyon (pearson, r)
Çarpıklık	-0.56
Basıklık	-0.39
S. Sapma	0.09
Fark	0.14
En küçük	0.16
En büyük	0.27
Ortalama	0.77
Medyan	0.81
Mod	0.84

Mermer seleksiyonu konusunda birçok çalışma YSA tabanlı olup çoğunlukla Matlab arayüzü kullanılarak gerçekleştirilmiştir [17-21], [25-28].

Bu çalışmada da YSA modeli, öznitelik vektöründen elde edilen bilgiler ile üç adet girdi parametresi (ortalama, mod, medyan) ve bir adet çıktı parametresi (renk sınıfı) ile oluşturulmuş ve çalıştırılmıştır. Girdi verileri üç sınıftan toplamda 36 adet mermer numunesine ait yüzeyin tümünün taranması ile elde edilen veriler kullanılmış olup verilerin %70'i YSA'nın eğitilmesi için (training), %15'i doğrulama (validation) ve son %15'i de sınama (testing) aşamaları için kullanılmıştır. Oluşturulan YSA modelinin basitleştirilmiş şematik görüntüsü Şekil2'de verilmiştir.



Şekil2. YSA Modeli Basitleştirilmiş Şeması

Model çıktılarının gerçek değerler ile benzerlik tespiti için regresyon değerleri hesaplanmıştır. Buna göre Training için 0.99, Validation için 0.94, Test için 0.97 ve modelin tümü için 0.99 bulunmuştur

YSA modeli test için çalıştırılmış ve 14 farklı numune için sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, modelin fabrikada çalışan insan-uzmanın yaptığı sınıflamaya çok yakın ($r=0.99$) sınıflama yapabildiğini göstermiştir (Tablo2).

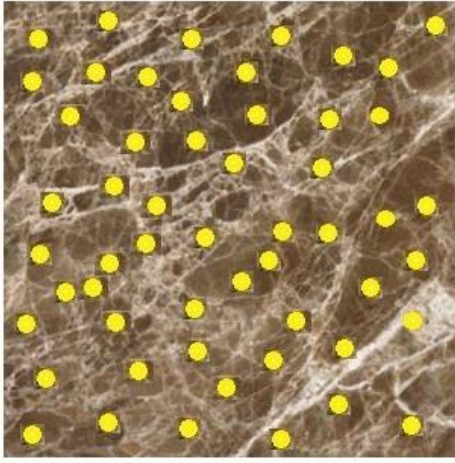
Tablo2. . YSA modelinin test sonuçları

Ort.	Mod	Medyan	Gerçek değer	YSA-model sonucu
88	77	86	1	1.0024
115	98	108	1	1.0279
120	95	114	1	1.0227
76	62	71	1	1.0032
112	99	106	1	1.0498
113	111	114	2	1.8329
116	121	117	2	2.3062
158	151	155	2	2.1232
136	135	135	2	2.0380
123	127	123	2	2.0160
161	181	163	3	2.9906
144	130	141	3	2.8705
169	161	166	3	2.9659
161	182	163	3	2.9908
161	187	165	3	2.9937

Çalışmanın buraya kadar olan kısmı literatürde bulunan YSA ile mermer seleksiyonu çalışmalarında yapılan çalışmalar ile aynı içeriktedir. Bundan sonraki bölümde önerilerden söz edilecektir.

Rastgele Toplanan Veriler ve YSA Modeli

Tüm yüzey taranması yerine, onları temsilen rastgele seçilmiş pikseller taranarak model oluşturulması önerilmiştir. Hangi oranda rastgele veri almak, tüm veriyi doğru bir şekilde temsil edebilir? Bu soruya cevap verebilmek ve tüm yüzey taraması model sonuçlarına en yakın rastgele veri oranını bulmak için, görüntü işleme yazılımımız istenilen oranlarda rastgele veri toplayacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Buna göre %1'den %90'a kadar toplamda 14 farklı rastgele oranda veri toplanmıştır. R1 tüm piksellerin sadece %1'ini içeren veriyi ifade ederken R30, tüm piksellerin %30'una karşılık gelen rastgele veriyi ifade etmektedir(Şekil3).



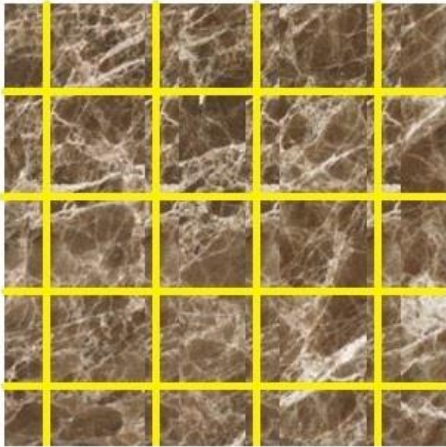
Şekil3. Rastgele piksel verisi okuma (temsili)

Tablo3. Rastgele veriler ile YSA modeli

Numune No	YSA-Gerçek korelasyonu (r)
R-01	0.736
R-02	0.768
R-03	0.802
R-04	0.793
R-05	0.833
R-10	0.813
R-20	0.855
R-30	0.855
R-40	0.862
R-50	0.921
R-60	0.927
R-70	0.959
R-80	0.975
R-90	0.987

Hatlardan Alınan Veriler ile YSA Modeli

Benzer bir yöntem olarak hedef görselin tüm pikselleri yerine, görsel üzerinde tespit edilecek belli hatlar üzerinden verilerin elde edilmesi yöntemi önerilmiştir. Bu amaçla görselin sadece iki hat ile dört kareye bölünmesinden (K-2), görselden 90 hat geçirilip yüzlerce kareye bölünmesine kadar (K-90) 15 farklı alternatif için yazılım yeniden kodlanmış ve veri toplanmıştır (Şekil4).



Şekil4. Hatlardan piksel verisi okuma (temsili)

Çalışma kapsamında iki farklı öneri için, 35 numuneden toplamda 29 farklı şekilde veri toplanmış, her bir alternatif için yeniden YSA modeli kurulmuş ve sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın en önemli sonuçları işlem süreleri ile ilgili olanlardır. Yapılan her alternatif işlem için yazılım hassas bir şekilde süre tutmuş ve kayıt altına almıştır. 29 alternatif ve bir mevcut yöntem (tüm yüzeyin taranarak tam veri alınması) toplamda 30 adet model için korelasyon ve süre bilgileri bir grafik haline getirilmiş ve Şekil4'de sunulmuştur.

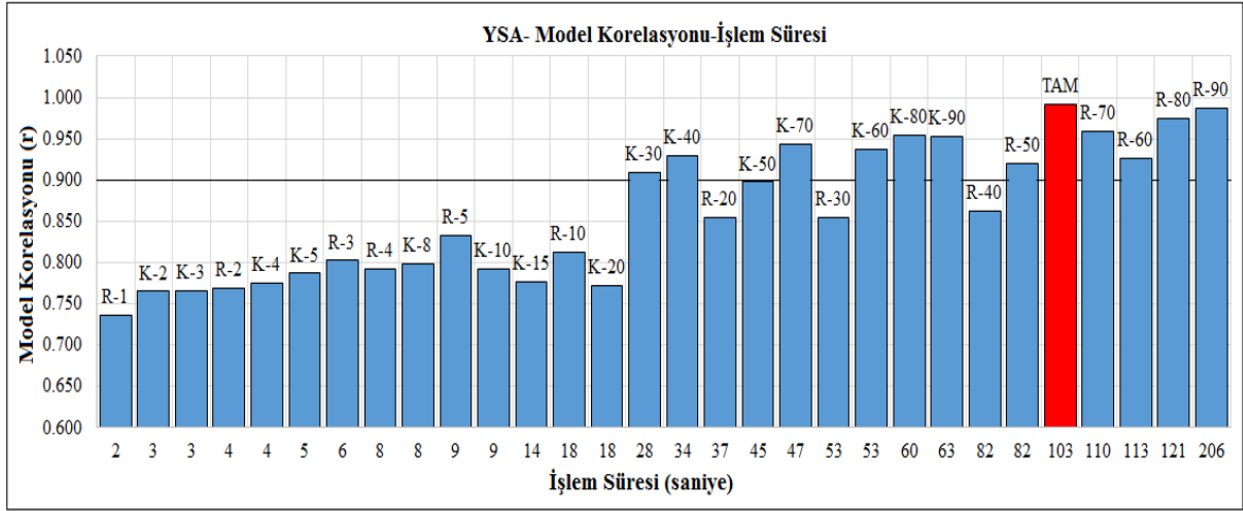
Her bir alternatif veri için yeniden YSA modeli oluşturulmuş ve mermer renk seleksiyonu yeniden yapılmış, korelasyon değerleri elde edilmiştir (Tablo4).

Tablo4. Hat verileri ile YSA modeli

Numune No	YSA-Gerçek korelasyonu (r)
K-2	0.765
K-3	0.765
K-4	0.775
K-5	0.787
K-8	0.799
K-10	0.793
K-15	0.777
K-20	0.772
K-30	0.909
K-40	0.929
K-50	0.897
K-60	0.937
K-70	0.944
K-80	0.954
K-90	0.953

Sonuçlar Ve Değerlendirmeler

Tüm çalışmanın sonuçlarının içeren grafik oluşturulurken rastgele (R kodlu olanlar) ve hatlardan alınan veriler (K kodlu olanlar) birlikte değerlendirilmiş, yatay eksen model ile gerçek seleksiyon arasındaki korelasyon olarak belirlenip, $r=0.9$ çizgisi ayrıca çizilmiş, yatay eksen ise süreler saniye cinsinden verilmiştir (Şekil4).



Şekil3. Tüm yöntemler için korelasyon ve işlem süreleri

Kırmızı (koyu renk) ile verilen sütun tüm yüzey taraması dediğimiz literatürde söz edilen halihazırda uygulanan modeldir. Çalışmanın sonuçları ve değerlendirmelerimiz aşağıdaki gibidir;

- Öncelikle çalışma için seçilen Emeperador mermeri için renk seleksiyonunda renk değerlerindeki değişimin (standart sapma), renkler arasındaki farkın büyüklüğünün, en büyük renk değerinin, en küçük renk değerinin, renk dağılımlarının çarpıklık ve basıklığının renk seleksiyonunda ciddi bir katkısının olmadığı, mod, medyan ve ortalama değerlerinin etkili olduğu görülmüştür.
- Mermer numunelerinin yüzeyinin tümünün taranması ile elde edilen veriler ile yapılan YSA destekli sınıflama çalışması sonucunda 10x10 cm numuneler için veri toplama işlemi 103 saniye sürmüştür.
- Model sonucunda 0.9921 gibi yüksek korelasyon değerleri ile sonuçlar elde edilmiş ve gerçekleştirilen YSA modelinin, bu mermer türünde renk seleksiyonu için başarı sağladığı sonucuna varılmıştır. Model test edildiğinde de gerçek sonuçlara çok yakın sonuçlar elde edilerek modelin güvenilirliği kanıtlanmıştır.
- Rastgele veri alma yöntemi ve hattan veri alma yöntemi ile toplanan veriler ile yapılan YSA modelleri birlikte değerlendirildiklerinde en iyi korelasyon değerinin R-90 (0.987), R-80 (0.975), R-70 (0.959), ardından K-80 (0.954) ve neredeyse aynı korelasyon değeri ile K-90 (0.953) işlemlerinden elde edildikleri görülmektedir. Veri oranlarının tüm yüzey taramasına yakın olduğu bu işlem adımlarında yüksek korelasyon elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.
- Tüm yüzey taramasını gösteren kırmızı sütunun sağ tarafında da yani işlem süresi ondan daha uzun olan işlemlerin de olması başlangıçta garip gibi görünse de bunun çok basit bir sebebi vardır; Tüm yüzeyin taranmasından daha uzun süre alan işlemler, yüzeyden %70, %80 vb. oranında rastgele veri toplamaya ayarlanmış işlemlerdir. Yüzeyden rastgele piksel verisi toplanırken aynı pikselden iki kez veri alınması

durumunda verinin iptal edilip verisi alınmamış piksel bulunana kadar rastgele koordinat atanmanın devam ettirilmesi için programa bir alt-yordam yazılmış ve uygulanmıştır. Bu nedenle de rastgele oranı arttıkça aynı piksele rast gelme olasılığı da arttığı için yazılım, verisi alınmamış pikselleri ararken uzun süreler harcamak zorunda kalmıştır. Sırasız düzensiz 80 bin veriyi arayıp bulmak, sıralı ve düzenli 90bin veriyi okumaktan daha uzun sürmüştür.

- R-60, R-70, R-80 ve R-90 olarak isimlendirilen yöntemlerde ölçülen süreler, tam yüzey taramasında ölçülen süreden daha fazla olduğu için bu yöntemlerin uygun olmayacakları sonucuna varılmıştır.
- Korelasyon değerleri +0.90 bulunan K-30, K-40, K-50, K-60, K-70, K-80 ve K-90 yöntemleri ile R-50 değerleri değerlendirildiğinde işlem süresini de dikkate alınca K-40 yönteminin 0.929 korelasyon değeri ve 34 saniye süre ile öne çıktığı görülmektedir.
- **K-40** yöntemi ile 103 saniye süren (tam tarama) veri toplama işlemi 34 saniyede gerçekleştirilmiş ve 0.93 korelasyon ile neredeyse aynı sonuçları üretmiş, başka bir deyişle, %67 oranında süre tasarrufu sağlamıştır.
- Korelasyon değeri +0.9 olan **K-30** yöntemi için bu süre sadece 28 saniye, süre tasarrufu %72 civarındadır.
- Korelasyon değeri +0.8 olan **R-5** yöntemi için bu süre sadece 9 saniye, süre tasarrufu %91 dir.
- Çalışmada 10x10cm boyutlarında görsel numuneleri kullanılmıştır. Mermer işleme tesislerindeki mermer ürünlerinin gerçek boyutları, çalışmadaki numune boyutlarından çok daha büyüktür. Önerilen yöntem, gerçek çalışma koşullarında uygulandığında çok daha büyük süreleri orantısız ölçekte kısaltacaktır. Böylece bu çalışma ile görüntü işleme ile renk seleksiyonu uygulamasının mermer işleme tesislerinde süre kısıtları içinde sürekli akan bir bant ile uyumlu çalışması konusunda önemli bir ilerleme sağlandığı değerlendirilmiştir. Çalışmanın ayrıntıları için [29] kaynağı incelenebilir.

Kaynakça

- [1] Gökay, M. K., ve Gündoğdu, İ. B. (2001). Mermer Renklerinin Sayısal Analiz Yoluyla Sınıflandırılması ve Mermer İşleme Tesislerindeki Kullanılabilirliği no. 40, *Bilimsel Madencilik Dergisi*.
- [2] Martinez-Alajarın Juan, Luis-Delgado José D. And Tomás-Balibrea Luis-Manuel (2005). "Automatic system for quality-based classification of marble textures". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 35 (4): 488–497.
- [3] Luis-Delgado José D., Martinez-Alajarın J., and Tomás-Balibrea Luis-Manuel (2003). "Classification of marble surfaces using wavelets". *Electronics Letters* 39 (9): 714–715.
- [4] Sousa João M. C., ve Pinto João R. Caldas (2004). "Comparison of Intelligent Classification Techniques Applied to Marble Classification". *Image Analysis and Recognition*, 802-9.
- [5] Dönmez, S., ve Sarı Dursun Y. (2005). Sayısal Görüntü Analizi Tabanlı Bir Yüzey Parlaklık Ölçüm Sistemi, Pamukkale Üniversitesi, *Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı 3, Cilt 11, Sayfa 401-405.
- [6] Ardalı, E. (2008). Classification Of Marble Textures Using Neural Networks and Image Processing Methods, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-elektronik Müh. ABD, FBE, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [7] Selver M. Alper and Akay, O. (2009). "Evaluating clustering methods for classification of marble slabs in an automated industrial marble in spection system". *IEEE Electrical and Electronics Engineering*, 2009. ELECO 2009. International Conference on, II–115.
- [8] Araújo Mar a, Mart nez Javier, Ordñez Celestino ve Vilán José Antonio, (2010). "Identification of granite varieties from colour spectrum data". *Sensors* 10 (9): 8572–8584.
- [9] Doğan, H. ve Akay, O. (2010). "Using Ada Boost classifiers in a hierarchical framework for classifying surface images of marble slabs". *Expert Systems with Applications*, 37 (12): 8814–8821.
- [10] Akkoyun, Ö. (2010). An Evaluation of Image Processing Methods Applied To Marble Quality Classification, 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development (ICCTD 2010), Cairo, Egypt.
- [11] Yaman, Ö. (2015). Mermer Fabrikalarında Ürün Kalite Kontrolünün Görüntü Analiz Yöntemi İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Maden Müh. ABD, FBE, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [12] Bişkin, O.T. (2011). Determination Of Qualitative And Quantitative Properties Of Natural Stones Using Signal and Image Processing Techniques, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-elektronik Müh. ABD, FBE, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [13] Abadi, M., S., E., Banihashemi, N. (2015). Automatic Classification of Travertine Stones Based On Sum And Difference Histograms Algorithm. 2015 9th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP).
- [14] Turhal, Ü. Ç., Aydın, S., ve Dener, G. (2015). Mermer Plakalarında Görüntü İşleme Teknikleri ile Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt: 2, Sayı: 1, 2015.
- [15] Careddu, N., and Akkoyun, Ö. (2016). An investigation on the efficiency of water-jet technology for grafiti cleaning. *Journal of Cultural Heritage*, Volume 19, May–June 2016, Pages 426-434.
- [16] Türkmen, M. (2017). Mermer Levhaların Sınıflandırılmasında Başarımın İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Müh. ABD, FBE, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [17] Kemaloğlu, N. (2017). Traverten Plakaların Damar Yapılarına Göre Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması ve Kalite Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Müh. ABD, FBE, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [18] Temiz, M. (2018). Doğal Taş Karolarının Görüntü İşleme ve Makine Öğrenmesi Teknikleri İle Sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalı, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- [19] Torun, Y., Akbaş, M. R., Çelik, M. A., and Kaynar, O. (2019). Development a Machine Vision System For Marble Classification, *IEEE 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 24-26 April 2019.
- [20] Turan, E. (2018). Yerel İkili Örüntü Tabanlı Uç Öğrenme Yaklaşımı Kullanan Akıllı Örüntü Tanıma Sistemi İle Mermer Sınıflandırma Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Mekatronik Müh. ABD, FBE, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [21] Önder, A.S. (2019). OpenGL İle Gerçek Zamanlı Doğal Taş Tasnifi Ve Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Elektronik ve Haberleşme Müh. ABD, FBE, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [22] Topalova, I., and Tzokev, A. (2010). Automated Texture Classification of Marble Shades with Real-time PLC Neural Network Implementation. In: *Neural Networks (IJCNN), The 2010 International Joint Conference*. 1–8.
- [23] Pençe, İ., and Çeşmeli Şişeci, M. (2019). Deep Learning in Marble Slabs Classification, *Techno-Science-Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University*, 2:1, 21-26.
- [24] Karaali, İ., and Eminağaoğlu, M. (2020). A convolutional neural network model for marble quality classification, *SN Applied Sciences* 2:1733.
- [25] Ökten, M., Akosman, Ş.A., Mora, Ö.T., ve Kılıç, V. (2021). Derin Öğrenme Tabanlı Mermer Yüzeylerinin Otomatik Sınıflandırılması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı 26, S. 73-77, Temmuz 2021
- [26] Karaali, İ. (2021). A Deep Learning Model for Marble Quality Classification, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Müh. ABD, FBE, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [27] Elmas, B. (2022). Classification varieties of marble and granite by convolutional neural Networks with transfer learning method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 37:2 (2022) 985-1001
- [28] Ershad, S.F. (2011). "Color Texture Classification Approach Based on Combination of Primitive Pattern Units and Statistical Features". *The International journal of Multimedia & Its Applications* 3 (3): 1-13.
- [29] Fırat, Yaser, (2022), Görüntü işleme yöntemleri ve mermer üretimine uygulanması, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.



Araştırma Makalesi / Research Article

Sodyum bentonit kilini güçlendirmede maksimum dayanım için optimum bazalt fiber oranının belirlenmesi

*Determination of the optimum basalt fiber ratio for maximum strength in sodium bentonite clay reinforcement*Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU*¹, Zülfü GÜROCAK²¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, yaslan@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3135-5926>²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, zgurocak@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1049-8346>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 19 Ağustos 2023
Revizyon 1 Eylül 2023
Kabul 12 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Bentonit, bazalt fiber, dayanım, güçlendirme

Düşük dayanımlı killeri stabilize etmek amacıyla sönmüş kireç, uçucu kül, silis dumanı, tüf, mermer tozu gibi katkı malzemelerinin kullanımı oldukça eski ve geleneksel bir uygulamadır. Ancak yeni teknolojik ürünlerin ortaya çıkışıyla birlikte bu geleneksel stabilizasyon yöntemleri yerini özellikle yapay fiber gibi ürünlerle yapılan güçlendirme yöntemlerine bırakmaya başlamıştır. Zemin iyileştirmede kullanılan, çevre dostu, doğal, doğada bol miktarda bulunan bu malzemelerden biri de bazalt fiberdir ve kullanımları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Zemin güçlendirmede bazalt fiber kullanımının başarısı kullanılan bazalt fiberin boyutu ve oranı ile ilgilidir ve yapılan bilimsel çalışmalar bu konularda yoğunlaşmıştır. Bu çalışmanın amacı, bazalt fiber ile güçlendirilen yüksek plastisiteli bentonit kilinde bazalt fiber oranının dayanıma olan etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. 6 mm uzunluğundaki bazalt fiberlerin kile farklı oranlarda eklenmesi ve optimum su içeriğinde sıkıştırılmasıyla hazırlanan silindirik örneklerde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve zeminin dayanımında meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, 6 mm uzunluğundaki bazalt fiber ile güçlendirilen bentonit kilinde maksimum dayanımın %4 bazalt fiber oranında elde edildiğini, bu orandan daha yüksek bazalt fiber oranlarında ise dayanımda azalmalar oluştuğunu göstermiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 19 August 2023
Received in revised form 1 September 2023
Accepted 12 September 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Bentonite, basalt fiber, strength, reinforcement

The use of additives such as slaked lime, fly ash, silica fume, tuff, marble dust to stabilize low strength clays is a very old and traditional practice. However, with the emergence of new technological products, these traditional stabilization methods have begun to give way to reinforcement methods, especially with products such as artificial fiber. One of these eco-friendly, natural and abundant materials used in soil reinforcement is basalt fiber, and its use is becoming more common day by day. The success of using basalt fiber in soil reinforcement is related to the size and ratio of the basalt fiber used, and scientific studies have focused on these issues. The aim of this study is to examine the effects of basalt fiber ratio on strength in high plasticity bentonite clay reinforced with basalt fiber. For this purpose, a number of experimental studies have been carried out. Unconfined compressive tests were carried out on cylindrical samples prepared by adding 6 mm long basalt fibers to clay at different rates and compressing them at optimum water content, and the changes in the strength of the soil were determined. The results of the study showed that the maximum strength was obtained at the rate of 4% basalt fiber in bentonite clay reinforced with basalt fiber of 6 mm length, while there was a decrease in strength at basalt fiber ratios higher than this ratio.

Doi: 10.24012/dumf.1346476

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yeni mühendislik malzemeleri, günümüzde hızlı gelişen teknoloji ve ihtiyaçlara bağlı olarak farklı kullanım alanları bulmaktadır. Üstün mühendislik özelliklerine ve yüksek performansa sahip bu yeni teknolojik ürünler klasik yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve insanlar tarafından üretilebilen veya doğal olarak bulunabilen fiberler bu ürünlerden birisidir. Fiberler bir boyutu diğer boyutundan çok büyük olan, aynı malzemenin daha büyük şekline göre daha yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır [1]. Yapay ve doğal olmak üzere iki ana gruba ayrılan fiberlerden doğal fiberler, doğada hazır olarak bulunmakta iken yapay fiberler insanlar tarafından üretilmektedir. Polimer, cam ve bazalt gibi yapay fiberler, yüksek dayanımlı, hafif, esnek ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olmalarından dolayı çok yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Artan çevresel problemler ve maliyetler daha ekonomik, çevre dostu, üstün özelliklere sahip ve hammadde ulaşılabilirliğin kolay olduğu yeni ürünlerin elde edilmesini gerekli hale getirmiştir. Geçmişte, yapı malzemeleri olan tuğla ve kerpicing dayanımlarını artırmak amacıyla doğadan alınan bitkisel ve hayvansal lifler kullanılırken, gelişen teknoloji ile farklı fiber türleri (sentetik polimer, karbon, cam) veya plastik atıklar doğal liflerin yerini almaya başlamıştır. Zemin güçlendirilmesinde bu fiberlerin kullanılması ve bunlara yönelik yapılan çalışmalarda son dönemde artış göstermiştir [3-23].

Bazalt kayasından elde edilen yeni teknoloji ürünlerinden birisi de bazalt fiber (BF)'dir. Önemli bir doğal yapı malzemesi olan ve geçmişten günümüze kadar inşaat sektöründe kullanılan bazalt, volkanizma sonucu püsküren lavların soğuması ile oluşan bir kaya türüdür ve BF'nin de hammaddesidir. BF'yi önemli kılan özellikler arasında, kolay erişilebilir, ucuz, çok fazla olması, çekme dayanımının, kimyasal direncinin, sıcaklığa karşı dayanımının, mantar ve mikroorganizma direncinin yüksek olması sıralanabilir. Killi zeminlerin BF ile güçlendirilmesi konusundan son 10 yıl içerisinde önemli bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda güçlendirmede kullanılan BF'nin oranı ve boyutunun güçlendirmedeki önemi incelenmiştir.

Ndepete ve Sert [24] 24 mm boyundaki ve %1.5 oranındaki BF ile takviye ettikleri siltli zeminde dayanımın maksimum olduğunu, Özdemir vd. [25], kaolin kilinde %1 BF takviyesi ve %9 kireç katkısı kullanarak hazırladıkları karışımda 28 günlük kür uygulamasıyla dayanımın 5.5 kat arttığını belirtmişlerdir.

Wang vd. [26], %6 oranında kireç ve sodyum-silikat ve %0.4 oranında 12 mm uzunluğundaki BF ile takviye ettikleri zeminde maksimum dayanım elde ettiklerini, Gisymol ve Ramya [27] ise 10 mm boyunda BF'nin organik zeminde %0.05 oranında kullanılması ve 28 gün kür uygulanmasıyla dayanımda maksimum artışın meydana geldiğini ifade etmiştir.

Qu vd. [28] killi zeminin kayma dayanımına BF takviyesi ve nano-silika katkısının etkisini incelemiş ve %0.5 BF takviyesi ile %1 nano silika katkısının kilin kayma dayanımında maksimum artışa neden olduğunu belirlemişlerdir. Boz vd. [29], yüksek plastisiteli kaolin kilinde maksimum dayanım artışının 90 günlük kür, %9 oranında kireç ve %0.75 oranında 19 mm boyunda BF'nin

kullanılmasıyla meydana geldiğini, Kenan ve Özocak [30] ise konsolide edilmiş siltli zeminde, 24 mm uzunluğundaki optimum BF oranının %1.5 olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Ma vd. [31], düşük plastisiteli şişen bir kilde yaptıkları araştırma sonucunda, en yüksek dayanım artışını %10 uçucu kül ve %8 kum katkılı, %0.4 BF takviyeli örnekte belirlemişlerdir. Pandit vd. [32], yüksek plastisiteli killi zeminde %4 oranında 12 mm boyundaki BF takviyesinin maksimum kuru birim hacim ağırlıkta artışa, optimum su içeriğinde ise azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir.

Küçükosmanoğlu [33], düşük plastisiteli killi bir zeminde yaptığı çalışmada 6, 12, 24 mm uzunlukta ve ağırlıkça %2.0, 1.5, 1.0, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05 oranlarında BF'yi kil bir zeminde takviye olarak kullanmış ve 6 mm uzunluğa sahip BF'nin %0.20 oranında kullanılmasıyla en az şişme ve maksimum taşıma gücü oranının (CBR) meydana geldiğini belirlemiştir. Ocakbaşı [34] ise yüksek plastisiteli kilde maksimum dayanım değerlerinin boyu 24 mm olan BF'nin %2 oranında kullanılmasıyla hazırlanan karışımlarda belirlendiğini ifade etmiştir.

Türkel [35] kumlu zemine ağırlıkça %2.5, 5, 10 oranlarında çimento katkısı ve %1, 2, 3, 4 oranlarında BF takviyesi ile hazırladığı örneklerde yaptığı deneysel çalışma sonuçlarına göre %10 çimento katkısı ve %1 BF takviyesinin taşıma gücü oranında, %10 çimento ve %3 BF takviyesinin kayma direncinde ve %10 çimento ve %4 BF takviyesinin ise serbest basınç dayanımında maksimum artışa neden olduğunu belirlemiştir.

Sungur vd. [36], ise BF takviyeli düşük plastisiteli killi zeminde 15 mm boyundaki BF'nin %1.5 oranında eklendiği örneklerde en yüksek kayma dayanımının meydana geldiğini belirtmiştir.

Terzi [37], yüksek plastisiteli kile ağırlıkça %0, 1, 1.5, 2 ve 2.5 oranında 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda BF ekleyip konsolide ettikten sonra yaptığı deneyler sonucunda, maksimum kohezyon değerinin 12 mm boyundaki %1.5 oranında BF takviyeli örnekte, maksimum içsel sürtünme açısının ise 24 mm boyundaki %2 oranında BF takviyeli örnekte belirlendiğini ifade etmiştir.

Xu vd. [38], BF ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli lölserde üç farklı fiber uzunluğunda ve dört farklı fiber içeriğinde hazırladıkları takviyeli örneklerde maksimum fiber oranının %0.6, fiber uzunluğunun ise 12 mm olması halinde lölün kayma dayanımının önemli ölçüde iyileştiğini belirtmiştir.

Zhao vd. [39], BF ve polipropilen fiberin düşük plastisiteli kil üzerindeki güçlendirici etkisini inceledikleri çalışmada, fiberlerin dayanıma olan etkisinin esas olarak kohezyon üzerindeki iyileştirici etkisinden geldiğini, ancak fiberin içsel sürtünme açısının artmasına çok fazla katkı sağlamadığını, fiberlerin 10-13 mm uzunluğunda ve %0.2 oranında olduğunda dayanıma olan etkilerinin maksimuma çıkabileceğini ileri sürmüştür.

Saran ve Demiröz [40], yüksek plastisiteli kile BF ve uçucu kül ekleyerek hazırladıkları örneklerde serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar dayanımdaki maksimum artışı 18 mm uzunluğundaki %1 BF takviyesi ve %10 uçucu kül katkısı ile ve 56 günlük kür sonrasında elde etmişlerdir.

Gürocak ve Aslan Topçuoğlu [41], düşük plastisiteli kaolin kiline farklı oranlarda (%0, 1, 2, 3) boyu 24 mm olan BF ve

farklı oranlarda (%20, 25, 30 ve 35) su ekleyerek hazırladıkları karışımlarda yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, maksimum serbest basınç dayanımının %1 BF oranında ve %25 su içeriğinde elde edildiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalarda kullanılan zemin türlerinden farklı olarak sodyum bentonit kili tercih edilmiştir. Oldukça yüksek bir plastisiteye sahip olan (LL = %507, PI = %466) bu kil türü özellikle seçilmiştir. Böylece, hem şu ana kadar yapılmış olan çalışmalardan farklı bir kil türü kullanılmış olacak, hem de oldukça yüksek plastisiteye sahip killi zeminlerde BF takviyesinin etkisinin nasıl olacağı hakkında bilgi edinme imkanı sunacaktır. Çünkü literatürdeki çalışmalarda kullanılan zemin türleri arasında bu kadar yüksek plastisiteye sahip bir kil kullanılmamıştır. Ancak, bu çalışmadan elde edilecek çıktılar doğrudan uygulamaya dönük olmaktan ziyade, çok yüksek plastisiteye sahip killi zeminlerin güçlendirilmesi ile ilgili literatüre katkı sunacaktır.

