

# ALKÜ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



ALANYA  
**ALAADDİN  
KEYKUBAT**  
ÜNİVERSİTESİ

Cilt:4 Sayı:3 Eylül-Aralık 2022

Volume:4 Issue:3 September-December 2022

ALKU  
JOURNAL of SCIENCE

e-ISSN 2667-7814

Alanya  
Alaaddin Keykubat University

## **DERGİNİN KÜNYESİ / JOURNAL INFO**

**Derginin Adı / Journal Name:** ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi / ALKU Journal of Science

**Kısa Adı/ Short Name:**

**e-ISSN:** 2667-7814

**Doi prefix:** 10.46740/alku.

**Yayın Dili / Publication Language :** Türkçe / English

**Yayın Periyodu / Publication Period:** Yılda üç kez (Nisan, Ağustos ve Aralık) / Three times a year (April, August, and December)

**Sahibi / Owner:** Prof. Dr. Ekrem KALAN, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Rektörü

**Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Publishing Manager:** Prof. Dr. Mehmet KANOĞLU

**Kuruluş / Establishment:** ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi tarafından tüm mühendislik bilimleri ve temel bilimler alanında yılda 3 kez yayınlanan hakemli bir dergidir. Dergimizde, Türkçe ve İngilizce dillerinde orijinal araştırma çalışmaları ve derlemeler yayımlanmaktadır. Bu dergi, hakemli ve açık erişimli bir uluslararası mühendislik bilimleri ve temel bilimler dergisidir. Değerlendirme ve yayınlanma süreçlerinde yazarlardan ücret talep edilmez.

ALKU Journal of Science is an international, peer-reviewed journal which is published by Rafet Kayış Engineering Faculty of Alanya Alaaddin Keykubat University in all areas of engineering and basic science. ALKU Journal of Science is a triannually published open access journal operating an online submission and peer review system which allows authors to submit articles online and track their progress. No charges are required from the authors in all of the publication steps.

**Dizinler ve Platformlar / Indexing and Platforms:** Google Scholar, Cosmos Impact Factor, ResearchBip, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Asos Index, International Innovative Journal Impact Factor(IIJIF), Scientific Indexing Services(SIS)

**Web Adresi/ Web address :** <https://dergipark.org.tr/tr/pub/alku>

**Yayınlayan Kuruluş / Publisher :** Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi / Alanya Alaaddin Keykubat University

**Makale gönderim ve takip sistemi / Article submission and tracking system:** ULAKBİM Dergi Sistemleri, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/alku>

**Web barındırma ve teknik destek / Web hosting and technical support:** Dergipark Akademik <http://dergipark.gov.tr/>

**İletişim / Contact:** Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Alanya, Antalya. E-mail: [alkufbd@alanya.edu.tr](mailto:alkufbd@alanya.edu.tr) Tel/Phone: 0242 5106060 (2545)

## EDİTÖR / EDITOR

**Prof. Dr. Mehmet KANOĞLU**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Alanya, Antalya

## ALAN EDİTÖRLERİ / SUBJECT EDITORS

**Prof. Dr. Fikri Serdar Gökhan**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü. Alanya, Antalya

Subject: Electrical-Electrical Engineering

Alan: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

**Doç. Dr. Bertan Beylergil**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Alanya, Antalya

Subject: Mechanical Engineering

Alan: Makine Mühendisliği

**Doç. Dr. İrem Küçüköğlü**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü. Alanya, Antalya

Subject: Mathematics

Alan: Matematik

**Dr. Öğr. Üyesi Murat Aksel**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Alanya, Antalya

Subject: Civil Engineering

Alan: İnşaat Mühendisliği

**Dr. Öğr. Üyesi Ciğdem Dülgerbaki**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü. Alanya, Antalya

Subject: Chemistry

Alan: Kimya

**Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Erdoğan**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Genetik ve Biyomühendislik Bölümü. Alanya, Antalya

Subject: Genetic Engineering

Alan: Genetik Mühendisliği

**Dr. Öğr. Üyesi Tuğba Aktar Küçükarslan**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü. Alanya, Antalya

Subject: Food Engineering

Alan: Gıda Mühendisliği

## **YAYIN VE TEKNİK EDITÖRLERİ / PUBLISHING AND TECHNICAL EDITORS**

**Arş .Gör. Dr. Gökhan Canbolat**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Alanya, Antalya

**Arş .Gör. Mustafa Altuğ Peker**, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. Alanya, Antalya

## **YAYIN KURULU / PUBLISHING BOARD**

Hüseyin AKILLI (Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi)

Gökhan APAYDIN (Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Naci ÇAĞLAR (Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi)

Hakan ÇELEBİ (Doç. Dr., Aksaray Üniversitesi)

Rossana DIMITRI (Dr., University of Salento)

Tamio ENDO (Prof. Dr., Mie University)

John GELEGENIS (Prof. Dr., Technological Educational Institute of Athens)

Viktor GRIBNIAKN (Prof. Dr., Vilnius Gediminas Technical University)

Anastas IVANOV IVANOV (Doç. Dr., Todor Kableskov Higher School of Transport)

İlker Murat KOÇ (Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi)

Anatoli I POPOV (Prof. Dr., University of Latvia)

Bilsay SÜMER (Dr., Hacettepe Üniversitesi)

Cevat SARIOĞLU (Prof. Dr., Marmara Üniversitesi)

Francesco TORNABENE (Dr., University of Bologna)

Jamal Seyyed Monfared ZANJANI (Dr., University of Twente)