2. Materyal ve metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada kil olarak yüksek plastisiteli sodyum bentonit kili, takviye malzemesi olarak ise son yıllarda yaygın olarak tercih edilen araştırılması ve geliştirilmesine hala ihtiyaç duyulan BF kullanılmıştır.

2.1.1. Bentonit kili

Bentonit kili montmorillonit ailesine bağlı bir kil minerali olup magnezyum ve alüminyumca zengin tuf, lav ve volkanik küllerin kimyasal olarak ayrışması veya bozulması ile oluşmaktadır [42, 43]. Kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmuştur. Bentonit tane boyu 2 µm ya da daha küçük, yoğunluğu ~ 2.6 gr/cm³, iyonlaşma kapasitesi fazla, plastisitesi yüksek ve su ile temas ettiklerinde şişme özelliği gösterip hacmi artan bir kildir [44]. Bu çalışmada kullanılan bentonit kili (Şekil 1) Tokat-Reşadiye (Türkiye) kil ocağından temin edilmiş olup, Aslan Topçuoğlu [45] yapmış olduğu çalışmada bu kilin Na-bentonit olduğunu tespit etmiştir. Bentonit kilinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan bentonit kili.

Tablo 1. Bentonit kilinin kimyasal bileşimi [45].

Ana Oksit (%)	Bentonit Kili
SiO ₂	62.50
Al ₂ O ₃	17.60
Fe ₂ O ₃	3.63
CaO	2.86
Na ₂ O	2.58
K ₂ O	0.92
TiO ₂	0.32
SO ₃	0.076
Cr ₂ O ₃	<0.01
Kızdırma Kaybı	6.60

2.1.2. Bazalt fiber (BF)

Fransız Paul Dhé 1923 yılında bazalttan fiber üretme fikrini ortaya atmıştır [46]. 1985’te Kiev’de ilk bazalt fabrikası faaliyete geçmiştir [47]. BF koyu renkli, ince taneli volkanik bir kayaç olan ve bazalt adı verilen doğal malzemeden elde edilmektedir. Dünya çapında yaygın bir şekilde bulunan sert ve yoğun bir kaya olan bazalt, magmatik kökenli bir kayadır ve termo-plastik malzemeler gibi ısıtıldığında ergimektedir. Kimyasal olarak incelendiğinde bazaltı oluşturan ana bileşen SiO₂’dir ve ikinci ana bileşen ise Al₂O₃’tür. Bu iki ana bileşeni Fe₂O₃, FeO, CaO ve MgO takip etmektedir [47]. Bu çalışmada kullanılan BF 6 mm boyunda olup BF satışı yapan firmadan temin edilmiştir (Şekil 2). BF’nin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ayrıştırılmamış BF.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan BF’nin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Fiber boyu (mm)	6
Monofilament Çapı (µm)	15 ±1,5
Nem Oranı, Max (%)	2
Elastisite Modülü (GPa)	90
Çekme Dayanımı (MPa)	3000
Isıl İletkenlik (W/mK)	0.031-0.038
Kopma Uzaması (%)	3.5
Yoğunluk (g/cm ³)	2.63

2.2. Deneysel çalışmalar

Bu çalışmada örnek hazırlama, takviyesiz bentonit kilinin kıvam limiti deneyleri, takviyesiz ve BF takviyeli örneklerin standart proktor ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Örnek hazırlama

İlk olarak bentonit kili 105 °C'de etüvde 24 saat kurutulmuştur. BF'ye ise kompresörle ayrıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 3). Önceden belirlenmiş miktardaki kil ve ayrıştırılmış BF mikser ile karıştırılmıştır (Şekil 4). Bu tür çalışmalarda çoğunlukla zemin etüvde kurutulduktan sonra fiber eklenmekte ve daha sonra bu karışıma belirlenen miktarda su ilave edilmektedir [48-52]. BF takviyeli karışımlara daha önceden belirlenmiş olan optimum su içeriği değerinde distile su eşit olacak şekilde püskürtüldükten sonra mikser yardımıyla tekrar karıştırılmıştır. Ayrıca zaman zaman el ile de karıştırma yapılarak zemin içerisinde fiberlerin homojen bir şekilde dağılması sağlanarak, fiber toplanması ve yığılması engellenmeye çalışılmıştır. Karıştırma süresi, homojen bir karışım sağlamak amacıyla 10 dakika olarak seçilmiştir.



Şekil 3. Kompresörle ayrıştırılmış BF.

Çalışmada kullanılan karışımlara ait BF boyu ve oranları Tablo 3'de verilmiştir



Şekil 4. Kil ve BF karışımlarının hazırlanması.

Tablo 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan BF boyu ve oranları.

BF Boyu (mm)	BF Oranı (%)	Örnek Adı
6	0	B
	1	B+%1BF
	2	B+%2BF
	3	B+%3BF
	4	B+%4BF
	5	B+%5BF

B: Bentonit BF: Bazalt Fiber

2.2.2. Kıvam limitleri deneyi

Kıvam limitleri, likit limit (LL) ve plastik limit (PL) olup ince taneli zeminlerde su içeriğine bağlı olarak kıvamın değişim gösterdiği sınırlar olarak ifade edilmektedir. LL, zeminin viskoz kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriği, PL ise zeminin yarı katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriğidir. Takviyesiz bentonit kilinin LL, PL ve plastisite indisi (PI) değerleri ASTM D4318-17e1 [53] göre belirlenmiş ve deneyler 10 adet örnekte yapılmıştır.

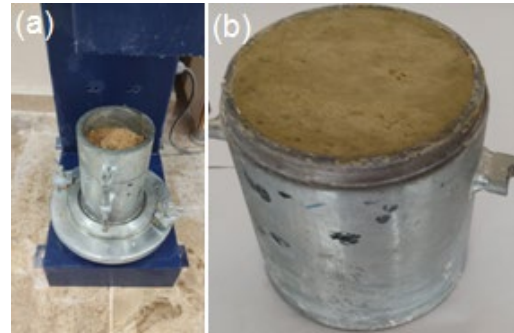
Kıvam limitleri deney sonuçlarına göre takviyesiz bentonit kilinin LL değeri %507, PL değeri %41 ve PI değeri %466 olarak belirlenmiş ve kilin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH)'dir (Tablo 4).

Tablo 4. Bentonit kiline ait kıvam limitleri ve proktor deney sonuçları.

Parametre	Değerler
LL (%)	507
PL (%)	41
PI (%)	466
w _{opt} (%)	38.50
γ _{kmax} (kN/m ³)	12.36
Zemin Sınıfı(USCS)	CH

2.2.3. Standart proktor deneyi

Bentonit kilinde ASTM D698- 12e2 [54] standardına göre yapılan proktor deneyleriyle maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri belirlenmiştir (Şekil 5). Deney, 2.5 kg'lık yükün zemin üzerine 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılması ve kalıp içerisinde zeminin üç tabaka şeklinde sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir.

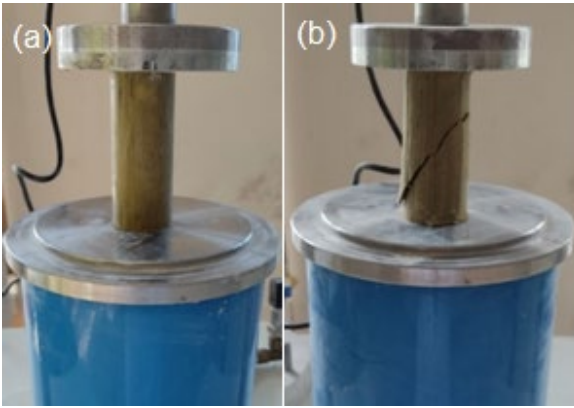


Şekil 5. Standart proktor deneyinin yapılışı (a) deney sonucu sıkıştırılmış örnek (b).

Yapılan standart proktor deneyi sonuçlarına göre bentonit kilinin w_{opt} değeri %38.50, γ_{kmax} değeri 12.36 kN/m³, olarak belirlenmiş ve deneylere ait sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

2.2.4. Serbest basınç deneyi

Zeminin serbest basınç dayanımını (q_u) belirlemek amacıyla serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Bu deneyde; silindirik zemin örneği üzerine sadece aksel yönde yükleme yapılmakta ve en büyük aksel gerilmenin değeri zeminin q_u değerini temsil etmektedir. Serbest basınç deneyleri 6 mm boyundaki BF’nin kuru ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında bentonit kiline eklenmesiyle oluşturulan karışımların takviyesiz bentonitin optimum su içeriğinde proktor deneyi ile sıkıştırıldıktan sonra alınan 30 adet silindirik örnekte, ASTM D2166M-16 [55] standardına göre gerçekleştirilmiş ve q_u değerleri belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. BF takviyeli bentonit kilinin serbest basınç deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) örnekler.

Serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre takviyesiz bentonit kilinin ortalama q_u değeri 206.93 kPa olarak belirlenmiştir. BF takviyeli bentonit örneklerinin ortalama q_u değerleri ise 200.03 - 237.48 kPa arasında değişmektedir (Tablo 5).

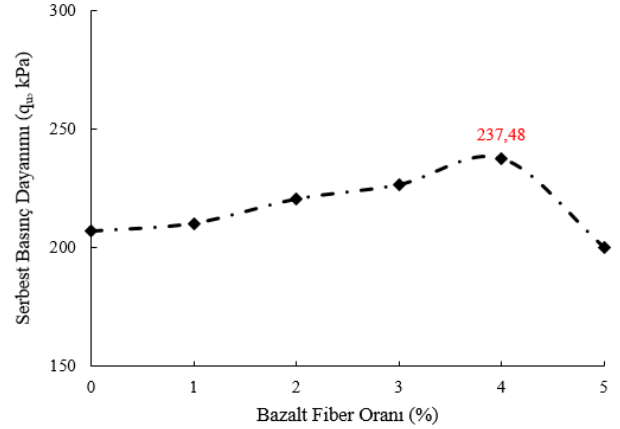
Tablo 5. Takviyesiz ve BF takviyeli bentonit kilinin serbest basınç deney sonuçları.

Fiber Boyu (mm)	Örnek Adı	q_u (kPa)
6	B	206.93
	B+%1BF	210.24
	B+%2BF	220.44
	B+%3BF	226.50
	B+%4BF	237.48
	B+%5BF	200.03

3. Bulgular ve tartışma

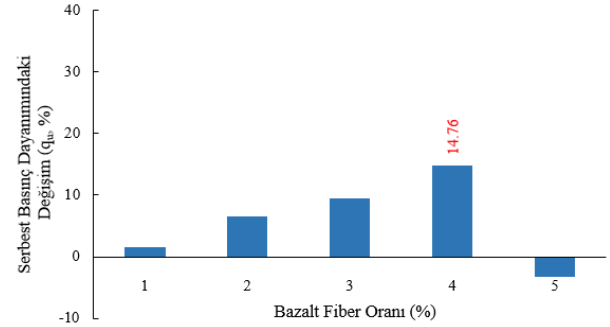
DeneySEL çalışmalar ile, takviyesiz ve BF takviyeli karışımların serbest basınç dayanımlarında meydana gelen değişimleri ortaya konmaya ve dayanımda maksimum iyileşmeyi sağlayan optimum BF oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Takviyesiz bentonit kilinin q_u değeri 206.93 kPa’dır ve farklı oranlarda BF takviyesi ile q_u değerlerinin 200.03 - 237.48 kPa arasında değiştiği belirlenmiştir. En düşük q_u değeri %5 BF takviyeli örnekte 200.03 kPa, en büyük q_u değeri ise %4 BF takviyeli örnekte 237.48 kPa olarak bulunmuştur (Tablo 4). BF oranının %4 olduğu

örnekte dayanım maksimum değere ulaşmış, BF takviyesinin %4’u aştığı örneklerde ise dayanım değeri azalma göstermiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Bentonit kiline ait q_u - BF oranı ilişkisi.

Takviyesiz bentonite göre dayanım değerlerinde %1 BF takviyeli örnekte %1.60, %2 BF takviyeli örnekte %6.53, %3 BF takviyeli örnekte %9.46, %4 BF takviyeli örnekte %14.76 oranında bir artış meydana gelirken %5 BF takviyeli örnekte %3.33’lük bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 8). Tüm bu verilere göre takviyesiz bentonit kilinin optimum su içeriğinde sıkıştırılmış, 6 mm uzunluktaki BF ile takviye edilmiş bentonit için optimum BF oranının %4 olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 8. Bentonit kiline ait % q_u değişimi - BF oranı ilişkisi.

Bentonit kiline eklenen 6 mm boyundaki BF’nin, kilin dayanımını belli bir orana kadar artırdığı, %4 BF oranından sonra ise dayanımı azalttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise artan fiber oranının zemin içerisinde oluşturduğu fiber yığılması-toplanması ve fiberin zemin içerisinde homojen dağıtılmasında karşılaşılan zorluk olarak açıklanabilir [33, 36, 37, 48]. Zemin içindeki fiber oranının fazla olduğu durumda fiberler arasında elektrostatik etkileşim meydana gelmekte ve fiberler zemin içinde homojen olarak dağılmadığı için kümeler halinde toplanmaktadır. Bundan dolayı da dayanım azalmaktadır [48].

Literatürde BF ile ilgili çalışmalardan bir kısmında [24, 27, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 41] farklı zemin türleri farklı boyut ve oranda BF ile güçlendirilmiştir. Bu çalışmalara ait sonuçlar incelendiğinde, zemin türü, zeminin plastisitesi, su içeriği ve BF uzunluğunun optimum BF oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Siltli kilin kullanıldığı çalışmalarda [24, 30] belirlenen optimum BF oranı %1.5’tir. Düşük plastisiteye sahip lölşlerin BF ile güçlendirildiği çalışmada [38] ise BF uzunluğu 12 mm’dir

ve optimum BF oranı %0.6 olarak belirlenmiştir. Düşük plastisiteli killerde yapılan çalışmalarda [33, 36, 39, 41] ise BF boyutuna bağlı olarak optimum BF oranı %0.2 ile 2 arasında değişmektedir. Organik zeminde yapılan çalışmada ise [27] bu oran %0.05 olarak verilmektedir. Bu BF oranları, bu çalışmada belirlenen %4'lük orandan oldukça düşüktür. Plastisitesi yüksek olan killi zeminlerde yapılan çalışmalarda [32, 34, 37] ise yine BF boyutuna bağlı olarak verilen optimum BF oranları %2 ile 4 arasındadır ve optimum BF oranları, yüksek plastisiteli sodyum bentonitin kullanıldığı bu çalışmada elde edilen %4 BF oranı ile uyumludur. Bu sonuçlar, BF ile zeminlerde yapılacak güçlendirmelerde, BF boyutu ile birlikte zeminin plastisitesinin de optimum BF oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

BF ile zemin güçlendirilmesi konusunda yapılan diğer bir grup çalışmada [25, 26, 28, 29, 31, 40] ise, sadece BF değil aynı zamanda kireç, sodyum-silikat, nano-silika, uçucu kül ve çimento gibi puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri de kullanılmış ve ayrıca küreme de yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmında [25, 26, 28, 29, 31] düşük plastisiteye sahip killer kullanılmıştır. BF uzunluğu ve su içeriğine bağlı olarak belirlenen optimum BF oranları %0.4-1 arasındadır ve bu çalışmada belirlenen optimum BF oranından oldukça düşük değerlerdir. Zeminlerin düşük plastisiteli olması ile birlikte kimyasal olarak stabilize edilmeleri ve kür uygulanması sonucunda optimum BF oranı oldukça düşük oranlara inmiştir. Daha yüksek optimum BF oranının beklendiği yüksek plastisiteli kilin kullanıldığı çalışmada [40] ise uçucu kül ile stabilizasyon ve küreme yapıldığı için optimum BF oranı %1 olarak belirlenmiştir. Çünkü, yüksek plastisiteli killerde kimyasal stabilizasyon ve kür sonrasında kilin plastisitesi önemli bir oranda azalmakta ve bu azalmaya bağlı olarak da optimum BF oranı da azalmaktadır.

Kumlu zeminde çimento ve BF ile yapılan çalışmada [35] ise ince taneli zeminlerin kullanıldığı diğer çalışmalardan farklı olarak, BF'nin dayanıma olan etkisinin çok az olduğu, çimento ile yapılan stabilizasyon ve BF takviyesinin birlikte kullanılması ve 28 günlük kür sonunda dayanımda dikkate değer artışların elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar iri taneli zeminlerde BF takviyesinin tek başına başarılı bir güçlendirme yapılamayacağını, ancak BF ile birlikte zeminin puzolanik bir malzeme ile stabilize edilmesi ve kür uygulanması sonucunda BF takviyesinin etkili olabileceğini göstermektedir.

Literatürde BF takviyesi ile ilgili çalışmalara ait bu sonuçlar, bu çalışmada neden %4 gibi yüksek bir optimum BF oranının elde edildiğini daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Çünkü bu çalışmada oldukça yüksek bir plastisiteye sahip bentonit kullanılmıştır ve BF takviyesinden başka herhangi bir puzolanik katkı malzemesi eklenmemiş ve küreme de yapılmamıştır. Literatürdeki çalışmalar ile ortaya konan zeminin plastisitesi ile optimum BF oranı arasındaki ilişki dikkate

alındığında, bu çalışmada kullanılan bentonit yüksek plastisiteye sahip olduğundan ve herhangi bir kimyasal stabilizasyon ve küremeye tabi tutulmadığından optimum BF oranı olarak önceki çalışmalara göre %4 gibi yüksek bir değer elde edilmiştir.

Sonuçlar

Yüksek plastisiteli killi zeminlerin güçlendirilmesinde optimum BF oranının belirlenmesi amacıyla yapılan bu deneysel çalışmalara ait sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1. Serbest basınç deneyleriyle takviyesiz bentonit kilinin dayanım değeri 206.93 kPa olarak belirlenmiştir. Farklı oranda BF takviyeli bentonit örneklerinin dayanım değerlerinin 200.03 - 237.48 kPa arasında değiştiği tespit edilmiştir.
2. Bentonit kilinde %4 oranında BF takviyesinin kullanıldığı örnekte q_u değeri takviyesiz bentonite göre %14.76 oranında artış göstermiştir. Araştırma sonuçlarına göre, takviyesiz bentonitin optimum su içeriğinde sıkıştırılmış BF takviyeli bentonit için serbest basınç dayanımda en fazla artışı sağlayan BF oranının %4 olduğunu söylemek mümkündür.
3. Killere eklenen BF oranı arttıkça belli bir değere kadar dayanım değerleri artmakta BF'nin daha fazla artmasına bağlı olarak ise azalmaktadır. Nitekim %5 oranında BF takviyesi ile q_u değerleri %3.33 oranında azalmaktadır.
4. Bu çalışmadan elde edilen verilerin literatürde bu konuda yapılan çalışmalara ait sonuçlar ile karşılaştırılması sonucunda, BF ile yapılacak zemin güçlendirmelerde BF boyutu ve su içeriği ile birlikte, zeminin plastisitesinin de önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Güçlendirilen zeminin düşük plastisiteli olması durumunda optimum BF oranı %0.2-2 arasında iken, bu oran yüksek plastisiteli killi zeminlerde yapılan güçlendirme ile ilgili çalışmalarda %0.4-1 arasındadır. Zeminin plastisitesi azaldıkça optimum BF oranı da azalmaktadır.
5. Bu çalışmayla ortaya konan veriler doğal, çevre dostu ve doğada bol miktarda bulunan klasik zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak son yıllarda çok fazla ilgi çeken BF'nin daha iyi anlaşılması, araştırılması ve literatüre bu anlamda katkı sağlaması açısından önem taşımakla birlikte, BF kullanılacak uygulamalarda, başarılı bir güçlendirme için BF boyutu, su içeriği, zeminin türü ve plastisitesinin optimum BF oranı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu unutulmamalıdır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Zülfü GÜROCAK, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Kaynaklar

- [1] Ö. Ekincioglu, "Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı: Bir optimum tasarım", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003.
- [2] M. Aral, "Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006.
- [3] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, Y. Cai, "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.11.002>
- [4] M.R. Abdi, A., Parsapajouh, M.A. Arjomand, "Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays", *International Journal of Civil Engineering*, 6(4), 284-292, 2008.
- [5] F. Ahmad, F. Bateni, M. Azmi, "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres", *Geotextiles & Geomembranes*, 28(1), 93-99, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.09.017>
- [6] A. Diambra, E. Ibrahim, D.M. Wood, A.R. Russell, "Fibre reinforced sands: experiments and modeling", *Geotextiles & Geomembranes*, 28(3), 238-250, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.09.010>
- [7] A.S. Zaimoglu, "Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers" *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 63-65, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.001>
- [8] A.R. Estabragh, A.T. Bordbar, A.A. Javadi, "Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers", *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 899-908, 2011, <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9427-8>
- [9] S. Kinjal, A. K. Desai, C.H. Solanki, "Experimental study on the Atterberg limits of expansive soil reinforced with polyester triangular fibers", *International Journal of Engineering Research*, 2012.
- [10] P.K. Pradhan, R.K. Kar, A. Naik, "Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 15-25, 2012, <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9445-6>
- [11] T. Eskişar, E. Karakan, S. Altun, "Effects of fibre reinforcement on liquefaction behaviour of poorly graded sands", *Procedia Engineering*, 161, 538-542, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.688>
- [12] A. Edincliler, A. Cagatay, "Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions", *Geosynthetics International*, 20(1), 39-46, 2013, <https://doi.org/10.1680/gein.12.00038>
- [13] E. Botero, A. Ossa, G. Sherwell, E. Ovando-Shelley, "Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)", *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.04.003>
- [14] M. Roustaei, A. Eslami, M. Ghazavi, "Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters", *Cold Regions Science and Technology*, 120, 127-137, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.011>
- [15] B.A. Behbahani, H. Sedaghatnezhad, F. Changizi, "Engineering properties of soils reinforced by recycled polyester fiber", *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(2), 01-07, 2016.
- [16] M.E. Orakoglu, J. Liu, "Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2128-2140, 2017, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0960-8>
- [17] P.F. Amini, R. Noorzad, "Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.026>
- [18] H. Cui, Z. Jin, X. Bao, W. Tang, B. Dong, "Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms", *Construction and Building Materials*, 189, 286-295, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- [19] M.A.M. Al-Bared, I.S.H. Harahap, A. Marto, S.V.A.N.K. Abad, M.O.A. Ali, "Undrained shear strength and microstructural characterization of treated soft soil with recycled materials", *Geomechanics and Engineering*, 18(4), 427-437, 2019, <https://doi.org/10.12989/gae.2019.18.4.427>
- [20] S. Lee, J. Im, G.C. Cho, I. Chang, "Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer treated sands", *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 445-452, 2019, <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.445>
- [21] B. Fındıkçı, "Bentonit kilinin cam fiber ile iyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 2020.
- [22] M. Valipour, P.T. Shourijeh, A. Mohammadina, "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", *Transportation Geotechnics*, 27, 1-14, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>

- [23] Y. Wang, P. Guo, S. Shan, H. Yuan, Bi Yuan, "Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute", *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(4), 1079-1088, 2016.
- [24] C.P. Ndepete S. Sert, "Use of basalt fibers for soil improvement", *Acta Physica Polonica*, 130(1), 355-356, 2016.
- [25] T. Özdemir, G.E. Polat, O. Azdeniz, A. Boz, A. Sezer, "Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, 1025-1034, 2016.
- [26] S. Wang, Q. Xue, W. Ma, K. Zhao, Z. Wu, "Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil", *Construction and Building Materials* 272(2021), 121914, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121914>.
- [27] P.G. Gisymol, K. Ramya, "A study on the effect of basalt fiber in organic soil", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 14(4), 13-17, 2017.
- [28] J. Qu, C. Hu, C. Zhao, "Shear strength experimental study on basalt fiber and nano-silica reinforced Shanghai clay", *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 28(3), 186-192, 2017,
- [29] A. Boz, A. Sezer, T. Özdemir, G.E. Hızal, O. Azdeniz Dolmacı, "Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers", *Arabian Journal of Geosciences*, 11(122), 1-14, 2018, <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3458-x>
- [30] A. Kenan, A. Özocak, "Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direncine etkisi", *2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, 2018.
- [31] Q.Y. Ma, Z.M. Cao, P. Yuan, "Experimental research on microstructure and physical-mechanical properties of expansive soil stabilized with fly ash, sand, and basalt fiber", *Advances in Materials Science & Engineering*, 2018, 1-13, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/9125127>
- [32] V.M. Pandit, C. Rohit, K. Tushar, C. Ayushi, G. Bhushan, C. Deepali, "Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil", *6th International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET)*, 850-853, 2018.
- [33] M. Küçükosmanoğlu, "Bazalt fiberin zemin iyileştirilmesinde kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2019.
- [34] P. Ocakbaşı, "Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2019.
- [35] U.M. Türkel, "Bazalt fiber ve çimento katkısının zayıf zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, 2019.
- [36] A. Sungur, M.F. Yazıcı S.N. Keskin, "Bazalt lifi ile güçlendirilmiş killi zeminin mühendislik özellikleri üzerine deneysel araştırma", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, 28, 895-899, 2021, <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011881>
- [37] S. Terzi, "Killi zeminlerin kayma direncine bazalt fiberin katkısı", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2021.
- [38] J. Xu, Z. Wua, H. Chena, L. Shaoc, X. Zhoue, S. Wange, "Triaxial shear behavior of basalt fiber-reinforced loess based on digital image technology", *KSCE Journal of Civil Engineering* 25(10), 3714-3726, 2021.
- [39] N. Zhao, H. Wu, Z. Huang, "Strength behavior of red clay reinforced by basalt chopped fiber", *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2021.
- [40] O. Saran, A. Demiröz, "Zemin stabilizasyonunda bazalt fiber ve uçucu kül kullanımının araştırılması", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, 495-511, 2022.
- [41] Z. Gürocak ve Y. Aslan Topçuoğlu (2023), "Bazalt fiber kullanımının düşük plastisiteli kilin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 688-701, <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1283148>
- [42] Y. Önem, "Sanayi Madenleri," Kozan Ofset, Ankara, 2000.
- [43] A. Akbulut, "Bentonit," MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [44] S. Genç, "Şişen Zeminler ve Bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri," Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [45] Y. Aslan Topçuoğlu, "Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi," Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [46] D. Saravanan, "Spinning the rocks-basalt fibers. Journal of the Institute of Engineers (India)", *Textile Engineering Division*, 86, 39-45, 2006.
- [47] H. Jamshaid, R. Mishra, "A green material from rock: basalt fiber-a review", *The Journal of The Textile Institute*, 107(7), 923-937, 2015, <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- [48] L. Gao, G. Hu, N. Xu, J. Fu, C. Xiang, C. Yang, "Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil", *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8, 2015, <https://doi.org/10.1155/2015/561293>

- [49] A.S. Soğancı, “The effect of polypropylene fiber in the stabilization of expansive soils”, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 9(8), 994-997, 2015.
- [50] P.V. Motiram, C. Rohit, K. Tushar, C. Ayushi, G. Bhushan, C Deepali, “Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil”, *International Journal for Research in Engineering Application Management (IJREAM)*, 850-853, 2018.
- [51] K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi, “Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils”, *Transportation Geotechnics*, 16, 76-84, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>
- [52] C. Liu, Y. Lv, X. Yu, X. Wu, “Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiberreinforced soil”, *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 581-590, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.03.004>
- [53] Standard Test Methods for Liquid Limit. Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM D4318-17e1, 2017.
- [54] Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials ASTM D698- 12e2, 2012.
- [55] Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, American Society for Testing and Materials ASTM D2166M-16, 2016.



Yağış-Akış İlişkisinin GEP ve ANFIS İle Modellenmesi

Modelling The Rainfall-Runoff Relationship With GEP & ANFIS Methods

Yunus Yaman^{1*}, Fevzi Önen²¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, yamany@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7904-7607>² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, fonen@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2368-1035>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 16 Mayıs 2023
Revizyon 19 Haziran 2023
Kabul 28 Haziran 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Yapay Zekâ, Yağış-Akış, GEP,
ANFIS

ÖZ

Yağış-akış ilişkisinin doğru bir şekilde modellenmesi, su kaynaklarının yönetimi ve su taşkınlarının kontrolü gibi hidrolojik uygulamalar için hayati önem taşımaktadır. Ancak hidrolojik sistemlerin karmaşıklığı ve nonlineer özellikleri nedeniyle, yağış-akış ilişkisi gibi olayları tanımlamak için hala birçok model geliştirilmektedir. Özellikle son yıllarda küresel ısınma ve küresel iklim değişimi gibi etmenler, yağış-akış ilişkisini belirlemeyi daha da önemli hale getirmiştir. Bu nedenle, yapay zeka teknikleri gibi modern yaklaşımların kullanımı giderek artmaktadır.

Bu çalışmada, havza yağış-akış modellemesi için iki farklı yapay zeka tabanlı yöntem olan Genetik İfadeli Programlama (GEP) ve Uyarlanabilir Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanılarak, tahmin edilen akış değerleri gözlenen akış değerleri ile karşılaştırılmıştır. Girdi parametreleri olarak, uydu verilerinden elde edilen 4km x 4km çözünürlüklü yağış verisi kullanılmıştır. Bu yağış verisi, havza için günlük ortalama yağış yüksekliği olarak elde edilmiştir. Akım verisi olarak, Berta Suyu Havzası çıkışındaki EİE-2334 No.lu akım gözlem istasyonunun (AGİ) günlük akış verileri kullanılmıştır. Akım verileri, $Q(t-1)$, $Q(t-2)$, $Q(t-3)$, $Q(t-4)$ ve yağış verileri olan $P(t)$, $P(t-1)$, $P(t-2)$, $P(t-3)$ gibi çeşitli girdi senaryoları oluşturulmuş ve çıkış olarak $Q(t)$ ile eşleştirilmiştir. Modellerin performansı, determinasyon katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hatanın kökü (KOKH) gibi istatistiksel ölçütler kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada, ANFIS ve GEP yöntemlerinden elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Berta Suyu Alt Havzası için en yüksek $R^2=0,988$ ve en düşük KOKH=4,770 değerini veren modelin ANFIS-K1 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, yapay zeka tekniklerinin yağış-akış ilişkisini belirlemede etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 May 2023
Received in revised form 19 June 2023
Accepted 28 June 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Artificial Intelligence, Rainfall-
Runoff, GEP, ANFIS

Doi: 10.24012/dumf.1297714

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The accurate modeling of the rainfall-runoff relationship is crucial for hydrological applications such as water resource management and flood control. However, due to the complexity and nonlinear characteristics of hydrological systems, many models are still being developed to describe events such as rainfall-runoff relationships. In particular, factors such as global warming and climate change have made determining the rainfall-runoff relationship even more important. Therefore, the use of modern approaches such as artificial intelligence techniques is increasing.

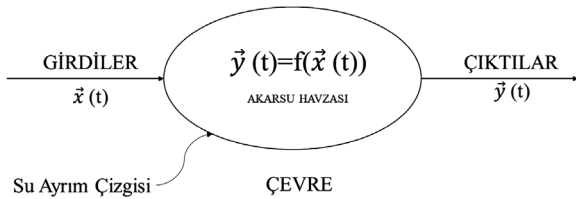
In this study, two different artificial intelligence-based methods, namely, Genetic Expression Programming (GEP) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), were tested to model basin rainfall-runoff, and the estimated flow values were compared with the observed flow values. 4km x 4km resolution precipitation data that obtained from satellite data was used as input parameters. This precipitation data was obtained as the daily average precipitation height for the basin. Daily flow data from the EIE-2334 flow observation station (FOS) at the outlet of the Berta Stream Basin was used as the flow data. Various input scenarios were created with flow data such as $Q(t-1)$, $Q(t-2)$, $Q(t-3)$, $Q(t-4)$ and precipitation data such as $P(t)$, $P(t-1)$, $P(t-2)$, $P(t-3)$, and matched with $Q(t)$ as output. Some of the inputs were used for model training, and the remaining were reserved for testing. The performance of the models was evaluated using statistical measures such as determination coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE). In the study, it was found that the results of the ANFIS and GEP methods were similar. The model with the highest $R^2=0.988$ and the lowest RMSE=4.770 for the Berta Stream Sub-Basin was found to be the ANFIS-K1 model. These results demonstrate that artificial intelligence techniques are an effective tool for determining the rainfall-runoff relationship.

Giriş

Son yıllarda yapay zekâ ve evrimsel algoritmaların gelişmesi ile kara kutu (kapalı kutu) modellerin hidrolojik problemlerin çözümünde kullanımı paralellik göstermektedir. Kara kutu modeller özellikle parametrik modellerin kullanılmasının zor olduğu hidrolojik problemlerde başarılı sonuçlar elde etmektedir. Bununla birlikte yağış ve akış ilişkisi gibi doğrusal olmayan (nonlinear) ilişkileri etkili bir şekilde modelleyebilmektedir. Havzadaki hidrolojik süreçlerin kaotik oluşu ve öngörülemezliği sebebiyle kara kutu modellerin, hidrolojik modellerin oluşturulmasında tercih edilmesi önemlidir.

Küresel ısınma, dünya genelindeki iklim sistemleri ve süreçleri arasındaki dengeyi bozarak küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu değişiklikler, atmosferin hidrolojik döngüsü gibi önemli sistemler üzerinde, yağış, buharlaşma ve su akışı gibi hidrolojik süreçlerde hem alan hem de zaman açısından önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişiklikler sadece uzun dönem ortalamaları etkilemekle kalmaz, aynı zamanda uç olayların sıklığı, büyüklüğü ve yayılımı üzerinde de etkili olacaktır. Yapılan çalışmalar, küresel ısınmanın su kaynaklarının kısıtlanmasına neden olabileceğini ortaya koymaktadır [1].

Hidrolojide havza kavramı, su ayırım çizgileriyle diğer havzalardan ayrılan ve gelen yağışı akışa dönüştürebilen hidrolojik sistemleri temsil etmektedir.



Şekil 1. Hidrolojik sistem kavramı [2]

Şekil 1’de gösterilen hidrolojik sistemde f , sistemin girdilerini çıktılara dönüştüren dönüşüm fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerin çevreleriyle olan ilişkileri $\vec{x}(t)$ girdi ve $\vec{y}(t)$ çıktı vektörleri ile belirlenir [2].

Yağış-Akış Modelleri

Yağış-akış modelleri temel olarak havzaya düşen yağış ile akış arasında matematiksel bir ilişki kurmaya odaklanır. Bu yapılırken çeşitli metodlar kullanılır.

Yağış akış ilişkisi için oluşturulan modellerin en basit şekilde yapıları akış yüksekliklerinin yağış yükseklikleriyle ilişkilendirilmesiyle oluşturulan modeldir. Bu model için çizilen grafikte hata oranının yüksek olacağı görülecektir. Hata oranının fazla olması, bu ilişkiyi belirleyen başka etmenlerin varlığını göstermektedir. Bu etmenlerin başında zemin türü ve zemin nemi gelir. Burada zemindeki nem miktarı zeminin doygunluğunun bir göstergesidir ve yağışın akışa dönüşmesini etkileyen önemli bir parametredir. Zemindeki nem miktarını etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir: gerçekleşen yağıştan önceki

yağışlar, yağışın başladığı zamanda akarsudaki akım miktarı, yağışın şiddeti ve devam ettiği süre. Bu verilen parametreler ile daha isabetli bir yağış – akış bağıntısı elde edilebilir Diğer etken olan zemin türü, zemini oluşturan malzemeyi ve içindeki boşluk miktarını temsil etmektedir ve zemine düşen yağışın sızma miktarını etkilemektedir [3].

Yağış ve akış arasındaki ilişkiyi belirlemede farklı modeller kullanılmaktadır. Bu yöntemler havzayı ele alış biçimine göre farklılıklar göstermektedir. Bu modeller şu şekilde sıralanabilir:

- Parametrik Modeller
- Klasik Kara Kutu Modeller (Kapalı Kutu)
- Yapay Zekâ Modelleri

Parametrik modeller havzaya düşen yağışın dönüşüm işlemini sızma ve yüzeysel akış gibi birçok alt bileşene ayırarak analiz eder. Bunu yaparken bileşenler arasındaki ilişkileri oldukça ayrıntılı bir şekilde gösterir [2]. Bu tip modellerde sistemin kaotik oluşundan dolayı çeşitli varsayımlar ve basitleştirmeler yapılır.

Kara kutu modellerde havzadaki gerçekleşen olaylar ayrıntılı bir şekilde incelenmez. Bu yaklaşımda havzaya yağış akışa dönüştüren bir sistem gözüyle bakılır. Girdiler ve çıktılar arasında matematiksel bağıntı elde edilir [2]. Bir sistem olarak düşünülen havzanın sistem davranışı (dönüşüm fonksiyonu) belirlenmeye çalışılır. Bu modeller havzadaki olayı tam olarak yansıtmazlar da oldukça basittirler. Ancak dönüşüm fonksiyonunu etkileyen çok fazla parametrenin bulunması, süreçlerin karmaşıklığı ve havzaların nonlinear davranışı sebebiyle bu modeller daha pratiktir.

Son yıllarda, yapay zekâ tekniklerindeki gelişmeler sayesinde, yağış ve akış arasındaki ilişkinin modellenmesinde gerçekçi tahminler yapmak mümkün hale gelmiştir. Bu yapay zekâ modelleri, insan benzeri niteliklerle donatılmış bir bilgisayar destekli makinenin sorunlara çözüm üretmesi, genellemeler yapması ve geçmiş tecrübelerden öğrenip mantıklı sonuçlar çıkarması fikrine dayanmaktadır [4].

Yapay zekâ yöntemleri, insan beyninin çalışma prensibinin, çıkarım yapma yetisinin ve düşünme şeklinin farklı algoritmalar ile taklit edilmesi ile sağlanır. Günümüzde hemen hemen her alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde etkili olmakla birlikte hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Temel olarak kara kutu modeller gibi çalışan yapay zekâ yöntemleri kendi içinde kullandığı farklı metodolojilerle kara kutu modellerinden ayrılmaktadır. En çok kullanılan yapay zekâ yöntemleri şu şekilde sıralanabilir:

- YSA
- Uzman Sistemler (Expert Systems)
- Metallerin Tavlanması Benzeşimi (Simulated Annealing)
- Gelişime Dayalı Algoritmalar
- Genetik algoritmalar (Genetic Algorithms)
- Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Yağış-akış ilişkisinin yapay zekâ yöntemleri ile modellenmesiyle ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Aytek ve arkadaşları [5], yapay zekâ yöntemlerinden olan Genetik İfadeli Programlama (GEP) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak yağış-akış ilişkisini modellemişlerdir. YSA'nın İleri Beslemeli Geriye Yayılım Yapay Sinir Ağı (İBGYSA) ve Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağı (GRYSA) ağ mimarilerini ve GEP kullanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. ABD'nin Pensilvanya eyaletindeki Juniata Nehri Havzası için üç yağış istasyonu ve bir akış istasyonunun günlük verileri dikkate alınmıştır. Ortalama, çarpıklık gibi istatistiksel parametreler ile ortalama kare hata (OKH) ve determinasyon katsayısı (R^2) gibi kriterler ile modellerin performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre GEP, YSA için kullanılan farklı ağ mimarilerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. GEP'in, YSA'ya alternatif olarak yağış-akış modellerinde kullanılabilmesi belirtilmiştir. Lefadani ve arkadaşları [6], İran bulunan Eskandari havzası için MIKE11/NAM, ANFIS ve YSA ile yağış tahmini yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ANFIS'in, YSA'ya göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Kuni ve arkadaşları [7], Hindistanın Kerala eyaletinde bulunan Vamanapuram Nehri havzasını çalışma alanı olarak seçmiştir. Havzanın farklı yerlerinde bulunan iki yağış istasyonundan aylık yağış verileri ve havza çıkışındaki akım gözlem istasyonunda aylık akış verileri elde edilmiştir. 10 yıllık verinin (120 ay) yüzde 75'i eğitime ve %25'i test aşaması için ayrılmıştır. ANFIS ve YSA kullanılarak yapılan çalışmada YSA için R^2 değeri 0,896 ve KOKH değeri 0,0593 olarak bulunmuştur. ANFIS için R^2 değeri 0,845 ve KOKH 0,0722 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak ANFIS'in akış tahmininde kullanılabilmesi görülmüştür. İfşaat ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada 17204 No.lu meteorolojik gözlem istasyonunun aylık toplam yağış değerleri kullanılarak, E21A057 akım gözlem istasyonu (AGİ) aylık ortalama akış değerleri GEP ve ÇDR yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Farklı girdi parametreleri kullanılarak hazırlanan modellerde, GEP yönteminin ÇDR yöntemine göre hemen hemen tüm durumlarda daha başarılı olduğu bulunmuştur. GEP yönteminde dört giriş parametresi kullanılarak tüm modeller arasında en başarılı model DM04 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler yağış $P(t)$, 1 aylık gecikmeli debi $Q(t-1)$, 1 aylık gecikmeli yağış $P(t-1)$ ve 2 aylık gecikmeli yağış $P(t-2)$ şeklindedir. Razali ve arkadaşları [9], yaptıkları çalışmada radar tekniğiyle elde edilen hava durumu verileri kullanılmıştır. Çalışmada Endonezya'da bulunan Pahang eyaletinin Kuantan şehrinde bulunan ve sık sık taşkınlara neden olan Kuantan Nehri için yağış-akış modellemesinde ANFIS yöntemi kullanılmıştır. Model parametreleri olarak üçgen tipi üyelik fonksiyonu seçilmiştir ve her girdi için 2 kural tanımlanmıştır. Modelin performansı R^2 ve KOKH ile ölçülmüştür. Akış ve yağışın bir önceki günkü 12 değerlerinin farklı kombinasyonları girdi, akım tahmininde bulunan günün akımı çıktı olarak seçilmiştir. En iyi sonucu veren kombinasyon $P(t)$, $P(t-1)$, $P(t-2)$, $Q(t-1)$ girdilerine karşılık $Q(t)$ çıkış olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar tatmin edici bulunup ANFIS'in genel olarak taşkın tahmini veya özel olarak yağış-akış modellemesi için kullanılma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Gerger ve arkadaşları [10], yaptıkları çalışmada Dicle Havzası içerisinde bulunan iki akım istasyonuna ait aylık ortalama

akım değerleri ve meteorolojik istasyona ait yağış değerleri kullanarak farklı yapay zekâ yöntemleri ile yağış akış ilişkisini modellemeye çalışmışlardır. Girdi olarak yağış ve akışın önceki günlerdeki değerlerinin kombinasyonları ve çıktı olarak tahmin edilen günün akış değeri alınarak modeller kurulmuştur. Çalışmada YSA, GEP, ANFIS yapay zekâ yöntemleri ve ÇDR istatistik yöntemi karşılaştırılmıştır. Verilerin %70'i eğitim, %30'u test için ayrılarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre akım gözlem istasyonlarının birinde GEP, diğerinde ise ANFIS diğer modellere göre daha iyi performans göstermiştir. Çalışma, yapay zekâ yöntemlerinin yağış-akış ilişkisini modellemede kullanılabilirliğini göstermekle birlikte GEP'in de matematiksel model oluşturma aşamasında başarılı olduğunu göstermiştir.

Materyal ve Metot

Çalışma Alanı

Çoruh Nehrinin önemli bir kolu olan Berta Suyu (Berta Çayı) alt havzası, çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Berta Suyu alt havzasının konumu Şekil 2'de verilmiştir.



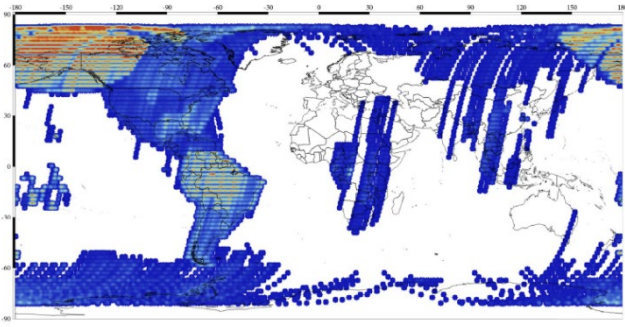
Şekil 2. Berta Suyu alt havzasının konumu

Bölgenin çalışma alanı olarak seçiminde en önemli nedenlerden biri bölgede akım gözlem istasyon sayısının fazla olması ve veri setlerinin uzun zaman aralıklarında kesintisiz olarak mevcut olmasıdır. Bu durum yapay zekâ yöntemleri açısından önemlidir. Bununla birlikte bölgenin çalışılmamış olması ve çeşitli su yapılarının var olması yer seçimi açısından bölgenin tercih edilmesi sebebidir.

Berta alt havzası, meteorolojik olarak değerlendirildiğinde hem Karadeniz iklimi hem de Doğu Anadolu tipi karasal iklim koşullarının hâkim olduğu bir coğrafyadır. Bu da yıl boyunca yağış miktarının fazla olduğunu göstermektedir.

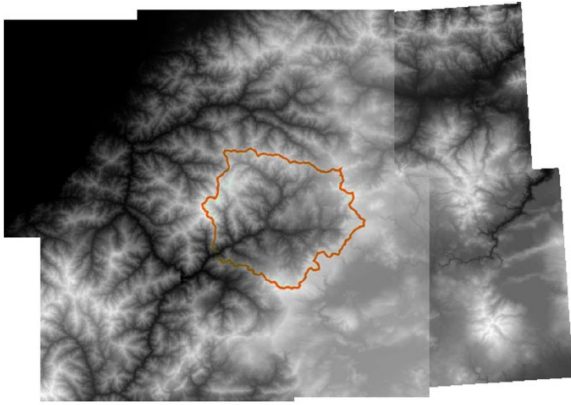
Çalışma Verileri

Yapılan çalışmada Alaska Üniversitesine ait Alaska Uydu Tesisi (Alaska Satellite Facility – ASF) tarafından sağlanan ALOS PALSAR veri setinin 12,5 m x 12,5 m çözünürlükteki sayısal yükseklik modeli tercih edilmiştir. ALOS PALSAR veri setinin küresel radar görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.

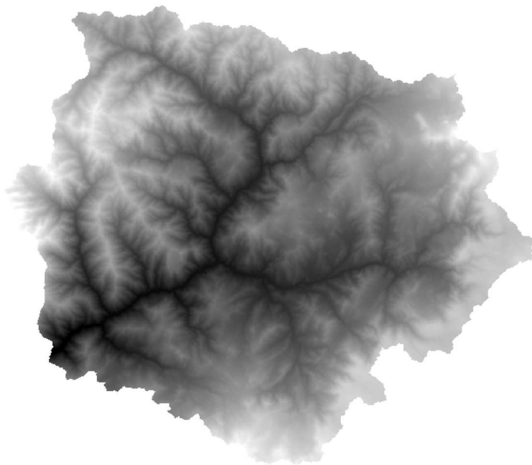


Şekil 3. ALOS PALSAR küresel radar görüntüsü [11]

Elde edilen sayısal yükseklik modelinden ArcGIS programının hidrolojik analiz araçları kullanılarak havza çıkış noktası EİE - 2334 No.lu AGİ olacak şekilde havza sınırları belirlenmiştir.



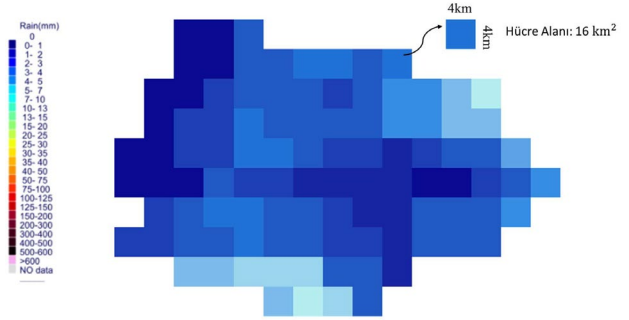
Şekil 4. Berta Suyu alt havzasının belirlenmesi



Şekil 5. Berta Suyu alt havzasının sayısal yükseklik modeli

Bu çalışmada Kaliforniya Üniversitesi bünyesindeki Hidrometeoroloji ve Uzaktan Algılama Merkezi (CHRS - The Center for Hydrometeorology and Remote Sensing) tarafından sağlanan uydu kaynaklı veri setleri kullanılmıştır. Çalışmada CHRS tarafından sağlanan PERSIANN-CCS veri

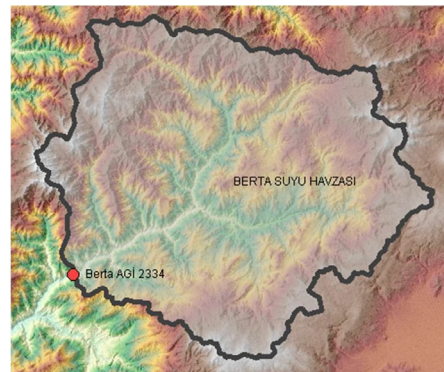
seti kullanılmıştır. Kullanılan veri seti $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ (4 km x 4 km) gibi yüksek bir çözünürlüktedir. Elde edilen verilerde her hücre sayısal olarak yağış miktarını temsil etmektedir ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yağışın havzadaki dağılışı

Her hücrenin temsil ettiği yağış değerleri toplanıp toplam hücre sayısına bölünmesiyle tüm havzayı temsil eden tek bir yağış değeri hesaplanmıştır. Yani çalışılan her bir gün için havzayı temsil eden ortalama yağış miktarı hesaplanmıştır.

Bölge hidrolojik olarak aktif bir bölge olduğu için hem Elektrik İşleri İdaresinin (EİE) hem de Devlet Su İşlerinin (DSİ) bölgede akım gözlem istasyonları bulunmaktadır. Havzanın çıkış noktası olarak EİE-2334 No.lu akım gözlem istasyonu seçilmiştir. Seçilen istasyonun tercih edilme sebeplerinden biri uzun zaman aralığında kesintisiz veri sağlanabilmesi ve seçilen noktanın Deriner baraj gölünün başlangıcı olmasıdır. EİE 2334 No.lu akım gözlem istasyonunun konumu Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. EİE 2334 No.lu akım gözlem istasyonu

Akım gözlem istasyonunun bulunduğu yer ($42^\circ 02' 00''$ D - $41^\circ 12' 35''$ K) (Ardahan - F48) Artvin - Yusufeli karayolu üzerindeki Şavşat yol kavşağından yaklaşık 15 km mesafedeki Bağlık mevkiindedir. İstasyonun deniz seviyesinden yüksekliği 366 m'dir. İstasyondaki akım verilerinin süresi 1 Ocak 1989'dan 30 Eylül 2010'a kadardır. Ancak çalışmada kullanılan yağış verisinin 2003 yılından önce mevcut olmamasından dolayı 2003 - 2010 yılları arasında mevcut olan yağış verileri alınmıştır. Bu sebeple

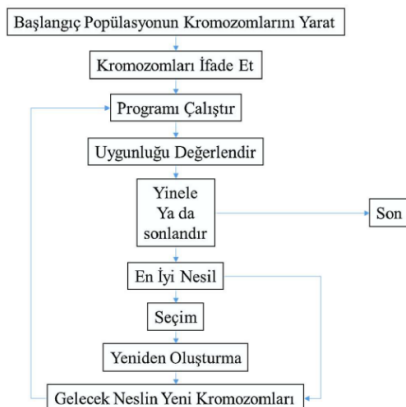
akım ve yağış verisinin kesiştiği aralık 1 Ocak 2003 tarihinden 30 Eylül 2010 tarihine kadar olan 2830 günlük akım ve yağış verisi kullanılmıştır.

Genetik İfadeli Programlama (GEP)

GEP, Genetik Algoritmalar (GA) ve Genetik Programlamanın (GP) bir alt dalıdır ve Evrimsel Algoritma ailesinin bir parçasını oluşturur. Bu algoritma ailesi, otomatik programlar oluşturarak problemlerin çözümünü gerçekleştirir. GEP, diğer Evrimsel Programlama tekniklerinden farklı olarak, bilgisayar programlarını doğrusal sabit uzunluklu bir temsil olan ifade ağaçlarına dönüştürür. GP ise genellikle doğrudan değişken boyutlu bir sözdizimi ağacı kullanır. Bu üç algoritma arasındaki temel fark, bireylerin doğasından kaynaklanır. GP'de bireyler, potansiyel çözümleri temsil eden kromozomlar olarak farklı boyutlarda ve şekillerde doğrusal olmayan varlıklardır. GA'da ise bireyler sabit uzunlukta kromozomlar olarak doğrusal dizilerdir. Her bir varlık fonksiyonuna göre farklı uygunlukları sergiler. Doğrusal olmayan varlıklar, diyagramlar veya ağaçlar şeklinde temsil edilebilirler. GEP'de ise bireyler, sabit uzunlukta doğrusal dizeler olarak kodlanmıştır ve farklı şekillerde, örneğin basit diyagram gösterimleri veya ifade ağaçları olarak ifade edilebilen doğrusal olmayan varlıklardır. [12].

GEP ile bir problemin çözümünde 5 temel adım mevcuttur. İlki, kullanılacak girdi (terminal) veri setinin belirlenmesidir. İkinci adımda; aritmetik operatörler (*, /, -, +), mantıksal ifadeler (eğer, ise, başka) ve matematiksel fonksiyonlar (tanh, sin, cos) gibi elemanlar içeren fonksiyonlar seçilir. Üçüncü adımda programın problemi çözerken referans alacağı performans değerlendirme kriterleri belirlenir. Dördüncü adımda kontrol parametreleri belirlenir. Son adımda ise çalışma sonlandırılır [13].

GEP algoritmasının önemli adımları Şekil 8'de verilmiştir. Başlangıç olarak belli bir sayıdaki bireyin kromozomları rastgele üretilir. Ardından bu kromozomlar ifade edilir ve her bir bireyin uygunluğu, fitness kümesi ile değerlendirilir. Sonrasında yeni özellikleriyle üremek ve modifikasyon ile yeniden oluşmak için bireyler uygunluklarına göre seçilir. Bu seçim aşamasına, yeni bireyler de tabi tutulur. İyi bir çözüm bulunana kadar veya belirlenen sayıda işlem yinelenir [14]. Buna göre bir gen ifade programının çalışma akış şeması Şekil 8'de gösterilmiştir.



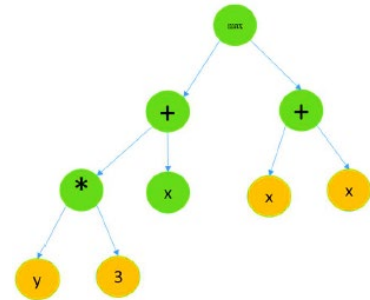
Şekil 8. Bir gen ifade programının akış şeması

Bir gen, baş ve kuyruk bölgelerinden oluşmaktadır. Şekil 9'da gösterildiği gibi baş kısmında üç tip fonksiyon (max, +, *) verilmiştir. Kuyruk kısmında ise üç terminal (x, y, 3) bulunur. Burada x ve y girdi değişkenleridir.



Şekil 9. Bir gen örneği

Verilen gen örneğinin GEP'te ifade ağacı şeklindeki gösterimi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Örnek genin ifade ağacı

Berta Suyu Havzasının yağış – akış ilişkisinin modellenmesi için yağış ve akışın çeşitli senaryoları girdi, akış verisi çıktı olarak kullanılmıştır. Performans değerlendirme ölçüsü olarak determinasyon katsayısı (R^2) ve karekök ortalama hata (KOKH) seçilmiştir. Fonksiyon setinde aritmetik operatörler (+, -, *, /) ve bazı matematiksel fonksiyonlar (exp, ln, inv, 3rt, min, max, avag) kullanılmıştır. Gen sayısı 3 ve kromozom sayısı 30 olacak şekilde baş uzunluğu 8 seçilmiştir. İfade ağaçları için 32 bağlantı operatörü olarak toplam (+) seçilmiştir. GEP model parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. GEP modellemesinde girdi olarak kullanılan verilerin %70'i (2000) eğitim verisi kalan %30'luk (830) kısmı test verisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 1. GEP model parametreleri

Parametre	Değer
Gen Sayısı	3
Kromozom Sayısı	30
Başlık Uzunluğu	8
Bağlantı Fonksiyonu Toplam	(+)
Mutasyon Oranı	0,05
Gen Kombinasyon Oranı	0,0277
Gen Aktarım Hızı	0,0277

Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Temel olarak YSA ve bulanık çıkarım sistemi olarak tanımlanan bulanık mantık (fuzzy logic) birleşimi olan hibrit bir yapay zekâ yöntemidir. ANFIS mimarisi, beş katmanlı bir ileri beslemeli sinir ağı topolojisinden ve Sugeno'nun eğer-ise kuralını öne sürdüğü bulanık çıkarım yaklaşımından oluşur [15]. ANFIS, öğrenme metodu olarak geri yayılım metodunu veya geri yayılım metodu ile en küçük kareler kestirim metodu kombinasyonunu kullanmaktadır [16].

ANFIS, 5 katmandan oluşan YSA mimarisini kullanmaktadır. Katmalarda bulanık mantık kural sayısı kadar nöron bulunur. Şekil 11'de 2 girişli ve 2 kurallı ANFIS ağı mimarisi örneği görülmektedir. Basitlik için, incelenen bulanık çıkarım sisteminin iki x ve y girdisi ve bir z çıktısı olduğunu varsayıyoruz. Birinci dereceden bir Takagi-Sugeno bulanık modeli için, iki bulanık eğer-öyleyse kuralına sahip ortak bir kural kümesi aşağıdaki gibidir:

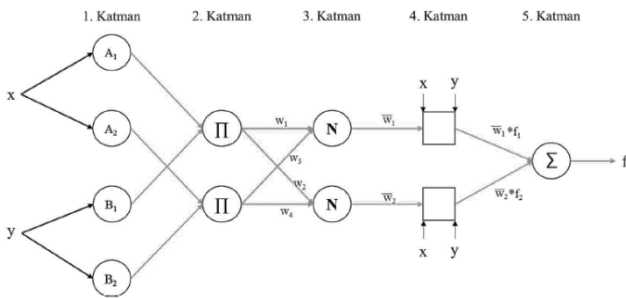
Kural 1: Eğer $x=A_1$ ve $y=B_1$ ise $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Kural 2: Eğer $x=A_2$ ve $y=B_2$ ise $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

En son çıkış her bir kuralın ağırlıklarının ortalamasıdır [16].

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (1)$$

Şeklinde hesaplanır. w ile gösterilen sistem tarafından atanan ağırlık değerleridir. Giriş ve çıkışları bilinen problem için w değeri otomatik olarak atanmaktadır.



Şekil 11. İki girişli, iki kurallı ANFIS ağı mimarisi

1.katmanda iki girdinin her birine 2 üyelik fonksiyonu tanımlandığı için katmanda 4 hücre bulunmaktadır ($i=4$).

2.katmanda cebirsel çarpım yapılarak kuralların kesinlik dereceleri bulunur.

3.katmanda kuralların normalizasyonu yapılır.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (2)$$

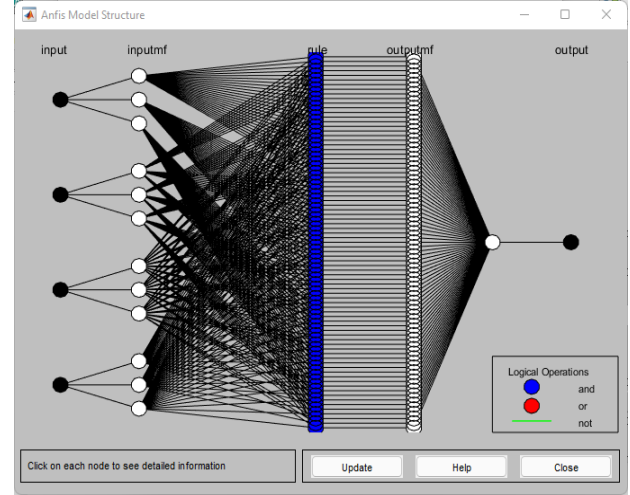
4.katmanda ise bir önceki katmanda normalizasyonu gerçekleştirilmiş olan kuralların her biri kendi çıkış fonksiyonuyla çarpılır.

$$\bar{w}_i * f_i = w_i * (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3)$$

5.katmanda, 4. katmandan çıktılar toplanarak çıkış sayısal değerleri bulunur.

$$\sum_i^r \bar{w}_i * f_i = \frac{\sum_i^r w_i f_i}{\sum_i^r w_i} \quad (4)$$

Şekil 12'de Matlab programının Fuzzy Designer araçındaki ANFIS'in program konfigürasyon arayüzleri görülmektedir.



Şekil 12. Dört girişli ve üç kurallı ANFIS ağı mimarisi

Model Senaryoları

Modeller oluşturulurken farklı girdi birleşimleri kullanılmıştır. Tablo 2'de verilmiş olan senaryolara göre $Q(t-1)$, $Q(t-2)$, $Q(t-3)$, $Q(t-4)$ sırasıyla bir, iki, üç ve dört gün önceki akım değerlerini, $P(t-1)$ ve $P(t-2)$ değerleri ise sırasıyla bir ve iki gün önceki yağış değerlerini göstermektedir. $Q(t)$, çıktı değeri olarak gösterilmektedir.

Tablo 2. Yağış-Akış ilişkisinin belirlenmesinde kullanılan senaryolar

Senaryo	Girdi	Çıktı
K1	$P(t), Q(t-1)$	$Q(t)$
K2	$P(t), Q(t-1), Q(t-2)$	$Q(t)$
K3	$P(t), Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)$	$Q(t)$
K4	$P(t), Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3), Q(t-4)$	$Q(t)$
K5	$P(t), P(t-1), Q(t-1)$	$Q(t)$
K6	$P(t), P(t-1), Q(t-1), Q(t-2)$	$Q(t)$
K7	$P(t), P(t-1), Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)$	$Q(t)$
K8	$P(t), P(t-1), P(t-2), Q(t-1)$	$Q(t)$
K9	$P(t), P(t-1), P(t-2), Q(t-1), Q(t-2)$	$Q(t)$

Bu senaryoların oluşturulmasındaki temel amaç akım tahmini yapılacak günün akımı, önceki günlerin akımının bir fonksiyonudur. Buna ek olarak eklenen önceki gün yağışları topraktaki nem miktarını etkileyen bir parametre olmasından ötürü senaryolara eklenmiştir.

Performans Değerlendirme Kriterleri

Modellerin performans değerlendirme kriterleri olarak eğitim ve test süreçlerinin karekök ortalama karesel hata (KOKH) ve determinasyon katsayısı (R^2) değerleri karşılaştırılmıştır. KOKH değerinin 0'a, R^2 değerinin 1'e yakın olması, model tarafından tahmin edilen değerlerin gerçek değere yakınsadığı anlamına gelir. Buna göre N toplam veri sayısı olmak üzere;

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{ölç.} - Q_{tah.})^2} \quad (5)$$

Burada, " $Q_{ölç.}$ " ölçülen akım değeri ve " $Q_{tah.}$ " tahmin edilen değerdir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{ölç.} - Q_{ort.})^2 - \sum_{i=1}^N (Q_{ölç.} - Q_{tah.})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{ölç.} - Q_{ort.})^2} \quad (6)$$

Şeklinde hesaplanır. Burada " $Q_{ölç.}$ ", gözlenen akım değerini, " $Q_{ort.}$ ", ortalama akım değerini, " $Q_{tah.}$ " ise tahmin edilen akım değerini ifade etmektedir.