**ALKÜ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ 2022:4(3)**

**ALKU JOURNAL OF SCIENCE 2022:4(3)**

**İçindekiler / Contents**

1. Farklı Duvar Modellerinde Isı Yalıtımının Etkisinin İncelenmesi / *Investigation of the Effect for Thermal Insulation on Different Wall Models*  
Mehmet KAN, Murat KORU  
.....110-119
2. Bulanık Ters Mantık Yöntemi ve Çelik Boru Profiller ile Teşkil Edilmiş Çelik Kafes Sistem Elemanlarının Tasarımında Kullanımı / *Fuzzy Inverse Logic Method and Its Usage in the Design of Steel Truss System Elements Constructed with Steel Pipe Profiles*  
Ertekin ÖZTEKİN  
.....120-142
3. Theoretical Investigation on Effect of Helicopter Main Rotor Parameters in Required Power / *Helikopter Ana Rotor Parametrelerinin Gerekli Güçteki Etkisinin Teorik İncelenmesi*  
Semanur ALTINTAŞ, Mehmet BAKIRCI  
.....143-158
4. Plastik Atıkların Betonda Değerlendirmesindeki Güncel Durum / *Current Situation in the Evaluation of Plastic Wastes in Concrete*  
Mustafa Altuğ PEKER, Oğuzhan ATAŞ, Murat AKSEL  
.....159-178

## Farklı Duvar Modellerinde Isı Yalıtımının Etkisinin İncelenmesi

Mehmet Kan<sup>1\*</sup> , Murat Kuru<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

\*mehmetkan@sdu.edu.tr

### Özet

Bu çalışmada, ısı kaybını belirlemek amacıyla farklı duvar modelleri tasarlanmıştır. Bu amaçla klasik duvar, cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar, tromble duvar ve faz değiştiren malzemeli (FDMli) tromble duvar olmak üzere 5 farklı duvar termal davranışları irdelenmiştir. İlk olarak 2 cm iç sıva, 18,5 cm tuğla ve 2 cm dış sıvadan oluşan yalıtımsız klasik duvar modeli ve daha sonra 5 cm taş yünü ve cam yünü yalıtım malzemeli duvar modelleri için analizler yapılmıştır. Son olarak tromble duvar model uygulaması incelenmiş olup tromble duvar modeline FDM eklenerek ısı yalıtımına etkisi incelenmiştir. 3. bölgede yer alan Isparta iline ait iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenmiştir. Isparta için ocak ayı verilerine göre iç ortam sıcaklığı 22 °C ve dış ortam sıcaklığı -1°C olduğu hesaplanmıştır. Bu duvar modelleri için yapılan analizlerden elde edilen sıcaklık ve ısı akısı verileri karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda iç ortam duvar sıcaklığı FDMli tromble duvar modeli analizler sonucunda daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** FDM, Tromble duvar, Isı yalıtımı, HAD.

## Investigation of the Effect for Thermal Insulation on Different Wall Models

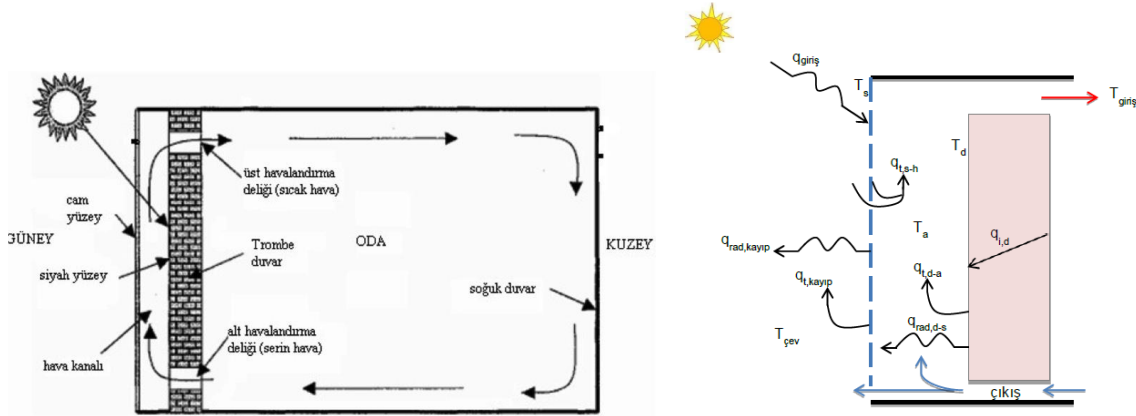
### Abstract

In this study, different wall models were designed to determine the heat loss. For this purpose, the thermal behavior of 5 different walls, namely the classical wall, the wall insulated with glass wool, the wall insulated with rock wool, the tromble wall and the tromble wall made of phase change material (FDM), was studied. First, analyzes were performed for the classic uninsulated wall model consisting of 2 cm interior plaster, 18.5 cm brick and 2 cm exterior plaster, and then for the wall models with 5 cm rock wool and glass wool insulation materials. Finally, the application of the tromble wall model was investigated and the effect on thermal insulation of adding FDM to the tromble wall model was studied. The indoor and outdoor temperatures of Isparta province, which is located in the 3rd region, were obtained. According to the January data for Isparta, the indoor temperature is 22 °C and the outdoor temperature is -1 °C. The temperature and heat flux data obtained from the analyzes for these wall models were compared. As a result of the analysis, it was found that the analysis of the internal temperature of the wall, the tromble wall model with FDM, gave better results.