Bulgular ve Tartışma

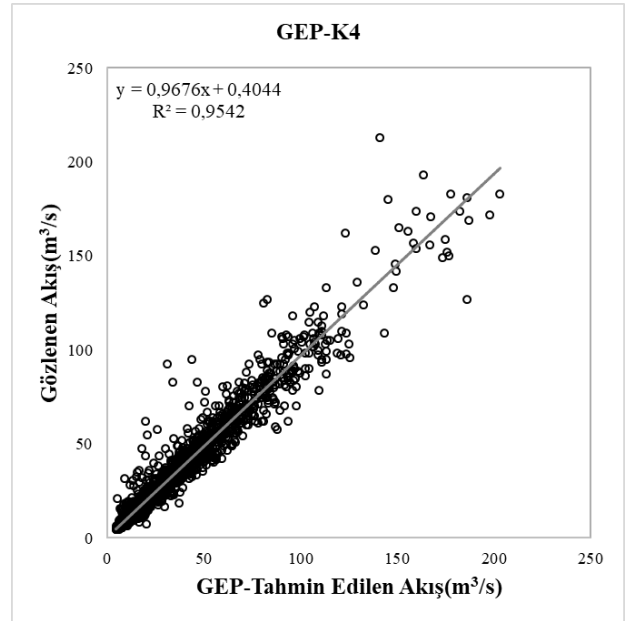
Yapılan çalışmada EİE – 2334 No.lu AGİ 2830 günlük akış verileri ve CHRS PERSIANN-CCS uydu kaynaklı günlük ortalama yağış verilerinin farklı kombinasyonlarından elde edilen girdi senaryoları kullanılarak gözlenen akışla eşleştirilmiştir. GEP ve ANFIS'te elde edilen modellerin akım değerleri gözlenen akış değerleriyle karşılaştırılmıştır. En yüksek yüksek determinasyon katsayısı değerlerine ve en düşük karekök ortalama karesel hata değerine sahip senaryolar seçilmiştir.

Tablo 3'de verilmiş olan sonuçlara göre üzere en yüksek determinasyon katsayısı ve en düşük karekök ortalama karesel hata değerlerine sahip GEP modeli GEP-K4 olarak gözlenmiştir.

Tablo 3. GEP eğitim ve test sonuçları

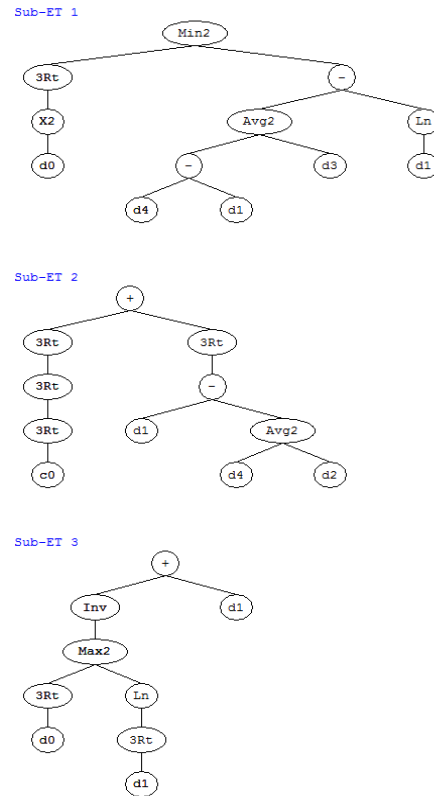
Durum	Eğitim- R^2	Eğitim-KOKH	Test- R^2	Test-KOKH
K1	0,952	5,964	0,948	5,666
K2	0,949	6,124	0,932	5,818
K3	0,943	6,490	0,933	6,166
K4	0,954	5,815	0,954	5,524
K5	0,952	5,941	0,942	5,644
K6	0,954	5,841	0,944	5,549
K7	0,953	5,880	0,953	5,586
K8	0,953	5,885	0,953	5,591
K9	0,953	5,869	0,953	5,576

GEP-K4 modeli için gözlenen akış değerleri ve model sonucu elde edilen tahmin değerlerini gösteren grafik Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. En yüksek determinasyon katsayısı değerine sahip GEP-K4 modelinin gözlenen değerlerle korelasyonu

GEP-K4 için elde edilen ifade ağacı Şekil 14'te görüldüğü gibidir.



Şekil 14. GEP-K4 modelinin ifade ağacı

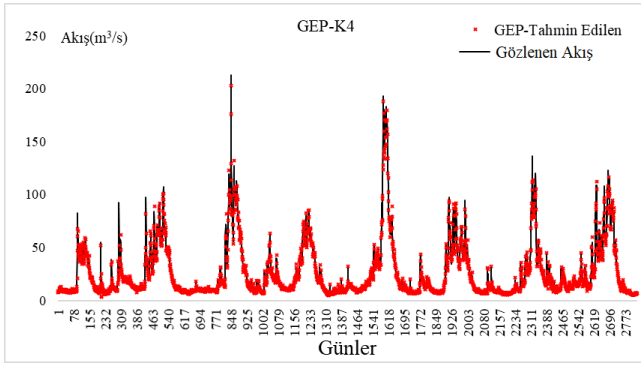
Bu ifade ağacından elde edilen modelin denklemi (7)'deki gibidir. Denklemdeki değişkenlere karşılık gelen girdiler Tablo 4'te belirtildiği gibidir.

$$\min \left[\left(\sqrt[3]{(d0^2)} \right), \left(\frac{(d4-d1+d3)}{2} + \ln \ln (d1) \right) \right] + \sqrt[3]{d1 - \frac{(d4+d2)}{2}} + \sqrt[2]{c0} + \ln \ln [\max (\sqrt[3]{d0}, \ln \ln \sqrt[3]{d1})] + d1 \quad (7)$$

Tablo 4. GEP ifade ağaçlarındaki değişkenlere karşılık gelen girdi değişkenleri

d0:	P(t)
d1:	Q(t-1)
d2:	Q(t-2)
d3:	Q(t-3)
d4:	Q(t-4)
c0:	-7,44

Model tahmin sonucu ve gözlenen akış değerlerinin zaman serisi grafiği Şekil 15'te verilmiştir.



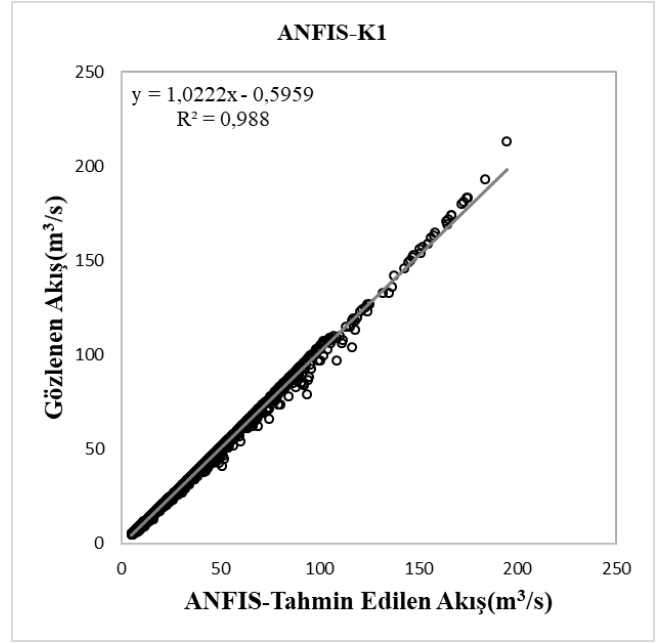
Şekil 15. Gözlenen akış değerleri ve GEP-K4 modeli ile tahmin edilen akış değerlerinin zaman serisi

Tablo 5'te verilmiş olan sonuçlara göre üzere en yüksek determinasyon katsayısı ve en düşük karekök ortalama karesel hata değerlerine sahip ANFIS modeli ANFIS-K1 olarak gözlenmiştir.

Tablo 5. ANFIS eğitim ve test sonuçları

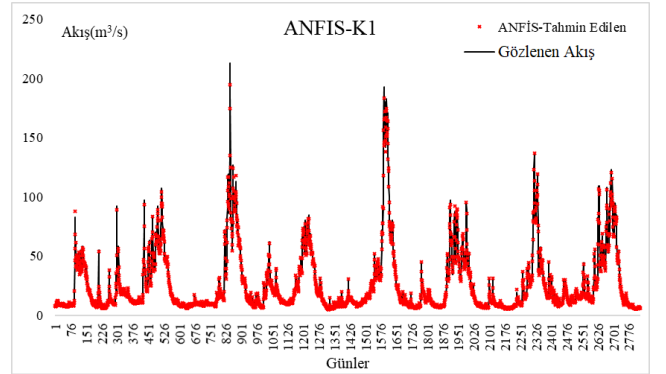
Durum	Eğitim-R ²	Eğitim-KOKH	Test-R ²	Test-KOKH
K1	0,988	4,770	0,959	4,675
K2	0,977	5,263	0,944	5,157
K3	0,955	4,994	0,889	4,894
K4	0,936	4,804	0,835	4,708
K5	0,983	5,763	0,949	5,648
K6	0,965	5,153	0,904	5,050
K7	0,942	5,926	0,848	5,808
K8	0,979	5,562	0,941	5,451
K9	0,948	4,886	0,863	4,788

ANFIS-K1 modeli için gözlenen akış değerleri ve model sonucu elde edilen tahmin değerlerini gösteren grafik Şekil 16'te gösterilmiştir.



Şekil 16. En yüksek determinasyon katsayısı değerine sahip ANFIS-K1 modelinin gözlenen değerlerle korelasyonu

Model tahmin sonucu ve gözlenen akış değerlerinin zaman serisi grafiği Şekil 17'de gösterilmiştir.



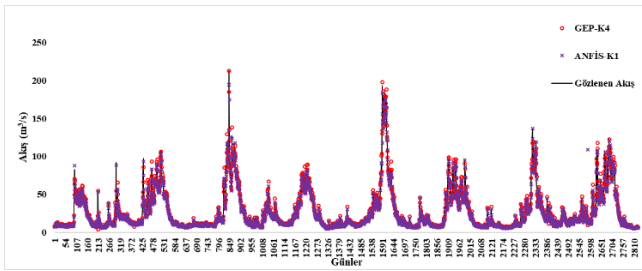
Şekil 17. Gözlenen akış değerleri ve ANFIS-K1 modeli ile tahmin edilen akış değerlerinin zaman serisi

Sonuçlar

Yapay zekâ teknikleri, su kaynakları sistemlerinin boyutlandırılması ve yönetilmesinde önemli bir rol oynayabilir. Bu teknikler, tahmin ve optimizasyon modelleri oluşturmak için kullanılabilir. Böylece su kaynakları yönetimi konusunda daha doğru ve etkili kararlar alınabilir. Bu nedenle, su kaynakları yönetimi konusunda yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri kullanmak, hem su kaynakları yönetimi hem de çevre yönetimi açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

Bu çalışmada, yağış ve akış arasındaki ilişkiyi modellemek için önceki günlerdeki yağış ve akış değerleri kullanılarak farklı senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar, yapay zekâ yöntemleri olan GEP ve ANFIS ile modellenmiş ve tahmin

sonuçları elde edilmiştir. Gözlenen akış ve modeller aracılığıyla elde edilen tahmin akış değerlerinin korelasyonunu gösteren Şekil 13 ve Şekil 16'da verilen saçılma diyagramları incelendiğinde ANFIS-K1 modelin GEP-K4 modeline göre daha az saçılma gösterdiği görülmektedir. Bu durum, ANFIS'in gerçek sonuçlara daha yakın tahminler yaptığını göstermektedir. Elde edilen model sonuçları ile gözlenen akışın zaman serisi grafiği üzerinde gösterilmesi Şekil 18'de gösterildiği gibidir. Grafikten anlaşılacağı üzere GEP ve ANFIS ile elde edilen tahmin akış, gözlenen akış ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Özellikle GEP-K4 modeli, akışın maksimum olduğu dönemleri başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Bu, modelin yağış ve akış arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde yakaladığını ve bu ilişkiyi kullanarak gelecekteki akış değerlerini tahmin etmek için etkili bir araç olduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Gözlenen akış ile modellerden elde edilen tahmini akışın zaman serisi

GEP modellemesi için belirli parametreler seçilmiştir, örneğin gen sayısı 3, kromozom sayısı 30 ve başlık uzunluğu 8 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, toplam (+) bağlantı operatörü seçilmiş ve aritmetik operatörler ve matematiksel fonksiyonlar kullanılmıştır. Elde edilen GEP modellerinden en yüksek $R^2 = 0,954$ ve en düşük KOKH=5,524 değerleriyle en iyi performans gösteren modeli K4 olarak belirlenmiştir.

ANFIS modellemesi için ise ileri beslemeli 5 katmanlı bir YSA ağı kullanılmış ve her değişken girdisi için 3 kural tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonu olarak üçgen (triangle) tipi fonksiyon seçilmiştir. En iyi performansı gösteren ANFIS-K1 modeli, girdi olarak tahmin edilen günün yağış değeri ve önceki günün akış değeri gibi parametreleri kullanmış ve en yüksek $R^2=0,988$ ve en düşük KOKH=4,770 değerlerini elde etmiştir. Elde edilen değerler ANFIS'in GEP'e göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu çalışma, yağış ve akış ilişkisini modelleme konusunda yapay zeka yöntemlerinin etkisini göstermektedir. GEP ve ANFIS gibi yapay zeka teknikleri, hidroloji alanında akış tahmini gibi önemli uygulamalarda kullanılacak güçlü araçlar olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, su kaynaklarının yönetimi, su baskını tahmini ve hidrolojik planlama gibi alanlarda karar vericilere yardımcı olabilecek değerli bilgiler sunmaktadır.

Ancak, bu çalışmanın bazı sınırlamaları da vardır. Örneğin, modelleme sürecinde kullanılan veri setinin sınırlı bir zaman aralığını kapsaması ve bölgesel farklılıkları dikkate almaması gibi sınırlamalar mevcuttur. Bu nedenle, gelecekteki

çalışmalarda daha geniş veri setleri kullanılması ve farklı bölgelerdeki verilerin de dikkate alınması önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, GEP ve ANFIS gibi yapay zeka yöntemlerinin yağış ve akış tahmini konusunda etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. Bu yöntemlerin daha fazla araştırılması ve geliştirilmesi, su kaynaklarının yönetimi ve hidrolojik planlama gibi alanlarda daha doğru ve güvenilir tahminler yapabilmemize yardımcı olabilir.

Kaynaklar

- [1] O. Fıstıkoğlu ve E. Biberoglu, *Küresel İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi ve Uyum Önlemleri*, Ankara, 2008.
- [2] M. Bayazıt, *Hidrolojik Modeller*, İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1998.
- [3] M. Bayazıt, *Hidroloji*, İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1995.
- [4] V. V. Nabyev, *Yapay Zeka: İnsan-Bilgisayar Etkileşimi*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2012.
- [5] A. Aytek, M. Alp ve M. Asce, An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling, *Journal of Earth System Science*, 117, pp. 145-155, 2008.
- [6] K. E. Lafdani, A. M. Nia, A. Pahlavanravi, A. Ahmadi ve J. Milad, Daily Rainfall-Runoff Prediction and Simulation Using ANN, ANFIS and Conceptual Hydrological MIKE11/NAM Models, *International Journal of Engineering & Technology Sciences*, 1(1), pp. 32-50, 2013.
- [7] S. K. T. Kuni ve M. C. Rainfall Runoff Modelling Using ANN and ANFIS, *International Symposium on Integrated Water Resources Management*, Kozhikode, 2014.
- [8] İ. H. İfşaat, V. Gümüş ve O. Şimşek, Evaluation of Gene Expression Method for Rainfall-Runoff Relationship: Case study of the E21A057 Station, 7. *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Şanlıurfa, 2019.
- [9] N. N. C. Razali, N. A. Ghani, S. I. Hisham, S. Kasim, N. S. Widodo ve T. Sutikno, Rainfall-Runoff Modelling Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(2), pp. 1117-1126, 2020.
- [10] R. Gerger, V. Gümüş ve S. Dere, Dicle Havzasının Yağış Akış İlişkisinin Belirlenmesinde Farklı Yapay Zeka Yöntemlerinin Değerlendirilmesi, *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), pp. 300-311, 2021.

- [11] ALOS PALSAR – Coverage Maps, [Çevrimiçi]. Available: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-coverage-maps/>. [Erişildi: 6 Mayıs 2023].
- [12] C. Ferreira, Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems, *Complex Systems*, 13(2), pp. 87-129, 2001.
- [13] J. R. Koza, Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- [14] C. Ferreira, Gene-expression programming: Mathematical modeling by an artificial intelligence., Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [15] L.-Y. Wei, A Hybrid ANFIS Model Based on Empirical Mode Decomposition For Stock Time Series Forecasting, *Applied Soft Computing*, pp. 368-376, 2016.
- [16] J. Jang, ANFIS: Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, *IEEE Transactions on Systems*, pp. 665-685, 1993.
- [17] M. Waqas, M. Saifullah, S. Hashim, M. Shoaib, A. Naseem ve M. Khan, Modelling of Rainfall-runoff process by GEP, RBF-SVM and M5 model tree in Jhelum River Basin, Pakistan, *CEWRE/ICHWR*, 21(16), pp. 105-115, 2021.



Dynamic Analysis Of Historical Sultan Hamit Masonry Arch Bridges

Çağrı Onur ÖZTÜRK¹, Senem YILMAZ ÇETİN^{2*}, Erkut SAYIN³

¹Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü, cagronurozturk@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-2385-4370

²Dicle University, Civil Engineering Department, senyilmaz@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-7282-6413

³Firat University, Civil Engineering Department, esayin@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0266-759X

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 June 2023

Received in revised form 11 September 2023

Accepted 25 September 2023

Available online 30 September 2023

Keywords:

Macro modelling, linear dynamic analyses, masonry stone bridge

Doi: 10.24012/dumf.1314957

* Corresponding author

ABSTRACT

There are many historical bridges belonging to various civilizations in our country. Historical bridges also help us understand the sociological, economic and cultural structures of civilizations that lived from past to present. Some of the historical bridges have been deformed due to natural events and human factors and some have been destroyed. It is extremely important to know the behavior of these bridges against earthquakes, since a large part of our country is located in a region with high earthquake risk. For this reason, the dynamic behavior of structures is examined with numerical and experimental studies, and earthquake analyses are made using earthquake acceleration records obtained from past earthquakes. With the result of these studies, it is aimed to strengthen the weak parts of the structures. Therefore, it is necessary to evaluate the behavior of historical masonry bridges that have survived to the present day, in order to carry out restoration and protection. In this study, the historical Sultan Hamit I-II and III bridges in the Askale district of Erzurum province are examined. These bridges were modeled in three dimensions using the SAP2000 finite element program. First of all, static analyses of the bridges under their own weight were performed. The dynamic properties of the bridges were determined by using modal analyses. After the dynamic properties of the bridges were obtained, dynamic analyses were evaluated with time-history analysis.

Introduction

It is seen that masonry structures are used quite widely in the past. These structures are constructed such as brick, stone and mud in which brick and stone are used as a load-bearing system. Although the structures used today are generally reinforced concrete, masonry type structures are still used extensively in rural areas. Historical bridges have been an important part of both cultural heritage and transportation since their construction. It is necessary to take protective measures in order the historical structures not to be damaged, that have experienced many natural disasters. When structures of madrasahs, bridges, mosques, churches etc., are examined, which have survived from ancient times to the present, it is seen that almost all of them are constructed with the masonry technique. Masonry structures do not consist of load-bearing walls formed with homogeneous mixtures like reinforced concrete structures. For this reason, the analysis methods to be used in their examination are different when considered steel or reinforced structures. However, modeling of load-bearing elements in heterogeneous structures is quite difficult. For this reason, it is great importance to know all aspects of the mechanical behavior of masonry structures. In addition, the cracking patterns that will occur on the walls may vary

depending on the force they are affected, due to the heterogeneity. In this context, many studies have been carried out on historical masonry structures in recent years. Riva et al. [1] using the ABAQUS program, examined the Asinelli Tower in Bologna, Italy, with macro modeling technique and gave information about the seismic behavior of the tower. The Griffith Bridge in Ireland was investigated by Fanning and Boothby [2] using the distributed crack model, and as a result of this study, the bearing structures of the bridge were modeled. The bridge's behavior under static loads has been investigated. It was determined that the model made reflects the bridge behaviors. Galasco et al. [3] performed the 3D modeling of historical masonry bridges and buildings with the nonlinear macro modeling method, compared the modeling with the experimental data, and obtained reliable results. Aoki et al. [4] investigated the dynamic analysis of the three-span stone arch Rakanji Bridge in Japan, using the finite element method. With the environmental vibration test, accelerometers were placed in certain parts of the bridge and vibration records were taken. Thus, the experimental dynamic properties of the structure (mode shapes, damping ratios and frequency) were determined. As a result of the studies, the experimental and theoretical dynamic properties of the bridge were

compared. Karaton et al. [5] performed the dynamic analysis of historical masonry Malabadi Bridge under different earthquake loads, and evaluated the nonlinear seismic responses of the bridge. Tubaldi et al. [6] analysed the geometric and mechanical strength and the collapse of the bridge piers on multi-span masonry bridges. Sayın et al. [7] examined the historical Uzunok Bridge in Malatya with the macro modeling method, and performed linear and non-linear analyses using the acceleration records of the 2003 Bingöl earthquake. Castellazzi et al. [8] improved the finite element model in their study and applied it to a 15-span railway bridge. According to this study, the current structural condition of the bridge and the strengthening works were evaluated. Korkmaz et al. [9] analysed the Timisyat Bridge in Rize with the finite element method by modeling it in three dimensions and aimed to determine the behavior of stone arch bridges under seismic loads. Ten earthquake accelerations were used for the seismic effect in the study, in which dynamic analyses were performed in the time history method. As a result of the study, the stress and displacement data determined separately for each earthquake record and these results were evaluated. Çakır and Uysal [10] evaluated the modal parameters and dynamic responses of reinforced brick masonry arches using experimental and numerical tests. Çalık et al. [11] evaluated the historical Küçük Fatih Mosque in Trabzon and applied vibration tests before and after the renovation. The benefits of ambient vibration tests in improving the finite element model and the structure behavior were examined. Türker et al. [12] investigated the dynamic behavior of the masonry arch bridge model, which was created in the laboratory at 1/10 scale, using experimental and analytical methods. For this purpose, a finite element model of the bridge was created using the SAP2000 program. Dynamic properties were determined by making modal analysis on the bridge model. Experimental dynamic properties of the structure (mode shapes, damping ratios and frequency) were determined by the environmental vibration test. As a result of the study, comparisons were made between the experimental and analytical results, and it was seen that there were differences in terms of frequencies. Özkaya et al. [13] investigated the seismic behavior of the historical Kireçli Bridge in their study. Three dimensional finite element model of the bridge was generated and nonlinear dynamic and static pushover analyses were performed on the model. In these analyses, the greatest displacement occurred in the middle region of the bridge. Onat and Sayın [14] examined the dynamic behavior of the historical Tağar Bridge in their study. For this purpose, they created a three-dimensional finite element model of the bridge using the ANSYS finite element program. Linear and non-linear seismic analyses of the Tağar Bridge were carried out. Güllü [15] examined the behavior of the historical Cendere Bridge under seismic effects in the study. For this purpose, a finite element model of the bridge was created using the SAP2000 program.

The study showed that the tensile strength of the bridge can be exceeded in the arch part. Öncü et al. [16] examined the historical Tuzluca Bridge, which has a single span, using the ANSYS program, formed the three-dimensional model

of the bridge and evaluated its behavior under the dynamic and static loads. As a result of the study, the limited damage performance level of the bridge was examined. Gönül and Sakcalı [17] examined the historical Irgandı Bridge in Bursa. The bridge was modelled with the finite element technique. ANSYS program was used for the analysis and the stress distributions and displacements of the bridge was obtained. On the other hand, there are several numerical studies about masonry arch bridges in the recent literature [18-21]

In this study, the historical masonry Sultan Hamit I, II and III Bridges in the Askale district of Erzurum province, those have a single span, were evaluated numerically (Figure 1). These bridges are located at close distances to each other. Three dimensional finite element model of the bridges were generated with SAP2000. Static analyses of the bridges were obtained under their own weight, and natural vibration frequencies, period and mode shapes were determined by modal analysis. In addition, earthquake analyses of the bridges were evaluated with two different earthquake records. For the dynamic analyses, 1992 Erzincan and 2020 Elazığ earthquakes acceleration records was considered as a seismic effect. The damping in the bridges is assumed to be Rayleigh type damping. Also, potential damage areas were evaluated considering the stress distributions obtained from the dynamic analyses.

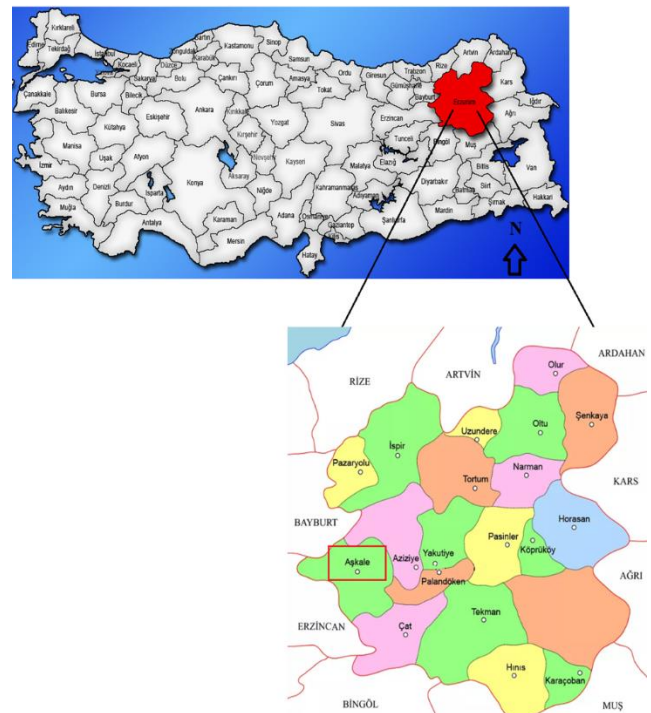


Figure 1. Location of the bridges

Structural Features of Sultan Hamit I Bridge

Sultan Hamit I Bridge, which is approximately 6.3 m wide and 16.5 m long, has an arch span of 3.0 m from the thalweg level of the river (Figure 2). The span width of the bridge is 6.9 m and the arch thickness of the bridge is approximately 0.60 m. There is a rubble masonry lined up around the beginning and end connections located at the lower parts of

the tempam walls of the bridge. However, the cut stone weave texture is seen at the upper parts of the bridge. The original construction material used in the bridge is generally basalt stone. It is thought that the bridge was built during the Ottoman period in the 20th century. It is located approximately 20 km southwest of Aşkale district of Erzurum province. The geometric features of the Sultan Hamit I Bridge is given in the Figure 3.



Figure 2. Sultan Hamit I Bridge

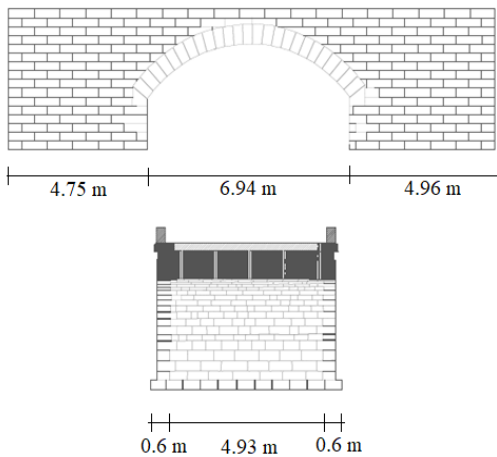


Figure 3. Geometric properties of Sultan Hamit I Bridge

Structural Features of Sultan Hamit II Bridge

Sultan Hamit bridge, which has a single arch span, has a height of 5.2 m from the thalweg level of the river. The span width of the arch is 3.2 m, while its height from the stirrup line is approximately 1.55 m. The bridge is shown in Figure 4. The tempam walls of the historical bridge were built using coarse stone and the filling part was built using rubble material. In the bridge, basalt stone is used for the construction material. It is thought that the bridge was built in the 20th century during the Ottoman period. It is located approximately 20 km southwest of Aşkale district of Erzurum province. The geometric features of the Sultan Hamit II Bridge is shown in the Figure 5.



Figure 4. Sultan Hamit II Bridge

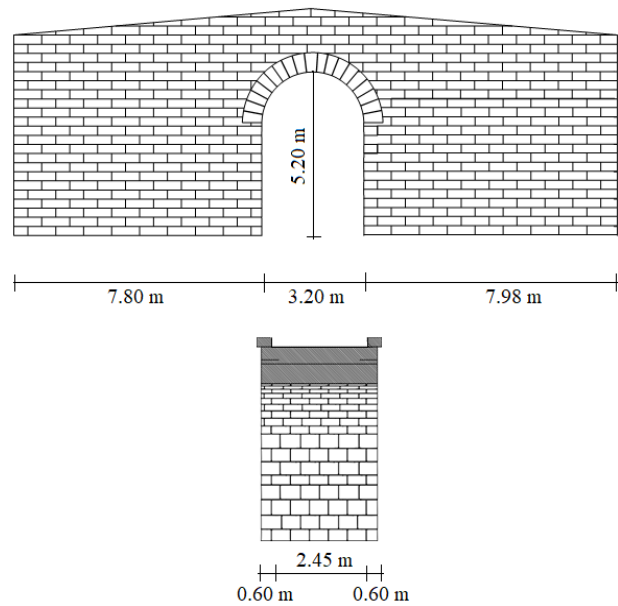


Figure 5. Geometric properties of Sultan Hamit II Bridge

Structural Features of Sultan Hamit III Bridge

Sultan Hamit III Bridge, which is approximately 7.2 m wide and 10.5 m long, has an arch span of 4 m based on the thalweg level of the river. The span width of the bridge is 3 m and the arch thickness of the bridge is approximately 0.4 m. There is a row thin face stones on the upper level of the arch keystone. There is no water flow on the river bed and it is filled with gravel and rubble. Basalt was used as the construction material at the Sultan Hamit III Bridge. This bridge was built in the 20th century during the Ottoman period. Like other bridges, it is located 20 km southwest of Aşkale. It is shown in Figure 6. Also, the geometric features of the Sultan Hamit II Bridge is given in the Figure 7.



Figure 6. Sultan Hamit III Bridge

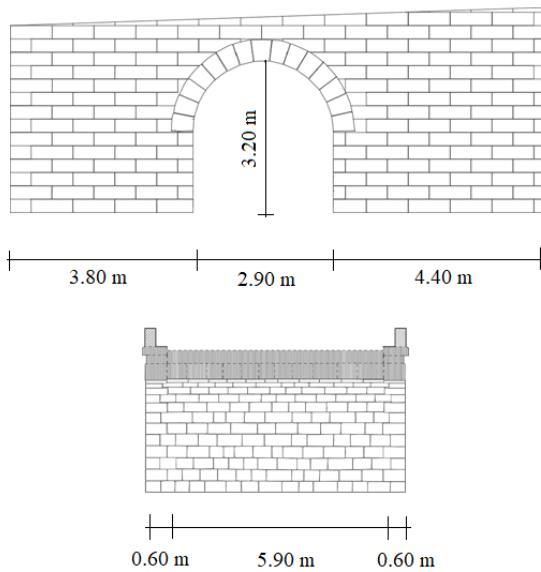


Figure 7. Geometric properties of Sultan Hamit III Bridge

Modeling and analysis methods of historical masonry structures

Three-dimensional modeling is used in historical masonry structures to obtain more realistic results. Three modelling approaches are generally used for numerical analyses of historical structures. Detailed micro modeling is more suitable for modelling to smaller structures or part of the large structures. Therefore, micro modeling is used when a detailed analysis of a part of the structure or its structural elements is needed [22]. When we consider the macro modeling method, it provides more accurate results because all structural factors are considered as a composite element without any distinction between blocks, bricks, stones and mortar. It can reflect the common properties of these factors. The macro modeling method takes less time than the micro modeling method as an analysis process. Therefore, it is frequently preferred for big structures. This method neglects the interaction between the mortar and masonry elements and considers all of them as a composite. However, when the literature is examined, it was seen that the macro modeling technique is frequently used in the numerical analysis of large historical structures [23, 24].

Sultan Hamit bridges are modeled with SAP2000 program using a hexahedral eight-node solid element, with three degrees of freedom at each node. The bridges are modelled with the macro modeling method. Three-dimensional model of the bridges is composed of four elements: arch, filler, floor and side walls. In the finite element model of the bridges all degrees of freedom were taken into account to be fixed at the ground level. In this study, the material properties of the bridges were taken in the literature [25]. Table 1 show the material properties of the bridges.

Table 1 Material properties of Sultan Hamit bridges [25]

Material properties	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio	Density (kg/m ³)
Arch	2109	0.20	2350
Tempan wall	2209	0.20	2350
Filling	1800	0.15	1600
Slab	2209	0.20	2350

Sultan Hamit I Bridge

Sultan Hamit I Bridge model is generated using 3627 nodal points and 2796 solid elements. Three dimensional model of the bridge was shown in Figure 8.

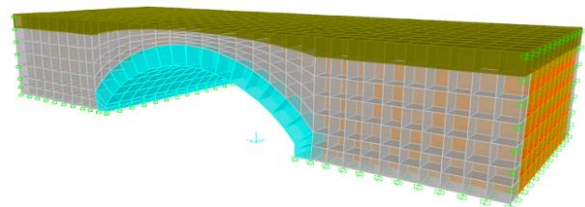


Figure 8. Three dimensional model of the Sultan Hamit I Bridge

Sultan Hamit II Bridge

Sultan Hamit II Bridge model is modeled using 4383 nodal points and 3392 solid elements. Three dimensional model of the bridge was given in Figure 9.

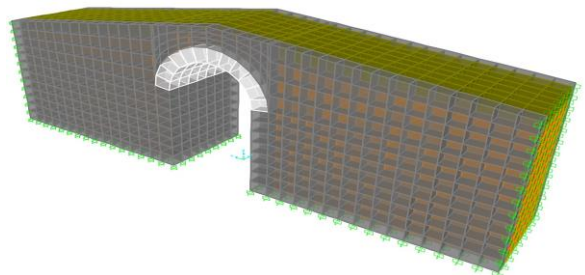


Figure 9. Three dimensional model of the Sultan Hamit II Bridge

Sultan Hamit Bridge III

Sultan Hamit III Bridge model is modeled using 3040 nodal points and 2310 solid elements. Three dimensional model of the bridge was presented in Figure 10.

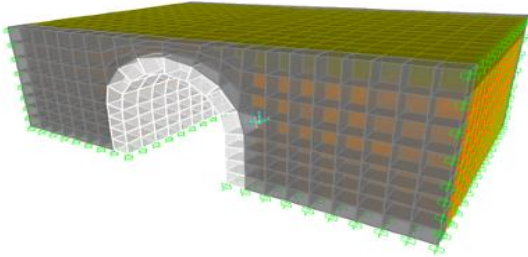


Figure 10. Three dimensional model of the Sultan Hamit III Bridge

RESEARCH FINDINGS

Static Analysis of Sultan Hamit I-II-II Bridges

Static analyses of Sultan Hamit bridges were carried out under their own weight. Static analyses of the bridges were made under their own weight according to the material properties presented in Table 1. Maximum displacement, maximum tensile and compressive stresses that occur as a result of the analyses of the bridges are discussed in this section.

After the static analysis of Sultan Hamit I Bridge, it is observed that the maximum vertical displacement occurred in the middle of the bridge span in the z-axis direction. The maximum displacement was calculated as 0.4654 mm. When the maximum tensile and compressive stresses of the bridge are examined, the maximum tensile and compressive stress were obtained as 68.867 kPa and 326.864 kPa, respectively.

For the Sultan Hamit II Bridge, it is observed that the maximum vertical displacement obtained in the middle of the bridge span in the z-axis direction. The maximum vertical displacement was calculated as 0.3027 mm. The maximum tensile and compressive stress of the bridge were acquired as 133.395 kPa and 182.358 kPa, respectively.

After the static analysis of Sultan Hamit III Bridge, the maximum vertical displacement occurred in the middle of the bridge span. The maximum vertical displacement was calculated as 0.1579 mm. After the analysis, the maximum tensile and compressive stress of the bridge were obtained as 83.717 kPa and 119.869 kPa, respectively.

Modal Analysis of Sultan Hamit I-II-II Bridges

Analytical modal analyses were performed for determining the dynamic characteristics of the Sultan Hamit Bridges. As a result of the analyses free vibration periods, mass participation ratios and mode shapes of the bridges were calculated for the first 100 modes. The sum of the calculated effective mass participation ratios was found to be more than 90% of the total mass of the bridges for 100 modes.

Sultan Hamit Bridge I modal analysis results

The period values of the first three modes of the bridge were calculated as 0.03744 s, 0.03666 s and 0.02965 s, respectively. The frequency values and mode shapes of the first 3 modes of Sultan Hamit I Bridge were presented in Figure 11.

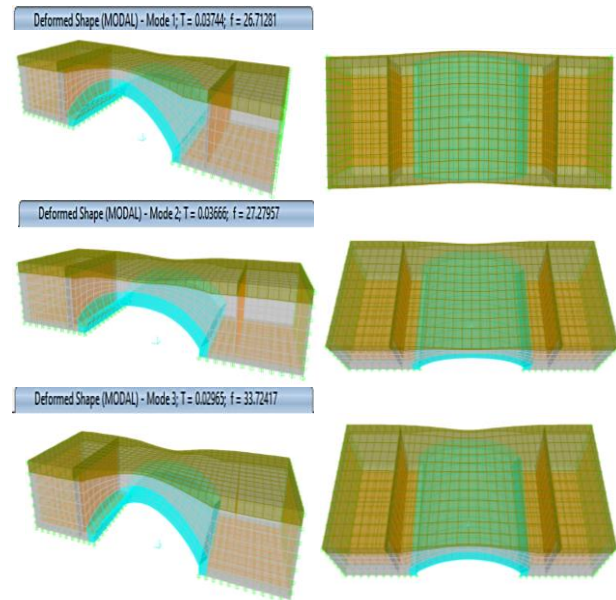


Figure 11. Frequency values and mode shapes of the first 3 modes of Sultan Hamit I Bridge

Sultan Hamit II Bridge modal analysis results

The period values of the first three modes of the bridge were found as 0.09584 s, 0.05741 s and 0.04434 s, respectively. The frequency values and mode shapes of the first 3 modes of the Sultan Hamit II Bridge were shown in Figure 12.

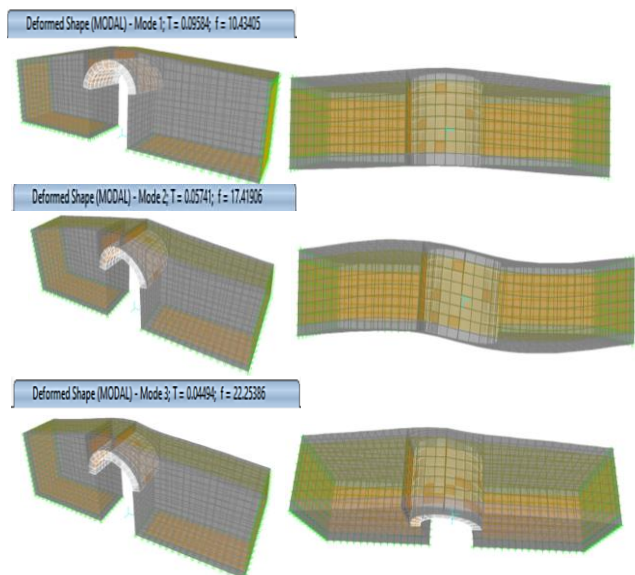


Figure 12. Frequency values and mode shapes of the first 3 modes of Sultan Hamit II Bridge

Sultan Hamit III Bridge modal analysis results

The period values of the first three modes of the Sultan Hamit III Bridge were calculated as 0.02721 s, 0.02063 s and 0.01877 s, respectively. The frequency values and mode shapes of the first 3 modes of the bridge were given in Figure 13.

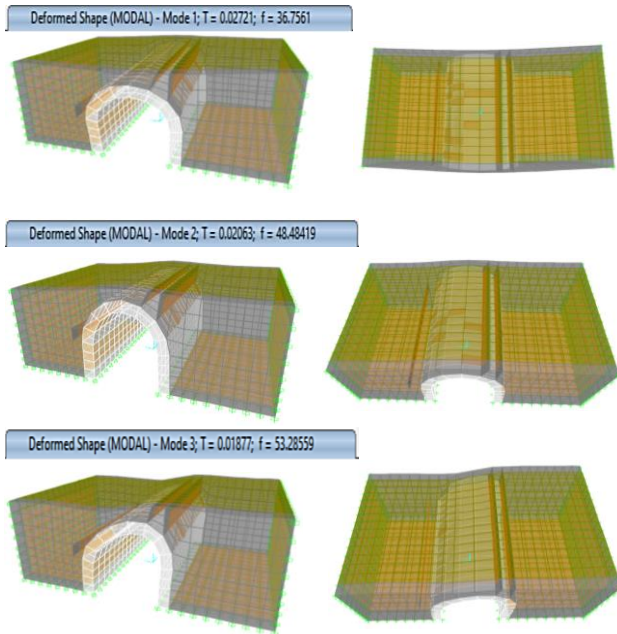


Figure 13. Frequency values and mode shapes of the first 3 modes of Sultan Hamit III Bridge

Dynamic Analysis of Sultan Hamit I-II-II Bridges

For the dynamic analysis of Sultan Hamit Bridges, the acceleration records of the 1992 Erzincan and 2020 Elazığ earthquakes were used for the time history analyses. SAP2000 finite element software was used in the dynamic analyses. In the analyses, the integration time step was chosen as 0,01 s. Also, HHT- α algorithm was used for the analysis. In the dynamic analyses, 5% damping ratio was used for the Rayleigh damping coefficients. East-West component of the earthquakes were applied in the y direction of the bridge. As a result of the analyses, the maximum stress and displacements occurring on the bridge were examined. For the displacements three nodal points which are top of the bridges were selected. These nodal points number are 1087, 1025 and 3258 for Sultan Hamit I, II and III Bridge, respectively. Maximum displacement values for 1992 Erzincan and 2020 Elazığ earthquakes were given in Figure 14 and 15 for Sultan Hamit I bridge. Maximum displacement values for the same earthquakes were shown in Figure 16 and 17 for Sultan Hamit II Bridge. For Sultan Hamit III Bridge, the maximum displacements were presented in Figure 18 and 19 for Erzincan and Elazığ earthquakes.

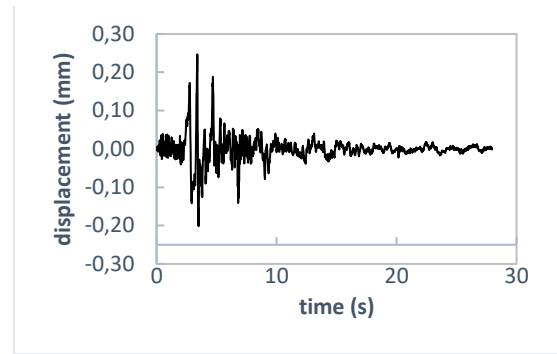


Figure 14. The displacement graph of the nodal point 1087 for the Erzincan earthquake

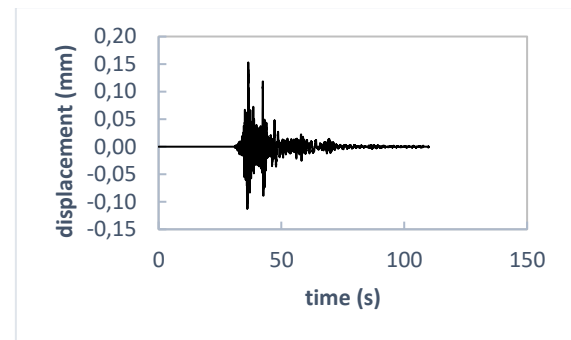


Figure 15. The displacement graph of the nodal point 1087 for the Elazığ earthquake

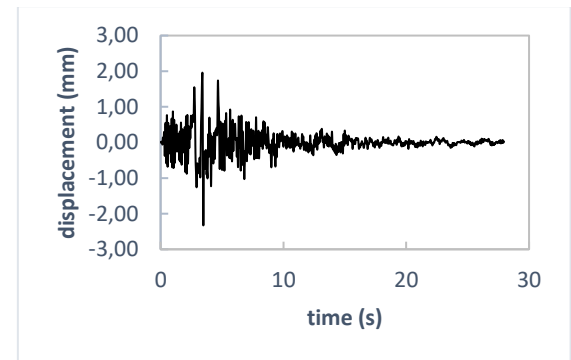


Figure 16. The displacement graph of the nodal point 1025 for the Erzincan earthquake

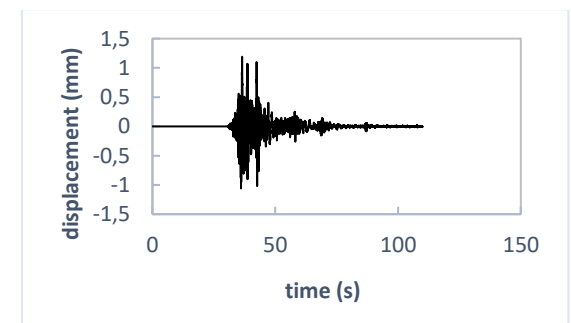


Figure 17. The displacement graph of the nodal point 1025 for the Elazığ earthquake

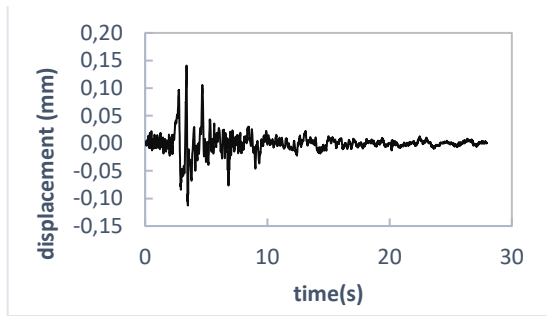


Figure 18. The displacement graph of the nodal point 3258 for the Erzincan earthquake

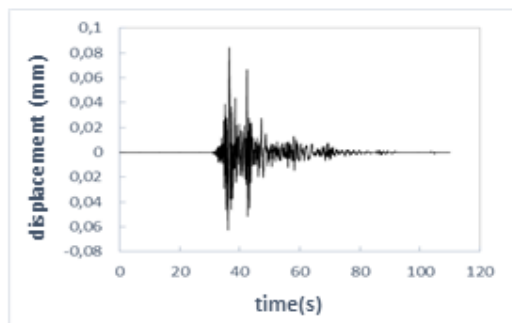


Figure 19. The displacement graph of the nodal point 3258 for the Elazığ earthquake

Also, the maximum compressive and tensile stress values of the bridges for the 1992 Erzincan and 2020 Elazığ earthquakes were given in Table 2.

Table 2 Analysis results

	1992 Erzincan		2020 Elazığ	
	Max. com. stress (kPa)	Max ten. stress (kPa)	Max. com. stress (kPa)	Max. ten. stress (kPa)
Sultanhamit I	497.36	318.72	428.90	319.13
Sultanhamit II	862.07	681.18	556.78	449.58
Sultanhamit III	215.75	143.44	177.37	113.80

Results

In this study, the static and dynamic analyses of the historical Sultan Hamit Bridges located in the Askale district of Erzurum province were investigated. Three dimensional model of the bridges and analyses were obtained with SAP2000 program. First of all, static analyses of the bridges under their own weight were performed. Also, natural frequencies, periods and mode shapes of the bridges were determined by modal analysis. In the dynamic analyses of the bridges were obtained by using the 1992 Erzincan and 2020 Elazığ earthquakes' acceleration records. Maximum displacement and stress values of the historical bridges were investigated according to the different earthquake accelerations. After the dynamic analyses maximum displacement values were determined

under the 1992 Erzincan earthquake's acceleration records for the Sultan Hamit I, Sultan Hamit II and Sultan Hamit III bridges. Similar studies will contribute to the transfer of cultural heritage to future generations.

Thanks

We would like to thank the (General Directorate of Highways/12. Region) for their support within the scope of the study.

References

- [1] P. Riva, F. Perotti, E. Guidoboni & E. Boschi., "Seismic Analysis of the Asinelli Tower and Earthquakes in Bologna", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17 (7-8), 525–550, 1998.
- [2] P. J. Fanning and T. E. Boothby, "Three-Dimensional Modeling and Full-scale Testing of Stone Arch Bridges", *Computers and Structures*, 79 (29), 2645–2662, 2001.
- [3] A. Galasco, S. Lagomarsino, A. Penna & S. Resemini, "Non-linear seismic analysis of masonry structures". *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, (843), Canada, 2004.
- [4] T. Aoki, T. Komiyama, D. Sabia & D. Rivella, "Theoretical And Experimental Dynamic Analysis Of Rakanji Stone Arch Bridge, Honyabakei, Oita, Japan", *7th International Conference on Motion and Vibration Control*, 2004.
- [5] M. Karaton, H. S. Aksoy, E. Sayın & Y. Calayır, "Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels", *Engineering Failure Analysis*, 79: 408-421, 2017.
- [6] E. Tubaldi, E. Minga, L. Macorini & B. A. Izzuddin, "Mesoscale analysis of multi-span masonry arch bridges", *Engineering Structures*, 225 (November 2019), 111137, 2020
- [7] E. Sayın, M. Karaton, B. Yön ve Y. Calayır, "Tarihi Uzunok Köprüsünün Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi". *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, 2011.
- [8] G. Castellazzi, S. De Miranda & C. Mazotti, "Finite Element Modelling Tuned on Experimental Testing for the Structural Health Assessment of an Ancient Masonry Arch Bridge", *Mathematical Problems in Engineering*, doi:10.1155/2012/495019, 2012.
- [9] K. A. Korkmaz, P. Zabin, A. I. Çarhoğlu, ve A. Nuhoğlu, "Taş Kemer Köprülerin Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi Timisvat Köprüsü Örneği", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 66-75, 2013.
- [10] F. Çakır and H. Uysal, "Experimental Modal Analysis of Brick Masonry Arches Strengthened Prepreg Composites", *Journal of Cultural Heritage*, doi:10.1016/j.culher.2014.06.003, 2014.
- [11] İ. Çalık, A. Bayraktar, T. Türker & H. Karadeniz, "Structural Dynamic Identification of a Damaged and Restored Masonry Vault Using Ambient Vibrations", *Measurement*, 55, 462-472, 2014.

- [12] T. Türker, A. Bayraktar, İ. Kocaman ve B. Çoruhlu, “Ölçekli Yığma taş kemer köprü modelinin dinamik davranışının deneysel ve analitik olarak incelenmesi”. 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi Ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Erzurum, 2015.
- [13] S. G: Özkaya, İ. Kazaz ve D. Okuyucu, “Kemerli Yığma Köprüünün Sismik Davranışının Sonlu Eleman Yöntemiyle İncelenmesi”, 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu* (43-57), Erzurum, 2015.
- [14] O. Onat ve E. Sayın, “Tarihi Tagar Köprüsünün Doğrusal Olmayan Sismik Analizi”. 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Erzurum, (301-312), 2015.
- [15] H. Güllü, Tarihi Yığma Yapılı Cendere Köprüsünün Deprem Etkisinin İncelenmesi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 245-259, 2017.
- [16] M. E. Öncü, A. H. Kardeşin ve B. Kardeşin, “Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi”. 4. *Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 2019.
- [17] G.B. Sakcalı, A. Gönül, İ. Yüksel, “*Seismic behavior of historical masonry bridges: The case study of Irgandı Bridge*”. *International Journal of Architectural Engineering Technology* 2019; 6: 24-32.
- [18] B. Pulatsu, E. Erdogmus, P.B. Lourenço, “Comparison of in-plane and out-of-plane failure modes of masonry arch bridges using discontinuum analysis”, *Eng Struct* 178:24-36, 2019.
- [19] A. Özmen, E. Sayın, “Seismic response of a historical masonry bridge under near and far-fault ground motions”, *Period Polytech Civil Eng* 65:946–958, 2021, <https://doi.org/10.3311/PPci.17832>.
- [20] E. G. Çubuk, E. Sayın, A. Özmen, “Dynamic Analysis of Historical Masonry Arch Bridges under Different Earthquakes: The Case of Murat Bey Bridge,” *Turkish J. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 461-473, 2022.
- [21] K. Akın, E. Sayın, A. Özmen, “Farklı sönüm tipleri altında tarihi yığma köprülerin sismik tepkilerinin değerlendirilmesi”, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 34(1): 45-59, 2022.
- [22] P. B. Lourenço, “*Structural behavior of civil engineering structures: Highlight in historical and masonry structure*”.s. Universidade do Minho, Portugal, 2000.
- [23] L. Pela, A. Aprile & A. Benedetti, “Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges,” *Construction and Building Materials*. 38, 381-394, 2013.
- [24] P. Zampieri, M. A. Zanini & C. Modena, “Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges,” *Bull Earthquake Engineering*. 13(9), 2629-2646, 2015.
- [25] A. Y. Kanbur, “*Tek açıklıklı tarihi bir köprüünün dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2021.



Gördes Alt Havzası Akışlarının Modellenmesinde Era5-Land Verilerinin Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation of Era5-Land Data for Modeling Gördes Basin Flows

Destina Dilan Ekinci^{1*}, Okan Fıstıkoğlu²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, destinadilan.ekinci@ogr.deu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6794-6373>

² Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, okan.fistikoglu@deu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9483-1563>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Temmuz 2023
Revizyon 28 Ağustos 2023
Kabul 1 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Era5-Land, Abed Modeli, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Gördes Alt Havzası

İklim değişikliğinin akarsu akımları üzerindeki etkilerinin hidrolojik modeller yardımıyla belirlenmesinde küresel atmosferik veri setlerinden sıklıkla faydalanılmaktadır. Sunulan çalışmada, Ege bölgesinde yer alan Gördes Alt Havzası akımlarının hem küresel veri setleri hem de yerel istasyon verileri ile akışlarının modellenmesi ve bu model sonuçları dikkate alınarak performansın değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Küresel veri seti olarak ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) tarafından sunulan 1959-2022 yılları arasında veri sağlayan ERA5 Land veri seti ve hidrolojik model olarak da ABCD aylık yağış akış modeli kullanılmıştır. Model performansını değerlendirmek için Nash-Shutcliffe performans fonksiyonu seçilmiş olup optimum model parametrelerin tahmini için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (PSO) kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular ERA5 Land veri setinin Gördes Alt Havzası'nın aylık akımlarının modellenmesinde havzanın hidrolojik özelliklerini başarılı bir şekilde yansıttığı ve bu veri setini kullanmanın modelleme çalışmalarında kolaylaştırıcı olacağı gösterilmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 15 July 2023
Received in revised form 28 August 2023
Accepted 1 September 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Era5-Land, Abed Model, Particle Swarm Optimization, Gordes Basin

Global atmospheric data sets are frequently utilized in determining the effects of climate change on river flows with the help of hydrological models. In the present study, it is aimed to model the flows of Gördes Basin, located in the Aegean region, with both global data sets and local station data and to evaluate the performance of these model results. The ERA5 Land dataset, which provides data between 1959 and 2022 provided by ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), was used as the global dataset and the ABCD monthly rainfall-runoff model was used as the hydrological model. Nash-Shutcliffe performance function was selected to evaluate the model performance and Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO) was used to estimate the optimal model parameters. The findings of the study show that the ERA5 Land dataset successfully reflects the hydrological characteristics of the basin in modeling the monthly flows of Gordes Basin and that using this dataset will facilitate modeling studies.

Doi: 10.24012/dumf.1327255

* Sorumlu Yazar

GİRİŞ

Tarihsel hidrometeorolojik gözlemler insan nüfusundaki artışın, kentsel büyümenin ve iklim değişiminin temiz su kaynakları üzerindeki baskıları arttırdığı, su miktarının ve niceliğinin azalması nedeniyle hem kırsalda yaşayan nüfus için hem de alternatif su kaynaklarına ulaşımı güç olan kentsel nüfus için endişe verici bir durumun oluştuğunu göstermektedir [1]. Ayrıca toprak yapısının bozulması, erozyon şiddeti ve toprak verimliliğinin düşmesi de söz konusu olumsuz durumun şiddetlenmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda tekrarlayan gıda güvenliği sorunları gibi toplum için ciddi sonuçlar doğurabilecek durumlar ortaya çıkmaktadır [2]. Bu noktada hidrometeorolojik süreçlerin doğru anlaşılması, sürdürülebilirliğin sağlanması açısından büyük önem arz etmektedir. İklim değişikliği veya arazi kullanımındaki değişimler gibi küresel ya da yerel ölçekte yaşanan değişiklikler nedeniyle, akarsu havzalarının gelecek dönemlerdeki hidrolojik davranışlarını tahmin edebilmek için hidrolojik model kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

Hidrolojik modeller, su kaynaklarının yönetimi ve su döngüsünün anlaşılması için geliştirilmiş önemli araçlardır. Modelleme yaklaşımı, yağış, buharlaşma, sızma, yüzeysel akış ve yeraltı suyu akışı gibi havza çapında gerçekleşen hidrolojik süreçlerin davranışlarını analiz ederek bunları belli bir ölçek dahilinde taklit eden basitleştirilmiş denklemlere dayanmaktadır. Hidrolojik modelleme, su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sınanması, su kalitesinin ve niceliğinin tahmin edilmesi, iklim değişikliğinin hidrolojik sistemlere etkilerinin değerlendirilmesi gibi birçok alanda su kaynakları araştırmacıları ve planlamacılarına önemli katkılar sunmaktadır. Literatürde, su havzalarında gerçekleşen hidrolojik çevrimi modelleyen, zaman ve mekân çözünürlüğü farklı, bünyelerinde muhtelif denklemler ve parametreler barındıran çok çeşitli modeller yer almaktadır [3]. Uygun modelin seçiminde en az parametre ile en tutarlı sonuçlar üreten tutumlu modeller belirleyici olmaktadır. Ayrıca bu modellerin veri ihtiyacı ve uygulama kolaylığı da model seçiminde önemli bir kriteri oluşturmaktadır [4].

Modellemenin başarılı olması için modelin doğru kurulmasının yanı sıra kullanılan verilerin havzanın hidrometeorolojik özelliklerini en iyi şekilde yansıtmaları gerekmektedir. Bu nedenle modelleme çalışmalarında genellikle yerel hidrometeorolojik istasyon gözlemlerinden yararlanılmaktadır. Ancak bu istasyon verilerine erişim bazen zor olabildiği gibi bazen de çeşitli nedenlerden ötürü eksik ya da hatalı veriler yer alabilmektedir. Son yıllarda erişimin daha kolay olduğu ve eksik verilerin yer almadığı küresel veri setlerinin modelleme çalışmalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. Söz konusu veri setleri, istasyon gözlemleri, uydu görüntüleri ve hidrometeorolojik model çıktıları gibi pek çok farklı kaynaktan elde edilen verinin küresel ölçekte tutarlı hale getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Öte yandan bazı durumlarda bu küresel veri setleri, çalışma alanının hidrometeorolojik koşullarını tam olarak temsil edememekte, dolayısıyla doğrudan kullanımı iyi sonuçlar vermemektedir [5]. Bu nedenle seçilen küresel veri setinin çalışma bölgesini yeterli doğruluk ve çözünürlükte temsil

edebildiğinin mutlaka sınanması gerekmektedir. Günümüzde farklı kaynaklardan sağlanan birçok küresel veri seti mevcuttur. Bu veri setlerinin arasında, oluşturulurken kullanılan interpolasyon teknikleri ve istasyon sayılarından kaynaklı farklılıkları bulunmaktadır [6]. Modelleme çalışmalarında seçilen havza ve model için en iyi performansı elde edebilmek adına, kullanılan küresel veri setlerinin uygunluğunun iyi değerlendirilmesi gerekmektedir [7]. Araştırmacılar tarafından bu küresel veri setlerinin istatistiksel analizleri ve farklı çalışma alanları için uygunluğunun tespiti üzerine kurgulanmış birçok çalışma mevcuttur [8]. Yapılan çalışmalar, küresel veri setleri arasından European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) tarafından sunulan ERA-Interim en iyi performans gösteren veri setleri arasında olduğunu göstermiştir [9]. Güncel çalışmalarda ise ECMWF tarafından sağlanan veri setlerinden güncel olan ERA5 ve ERA5-Land veri setlerinin, ERA5-Interim veri setine oranla daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [10] [11].

Sunulan çalışmada, ERA tipi küresel hidrometeorolojik veri setinin Gediz Havzası'nda yer alan Gördes Alt Havzası'nın aylık akımlarının modellenmesinde kullanılarak, veri setinin zaman ve mekân tutarlılığı ile bölgesel temsiliyetinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada ECMWF tarafından sağlanan, çözünürlük açısından European ReAnalysis (ERA5)'in geliştirilmiş bir versiyonu olan yaklaşık 9 km çözünürlüklü ERA5-Land arazi yüzeyi veri seti kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında arazi yüzeyi, su ve enerji akımlarının bütçe hesaplarının yapıldığı önemli bir biriktirme elemanıdır [12]. Bu nedenle küresel çapta ve yüksek çözünürlükte arazi yüzeyi ile hidrometeorolojik akımların belirlenmesi ve kullanıma sunulması hidrolojik modelleme çalışmalarına önemli katkılar sunmaktadır.

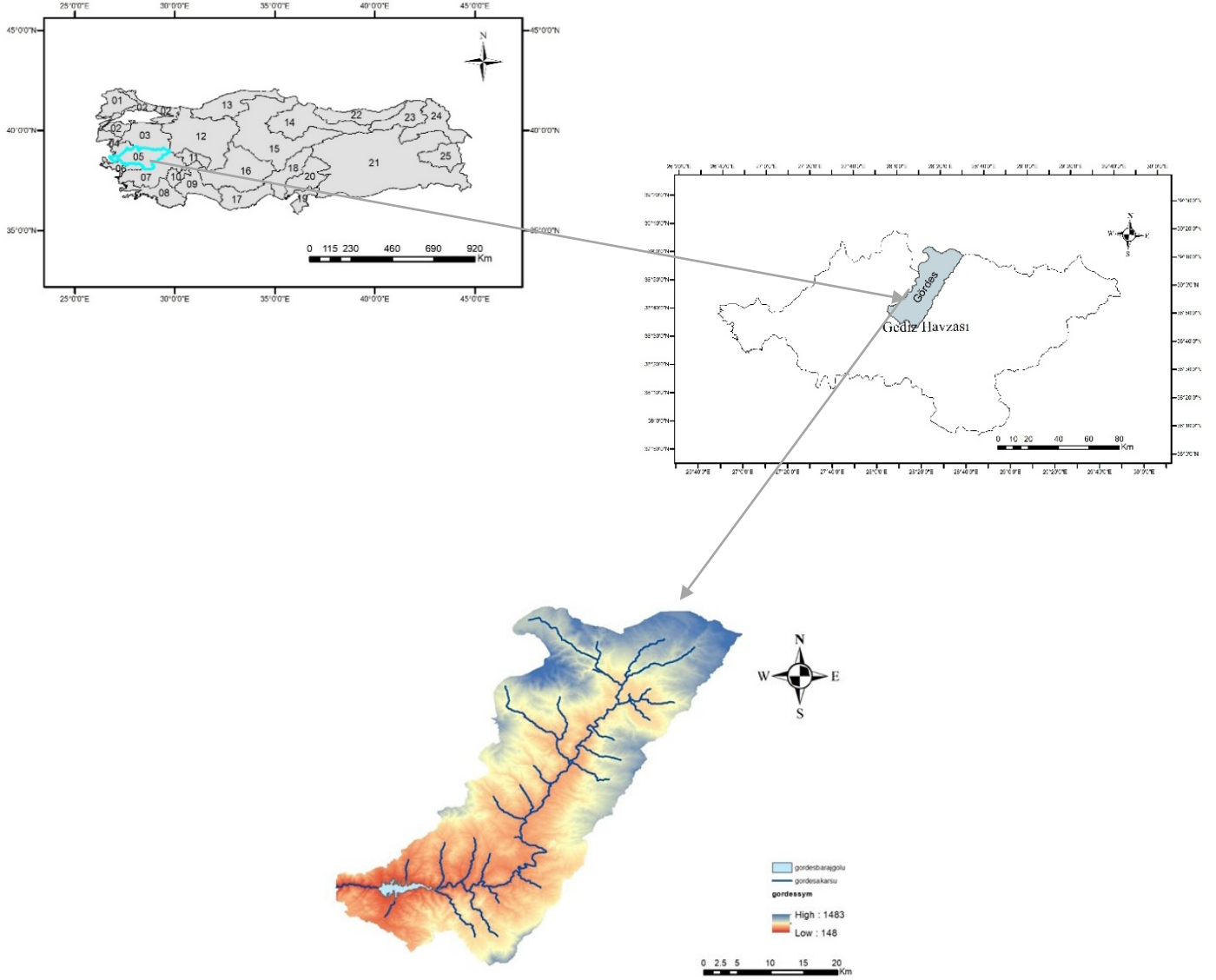
Çalışma kapsamında aylık yağış-akış modeli olarak ABCD modeli kullanılmıştır. Gördes Alt Havzası'nın aylık akımlarının modellenmesinde hem yerel istasyon gözlemleri hem de ERA5-Land verileri kullanılmış olup her iki veri grubu için model girdileri, model parametreleri ve model akımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanı ve Veriler

Türkiye'de toplam 25 adet akarsu havzası bulunmakta olup her birinde bulunduğu konum ve topografya itibarıyla farklı iklim özellikleri görülmektedir [8]. Uygulama alanı, Türkiye'nin batısında yer alan Gediz Havzası'nın bir alt havzası olup 1045 km² drenaj alanına sahip olan Gördes Alt Havzası'nı kapsamaktadır (Şekil 1). Havza çıkışında yer alan Gördes barajı, İzmir şehrine 63 milyon m³/yıl ilave su temini ve çevredeki sulama alanlarına ise 72 milyon m³/yıl sulama suyu temini için tasarlanmıştır [13].