**Keywords:** FDM, Trombe wall, Thermal insulation, CFD.

## 1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, doğal enerji kaynakları insan yaşamını kolaylaştıran önemli bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi kullanılarak binaların ısıtma ve soğutma ihtiyacı sıcak su elde edilmesi gibi avantajları sahip ve kolaylıkla temin edilebilmektedir. Güneş enerjisi, günümüz uygulamalarında aktif, pasif ya da her ikisinin birleşimini içeren yöntemlerle kullanılmaktadır. Aktif yöntemde; sisteme ek bir enerji vererek (fan, pompa gibi) enerji sağlanır. Bu yöntemler genelde kolektör sistemlerinde kullanılır. Pasif yöntemde ise sisteme herhangi bir ek enerji verilmeden yalnızca doğal yollarla enerji transferi sağlanır. Pasif ısıtma, güneş ışınımını toplama mekanizmalarına bağlı olarak farklılık gösterir. Pasif güneş enerji sistemlerinde kullanılan ısıtma ve soğutma işlemleri, radyasyon, kondüksiyon ve doğal konveksiyondan oluşmaktadır. Güneş ışığı binaya çarptığı zaman, bina malzemeleri bu ışığı geçirir, yansıtır ya da güneş ışınımını absorbe eder. Binaların ısıtılması, doğal bir enerji kaynağı olan güneş vasıtasıyla yapılabilmektedir. Pasif ısıtma tekniklerinden biri de Trombe duvar kullanımıdır [1]. Şekil 1’de Trombe duvar çalışma prensibi ve ısı transfer mekanizması gösterilmiştir. Trombe duvar bir kolektör sistemi olup, duvar ve duvardan belli bir mesafeye yerleştirilmiş cam yüzeyden oluşur. Duvarın dış yüzeyi güneşe bakar ve güneş ışınlarını absorplayıcı olarak çalışır. Burada, camdan geçen ışınlar, Trombe duvar tarafından emilerek, enerji duvar içinde depolanır. Cam ile duvar arasında kalan hava ise ısınır ve doğal konveksiyon yoluyla üst delikten iç ortama iletilir. Bilindiği gibi ısınan hava genişler ve böylece sıcaklığı artarken yoğunluğu azalır. Dolayısı ile kanal içerisindeki hava, kaldırma kuvvetinin etkisiyle yükselir. Üst delikten oda içerisine girerek, sahip olduğu enerjiyi buralara aktarır. Soğuk oda havası, Trombe duvarın alt kısmında bulunan hava deliğinden kanala çekilir, hava kanalında ısınarak yükselir ve oda içerisine tekrar sirkülasyon yoluyla aktarılır. Kanalda doğal konveksiyonla ısının taşınması, duvarın alt ve üst kısımlarına hava deliklerinin açılmasıyla mümkün olmaktadır. Böylece kışın güneşli günlerde odaya ek bir ısı kazancı sağlanmış olur. Trombe duvar sistemlerinde duvarın güneşe bakan dış yüzeyi koyu renkte olmalıdır. Ayrıca trombe duvarın için ısı transfer modeli gösterilmiştir. Bu modelde ısı transferi radyasyon, kondüksiyon ve doğal konveksiyon olmak üzere üç faktörden oluşmaktadır [2].



Şekil 1. Trombe duvar çalışma prensibi ve ısı transfer mekanizması [1,2]

Literatürde binalarda yalıtım malzemesi trombe duvar ve FDMlerin duvar modellerinde kullanımına yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır. Uçar ve Balo çalışmalarında farklı iklim bölgeleri için optimum yalıtım kalınlıklarını ve yatırım maliyetlerini incelemişlerdir. Bölge ve yalıtım malzemesine bağlı olarak enerji tasarrufunun değiştiği gözlemlenmiştir [3]. Yu vd., yaptıkları çalışmada Çin’in farklı bölgelerinde yaz ve kış mevsimleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesinde farklı yalıtım malzemelerini karşılaştırmışlardır. [4]. Gölcü vd. dış

duvar modelinde taş yünü yalıtım malzemesi olarak kullanmışlardır. Bu bina duvarı için optimum yalıtım kalınlıklarını, enerji tasarruflarını ve geri ödeme sürelerini hesaplamışlardır [5]. Liu vd., çalışmalarında yıllık enerji tüketimini tahmin etmek için nem transferinin ısı transferine olan etkisini dikkate alan birleştirilmiş ısı ve nem transferi modeli kullanmışlardır [6]. Zalewski vd., yaptıkları çalışmada yalıtımlı büyük bir tromble tasarlamışlardır. Bir prototip Trombe duvarlı sistem test hücresi içine inşa edilerek iki yıl boyunca test edilmiştir. Büyük duvarın ısıl fiziksel özellikleri ve bina ile havalandırılmış tabakadaki ısı transferi miktarı hesaplamışlardır [7]. Pieter çalışmasında, bina tasarımı ve yapılanma simülasyon araçlarının bütünleştirilmesini incelemiştir. Bir bina dizaynı içerisinde tromble duvarın, geliştirilmiş cam sistemleri ve fotovoltaikler elemanların etkisini gözlemleyerek enerji maliyet analizi yapılmıştır [8]. Khedari vd., bir bina içerisinde 25 m<sup>3</sup> hacme sahip bir odadaki güneş bacasının performansını incelemiştir. Güneş bacasız bir ev ile güneş bacalı bir ev arasındaki farkları incelemiştir. Benzer hava şartlarındaki günleri dikkate alarak, güneş bacalı evde harcanan günlük elektrik tüketimi %10-20 oranında azalma gösterdiği belirtmişlerdir [9]. Yedder ve Bilgen tarafından yapılan çalışmada, Trombe duvarlı bir sistemin termal performansını, akışı laminer ve iki boyutlu kabul ederek, sayısal olarak incelemiştir [10]. Onbaşıoğlu ve Eğrican yapmış oldukları çalışmada, pasif ısıtma sistemlerinin termal performanslarını, hız, sıcaklık ve akı ölçümleri yaparak, ısı kazancına etkilerini deneysel olarak incelemiştir [11]. Ong bu çalışmada, tromble duvarın matematiksel modellemesini yapmıştır. Sürekli rejimdeki ısı transfer denklemleri; cam ile yüzeylerdeki toplayıcı duvar sıcaklıkları ve ısıl direnç kullanılarak, kanaldaki hava akışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Klasik Trombe duvarında güneş enerjisi duyulur ısı şeklinde depolanır, fakat birim kütle başına ısı depolama kapasitesi çok daha yüksek olması nedeniyle, faz değişim maddesi içeren Trombe duvarı çok daha cazip olduğunu belirtmişlerdir FDMli Trombe duvarın, yapı olarak klasik Trombe duvarıyla benzer bir konstrüksiyona sahiptir. Ararlarındaki tek fark, klasik Trombe duvarındaki kalın tuğla duvarın yerini çok daha ince ve içerişi faz değişim maddesi ile doldurulmuş bir yapı elemanının almasıdır. Gün boyu gelen güneş ışınımı FDMlerin ergimesine neden olur ve böylece güneş enerjisi gizli ısı şeklinde FDM içerisinde depolanır. Gece boyunca duvardan ısı çekilerek binaya verilir ve sonuçta FDM yeniden katılaştır (rejenerasyon). Sonuç olarak FDMli Trombe duvar, klasik Trombe duvarına göre daha hafiftir, daha az hacim işgal eder ve ısıl sığası daha yüksektir [12]. Onishi vd. ısı depolama malzemesi olarak FDM kullanıldığı varsayılarak karışık bir ısıtma sisteminin basit performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada pasif güneş enerjili Trombe duvar modeli, oda sıcaklığı şartlarında ele alınmıştır. Aynı zamanda hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) kullanılarak zamana bağlı çözüm yapılmıştır. Sonuç olarak; FDM ile ısıtmanın daha etkili olduğunu ve bu yöntem karışık sistemli, düşük enerjili evlerin geliştirilmesinde daha kolay bir şekilde uygulanabileceğini söylemişlerdir [13]. Swet (1980) ve Ghoneim vd. (1991) FDM olarak NaCO<sub>3</sub>.10H<sub>2</sub>O kullandıkları Trombe duvarının klasik Trombe duvarına göre daha ince ve performansının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Knowler (1983) CG parafin wax içerisine metal katılarak FDMli Trombe duvarın toplam ısı iletim katsayısını ve ısıl veriminin arttığını söylemişlerdir [14,15].