Şekil 1'de Gördes Havzası'na ait sayısal yükselt modeli verilmiş olup modelde en yüksek (high) ve en düşük (low) yükseltler gösterilmektedir.



Şekil 1. Gördes Alt Havzası sayısal yükselti modeli

Meteoroloji Verileri

Havza üzerinde aylık yağış ve sıcaklık verilerini ölçen yerel istasyonlar Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından işletilmektedir. Bu istasyonlar sırasıyla 17746-Demirci, 5273-Gölmarmara, 4930-Gördes ve 5278-Köprübaşı istasyonlarıdır. Havza çıkış akımları ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından işletilen D05A028 nolu akım gözlem istasyonu tarafından izlenmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan meteoroloji istasyonlarının alansal ağırlıkları Thiessen Poligonları Yöntemi ile belirlenmiş (Şekil 2), alansal ortalama yağış (P), ortalama sıcaklık (Tort), minimum sıcaklık (Tmin) ve maksimum sıcaklık (Tmax) verileri, 1962-1993 su yılı dönemleri için derlenmiştir.

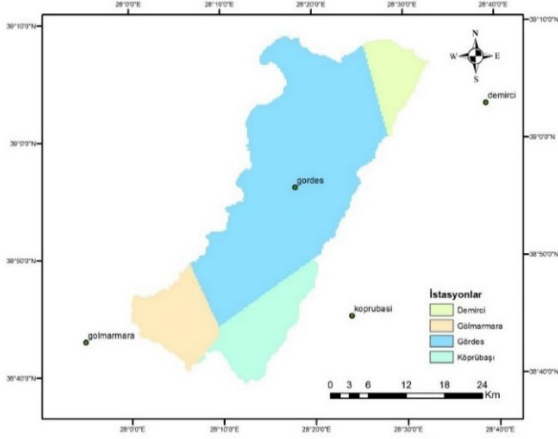
Hidrolojik modellerin en önemli girdilerinden biri de potansiyel evapotranspirasyondur (PET). Bu değerlerin

ölçümü mümkün olmamakla birlikte PET değerlerinin doğru tahminlenmesi model performansı açısından önem arz etmektedir.

Literatürde PET değerlerinin hesaplanması için önerilmiş birçok yöntem mevcuttur. Okkan, U., & Kıymaz, H. (2020) çalışmasında Penman-Monteith, Hargreaves, Blaney-Criddle, McGuinness-Bordne, Hamon gibi 21 adet PET hesap yöntemi ile Gediz Havzası'nda yer alan farklı akarsu kollarının PET değerleri belirlenmiş, bu değerler kavramsal Dinamik Su Bütçesi Modeli girdisi olarak kullanılarak PET hesap yöntemlerinin performansları değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda radyasyon tabanlı McG-Bor yöntemi diğer yöntemlere kıyasla daha tutarlı sonuç vermiştir. Ancak bu yöntemin radyasyon tabanlı olması ve ülkemizde radyasyon verisi ölçümünün mümkün olmamasından ötürü yakın sonuç veren sıcaklık tabanlı HamI eşitliği önerilmiştir.

Literatüre bakıldığında, çalışma alanının iklim özelliklerine bağlı olarak PET hesap yöntemlerinin performanslarının değişkenlik gösterdiği, hangi ampirik formülün model sonuçlarının iyileştirilmesinde daha iyi performans sergileyeceği konusunda genel bir yargının bulunmadığı görülmektedir [14].

Yapılan çalışmada potansiyel evapotranspirasyon değerleri, radyasyon tabanlı Hargreaves Metodu [15] kullanılarak hesaplanmıştır. Bu metoda ait eşitliğin temel girdileri sıcaklık ve güneş radyasyon değerleridir.



Şekil 2. Gördes Alt Havzası Thiessen poligonları

Era5-Land Veri Seti

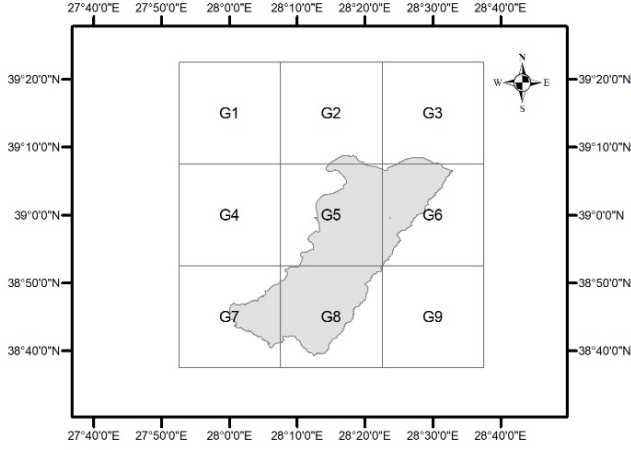
ECMWF tarafından sunulan Era5-Land veri seti, arazi yüzeyi ile ilgili bilgi akışı sağlayan bir yeniden analiz veri seti olup çözünürlük açısından ERA5'in geliştirilmiş bir versiyonudur. Elde edilen bu veri seti küresel ölçekte modellerin ve yer gözlemlerinin kombinasyonundan oluşmaktadır [16].

ERA5-Land verileri hazırlanırken, ERA5'te olduğu gibi göl yüzey alanı, göl derinliği, toprak türü ve bitki örtüsü, yüzey albedosu, yaprak alanı indeksi gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Bu veri seti, ERA5'te yüzeye en yakın seviye (seviye 137) için sunulan sıcaklık, özgül nem, rüzgâr hızı ve yüzey basıncından oluşan meteoroloji verileri kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca yaklaşık 31 km olan ERA5 çözünürlüğünden, yaklaşık 9 km olan ERA5-Land çözünürlüğüne geçiş için üçgen ağı dayalı bir lineer interpolasyon yöntemi kullanılmıştır [12].

ERA5-Land, 50 farklı değişken üreterek (Tablo1) birkaç on yıl boyunca yüzey seviyesinde su ve enerji döngülerinin tutarlı bir simülasyonunu sağlamaktadır. Veri seti 1950'den günümüze, 1 saatlik zamansal çözünürlükte hazırlanmış aylık ortalamaları içerir. Ayrıca, 0.1° x 0.1° yatay çözünürlükte, yüzey seviyesinden 2 m yükseklikten 289 cm toprak derinliğine kadar dikey kapsama alanına sahiptir.

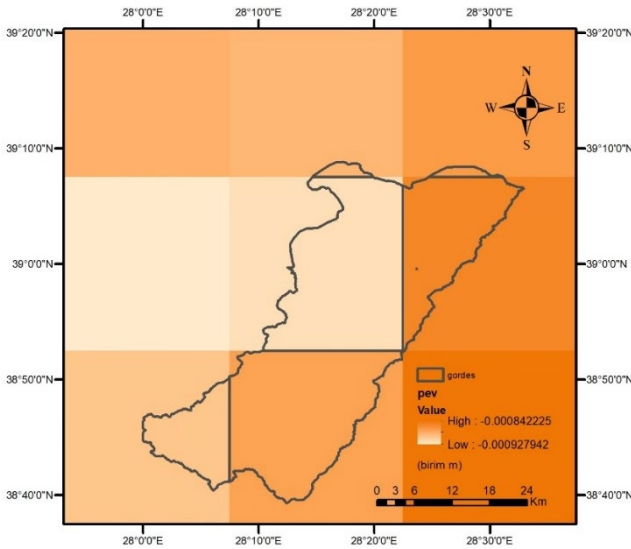
Tablo 1. ERA5-Land ile sunulan veri listesi

Atmosferik veriler	Birim	Era5-Land tarafından üretilen veriler	Birim
10m rüzgar u bileşeni	m s-1	2m çığ noktası sıcaklığı	K
10m rüzgar v-bileşeni	m s-1	2m sıcaklık	K
Yüzey Basıncı	Pa	Çıplak Toprak Buharlaşması	m Su Eşdeğeri
Yüzeysel Aşağı Yönlü Güneş Radyasyonu	J m-2	Okyanuslar Dışında Açık Su Yüzeylerinden Buharlaşma	m Su Eşdeğeri
Yüzeysel Aşağı Yönlü Termal Radyasyonu	J m-2	Kanopinin Tepesinden Buharlaşma	m Su Eşdeğeri
Toplam Yağış	m	Bitki Ortusunun Terlemesi ile Oluşan Buharlaşma	m Su Eşdeğeri
Yüzeysel Net Güneş Radyasyonu	J m-2	Tahmini Albedo	Boyutsuz
Yüzeysel Net Termal Radyasyon	J m-2	Göln Dıp Sıcaklığı	K
		Göl Buz Derinliği	m
		Göl Buz Sıcaklığı	K
		Göl Karışık Katman Derinliği	m
		Göl Karışık Katman Sıcaklığı	K
		Göl Şekil Faktörü	Boyutsuz
		Göl Toplam Katman Sıcaklığı	K
		Potansiyel Buharlaşma	m
		Akış	m
		Yüzey Rezervuarı İçeriği	m Su Eşdeğeri
		Yüzey Sıcaklığı	K
		Kar Albedo	Boyutsuz
		Kar Kaplaması	%
		Kar Yoğunluğu	kg m-3
		Kar Derinliği	m
		Kar Derinliği Su Eşdeğeri	m Su Eşdeğeri
		Kar Buharlaşması	m Su Eşdeğeri
		Kar Yağışı	m Su Eşdeğeri
		Kar Erimesi	m Su Eşdeğeri
		Toprak Sıcaklığı Seviyesi 1	K
		Toprak Sıcaklığı Seviyesi 2	K
		Toprak Sıcaklığı Seviyesi 3	K
		Toprak Sıcaklığı Seviyesi 4	K
		Yer Altı Akışı	m
		Yüzey Gizli Isı Akışı	J m-2
		Yüzeysel Akış	m
		Yüzey Duyulur Isı Akışı	J m-2
		Kar Tabakasının Sıcaklığı	K
		Toplam Buharlaşma	m Su Eşdeğeri
		Hacimsel Toprak Su Katmanı 1	m3 m-3
		Hacimsel Toprak Su Katmanı 2	m3 m-3
		Hacimsel Toprak Su Katmanı 3	m3 m-3
		Hacimsel Toprak Su Katmanı 4	m3 m-3
		Yaprak Alanı İndeksi, Yüksek Bitki Örtüsü	m2 m-2
		Yaprak Alanı İndeksi, Düşük Bitki Örtüsü	m2 m-2



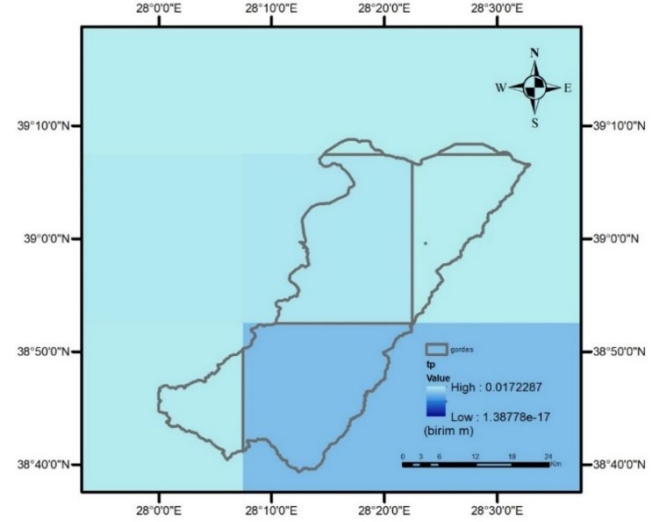
Şekil 3. Gördes Alt Havzası'nı kapsayan Era5-Land gridleri

Gördes Alt Havzası altı adet Era5-Land gridi içerisinde kalmaktadır (Şekil 3). Çalışma kapsamında kullanılan hidrolojik model girdileri aylık toplam yağış (Şekil 5) ve aylık potansiyel evapotranspirasyon (Şekil 4) olup bu veriler Copernicus tarafından sağlanan veri erişim platformu üzerinden temin edilmiştir. Mevcut ECMWF Entegre Tahmin Sistemi'ndeki potansiyel evapotranspirasyon (pev), bitki örtüsü parametrelerinin "ürünler/karma tarım" olarak belirlendiği ve "toprak neminden kaynaklanan basıncın olmadığı" varsayımıyla yüzey enerji dengesi hesaplamalarına dayanmaktadır. Potansiyel evapotranspirasyonun, sulama gereksinimlerinin bir tahminini sağlaması amaçlanmış olsa da kuru havada gerçekleşen çok güçlü buharlaşma nedeniyle, yöntem kurak koşullarda gerçekçi olmayan sonuçlar verebilmektedir [17].



Şekil 4. Gördes Alt Havzası'nı kapsayan Era5-Land potansiyel evapotranspirasyon gridleri

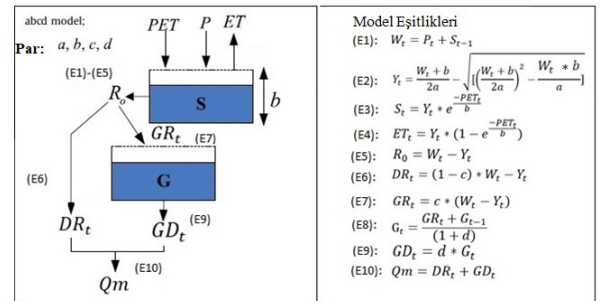
Era5-Land veri seti içerisinde toplam yağış (tp), Dünya yüzeyine düşen toplam yağmur ve kar olmak üzere birikmiş sıvı ve donmuş su olarak tanımlanır. Bu veri büyük ölçekli yağışlar ve konvektif yağışların toplamına eşit olup birimi metredir. Ancak sis, çiy veya Dünya yüzeyine inmeden önce atmosferde buharlaşan yağışı içermemektedir [17].



Şekil 5. Gördes Alt Havzası'nı kapsayan Era5-Land toplam yağış gridleri

Abcd Modeli

ABCD modeli, Thomas [18] tarafından ulusal su rezervinin tahmini için önerilmiş bir hidrolojik modeldir [19]. Model aylık toplam yağış ve aylık potansiyel evapotranspirasyon verilerini kullanarak model sonucunda aylık akış, zemin nemi, yeraltı suyu depolaması ve gerçekleşen evapotranspirasyon çıktıları üretilmektedir [20]. ABCD hidrolojik modelinin 4 parametresi bulunmaktadır. Modelin işleyiş şeması ve parametreleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. ABCD modelinin işleyiş mekanizması [21].

Model içerisinde yer alan W_t değişkeni toprakta mevcut olan kullanılabilir su miktarını temsil etmektedir. P_t yağışının gelmesi ile zeminde bir önceki ayda mevcut olan zemin nemi S_{t-1} 'e eklenir ve topraktaki mevcut kullanılabilir su miktarı elde edilmiş olur (Denklem 1).

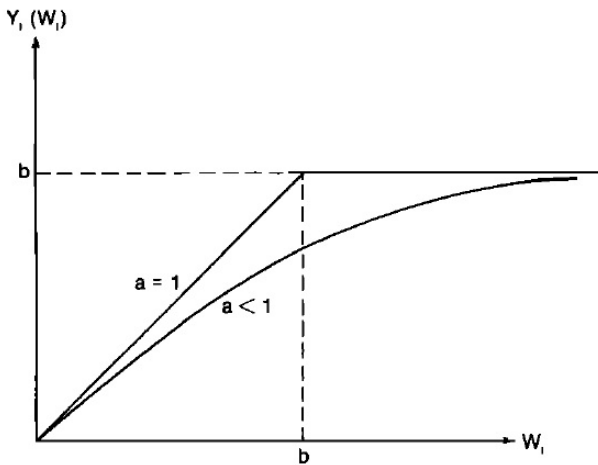
$$W_t = P_t + S_{t-1} \quad (1)$$

Model içerisinde tanımlanan Y değişkeni evaporasyon potansiyelini temsil etmekte olup a ve b parametreleri ile W değişkenine bağlı olarak tanımlanmasının yanı sıra aylık gerçekleşen evapotranspirasyon ve o ayki zemin neminin toplamı olarak da tanımlanabilmektedir (Denklem 2 ve Denklem 3).

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left[\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t * b}{a}\right]} \quad (2)$$

$$Y_t = ET_t + S_t \quad (3)$$

Denklem içerisinde yer alan a parametresi, zemin tamamen doymun hale gelmeden önce akışın oluşma eğilimini ifade etmekte olup $0 < a \leq 1$ aralığında değer almaktadır [20]. Modelin diğer bir parametresi olan b parametresi ise evapotranspirasyon ve toprak nemi depolamasının üst limitini ifade etmektedir [22].



Şekil 7- ABCD modelinde Y ve W grafiği [22].

Y_t değişkeninin W_t ye bağlı olarak ifade edilen fonksiyonu incelendiğinde t periyodunda Y_t değişkeninin değerinin üst sınırının b parametresine eşit olduğu görülmektedir [22].

Şekil 7'deki grafikten de anlaşılacağı üzere a parametresinin 1'e eşit olduğu kabulü ile model çalıştırıldığında evaporasyon potansiyelinin (Y_t) aldığı en büyük değer toprağın üst katmanının su depolama kapasitesine, yani b parametresine eşit olmaktadır. Ancak a parametresinin 1'den küçük olduğu kabulü ile model çalıştırıldığı zaman evaporasyon potansiyeli hiçbir zaman b parametresine eşit olmamaktadır.

Model içerisinde tanımlanan S_t değişkeni zemin nemini temsil etmekte olup evapotranspirasyon potansiyeli (Y_t), b

parametresi ve aylık potansiyel evapotranspirasyona (PET_t) bağlı olarak ifade edilmektedir (Denklem 4).

$$S_t = Y_t * e^{-\frac{PET_t}{b}} \quad (4)$$

Gerçekleşen evapotranspirasyon ET_t , evapotranspirasyon potansiyelinden o ayki zemin neminin çıkartılması ile ifade edilmektedir (Denklem 5).

$$ET_t = Y_t * (1 - e^{-\frac{PET_t}{b}}) \quad (5)$$

R_0 akış için mevcut suyu ifade etmektedir. Toprakta bulunan sudan (W_t) evapotranspirasyon potansiyelinin (Y_t) çıkartılmasıyla elde edilir (Denklem 6).

$$R_0 = W_t - Y_t \quad (6)$$

Akış için mevcut olan suyun $1-c$ kadarı yüzeysel akışa geçmekte (DR_t) ve c kadarı ise yer altı suyunu (GR_t) beslemektedir (Denklem 7 ve Denklem 8).

$$DR_t = (1 - c) * W_t - Y_t \quad (7)$$

$$R_0 = W_t - Y_t \quad (8)$$

Yer altı suyu beslenimi sonucu yer altı su depolamasının yeni seviyesi aşağıdaki formülle ifade edilmektedir (Denklem 9) " G_{t-1} ", bir önceki ay yeraltında depolanan su miktarıdır.

$$G_t = \frac{GR_t + G_{t-1}}{(1 + d)} \quad (9)$$

Yer altında depolanan suyun (G_t) d kadarlık kısmı yer altında akışa geçerek toplam akışa dahil olmaktadır (Denklem 10).

$$GD_t = d * G_t \quad (10)$$

Yukarıdaki formüllerde verilen c parametresi yeraltı suyu geri beslenme katsayısı olarak ifade edilmekte olup $0 < c \leq 1$ aralığında bir değerdir. Model parametreleri arasında yer alan d parametresi ise yeraltı suyu akışı durgunluk sabiti olarak ifade edilmekte olup $0 < d \leq 1$ aralığında bir değerdir. Bu parametre modelin en hassas parametresi olup d parametresindeki minimal değişimler model sonucunda belirgin farklılıklar göstermektedir [23].

Model sonucu olarak elde edilmek istenen toplam akış ise yüzeysel akışın (DR_t) ve yeraltı suyu akışının (GD_t) toplamına eşittir (Denklem 11).

$$Qm_t = DR_t + GD_t \quad (11)$$

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması

ABCD modelinin optimum parametreleri belirlenirken sezgisel bir optimizasyon algoritması olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. PSO, Eberhart ve Kennedy tarafından geliştirilmiş bir global optimizasyon yöntemidir [24]. Bu algoritma, sürüler halinde hareket etme kabiliyetine sahip olan hayvanların bu hareketi esnasında, besin arama ve tehlikelerden kaçınmak gibi yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmek için sergiledikleri davranış şekillerinden esinlenilerek geliştirilmiştir [25].

Algoritma çalıştırılırken ilk olarak rastgele atanmış bir başlangıç sürüsü tanımlanır (Denklem 12) ve bu sürü için bir amaç fonksiyonu belirlenir. Başlangıç sürüsünde, sürüye dahil olan her bir eleman bilinmeyen parametre adedi kadar sonuç üretmektedir [26].

$$x_{i,j} = x_j^{min} + rnd * [x_j^{max} - x_j^{min}] \quad (12)$$

$$i=1,2,\dots,npop, j=1,2,\dots,npar$$

npop; Topluluk (sürü) içerisindeki parçacık sayısı

npar; modelde kalibre edilmesi gereken parametre sayısı

rnd; 0~1 aralığında rastgele üretilmiş sayı

xjmin ve xjmax parametrelerin alt ve üst limitleri

Topluluktaki her bir parçacık eldeki problem için olası bir çözümü temsil eder [27]. Başlangıçta tüm parçacıkların hızları sıfır kabul edilir. Parçacıklar topluluk içerisindeki pozisyonlarını hız vektörü yardımı ile güncellerler (Denklem 13). Denklemde t iterasyon adımı, ω atalet, c ise ivmelenme katsayısı olup bu katsayı genellikle 2 değerini alır [28]. Yapılan çalışmalar sonucunda, ω atalet değerinin 0.8-1.2 aralığında seçilmesi durumunda PSO algoritmasının en iyi yakınsama hızına eriştiği belirlenmiştir [24].

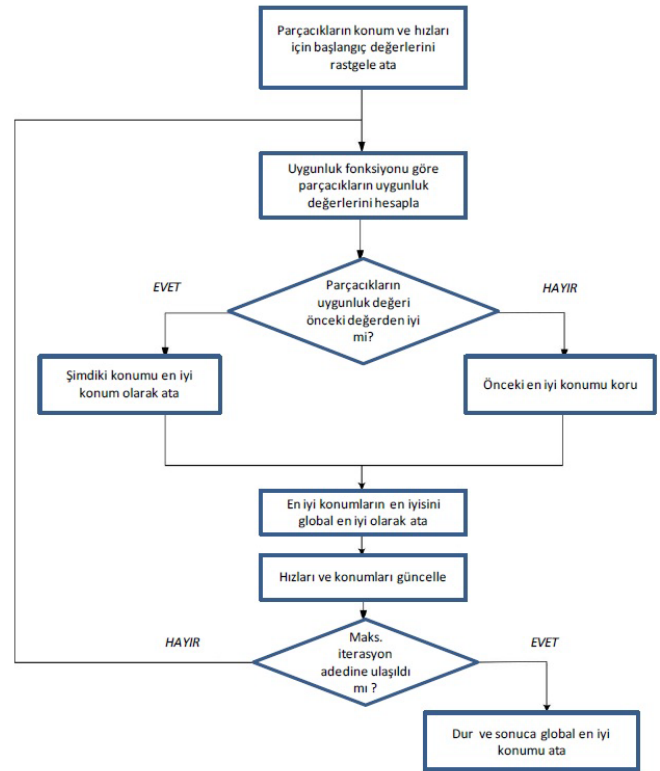
$$v_{i,j}(t+1) = \omega * v_{i,j}(t) + \quad (13)$$

$$rnd * c1 * (pb_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) +$$

$$rnd * c2 * (gb_{i,j}(t) - x_{i,j}(t))$$

Bu pozisyonlardan en iyi amaç fonksiyonu değerini veren pozisyon "pb", bu pozisyonun amaç fonksiyonu değeri ise "gb" olarak tanımlanmaktadır [26]. Algoritma, tanımlanan her iterasyon adımında bir önceki adımın pb ve gb değerleri hafızada tutmakta ve bu değerleri söz konusu iterasyon adımının pozisyonlarına dahil ederek yeni pb ve gb değerlerini belirlemektedir.

Tanımlanan maksimum iterasyon sayısı kadar aynı işlem tekrarlanmaktadır [26]. PSO algoritmasının akış şeması Şekil 8'de verilmiştir.

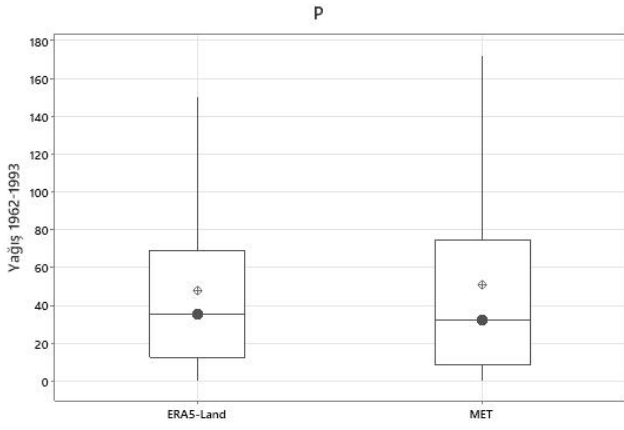


Şekil 8- PSO algoritması akış şeması [26].

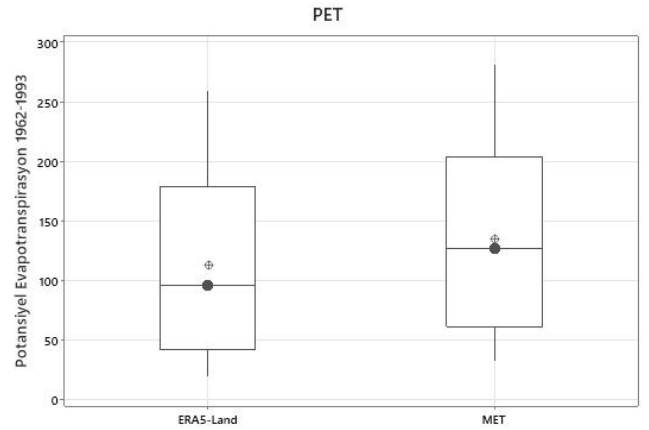
BULGULAR

Yapılan çalışma kapsamında yerel istasyon verileri ve ERA5-Land verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile havzanın akımlarının modellenmesi için ABCD yağış-akış modeli, model kalibrasyonu ve modele ait parametrelerin optimum değerlerinin tespiti için ise Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimisation) algoritmasından yararlanılmıştır. Yukarıda detayları verilen ABCD modeli ve PSO algoritması MATLAB ortamında kodlanmıştır. PSO çalıştırılırken $c1=c2=2$ ve $\omega=0.8$ olarak tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda her iki veri seti için de hem model girdileri hem de veri setlerinin performansı kıyaslanmıştır.

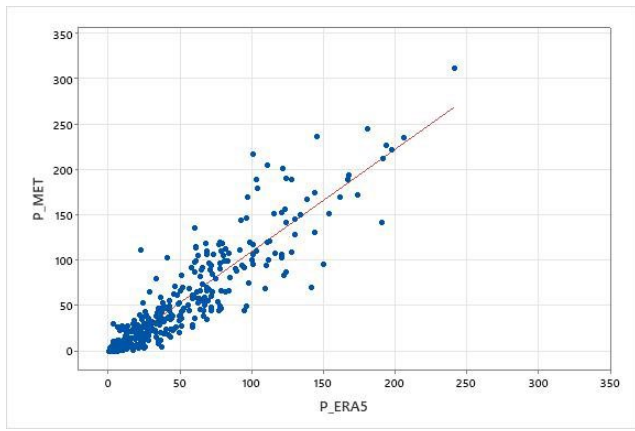
Veri setlerinden edinilen aylık toplam yağışlara ait box-plot grafiği Şekil 9'de, saçılım grafiği ise Şekil 10'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde gerek istasyon gerekse Era-Land verilerinin istatistiksel açıdan birbirine yakın diziler olduğu gözlenmektedir.



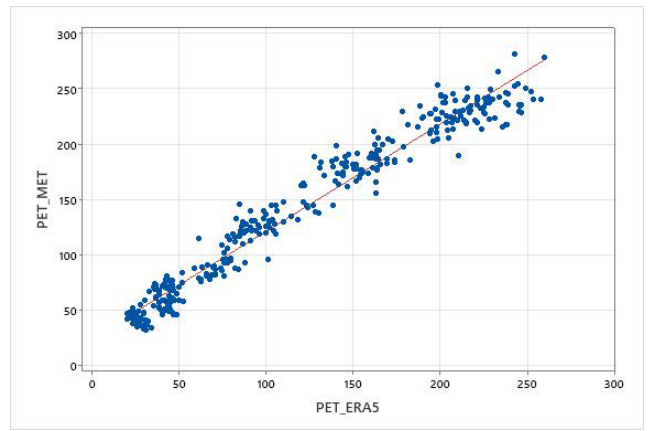
Şekil 9- ERA5-Land ve meteoroloji istasyonu yağışlarının box-plot grafiği



Şekil 11- Era5-Land ve Meteoroloji verileri ait PET değerlerinin box-plot grafiği



Şekil 10- Era5-Land ve meteoroloji istasyonu yağışlarının saçılım grafiği



Şekil 12- Era5-Land ve Meteoroloji verileri ait PET değerlerinin saçılım grafiği

Era5-Land veri setinden edinilen potansiyel evapotranspirasyon ve meteoroloji istasyonlarından edinilen sıcaklık verileri kullanılarak Hargreaves metodu ile hesaplanan potansiyel evapotranspirasyona ait box-plot grafiği Şekil 11'da, saçılım grafiği ise Şekil 12'de verilmiştir.

Bölüm 2.3 de Era5-Land veri setinde potansiyel evapotranspirasyonun(pev) nasıl belirlendiği verilmiştir. Meteoroloji verileri ile potansiyel evapotranspirasyonun belirlenmesinde kullanılan Hargreaves eşitliğinin girdileri sıcaklık ve güneş radyasyonu verileridir. Ülkemizde yağış ve sıcaklık verileri meteoroloji istasyonu ölçeğinde sağlanabilmektedir. Ancak güneş radyasyonu verileri için aynı durum mümkün olmamaktadır [14]. Bu nedenle Hargreaves eşitliğinde girdi olarak kullanılan radyasyon enleme bağı olarak ifade edilen eşitlik sonucu belirlenmiştir [29]. Güneş radyasyonun bölgesel çapta ölçülmemesinden ötürü çalışma alanının temsilinde ölçülmüş yağış ve sıcaklık verilerine göre zayıf kalmaktadır. Bununla birlikte iki veri setinde potansiyel evapotranspirasyon verilerinin belirlendiği yöntemler farklı olduğundan bu verilerde yağış verilerine oranla istatistiksel olarak daha belirgin farklılık görülmüştür.

Çalışmada kullanılan hidrolojik modelin, çalışma alanının hidrolojik davranışını temsilindeki başarısını test etmek adına yerel istasyonlardan elde edilen meteoroloji verileri ve gözlenen akım verileri kullanılarak model akımları üretilmiştir. Model performansının değerlendirilmesinde Nash Sutcliffe katsayısı esas alınmıştır. Nash performans değeri 1'e yaklaştıkça model performansı iyileşmektedir (Tablo 2) [30]. Meteoroloji istasyonlarından sağlanan veriler kullanılarak elde edilen model sonucu Nash=0,916 performans değeri sağlanmış, sonuç olarak modelin Gördes Alt Havzası'ndaki aylık yağış-akış ilişkisini başarı ile temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 2. Nash-Sutcliffe ve PBIAS performans derecelendirmesi [30].

Performans Değerlendirmesi	Nash-Sutcliffe (NS)	PBIAS (%)
Çok İyi	$0.75 < NS \leq 1$	$PBIAS < \pm 10$
İyi	$0.65 < NS \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Yeterli	$0.50 < NS \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Yeterli Değil	$NS \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

ERA5-Land veri setinden edinilen aylık toplam yağış (Pt) ve aylık potansiyel evapotranspirasyon (PETt) verileri içerisinde 1962-1993 yılları arasındaki 372 zaman serisi model girdisi olarak alınmış, ilk 186 veri kalibrasyon aşamasında, diğer 186 veri ise verifikasyon aşamasında kullanılmıştır. PSO algoritmasına ait kod içerisinde ABCD model kodu çalıştırılarak modele ait dört parametrenin en iyi performans sonucunu veren optimum değerleri belirlenmiştir.

Sonuç olarak elde edilen model parametreleri Tablo 3’de, model performansları ise Tablo 4’de verilmiştir. Yapılan kontrollerle model kalibrasyon sürecinde, Okkan ve Kırdemir [20] çalışmasında da belirtildiği üzere modelin d parametresinin 0’a yakınsadığı durumlarda hata azalmaktadır. Bunun sonucunda PSO algoritmasında d parametresi 0.001 olarak tanımlandığında hatanın azaldığı gözlenmiş ve optimum model parametreleri belirlenmiştir.

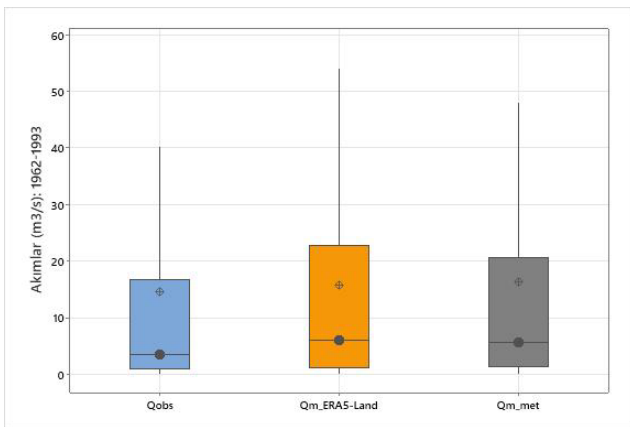
Tablo 3. Era5-Land ve Meteoroloji verilerine ait optimum parametreler

Parametreler	a	b	c	d	NS
ERA5-Land	0.934	218.48	0.173	0.001	0.721
Meteoroloji	0.975	352.51	0.133	0.001	0.916

Tablo 4. Kalibrasyon ve verifikasyon dönemi model performansları

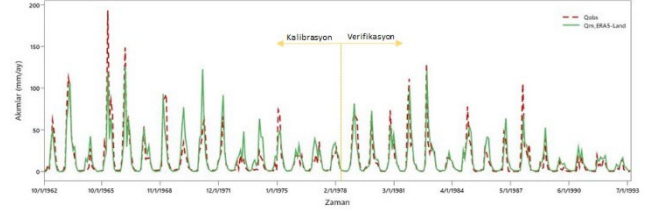
	RMSE (mm)	R2 (-)	NS (-)	MAE (-)	PBIAS (%)
Meteoroloji Cal	8.05	0.917	0.916	4.82	4.19
Meteoroloji Ver	8.450	0.869	0.838	4.870	17.82
ERA5-Land Cal	14.644	0.724	0.721	8.137	7.49
ERA5-Land Ver	8.757	0.826	0.825	4.743	4.82

Model sonucunda elde edilen akımların medyan ve kartil istatistiklerinin görsel olarak dağılımını gösterebilmek için bu akımlara ait box-plot grafiği Şekil 13 verilmiştir.

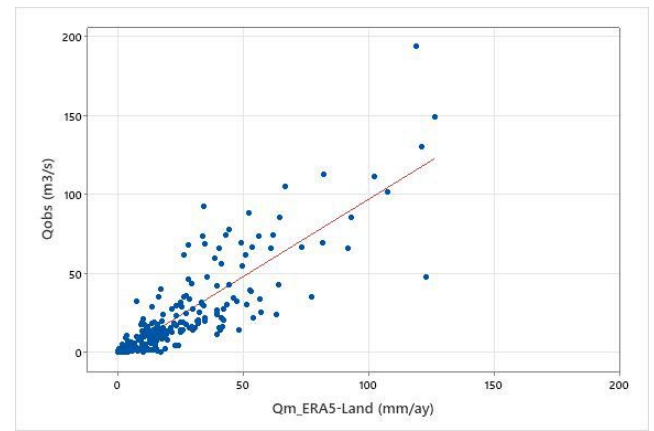


Şekil 13- Gözlemler ile model sonuçlarının box-plot grafiği

ERA5-Land verileri kullanılarak elde edilen model sonuçları ve gözlenmiş akımlara ait gidiş grafiği Şekil 14’de, saçılım grafiği ise Şekil 15’de verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere Era5-Land verilerine dayalı model sonuçlarının gözlemlerle uyumlu olduğu görülmektedir.

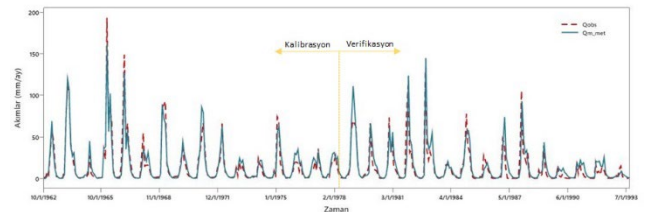


Şekil 14- Gözlenen akımlar ve Era5-Land verilerinden elde edilen serinin gidiş grafiği

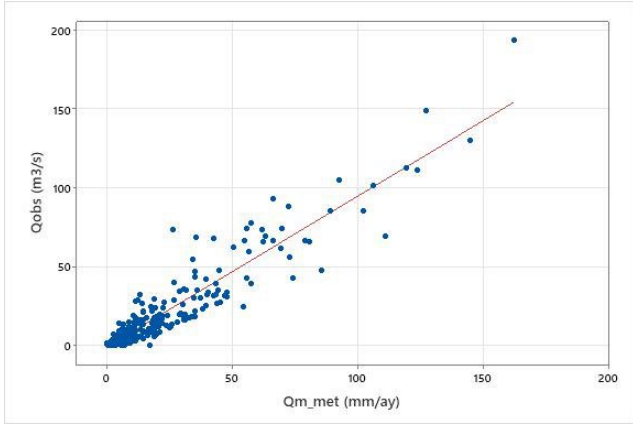


Şekil 15- Gözlemler ve ERA5-Land verilerinden elde edilen serinin saçılım grafiği

Meteoroloji verileri kullanılarak elde edilen model sonuçları ve gözlenmiş akımlara ait gidiş grafiği Şekil 16’de, saçılım grafiği ise Şekil 17’de verilmiştir. Meteoroloji verileri yerel istasyonlardan sağlandığı için model performans değeri oldukça yüksek olup model sonuçları gözlenmiş akımlar ile yüksek tutarlılıktadır.

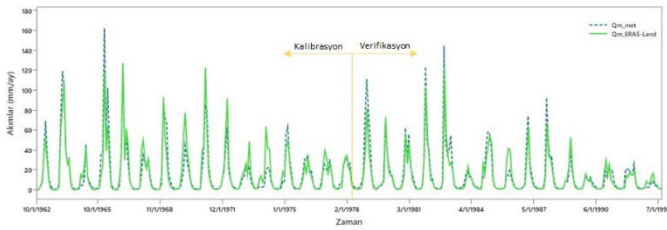


Şekil 16- Gözlenen akımlar ve meteoroloji verilerinden elde edilen serinin gidiş grafiği



Şekil 17- Gözlemler ve meteoroloji verilerinden elde edilen serinin saçılım grafiği

Şekil 18’de her iki veri seti ile elde edilen model sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 18- ERA5-Land ve meteoroloji verilerine ait model sonuçlarının gidiş grafiği

SONUÇ

Sunulan çalışmada, ABCD hidrolojik modelinin Gördes Alt Havzası’ndaki istatistiksel performansına bakıldığında, bu bölgenin aylık yağış-akış ilişkisini başarıyla temsil ettiği görülmektedir. Çalışmada kullanılan Era5-Land küresel veri setinden ve yerel istasyonlardan edinilen aylık toplam yağışlar kıyaslanmış, istatistiksel olarak benzer özelliklerde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Era5-Land küresel veri setinden elde edilen aylık potansiyel evapotranspirasyon verileri ve yerel istasyonlardan temin edilen sıcaklık verileri ile Hargreaves yöntemi kullanılarak hesaplanan potansiyel evapotranspirasyon değerleri kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda potansiyel evapotranspirasyon verileri kıyaslandığında kartil ve medyan değerlerinde yağış verilerine oranla belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Bu durumun potansiyel evapotranspirasyon ölçüm ve hesap tekniklerinin farklı olmasından ve Hargreaves yönteminde kullanılan güneş radyasyonu verilerinin ölçülememesinden kaynaklı bölge temsiliyetinde zayıf kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte bu veriler kullanılarak model kalibre edildiğinde nash değerinin 0.721 olduğu tespit edilmiş, bu değer model performans derecelendirmesinde iyi derece sınırında kaldığı

belirlenmiştir. Model sonuç üretirken performans fonksiyon değerini iyileştirmek için d parametresinin bölüm 2.4’de belirtilen alt sınıra dayandığı görülmüştür. Bu durumun güneş radyasyon verilerinin bölge temsiliyetinin zayıf olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Çalışma sonucunda, hidrolojik model kalibrasyonunun potansiyel evapotranspirasyon değerlerindeki farklılıkların model sonuçlarına yansımalarına engel olduğu, dolayısıyla PET modellerinin hidrolojik modellemede akımlar üzerinde etkilerinin kısıtlı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte Era5-Land veri setine erişimin oldukça kolay olduğu ve bu verilerin bölgedeki havza özelliklerini yansıtmakta iyi performans sergilediği tespit edilmiş, Ege Bölgesi’nde yer alan havzaların hidrolojik süreçlerinin modellenmesinde bu veri setinin kullanılmasının uygulama kolaylığı sağlayacağı belirlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Uchenna, U. P., Lancia, M., Viaroli, S., Ugbaja, A. N., Galluzzi, M., & Zheng, C. “Groundwater sustainability in African Metropolises: Case study from Calabar, Nigeria”, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101314, 2023.
- [2] Anteneh, Y., Alamirew, T., Zeleke, G., & Kassawmar, T. “Modeling runoff-sediment influx responses to alternative BMP interventions in the Gojeb watershed, Ethiopia, using the SWAT hydrological model” *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 22816-22834, 2023
- [3] Singh, V. P., & Frevert, D. K. “Watershed modeling” In *World water & environmental resources congress 2003* (pp. 1-37), 2003.
- [4] Fıstıkoğlu, O., “Hidrolojik modeller” *Türkiye İnşaat Mühendisliği 15. Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı* içinde (799-809). Ankara, 1999.
- [5] Fıstıkoğlu, O., & Okkan, U. “Statistical downscaling of monthly precipitation using NCEP/NCAR reanalysis data for Tahtalı River Basin in Turkey” *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 157-164, 2011.
- [6] Girgin, G., & Şen, Ö. L. “GRIDDED PRECIPITATION DATASETS: HOW CONSISTENT ARE THEY FOR TURKEY, A COUNTRY WITH COMPLEX TOPOGRAPHY?” In *This 8th Atmospheric Sciences Symposium; ATMOS2017* built upon the series that began at Istanbul Technical University, Department of Meteorological Engineering in 1981. Subsequent meetings have been held in 1991; 2003; 2008; 2011; 2013 and 2015 in Istanbul, Turkey. And it is not just enough to produce scientific data for people but it is also necessary to process the data and share the results of those data as a source for students and a starting point for all., November 2017.
- [7] Yang, Y., Li, Q., Song, Z., Sun, W., & Dong, W. “A comparison of global surface temperature variability, extremes and warming trend using reanalysis datasets and CMST-Interim”, *International Journal of Climatology*, 42(11), 5609-5628, 2022.

- [7] Nacar, S., Kankal, M., & Okkan, U. "Evaluation of the suitability of NCEP/NCAR, ERA-Interim and, ERA5 reanalysis data sets for statistical downscaling in the Eastern Black Sea Basin, Turkey" *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(2), 39, 2022.
- [8] Essou, G. R., Sabarly, F., Lucas-Picher, P., Brissette, F., & Poulin, A. (2016). Can precipitation and temperature from meteorological reanalyses be used for hydrological modeling?. *Journal of Hydrometeorology*, 17(7), 1929-1950
- [9] Tarek, M., Brissette, F. P., & Arsenault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544.
- [10] Gomis-Cebolla, J., Rattayova, V., Salazar-Galán, S., & Francés, F. (2023). Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020). *Atmospheric Research*, 284, 106606
- [11] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. "ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications" *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383, 2021
- [12] Okkan, U., Fistikoglu, O., Ersoy, Z. B., & Noori, A. T. "Investigating adaptive hedging policies for reservoir operation under climate change impacts" *Journal of Hydrology*, 619, 129286, 2023.
- [13] Okkan, U., & Kiyamaz, H. (2020). Questioning of empirically derived and locally calibrated potential evapotranspiration equations for a lumped water balance model. *Water Supply*, 20(3), 1141-1156.
- [14] Talebmorad, H., Ahmadnejad, A., Eslamian, S., Ostad-Ali-Askari, K., & Singh, V. P. "Evaluation of uncertainty in evapotranspiration values by FAO56-Penman-Monteith and Hargreaves-Samani methods" *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 10(2), 135-147, 2020.
- [15] Çaktu, Y. "Identifying impacts of climate change on water resources using CMIP6 simulations Havran basin case" Master's thesis, Middle East Technical University, 2022.
- [16] Sabater, J. M. "ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present" Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 10, 2019.
- [17] Thomas, H.A., "Improved methods for national water assessment: Final report" U.S. Geol. Surv. Water Resour. Contract WR15249270, 44.PP, 1981.
- [18] Wang, D., & Tang, Y. "A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in Darwinian hydrologic models", *Geophysical Research Letters*, 41(13), 4569-4577, 2014.
- [19] OKKAN, U., & KIRDEMİR, U. "BAYES MODEL ORTALAMASI YÖNTEMİYLE KAVRAMSAL YAĞIŞ-AKIŞ MODELİ ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ" *DSI Technical Bulletin/DSI Teknik Bülteni*, (121), 2016.
- [20] Bai, P., Liu, X., & Liu, C. "Improving hydrological simulations by incorporating GRACE data for model calibration" *Journal of Hydrology*, 557, 291-304, 2018.
- [21] Alley, W. M. "Water balance models in one-month-ahead streamflow forecasting" *Water Resources Research*, 21(4), 597-606., 1985.
- [22] Al-Lafta, H. S., Al-Tawash, B. S., & Al-Baldawi, B. A. (2013). Applying the "abcd" monthly water balance model for some regions in the United States. *Advances in Physics Theories and Applications*, 25(1), 36-47
- [23] Bai, Q. "Analysis of particle swarm optimization algorithm" *Computer and information science*, 3(1), 180, 2010.
- [24] Eberhart, R., & Kennedy, J. "A new optimizer using particle swarm theory" In *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science* (pp. 39-43). Ieee, October 1995.
- [25] Okkan, U., & Kırdemir, U. "Budyko yaklaşımına dayanan bir su bütçesi modeli ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile kalibrasyonu" *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2(1), 1-10, 2016.
- [26] Tayfur, G. "Modern optimization methods in water resources planning, engineering and management" *Water Resources Management*, 31, 3205-3233, 2017.
- [27] Afshar, A., Shojaei, N., & Sagharjooghifarahani, M. "Multiobjective calibration of reservoir water quality modeling using multiobjective particle swarm optimization (MOPSO)". *Water resources management*, 27, 1931-1947, 2013.
- [28] Yates, D., & Strzepek, K. M. (1994). Potential evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin runoff under climate change.
- [29] Suryaningtyas, L. S., Ery, S., & Rispiningtati, R. "Hydrological analysis of TRMM (Tropical rainfall measuring mission) data in lesti sub watershed", *Civil and Environmental Science Journal Vol. III, No. 01*, pp. 018-030, 2020
- [30] Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations" *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900, 2007.



Sismik dirençlilik ve spektral parametrelerin etkisi

*Seismic resilience and the influence of spectral parameters*İbrahim Baran KARAŞIN^{1*}¹ Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler M.Y.O İnşaat Teknolojisi Bölümü, baran.karasin@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-1215>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 28 Temmuz 2023
Revizyon 27 Ağustos 2023
Kabul 1 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Dirençlilik esaslı tasarım, deprem, dirençlilik indeksi, spektral ivme

ÖZ

Yapıların sismik etkilere karşı direncini değerlendirmek ve depremlerin neden olabileceği zararları minimize etmek, deprem mühendisliğinin temel hedeflerinden birini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, deprem mühendisliğinde oldukça güncel ve son yıllarda giderek önem kazanmakta olan sismik dirençlilik kavramı öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, herhangi bir afet sonrası yapıların eski haline dönebilme becerisi olarak tanımlanabilen Sismik dirençlilik konsepti, formülasyonları ile birlikte ele alınmıştır. Konsept olarak izah edilen sismik dirençlilik kavramının dirençlilik indeksi ile sayısallaştırılması bu indeksi oluşturan parametrelerden biri olan spektral ivme değeri değişken olarak seçilmiştir. Spektral ivme değişimine yaklaşımları farklı olan TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği)2018 ve DBYYHY (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik)2007 yönetmelikleri çerçevesinde 7 katlı bir betonarme yapı için Türkiye'nin 7 farklı bölgesinde 7 farklı şehir seçilmiştir. Örnek yapı olarak ele alınan bu yapıya Artımsal Dinamik Analiz (IDA) metodu ile Kocaeli 1999 depremi uygulanmış ve dirençlilik indeksi hesaplaması için gerekli veriler elde edilmiştir. Söz konusu illere ait hesaplanan PGA değerleri esas alınarak elde edilen dirençlilik indeksleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile dirençlilik indeksi DBYYHY2007'e göre tüm şehirlerde sabit %99,7 iken değişken PGA değerleri ile TBDY2018'e göre %79,7-%99,6 aralığında hesaplanmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 July 2023
Received in revised form 27 August 2023
Accepted 1 September 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

*Resilience, earthquake, seismic index, spectral acceleration*Doi: [10.24012/dumf.1334343](https://doi.org/10.24012/dumf.1334343)

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Evaluating the resistance of structures against seismic effects and minimizing the damages caused by earthquakes constitute one of the main objectives of earthquake engineering. In this context, the concept of seismic resilience, which is very current in earthquake engineering and has been gaining importance in recent years, comes to the fore. In this study, the concept of seismic resilience, which can be defined as the ability of structures to recover after any disaster, is discussed together with its formulations. The concept of seismic resilience, which is explained as a concept, is quantified with the resilience index and the spectral acceleration value, which is one of the parameters constituting this index, is selected as a variable. Within the framework of TBEC (Turkish Building Earthquake Code)2018 and TSC(Turkish Seismic Code)2007 regulations, which have different approaches to spectral acceleration change, 7 different cities in 7 different regions of Turkey were selected for a 7-storey reinforced concrete building. The Kocaeli 1999 earthquake was applied to this structure, which was taken as a sample structure, with the Incremental Dynamic Analysis (IDA) method and the data required for the resilience index calculation were obtained. The resilience indices obtained based on the calculated PGA values of these provinces were compared. With this comparison, the resilience index was calculated in the range of 79.7%-99.6% according to TBEC2018 with variable PGA values, while it was constant 99.7% in all cities according to TSC2007.

Giriş

Türkiye, küresel çapta jeolojik özellikleri, topografik yapısı ve iklimsel koşulları sebebiyle doğal afetlerin sıkça tecrübe edildiği ülkelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ülkenin coğrafi konumu, çevresindeki farklı tektonik plakaların etkileşimi ve yoğun sismik aktivitenin hüküm sürdüğü bir bölgede bulunması, depremler, heyelanlar, sel olayları ve taşkınlar gibi değişik doğal felaketlere karşı bir yatkinlik sergilemektedir. Bu tür afetler, sadece insan hayatını ve ekonomiyi etkilemekle kalmaz, aynı zamanda altyapıyı da ciddi anlamda etkileyebilir.

Türkiye, farklı tektonik levha sınırlarında gerçekleşen hareketlilikler nedeniyle dünyanın en aktif deprem bölgelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Depremler, yerkabuğundaki kırılmaların ani titreşimler halinde yayılması sonucu meydana gelir ve yüzeyleri ile yapıları sarsar. Bu doğal afetler arasında depremler, Türkiye için gerek sıklık bakımından gerek ise en büyük tehlikeleri içermesi bakımından en önemli afetlerden biri olarak öne çıkar. Yüksek sismik aktivite, sayısız depremin yaşanmasına ve bunların büyüklüklerine göre zaman zaman ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle, yapıların deprem etkisine karşı dayanıklılığını artırmak ve direncini güçlendirmek hayati bir öneme sahiptir.

Depremlerin yıkıcı etkileri, yapıların tasarım ve inşasında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, son dönemlerde sismik tasarım alanında öne çıkan bir yaklaşım olan "Direncilik Esaslı Tasarım" (Resilience Based Design-RBD), büyük bir öneme sahiptir. RBD, yapıların sadece enerji sönmüleme kapasiteleriyle değil, aynı zamanda deprem sonrasında hızla eski haline dönebilme yetenekleriyle de ilgilenir [1]. Bu yaklaşım, yapıların bireysel değil, bölgesel zarar analizine izin veren bir "Portföy Yaklaşımı" içinde ele alınması gerektiğini savunur. Bina tasarımı, sadece yapısal özelliklerle sınırlı kalmayıp, toplulukları ve insanları da hesaba katan kapsamlı bir yaklaşımla şekillendirilmelidir [2]. Bu şekilde, depreme dayanıklı yapılar inşa etmenin yanı sıra, toplulukların afetlerle başa çıkma ve hızlı bir toparlanma yeteneğini artırmayı amaçlar.

Sismik açıdan sağlam ve dayanıklı yapıların inşa edilmesi, doğal afetlerin etkilerini en aza indirme ve toplulukların güvenliğini sağlama konusunda önemli bir adımdır. Bu bağlamda, yapıların deprem davranışlarının incelenmesi, sismik analizlerin yapılması ve ileri teknolojilerin kullanılması büyük bir öneme sahiptir. Türkiye'nin jeolojik yapısına uygun olarak deprem riskini azaltmaya yönelik stratejilerin benimsenmesi ve sismik direncilik konusunda sürekli bir bilgi birikiminin sağlanması, gelecekteki doğal afetlerin etkilerini minimize etme yolunda hayati bir rol oynayacaktır. Bu çalışma, Türkiye'nin doğal afetlerle mücadelesinde kritik bir adım olan sismik direncilik konusunda bir bakış açısı sunmayı hedeflemektedir.

Bruneau vd., direncilik esaslı tasarım konseptini ilk defa ortaya koymuşlardır [1]. Bu çalışmada, konseptin tanımı, gerekliliği ve öngörülen ihtiyaçlar incelenmiş ve açıklanmıştır. Bu ilk tanımdan sonra, Bocchini ve ekibi sürdürülebilirlik ile direncilik kavramlarını

karşılaştırdıkları çalışmada, bu iki yaklaşımın altyapı sistemleri genelinde ve özellikle köprülerde nasıl uygulandığını incelemiştirler [3]. Aynı yıl içinde Bruneau ve arkadaşları, konseptin metodolojisini genişleterek sismik performans, kırılabilirlik eğrileri ve direncilik fonksiyonları arasındaki ilişkileri kurmuşlardır [4]. Cimellaro vd., afetlere karşı direncilik kavramını ve nicel değerlendirmesini sunan bir çalışma yapmışlardır. Sağlık tesislerinin deprem etkisi altında değerlendirilmesi için ortak bir referans çerçevesi önererek birleşik bir terminoloji oluşturmuşlardır [5]. Ekhlaspoor ve ekibi, İran'daki yapıların sismik direncilik indeksini tahmin edebilen, "Ri" olarak adlandırılan bir web tabanlı yazılım aracı geliştirmişlerdir. Kırılabilirlik eğrileri kullanılarak direncilik indeksini hızla hesaplamamın yanı sıra, Artımsal Dinamik Analiz (IDA) sonuçlarını Ri yazılımına entegre ederek yapısal direnciliğin doğru bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımışlardır [6]. Samadian vd. örnek bir olay olarak Tahran'da inşa edilen ve daha sonra betonarme perde duvarlarla güncellenen bir okulu ele almışlardır. Okulun sismik direnciliğini değerlendirmek için hasar görülebilirlik ve kırılabilirlik eğrilerini kullanmışlardır. Ayrıca, bölgesel ekonomik koşullara dayalı yeni bir metodoloji uygulayarak kayıp tahminleri yapmışlardır. Bu örnekte, sismik direncilik, %50, %20, %10 ve %2 olmak üzere dört tehlike seviyesinde 50 yıllık süre içinde değerlendirilmiştir [7]. Hancılar vd. 2000 yılı sonrası İstanbul'da inşa edilen binalar için ekonomik kayıp ve karşılaştırmalı hasar tahminleri yapmışlardır. Bu amaçla ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) yazılımının Kentsel Deprem Kayıpları Tahmin Modülünü kullanmışlardır [8]. Onat ve Yön 2021 yılındaki çalışmalarında, daha kolay yapısal değerlendirmeler yapılabilmesi için TBDY-2018 kapsamında yeni bir görel kat öteleme oranı sınır durumu önerisi sunmuşlardır [9].

Türkiye'de önceki deprem yönetmelikleri ve haritaları ile güncel yönetmelikler arasındaki değişimleri inceleyen birçok yayın bulunmaktadır. Bu çalışmalarda farklı yapı tipleri için deprem kuvveti hesap yöntemleri, taban kesme kuvvetleri, deplasmanlar, periyot, hedef deplasmanlar, katlar arası ötelemler, spektrum eğrileri ve kesit hasar değerleri incelenmiştir. [10-17]

Karasin vd. [18] çalışmalarında coğrafi konuma özel tasarım spektrumlarının betonarme yapı performansına etkisini incelemiştirler. Sarıtaş vd. [19] çalışmalarında yüksek katlı yapıların sismik performansını ve sismik izolasyonun etkilerini incelemiştirler. Avcil vd. [20] aynı deprem bölgesinde yer alan ancak her yerleşim için özel olarak kullanılan tasarım spektrumlarının minarelerin sismik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Görgün vd. [21,22] hızlı sismik performans yöntemi ile betonarme yapıların deprem performansları incelemiştirler. Onat vd. [23] çalışmalarında spesifik bir bölgenin, geçmişteki ve günümüzdeki sismotektonik özelliklerini, mevcut yapı stokunu ve depremden önceki yapısal koşulları kısaca sunmak, yapısal performans değerlendirme ve depremden kaynaklanan hasarları ve havza etkisinden kaynaklanan hasarları sınıflandırmayı amaçlamışlardır.

Bu çalışmada dirençlilik esaslı tasarım konsepti çerçevesinde oluşturulan dirençlilik indeksinin tüm parametreleri sabit tutularak spektral ivme değeri değişken olarak seçilmiş ve bu değişkenin dirençlilik indeksine etkisi ortaya konulmuştur. Bu çerçevede yerel sismisiteye yaklaşımları birbirinden farklı olan TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği)2018 ve DBYYHY(Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik) 2007 yönetmelikleri seçilmiş ve kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamaların isabetli olması amacıyla 7 farklı bölgeden 7 farklı ile ait veriler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren yönetmelik ile birlikte mikro bölgeleme yönteminin kırılmalık eğrilerinden elde edilen dirençlilik indeksi bakımından da önemli bir yere sahip olduğu vurgulanmıştır.

Metodoloji

Dirençlilik Esaslı Tasarım

Sismik tasarım alanında ortaya çıkan Dirençlilik Esaslı Tasarım (Resilience Based Design), son dönemde artan önemiyle geleceğin tasarım yaklaşımı olarak kabul edilmektedir. Bu konseptin temelindeki "Dirençlilik" kavramı, yapıların veya yapı elemanlarının enerji sönmüleme kapasitelerinin ötesinde, deprem sonrasında hızla eski ve sağlam durumlarına geri dönebilmeye yeteneğini ifade etmektedir. Mevcut analizler genellikle binaları sadece yapılar olarak ele alırken, RBD yaklaşımı, binaların tasarımının, toplumun ve insanların ihtiyaçlarına entegre bir şekilde düşünülmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bir binanın tek başına değil, bölgesel zarar analizine izin verecek bir tür 'Portföy Yaklaşımı' kullanılarak, bir bina grubu olarak düşünülmesi gerektiğini vurgular.

RBD'nin amacı, her yapının işlevini olabildiğince hızlı bir şekilde yeniden kazanmasını sağlayan teknolojilerin ve eylemlerin geliştirilmesidir. Binaların ve altyapının sadece deprem sırasındaki performansını değil, aynı zamanda deprem sonrası toparlanma (iyileşme) süreçleri de hesaba katılmaktadır.

Sonuç olarak, Dirençlilik Esaslı Tasarım, sadece depremin etkilerini minimize etmekle kalmaz, aynı zamanda toplumların ve yapıların deprem sonrası etkilenen bölgelerde eski işlevselliğini hızla geri kazanabilmesi için kapsamlı bir yaklaşım sunar. Bu yöntemin işlem adımları kısaca şu şekildedir: Öncelikle incelenecek yapının belirlenmesi ve ardından sismik tehlike analizi yapılması gerekmektedir. Yapı, bir yazılım programında modellemeye tabi tutulduktan sonra Artımsal Dinamik Analiz prosedürleri, seçilen deprem ivme kayıtlarına göre uygulanır. Kırılmalık eğrileri, belirlenen hasar sınırları doğrultusunda Artımsal Dinamik Analiz sonuçları kullanılarak oluşturulur. Bu sürecin sonunda, fonksiyonellik eğrisi çıkarılarak dirençlilik indeksi hesaplanabilir.