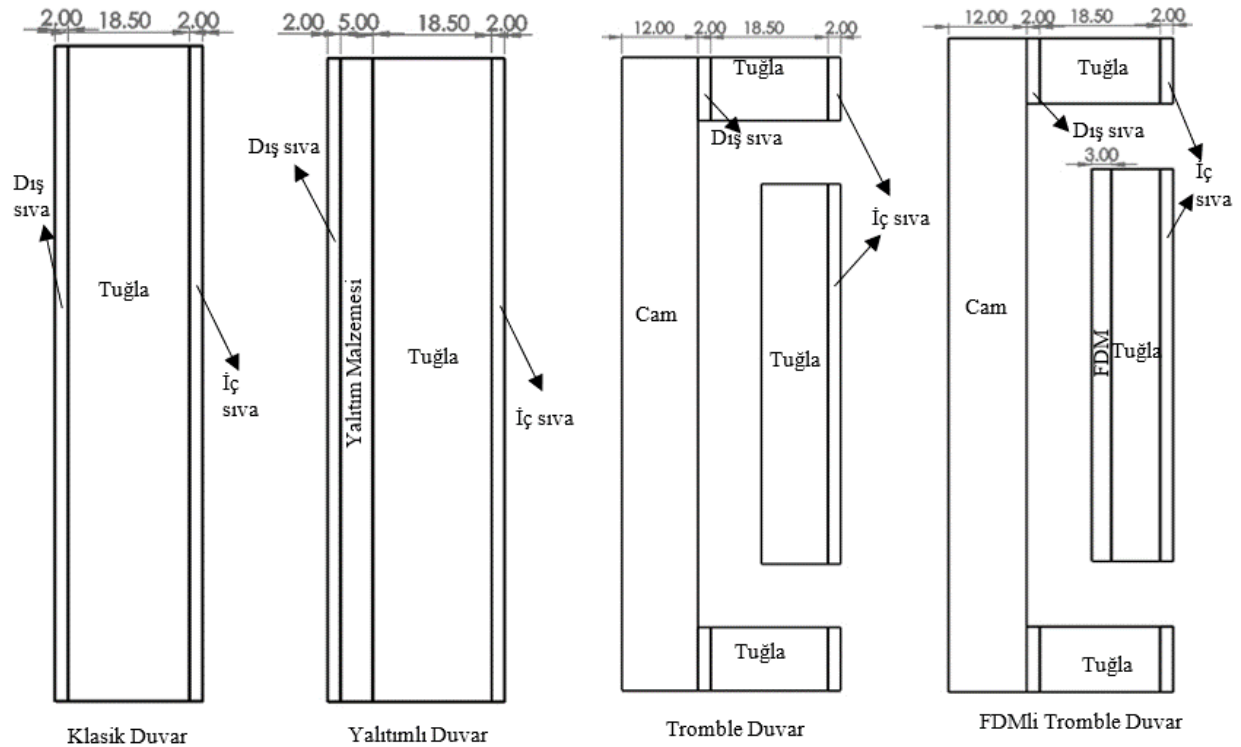
Bu çalışmada 3. Bölgede yer alan Isparta ili için hesaplar yapılmış olup farklı duvar modelleri (klasik duvar, cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar, tromble duvar ve FDMli tromble duvar) incelenmiştir. Yalıtım malzemesi olarak taş yünü ve cam yünü kullanılmıştır. Bu duvar modelleri için yapılan analizlerden elde edilen sıcaklık ve ısı akısı verileri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında; iç ortam duvar sıcaklığı FDMli tromble duvar modelinde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Klasik duvar modelinde



34350 W/m<sup>2</sup>, cam yünlü yalıtımlı duvarda 11963 W/m<sup>2</sup>, taş yünlü yalıtımlı duvarda 10944 W/m<sup>2</sup>, tromble duvarda 9045 W/m<sup>2</sup> ve FDMli tromble duvar modelinde ise 8355 W/m<sup>2</sup> ısı akısı olduğu hesaplanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Ülkemizde, genellikle klasik olarak bilinen dış sıva, tuğla ve iç sıvadan oluşan duvar model uygulaması kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda ısıtma giderlerindeki artışlar nedeniyle, insanlar bina dış cephelerini yalıtım malzemeleriyle yalıtma yoluna giderek ısıtma giderlerini azaltmaya çalışmaktadırlar. Cam yünü ve taş yünü yalıtım malzemeleri açık gözenekli malzemelerdir. Bu yalıtım malzemeleri genellikle mantolama olarak da adlandırılan duvarların dış yüzeyine yapılan ısı yalıtım uygulamalarında kullanılır [16]. Tromble duvar uygulaması binanın güney duvarının dış tarafı tek ya da çift camlı olarak yapılır. İç taraf duvar materyalleri ya da su tanklarından oluşmuş, güneş ışınımını absorbe etmek için siyah boya ile kaplanmış bir duvardır. Isı, duvar ve cam arasındaki alan boyunca havaya iletilir ve zorlanmış ya da doğal taşınım ile sirküle edilir. Depolama birimi aynı zamanda çatı veya tavanın bir parçası olabilir [17]. FDMli tromble duvarda ise; dış tarafta cam, arada yalıtım amaçlı hava boşluğu ve iç tarafta FDM bulunmaktadır. Kullanılan FDM, gelen ışınımı absorbe ederek faz değiştirirken ışık geçirgenliği de artar. Işık geçirgenliği katı halde iken 0,4 sıvı halde iken 0,9 olarak verilmektedir. Böylece güney cephe hem bir aydınlatma elemanı hem de ısı depolama elemanı olarak görev yapmaktadır. Bu tasarımla güney cepheden olan ısı kaybı ve ısı kazancında sırasıyla %30 ve %50 azalma olduğu belirtilmektedir [18]. Yapılan bu çalışmada klasik duvar, cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar, tromble duvar ve FDMli tromble duvar duvar modelleri incelenmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere tasarlanan duvar modeline ait ölçüler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan duvar modellerine ait ölçüler

Bina duvarları, binayı dış ortamın olumsuz etkilerinden koruduğu gibi aynı zamanda binada en çok ısı kaybının yaşandığı yerlerinden biridir. Bu nedenle binanın dış duvarlarında kullanılan yalıtım malzemeleri ısı kaybı hesaplamalarında önemlidir. Ülkemizde ısı yalıtımı için “TS 825 (Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları

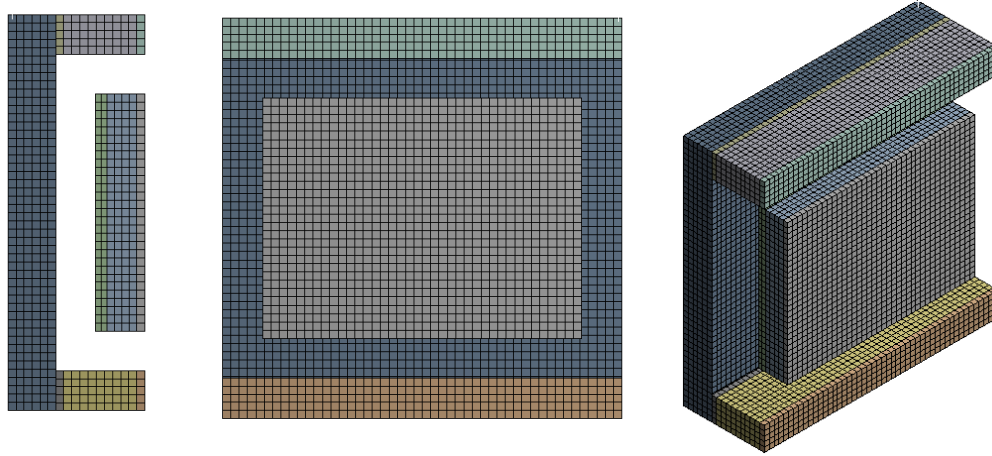
Standardı) Standardı” esas alınmaktadır. “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı” göre Türkiye dört farklı bölgeye ayrılmıştır [19]. Ayrıca FDM için ısı iletkenlik katsayısı laboratuvar ortamında testlere tabii tutularak ölçülmüş analizler için gerekli olan sıcaklıktaki değerler hesaplanmıştır. Duvar bileşenlerine ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Duvar bileşenlerinin özellikleri

Duvar bileşenleri	Kalınlık (m)	Isı iletkenlik değeri (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
Cam [19]	0.12	1.8	0.055
Dış sıva [19]	0.02	1.6	0.013
Taş yünü [19]	0.05	0.035	1.429
Cam yünü [19]	0.05	0.040	1.143
Tuğla [19]	0.185	0.39	0.487
İç sıva [19]	0.02	1	0.020
FDM	0.05	0.3006 (288 K) 0.3002 (298 K)	0.655

## 2.1 Duvar modellerinin nümerik analizinde kullanılan temel denklemler ve analiz çözümlemesindeki metotlar

Duvar modelleri için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinde sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur. Yapılan bu tasarım için Şekil 3’te verilen ağ yapısına göre CFD analizleri için Ansys yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu duvar modellerinde 97686 elaman, 102590 adet düğüm noktası bulunmaktadır.



Şekil 3. Duvarın ağ yapısı

Programlardan alınan mesh dosyalarına sınır şartları ve parametreler uygulanarak sistemin çözümü yapılmaktadır. Çözümlemelerde dış ortam sıcaklığı, Isparta ili için Ocak ayında kabul edilen sıcaklık değeri  $-1^{\circ}\text{C}$  ve dış ortam konveksiyon katsayısı olarak  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  kabul edilmiştir. Duvarın iç yüzey sıcaklığı  $22^{\circ}\text{C}$  ve iç ortam konveksiyon katsayısı olarak  $7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$  kabul edilmiştir.