Dirençlilik indeksinin hesaplanması

Sismik dirençlilik kavramı, incelenen yapının deprem etkisi altındayken belirli bir süre içinde eski işlevselliğine geri

dönebilmeye yeteneğini ifade eder. Dirençlilik kavramının hesaplanma yöntemi Denklem (1) şeklinde sunulmuştur.

$$R = \int_{T_{OE}}^{T_{OE}+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad (1)$$

Bu bağlamda, TOE, E olayının meydana geldiği zamanı temsil ederken, TLC, sistem kontrol süresini ifade eder. Dirençlilik (R), genellikle önceden belirlenmiş olan kontrol süresi (TLC) içinde belirli bir yapı veya topluluğun önceden belirlenmiş işlevselliği veya performans seviyesini sürdürebilmeye yeteneğini ifade eden bir fonksiyon olarak kabul edilir [1-3]. İşlevsellik fonksiyonu Q(t), yapılan işlemlerde işlevi temsil eder ve Denklem (2) şeklinde tanımlanmıştır.

$$Q(t) = [1 - L(I, T_{RE})] \times [H(t - t_{OE}) - H(t - (t_{OE} + T_{RE}))] \times f_{REC}(t, t_{OE}, T_{RE}) \quad (2)$$

İşlevsellik fonksiyonu içerisinde yer alan $L(I, T_{RE})$ kayıp fonksiyonunu (Loss Function) ifade etmekte, $f_{REC}(t, t_{OE}, T_{RE})$ iyileşme fonksiyonunu (Recovery Function) ifade etmekte, $H(t - (t_{OE} + T_{RE}))$ birim adım fonksiyonunu (Heavyside step Function) ve T_{RE} E olayı sonrası iyileşme süresi (Recovery Time of Event E) ifade etmektedir. İyileşme süresi (T_{RE}), incelenen sistemin afet sonrası işlevselliğini, önceden belirlenmiş bir süre içinde afet öncesi seviyeye veya daha iyi bir seviyeye getirmek için gereken süreyi ifade etmektedir. İyileşme süresi (T_{RE}), genellikle kontrol süresi (T_{LC}) değerinden daha kısa olmakta ve depremin şiddeti, inşaat süresi, maliyet, iş gücü gibi pek çok belirsiz parametreye bağlı olmaktadır. Bu nedenle, iyileşme süresi (T_{RE}), dirençlilik analizinde belirlenmesi en zor ve en belirsiz parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

Kayıp fonksiyonu (Loss Function)

Genel olarak, bir kayıp fonksiyonu, Denklem (3)'te yer görülebileceği üzere, doğrudan (L_D) ve dolaylı (L_I) kayıp olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır.

$$L(I, T_{RE}) = L_D + \alpha_I \times L_I \quad (3)$$

Afet sırasında meydana gelen doğrudan kayıplar (L_D), yapısal ve yapısal olmayan eleman kayıplarını ve doğrudan can kayıplarını içermektedir. Ancak dolaylı kayıplar (L_I) zamansal etkilere bağlıdır. Bir ağırlık faktörü olan α_I , ilgili yapının toplum için önemine ve yapının diğer sistemler üzerindeki etkisine bağlı olarak dolaylı kayıplarla çarpılır. Bu anlamda α_I bir önem faktörü katsayısı olarak düşünülebilir. Doğrudan ekonomik kayıplar (L_{DE}), Denklem (4) kullanılarak bina onarım giderlerinin yenileme maliyetlerine oranı olarak tanımlanır.

$$L_{DE,K}(I) = \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{C_{sj}}{I_s} \prod_{i=1}^{t_i} \frac{(1+\delta_i)}{(1+r_i)} \right\} \cdot P_j \{ \cup_{i=1}^n (R_i \geq r_{tim} \ i|I) \} \quad (4)$$

P_j , belirli bir j performans sınırının aşılma koşullu olasılığını ifade etmektedir. I yoğunluğunda bir afet meydana geldiğinde, C_{sj} , j performans seviyesinin aşılması sonucu oluşan hasar durumuyla ilgili bina onarım maliyetini temsil eder. Ayrıca I_s , aynı senaryoda yapının yeniden inşa maliyetini ifade eder. İlk yatırım zamanı ile afet olayının meydana geldiği zaman arasındaki t_i yılı

cinsinden zaman dilimi için uygulanan yıllık iskonto oranı r_i ile δ_i yıllık amortisman oranını ifade etmektedir.

Her bir yapısal ve yapısal olmayan bileşen k için doğrudan ekonomik kayıpların ($L_{DE}(I)$) değerlendirilmesi, aşağıdaki Denklem (5)'te yer alan ağırlıklı ortalama ifadesi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$L_{DE}(I) = \frac{\sum_{k=1}^n W_k \times L_{DE,K}(I)}{N} \quad (5)$$

Bu bağlamda, W_k sembolü, binadaki her bir yapısal ve yapısal olmayan bileşenin önemini yansıtan bir ağırlık faktörünü temsil etmektedir. N ise asansörler, tavanlar, bölmeler, cam, borular, mekanik ve elektrikli ekipmanlar gibi yapısal ve yapısal olmayan bileşenlerin toplam sayısını ifade etmektedir.

$L_{DE,K}(I)$ ifadesi, K bileşeni ile ilişkili doğrudan ekonomik kaybı belirtirken, N sistemdeki yapısal ve yapısal olmayan bileşenlerin toplam sayısını gösterir. Bu yapısal olmayan bileşenler arasında tavanlar, asansörler, mekanik ve elektrikli ekipmanlar, borular, bölmeler gibi örnekler bulunabilir.

İyileşme fonksiyonu (Recovery Function)

İyileşme süreci oldukça karmaşıktır ve birçok değişkenin, zaman boyutunun ve mekânsal boyutun etkisi altındadır. Aynı topluluk veya bölgeler içinde farklı coğrafi alanlar arasındaki farklılıkları ortaya çıkarabilir. Böylelikle, farklı iyileşme hızları ve farklı iyileşme kaliteleri ortaya çıkabilir. Bu durum, bir yapıyı veya sistemin iyileşme modellemesinin karmaşıklığını göstermektedir.

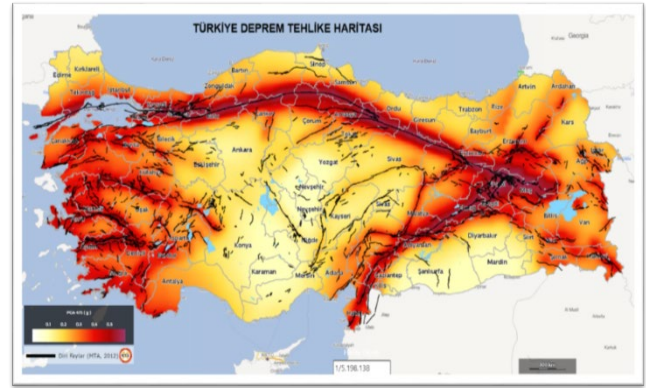
Sisteme ve toplumun hazırlık ve tepkisine bağlı olarak, çeşitli iyileşme fonksiyonu türleri seçilebilir. Genellikle kullanılan iyileşme fonksiyonları lineer, üstel [24] ve trigonometrik [25] olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu çalışmada, Denklem (6)'da belirtilen lineer iyileşme fonksiyonu ele alınmıştır.

$$f_{REC}(t, t_{OE}, T_{RE}) = \left\{ 1 - \left(\frac{t - t_{OE}}{T_{RE}} \right) \right\} \quad (6)$$

Sismik parametrelerin karşılaştırılması

Herhangi bir bölgedeki yapıların tasarımında ve değerlendirilmesinde bölgenin depremsellik unsurları dikkate alınmalıdır. Depremsellik unsurlarının bir bütün olarak kullanılması tasarım spektrumlarının elde edilmesi ile sağlanır. Tasarım spektrumları, bölge ve çevresindeki fay/fay gruplarının özellikleri, bölgedeki deprem aktivitesi, meydana gelen depremlerin özellikleri ve yapının faylara olan uzaklığı gibi birçok parametrenin bir araya getirilmesi ile elde edilir. Yeni yönetmelikte, 2007 yönetmeliğinde deprem tehlikesini tanımlayan ana parametre olan etkin yer ivmesi yerine, kısa periyot ve 1.0 s periyot için Deprem Tehlike Haritasında tanımlanan spektral ivme katsayıları ve yerel zemin etki katsayıları esas alınarak tasarım ivme spektrumu tanımlanmıştır. 2007 deprem yönetmeliğinde deprem parametreleri beş farklı deprem bölgesinin yanı sıra dört farklı zemin sınıfı dikkate alınarak belirlenmekteydi.

Ancak 2019 yılında yürürlüğe giren yeni deprem yönetmeliği ile coğrafi konuma özgü deprem parametre değerleri hesaplanmaktadır [26]. Yeni yönetmelikle birlikte Deprem Bölgeleri yerine Deprem Tehlike Haritası kullanılmıştır. Türkiye'nin güncellenmiş sismik tehlike haritası Şekil 1'de gösterilmektedir. Türkiye Deprem Tehlike Haritası, 475 yıllık geri dönüş süresine eşdeğer olan 50 yıl içinde %10 olasılıkla ulaşılması veya aşılması beklenen Tepe Yer İvmesi (PGA) değerlerini göstermektedir. PGA konturları sarı renkte olup nispeten düşük tehlike bölgelerini (0,1 g'nin altında), orta tehlike bölgeleri (0,1 ila 0,25 g) sarıdan turuncuya doğru sıralanmakta ve yüksek riskli bölgeler (0,3 g'den fazla) kırmızı renkle gösterilmektedir.



Şekil 1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası [27]

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018), önceki yönetmeliğe kıyasla üç farklı yer hareketi seviyesi (DD-1; DD-3; DD-4) eklenmiştir [28]. DBYYHY-2007'de ise sadece tekrarlanma periyodu 475 yıl ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan standart tasarım depremi yer hareketi seviyesi (DD-2) dikkate alınmıştır [29]. Dört deprem seviyesinden ilk ikisi olan DD-1 ve DD-2'nin ASCE-07'deki tasarım depremlerine karşılık geldiği belirtilmektedir [30]. Mevcut yönetmelikteki dört farklı yer hareketi seviyesi Tablo 1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında tüm iller için 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan DD-2 deprem seviyesi dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Deprem yer hareketi düzeyleri [28]

Deprem Düzeyi	Tekrarlanma Periyodu	50 yılda aşılma olasılığı	Açıklama
DD-1	2475	0.02	En büyük deprem düzeyi
DD-2	475	0.1	Standart tasarım deprem düzeyi
DD-3	72	0.5	Sık deprem düzeyi
DD-4	43	0.68	Servis deprem düzeyi

Şekil 1'de verilen kullanımı pratik olan Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından kullanıma açılmıştır. Farklı deprem yer

hareketi seviyeleri, yerel zemin koşulları ve konum (enlem ve boylam) verileri kullanılarak web uygulaması üzerinden herhangi bir konum için deprem parametreleri hesaplanabilmektedir. Kısa periyotlu harita spektral ivme katsayısı (S_s) ve 1 saniye periyodu için harita spektral ivme katsayısı (S_1), yerel zemin durumu ve herhangi bir coğrafi konum için aşılma olasılığı dikkate alınarak elde edilir. Tasarım spektral ivme katsayıları S_{Ds} ve S_{D1} , spektral ivme katsayıları (S_s ve S_1) ve yerel zemin katsayıları (F_s , F_1) kullanılarak Denklem (7) ve (8)'de gösterildiği gibi dönüştürülmüştür.

$$S_{Ds} = S_s \cdot F_s \quad (7)$$

$$S_{D1} = S_1 \cdot F_1 \quad (8)$$

Seçilen konumlar için farklı aşılma olasılıkları için elde edilen tepe yer ivmesi (PGA) değerleri ve önceki yönetmeliğe göre tepe yer ivmesi değişimleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Her iki yönetmelik içinde DD-2 kullanılırken TBDY-2018 için zemin sınıfı ZC olarak seçilmiştir.

Tablo 2. Deprem yer hareketi düzeyleri

Şehir	En büyük yer ivmesi PGA (g) TBDY2018					DBYYHY 2007
	50 yılda aşılma olasılığı					
	2%	10%	50%	68%	10%	
Adıyaman	0.959	0.514	0.172	0.112		0.4
Çorum	1.145	0.669	0.295	0.173		
Denizli	0.852	0.469	0.189	0.138		
Bingöl	1.137	0.654	0.274	0.140		
Hatay	0.878	0.448	0.148	0.100		
Samsun	1.082	0.624	0.249	0.161		
Yalova	1.012	0.591	0.234	0.146		

Tablo 3. DD-2 için elde edilen değerler

Şehir	PGA(g)	S_{Ds}	S_{D1}
Adıyaman	0.514	1.472	0.49
Çorum	0.669	1.95	0.70
Denizli	0.469	1.37	0.39
Bingöl	0.654	1.93	0.61
Hatay	0.448	1.26	0.41
Samsun	0.624	1.80	0.65
Yalova	0.591	1.74	0.57

Tablo 3'te, TBDY2018 ile araştırmacıların kullanımına sunulan mikro bölgeleme yöntemi sayesinde her ilden ayrı ayrı elde edilen spektral parametreler verilmiştir. bu çalışmada ele alınan tüm yerleşim birimleri için bir önceki yönetmelikten daha yüksek ve farklı spektral değerler elde edilmiştir. Önceki yönetmelikte her bir deprem bölgesi için

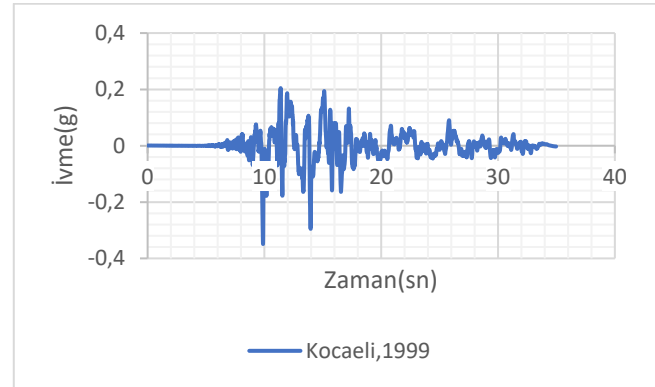
tek bir tasarım spektrumu kullanılırken, mevcut yönetmelikte her bir coğrafi konum için belirli bir tasarım spektrumu kullanılmaktadır. Dolayısıyla, önceki yönetmelik bölgesel bazda olduğu için tüm bu yerleşimler için aynı spektral değerler elde edilmiştir. Bölgeselden coğrafi konum bazlı deprem tehlikesine geçişe bağlı olarak elde edilecek deprem parametrelerinin çok daha anlamlı olabileceği söylenebilir.

Çalışmada incelenen betonarme yapı

Çalışma kapsamında seçilen şehirlerin tümünde muhtemel olarak bulunabilecek olan 7 katlı X doğrultusunda 4, Y doğrultusunda 2 açıklıklı betonarme bir bina SeismoStruct [27] yazılımında modellenmiştir. Kolon ebatları sabit 40cm*50cm olarak seçilirken, kiriş ebatları sabit 25cm*60cm olarak seçilmiştir. Binada kullanılan malzemeler TBDY2018 yönetmeliği esas alınarak, beton için 25 MPa dayanıma sahip, donatı dayanımı 420 MPa dayanıma sahip olarak nümerik modelleme tamamlanmıştır. Modellenen bu yapıya 1999 Kocaeli depremi etkilerek zaman-tanım aralığında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. Kocaeli depremi verileri

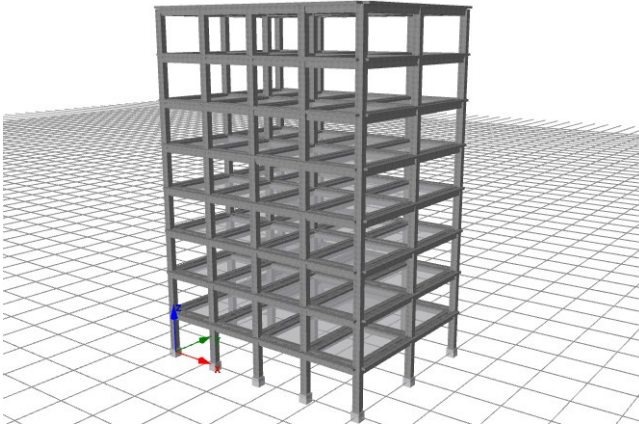
Deprem	İstasyon	M	PGA(g)
Kocaeli, 1999	Sakarya	7.4	0.415



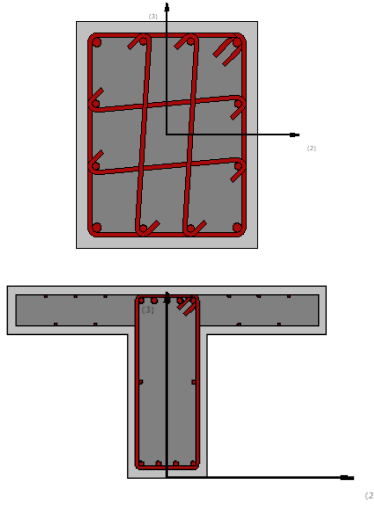
Şekil 2. Kocaeli depremi İvme-Zaman grafiği

Tablo 4 ve Şekil 2'de verileri gösterilen Kocaeli 1999 depremi, X doğrultusunda gerçekleştirilen IDA analizi 0.1g ile 2g aralığında 0.1g adım aralığı ile ölçeklenerek toplam 20 defa tekrarlanmıştır. Böylelikle her ölçekleme adımı için ayrı ayrı görel kat ötelemeleri hesaplanmış ve dirençlilik indeksi için gerekli veriler elde edilmiştir.

Analize konu olan yapının 3 boyutlu gösterimi Şekil 3'te, kullanılan kolon ve kiriş enkesitleri ise Şekil 4'te verildiği gibidir.



Şekil 3. Analiz edilen yapının 3 boyutlu modeli

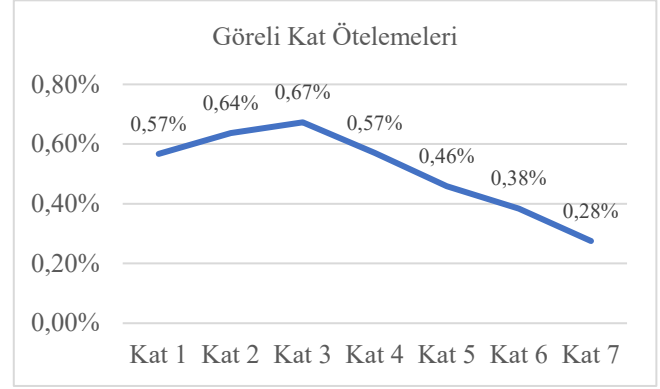


Şekil 4. Kullanılan kolon ve kiriş enkesitleri

Bu örnek yapının modellenmesi sırasında döşeme kullanılmamış olup rijit diyafram tanımlaması yapılmıştır. Döşemelerde hesaplanan tüm yükler kirişlere düzgün yayılı yük olarak etkilmiştir. Analiz sonuçlarının daha hassas elde edilebilmesi için tüm kolon ve kirişlerde yayılı plastik mafsallı modellemesi sabit 150 lif tanımlamasıyla gerçekleştirilmiştir.

Bulgular

Çalışma kapsamında incelenen şehirlerin tümünde görülebilecek tipik bir yapı seçilmiş ve modellenmiştir. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sismik dirençlilik indeksinin hesaplanmasında kullanılmıştır. İlk bölümde detaylıca izah edilen sismik dirençlilik indeksinin yapısal olmayan tüm parametreleri sabit olarak seçilmiş ve analiz sonuçlarına doğrudan etki etmemesi sağlanmıştır. Analizler sonucu oluşan maksimum görelî kat ötelemeleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Elde edilen görelî kat öteleme oranları

Maksimum görelî kat ötelemeleri dirençlilik indeksi hesaplamasında kullanılırken sınır değerler belirlenerek ilk bölümde anlatıldığı üzere kırılma eğrilerinden dirençlilik indeksi türetilmiş olup görelî kat ötelemesi sınır değerleri HazUS [32]'den alınan ve Tablo 5'te verilen değerler sınır değerler olarak kullanılmıştır.

Tablo 5. HazUS Görelî kat ötelemesi limitleri

Hafif Hasar	Orta Hasar	Ağır Hasar	Göçme
0.0025	0.005	0.015	0.04

Aynı yapının farklı illerde bulunması durumu için TBDY2018'e göre yapılan hesaplamalara göre ortaya çıkan dirençlilik indeksleri hesaplanıp Tablo 6'da verildiği gibidir.

Tablo 6. Dirençlilik indeksleri (TBDY2018)

Şehir	PGA(g)	Dirençlilik İndeksi
Adıyaman	0.514	%98
Çorum	0.669	%79.9
Denizli	0.469	%99.6
Bingöl	0.654	%79.7
Hatay	0.448	%99.6
Samsun	0.624	%79.6
Yalova	0.591	%81.7

Aynı yapının farklı illerde bulunması durumunda DBYYHY 2007 yönetmeliğine göre yapılan hesaplamalara göre ortaya çıkan dirençlilik indeksleri tüm iller için sabit 0.4g PGA değerine karşılık Dirençlilik İndeksleri de %99,7 olarak hesaplanmıştır. Söz konusu bütün illerin 1. Derece deprem bölgelerinde yer alması nedeniyle tamamı aynı ivme değerleri ile değerlendirildiğinden dolayı dirençlilik indeksine sismik parametrelerin katkısı şehirler arasında herhangi bir farklılık göstermemiştir.

Sonuç

Zaman içinde meydana gelen depremler, bu depremler nedeniyle yaşanan can ve mal kayıpları, bilimsel ve teknolojik gelişmeler ile yapı teknolojilerindeki yenilikler, depreme dayanıklı yapı tasarımı esaslarında ve deprem tehlike haritalarında değişiklikler yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu süreçte Türkiye de gerekli değişiklikleri, yenilikleri ve eklemeleri yapmıştır. Farklı tarihlerde hem deprem tehlike haritaları hem de depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri açısından önemli değişiklikler yapmıştır. Bu değişikliklerin her biri deprem mühendisliği kapsamında bir kazanım olarak değerlendirilmektedir. Daha detaylı olarak hazırlanan güncel yönetmelikteki önemli değişiklikler arasında farklı deprem yer hareketi seviyeleri ve konuma özgü deprem parametrelerinin hesaplanması yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında farklı konumlar için deprem-yapı parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Yer seçimleri yapılırken, karşılaştırmaların daha doğru yapılabilmesi için, bir önceki deprem bölgesi haritasında aynı derecede deprem bölgesinde yer alan, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerindeki toplam yedi yerleşim birimi ve hepsinde birer yerleşim birimi dikkate alınmıştır. Önceki yönetmelikte, aynı yerel zemin koşulları altında bu yerleşimlerin tümü için aynı deprem, yapısal parametreler ve tepki spektrumu elde edilmiştir. Ancak her coğrafi konumun kendine has depremsellik özellikleri olduğundan deprem parametreleri değişkenlik göstermekte ve bu değişkenlik yapısal sonuçları etkilemektedir.

Bu çalışmada dikkate alınan tüm yerleşimler birinci derece deprem tehlike bölgesinde yer almaktadır. Önceki

yönetmelikte birinci derece bölgeler için yinelenme periyodu 475 yıl olan deprem yer hareketi seviyesi için etkin yer ivmesi katsayısı 0.40g olarak alınmıştır. Bu değer aynı deprem bölgesinde yer alan tüm yerleşimler için aynı değeri almaktadır. Ancak mevcut yönetmelikte seçilen her yerleşim yeri için PGA değerleri değişmiştir. Aynı deprem yer hareketi seviyesi için PGA değerleri 0.44g ve 0.67g aralığında elde edilmiştir. Bu çalışmada seçilen tüm yerleşim yerlerinde önemli farklılıklar vardır. Bu farklılıklar, TBDY2018 yönetmeliğinin, yerleşimlerin depremsellik unsurlarının özelliklerine bağlı olarak DBYYHY2007'ye göre daha güvenli bir tarafta durduğunu göstermektedir.

Öte yandan, çalışmanın odak noktalarından biri olan dirençlilik esaslı tasarımın diğer tüm parametreleri dışarıda bırakılarak sadece spektral parametrelerin dikkate alınması ile ortaya çıkan dirençlilik indeksi sonuçlarının değişen PGA değerleri ile birlikte belirgin farklar gösterdiği açıktır. Bu durum TBDY2018 yönetmeliği ile birlikte mikro bölgeleme ve sahaya özgü spektral parametrelerin elde edilmesinin önemini bir kez daha göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışmada söz konusu lokasyonlar için AFAD sismik harita verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verileri araştırmacıların kullanımına açtıkları için kuruma teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., Von Winterfeldt, D., "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." *Earthq Spectra*, vol. 19(4), pp.733–52, 2003.
- [2] Cimellaro, G.P., "Resilience-Based Design (RBD) modelling of civil infrastructure to assess seismic hazards" *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, pp. 268-303, 2013.
- [3] Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T. ve Zinke, T., "Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach." *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 20(2), 2014.
- [4] Bruneau, M., Reinhorn, A., "Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities." *Earthq Spectra*, vol. 23(1), pp. 41–62, 2007.
- [5] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. ve Bruneau, M., "Framework for analytical quantification of disaster resilience", *Eng. Struct.*, vol. 32(11), pp. 3639-3649, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>. 2010.
- [6] Ekhaspoor, A., Raissi Dehkordi, M., Eghbali, M., ve Samadian, D., "Pre-event assessment of seismic resilience

index for typical Iranian buildings via a web-based tool." *International Journal of Civil Engineering*, vol. 20, pp. 257-272, 2022.

[7] Samadian, D., Ghafory-Ashtiany, M., Naderpour, H., ve Eghbali, M., "Seismic resilience evaluation based on vulnerability curves for existing and retrofitted typical RC school buildings." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 127, 105844. 2019.

[8] Hancılar, U., Şeşetyan, K. Çaktı, E., "İstanbul'daki 2000 Yılı Sonrası Binalar İçin Tasarım Depremi Altında Karşılaştırmalı Yapısal Hasar ve Mali Kayıp Tahminleri." *Teknik Dergi*, vol. 30(3), pp. 9107-9123. 2019. DOI: 10.18400/tekderg.326939

[9] Onat, O., Yön, B. "A novel inter-story drift limit proposal for TBEC2018 and fragility prognosis with TSC2507." *Journal of Structural Engineering*, vol. 4(2), pp. 068-082. 2021.

[10] Sucuoğlu H., "New improvements in the 2019 building earthquake code of Turkey", *Turk. J. Earthq. Res.* 1(1), 63-75. 2019

[11] Işık, E., Ekinci, Y.L., Sayil, N., Buyuksarac, A., Aydın, M.C., "Time-dependent model for earthquake occurrence and effects of design spectra on structural performance: a case study from the North Anatolian Fault

- Zone, Turkey”, *Turkish J. Earth Sci.*, 30(2), 215-234. 2021 <https://doi.org/10.3906/yer-2004-20>.
- [12] Adar, K., Büyüksaraç, A., Işık, E., Ulu, A.E., “Comparison of 2007 and 2018 seismic codes in the scope of structural analysis”, *Eur. J. Sci. Techn.*, 25, 306-317. 2021 <https://doi.org/10.31590/ejosat.906347>.
- [13] Işık, E., Harirchian, E., Bilgin, H., Jadhav, K., “The effect of material strength and discontinuity in RC structures according to different site-specific design spectra”, *Res. Eng. Struct. Mater.*, 7(3), 413-430. 2021 <http://dx.doi.org/10.17515/resm2021.273st0303>.
- [14] Işık, E., Fatih Avcil, F., Harirchian, E., Arkan, E., Bilgin, H., ve Özmen, H.B. “Architectural Characteristics and Seismic Vulnerability Assessment of a Historical Masonry Minaret under Different Seismic Risks and Probabilities of Exceedance” *Buildings* 12, no. 8: 1200. 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12081200>
- [15] Avcil, F., Işık, E., Büyüksaraç, A. “The effect of local soil conditions on structure target displacements in different seismic zones.” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(4) , 1000-1011 . 2022. DOI:10.17714/gumusfenbil.1107506
- [16] Işık, M.F., Avcil, F., Harirchian, E., Bülbül, M.A., Hadzima-Nyarko, M., Işık, E., İzol, R., Radu, D. “A Hybrid Artificial Neural Network—Particle Swarm Optimization Algorithm Model for the Determination of Target Displacements in Mid-Rise Regular Reinforced-Concrete Buildings”. *Sustainability*. 2023; 15(12):9715. <https://doi.org/10.3390/su15129715>
- [17] Arkan, E., Işık, E., Harirchian, E., Topçubaşı, M., Avcil, F. “Architectural Characteristics and Determination Seismic Risk Priorities of Traditional Masonry Structures: A Case Study for Bitlis (Eastern Türkiye).” *Buildings*; 13(4):1042. 2023 <https://doi.org/10.3390/buildings13041042>
- [18] Karasin, İ.B., Işık, E., Demirci, A., Aydın, M.C., “Coğrafi konuma özel tasarım spektrumlarının betonarme yapı performansına etkisi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(3), 1319-1330. 2020. <https://doi.org/10.24012/dumf.682377>.
- [19] Saritaş, F., Bedirhanoglu, I., Konak, A., Keskin, M.S. “Effect of Seismic Isolation on the Performance of High-Rise Buildings with Torsional Instability.” *Sustainability*; 15(1):36. 2023 <https://doi.org/10.3390/su15010036>
- [20] Avcil, F., Işık, E., Bilgin, H., Baytan, H.Ö. “TBDY-2018’de verilen tasarım spektrumlarının anisals yığma yapı sismik davranışına etkisi”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(16), 165-177. 2022. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1051120>
- [21] Görgün, H., Kaya, D., Öncü, M. E., Çetin, S. Y. “On performance-based seismic assessment method for medium-rise RC buildings.” *Gradevinar*, 71(08.), 663-672. 2019.
- [22] Görgün, H., Kaya, D. Hızlı sismik performans değerlendirme yöntemi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(4), 685-694. 2017.
- [23] Onat, O., Yön, B., Öncü, M. E., Varolgüneş, S., Karaşin, A., Cemalgil, S. “Field reconnaissance and structural assessment of the October 30, 2020, Samos, Aegean Sea earthquake: an example of severe damage due to the basin effect. ‘*Natural Hazards*, 112(1), 75-117. 2022.
- [24] Singh, R. R., Bruneau, M., Stavridis, A., ve Sett, K. “Resilience deficit index for quantification of resilience.” *Resilient Cities and Structures*, vol. 1(2), pp. 1-9. 2022.
- [25] Yin, C., Kassem, M. M., ve Mohamed Nazri, F., “Comprehensive Review of Community Seismic Resilience: Concept, Frameworks, and Case Studies.” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022.
- [26] Isik, E., Karasin, I.B., and Karasin, A. "The effect of different earthquake ground motion levels on the performance of steel structures in settlements with different seismic hazards." *Structural Engineering And Mechanics* 84, no. 1: 85-100. 2022.
- [27] <https://tdth.afad.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 08.08.2023)
- [28] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Resmi Gazete; 30364, 2018.
- [29] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara, 2007.
- [30] Güler, K., Celep, Z. “On the general requirements for design of earthquake resistant buildings in the Turkish Building Seismic code of 2018”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1), 012015. 2020.
- [31] Seismosoft, “SeismoStruct 2022 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures”, available from <https://seismosoft.com/>. 2022.
- [32] FEMA (Federal Emergency Management Agency), “Hazard Earthquake Model Technical Manual” Erişim Tarihi: 21 Temmuz 2021. <https://www.fema.gov/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus/user-technical-manuals>.