## 2.2 Duvar modelinin matematiksel analizi

Bu çalışmada sadece duvar yüzeyinde ısı kayıplarının olduğu kabul edilmiştir. Duvarın birim alandan gerçekleşen ısı kaybı Denklem 1’de gösterildiği gibi hesaplanabilir [20].

$$\dot{q} = U\Delta T \quad (1)$$

Burada, “U” (W/m<sup>2</sup>K) toplam ısı geçiş katsayısıdır. Bir duvar için toplam ısı geçiş katsayısı Denklem 2 ile hesaplanabilir [20].

$$U = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{izo}} + \frac{1}{R_0} \quad (2)$$

Burada, “R<sub>i</sub>” ve “R<sub>0</sub>” sırası ile iç ve dış yüzeyin ısı dirençleri, “R<sub>d</sub>” yalıtımsız duvar tabakalarının ısı direnci, “R<sub>izo</sub>” ise, yalıtım malzemesinin ısı direncini ifade eder. Ayrıca R<sub>izo</sub> yalıtım malzemesinin ısı direnci Denklem 3’te verilmiştir [20].

$$R_{izo} = \frac{x}{k} \quad (3)$$

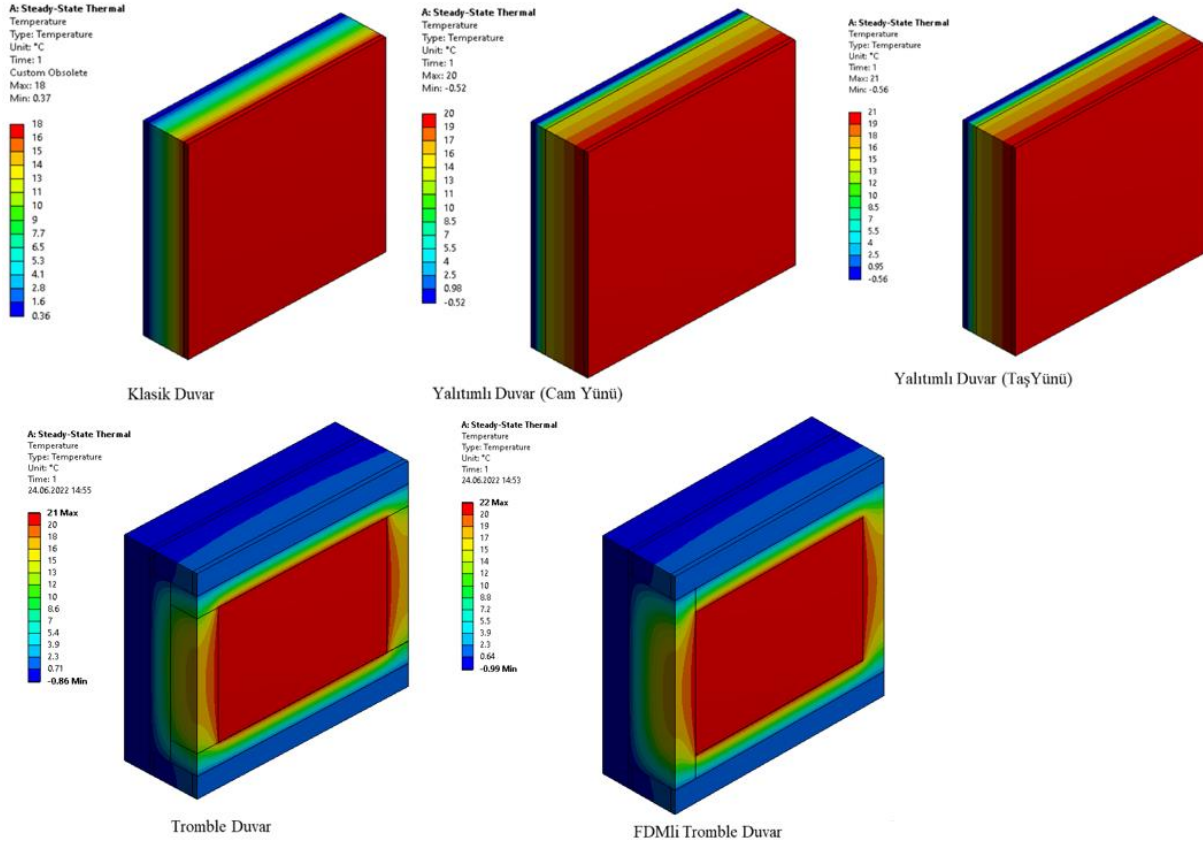
Denklem 3’te “x” yalıtım malzemesinin kalınlığını (m), “k” ise yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğini (W/mK) katsayısını ifade etmektedir. Yalıtımsız bir duvar tabakasının toplam ısı direnci (R<sub>TD</sub>), “R<sub>0</sub>”, “R<sub>d</sub>” ve “R<sub>i</sub>” nin toplamı kabul edilirse Denklem 2’deki ifade Denklem 4’e dönüştürülerek sadeleştirilebilir [20].

$$U = \frac{1}{R_{izo} + R_{TD}} \quad (4)$$

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

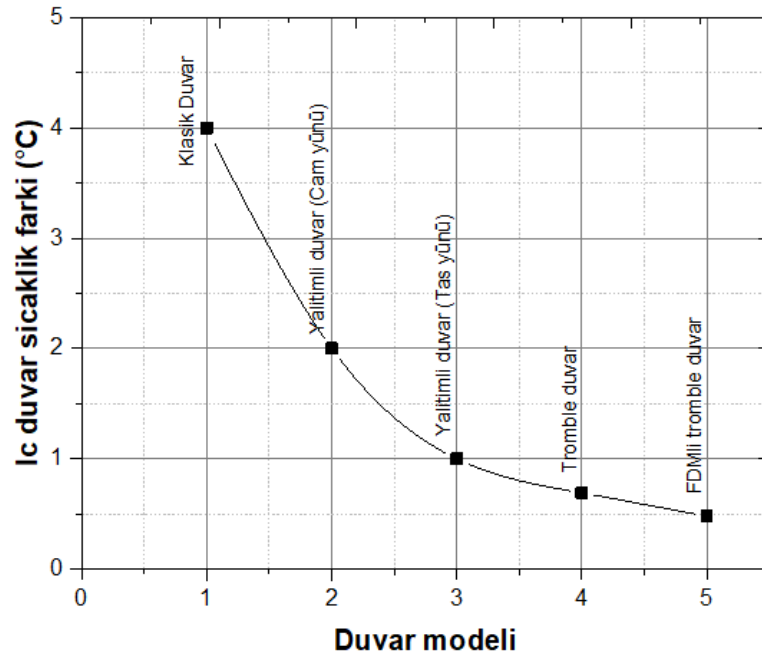
Bir binanın duvarı için 3D tasarımlar tamamlandıktan sonra analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmada 2 cm iç sıva, 18,5 cm tuğla ve 2 cm dış sıvadan oluşan klasik bir duvar modeli için termal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu duvarlarda kullanılmak üzere 5 cm taş yünü ve cam yünü kullanılarak yalıtım sağlanmış ve bu yeni yalıtımlı duvarlar için analizler yapılmıştır. Daha sonra tromble duvar modeli ve FDMli tromble duvar modeli için analizler gerçekleştirilmiştir. Ansys yazılımında kullanılmak üzere 3. bölgede yer alan Isparta iline ait iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenmiştir. Analizlerde dış ortam sıcaklığı, Isparta ili için Ocak ayında kabul edilen sıcaklık değeri -1 °C ve dış ortam konveksiyon katsayısı olarak 25 W/m<sup>2</sup>K kabul edilmiştir. Duvarın iç yüzey sıcaklığı 22 °C ve iç ortam konveksiyon katsayısı olarak 7.69 W/m<sup>2</sup>K kabul edilmiştir. Analizlerde duvarın sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Şekil 4’te duvar modellerine ait sıcaklık dağılım konturlarının değişimleri verilmiştir.

Şekil 4’ten de görüleceği üzere klasik duvarda dış sıva ve iç sıva tarafındaki sıcaklık farkının daha yüksektir. Cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar ve tromble duvar modellerinde sıcaklık farkının daha az olduğu görülmektedir. En az sıcaklık farkının FDMli tromble duvarda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Duvar modellerinin sıcaklık dağılım konturları

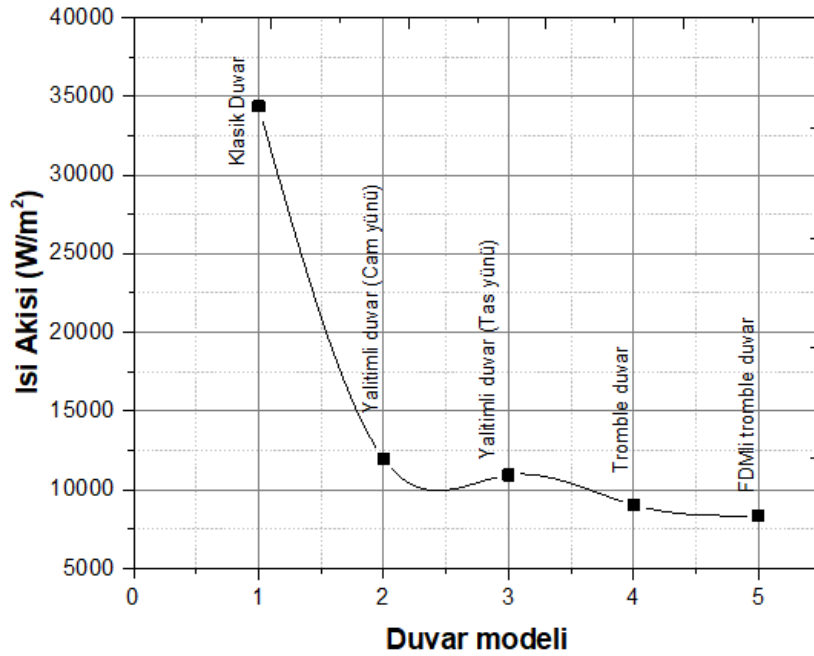
Şekil 5'teki grafikte; iç ortamda bulunan iç duvar tarafındaki sıcaklık farkı verilmiştir.



Şekil 5. Duvar modellerinde iç duvar sıcaklık farkı grafiği

Şekil 5'ten de görüldüğü üzere duvar modellerinin iç duvar sıcaklık farkı grafiği verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü üzere klasik duvar modelinde 4 °C, cam yünlü yalıtımlı duvarda 2 °C, taş yünlü yalıtımlı duvarda 1°C, tromble duvarda 0.69 °C ve FDMli tromble duvar modelinde ise 0.48 °C sıcaklık farkı olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 6'daki grafikte, farklı duvar modellerine göre ısı akısı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. Farklı yalıtım kalınlıklarına sahip duvar modellerinin ısı akısı grafiği

Şekil 6'dan da görüldüğü üzere farklı duvar modellerinin ısı akısı grafiği verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü üzere klasik duvar modelinde 34350 W/m<sup>2</sup>, cam yünlü yalıtımlı duvarda 11963 W/m<sup>2</sup>, taş yünlü yalıtımlı duvarda 10944 W/m<sup>2</sup>, tromble duvarda 9045 W/m<sup>2</sup> ve FDMli tromble duvar modelinde ise 8355 W/m<sup>2</sup> ısı akısı olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 5 ve 6 incelendiğinde, klasik duvar ile FDMli tromble duvar arasındaki sıcaklık farkının yaklaşık 3.5 °C daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca FDMli tromble duvarda %24 daha az ısı kaybının olduğu gözlemlenmiştir. Literatür ile karşılaştırıldığında FDMli tromble duvarın daha iyi sonuçlar verdiği doğrulanmıştır [2,6,17]. Ayrıca kış mevsiminde uygun koşullar sağlandığında bina içine temiz ve sıcak hava girmesini sağladığından bina içindeki hava kalitesini arttığı gibi ısınma için kullanılan enerjiden tasarruf sağlar. Yazın da binanın soğutma yükünü azaltır. Enerji tasarrufu da sağladığından kısa sürede kendisini amorti edebilir. Bütün bu avantajlarının yanı sıra, uzun ömrü olmasıyla da tercih edilmektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında bir binaya ait farklı duvar modelleri için 3D tasarımlar tamamlanmıştır. Daha sonra bu duvar modelleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmada 2 cm iç sıva, 18,5 cm tuğla ve 2 cm dış sıvadan oluşan klasik bir duvar için termal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu duvarlarda kullanılmak üzere 5 cm taş yünü ve cam yünü kullanılarak yalıtım sağlanmış ve bu yeni yalıtımlı duvarlar için analizler yapılmıştır. Daha sonra tromble duvar modeli ve FDMli tromble duvar modeli için analizler gerçekleştirilmiştir. Ansys yazılımında kullanılmak üzere 3. bölgede yer alan Isparta iline ait iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenmiştir. Isparta için ocak ayı verilerine göre iç ortam sıcaklığı 22 °C ve dış ortam sıcaklığı -1 °C olarak kabul edilmiştir. Analizlerde duvar modellerine ait sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında; FDMli tromble duvar modelinde diğer duvar modellerine göre daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Klasik duvar modelinde 34350 W/m<sup>2</sup>, cam yünlü yalıtımlı duvarda 11963 W/m<sup>2</sup>, taş yünlü yalıtımlı duvarda 10944 W/m<sup>2</sup>, tromble duvarda 9045 W/m<sup>2</sup> ve FDMli tromble duvar modelinde ise 8355 W/m<sup>2</sup> ısı akısı olduğu hesaplanmıştır. En iyi ısı akısı ve en az sıcaklık farkı sonuçlarının ise FDMli tromble duvarda olduğu hesaplanmıştır.

#### REFERANSLAR

- [1] Doğan A., Pırasacı T. 2007. “Bina Cephelerinde Yalıtım Yerine Trombe Duvar Kullanımının İncelenmesi” Ulusal İklimlendirme Kongresi, İKLİM2007, Türkiye, 15-18 Kasım 2007.
- [2] Khanlar A. 2013. “Güneş Duvarı Sistemlerinin Dünyadaki Uygulamaları ve Türkiye’deki Uygulanabilirliği” Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Ankara.
- [3] Uçar, A. ve Balo, F., 2010. “Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls”, *Renewable Energy*, 35, 1, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.009>
- [4] Yu, J., Yang, C., Tian, L., Liao, D., A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China, *Applied Energy*, 86, 2520-2529, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.010>
- [5] Gölcü, M., Dombaycı, A, Ö., Abalı, S., “Denizli İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufuna Etkisi ve Sonuçları”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, No 4, s. 639-644, 2006.
- [6] Liu, X., Chen, Y., Ge, H., Fazio, P. ve Chen, G., (2015). Determination of optimum insulation thickness of exterior wall with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China, *Procedia Engineering*, 121, 1008-1015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.072>
- [7] Zalewski, L. Charitant, M. Lassue, S. Duthoit, B., 1997, Experimental thermal study of a solar wall of composite type, *Energy and Buildings*, 25, 7-18. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00974-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00974-7)
- [8] Pieter, D. W., 2004, Marinus Van Der Voorden, Providing Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components, *Energy and Buildings*, 36, 749-758. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.003>
- [9] Khedari, J. Rachapradit, N. Hirunlabh, J., 2003, Field Study of Performance of Solar Chimney with Airconditioned, *Building Energy*, 28, 1099-1114. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00092-6)
- [10] Yedder, R. B. ve Bilgen, E. (1991). Natural convection and conduction in Trombe wall systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(4-5), 1237-1248. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90032-A](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90032-A)

- [11] Onbasioglu, H., ve Egrican, A. N. (2002). Experimental approach to the thermal response of passive systems. *Energy conversion and management*, 43(15), 2053-2065. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00138-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00138-8)
- [12] Ong, K. S. A., 2003, Mathematical Model of a Solar Chimney, *Renewable Energy*, 28, 1047-1060. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00057-5)
- [13] Onishi, J. Socda, H. Mizuno, M., 2001, Numerical Study on a Low Energy Architecture Based upon Distributed Heat Storage System, *Renewable Energy*, 22, 61-66. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00049-5)
- [14] Swet, C. J. (1980). Phase change storage in passive solar architecture. *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.;*(United States), 5(CONF-801016-(Vol. 1)).
- [15] Ghoneim, A. A., Klein, S. A., & Duffie, J. A. (1991). Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials. *Solar energy*, 47(3), 237-242. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90084-A](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90084-A)
- [16] Bayraktar, D., Bayraktar, E.A., (2016). Mevcut binalarda ısı uygulamalarının değerlendirilmesi, *Akif Ersoy Mehmet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7, 1, 59-66.
- [17] Kurtbaş İrfan, (2005). Elazığ Şartlarında Trombe Duvar Uygulanabilirliğinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi, Makina Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elazığ.*
- [18] Kurnuç Çırakman Aslıhan, 2010, “Faz Değiştiren Madde İçeren Bina Güney Duvarının Deneysel Olarak İncelenmesi” *Doktora Tezi, Makina Mühendisliği, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.*
- [19] TS 825, (2008). *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- [20] Gürel, A. E., & Cingiz, Z., 2011. “Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi”. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 75-81.

## Bulanık Ters Mantık Yönteminin Çelik Boru Profiller ile Teşkil Edilmiş Çelik Kafes Sistem Elemanlarının Tasarımında Kullanımı

Ertekin Öztekin<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye.

\*ertekinoztekin@hotmail.com

### Özet

Bu çalışmada, yapay zekâ yöntemlerinden biri olan bulanık mantık yöntemi kullanılarak, çelik boru profillerin çekme ve basınç kuvveti etkisindeki kapasitelerini belirleyebilmek için iki adet bulanık model oluşturulmuştur. 2018 Türk Çelik yapılar Yönetmeliğinde belirtilen GKT yöntemine göre oluşturulan her iki bulanık modelde de, çelik sınıfı S355 olarak sabit olarak tutulurken, kesit çapı ( $D$ ), profil et kalınlığı ( $t$ ) ve eleman uzunluğu ( $L$ ) değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır. Eksenel çekme kapasitesi ( $T_n$ ) ve eksenel basınç kapasitesi ( $P_n$ ) ayrı ayrı olarak bu modellerin çıktı parametrelerini oluşturmuşlardır. Her iki modelin oluşturulmasında aynı girdi değişkenleri değerlerine sahip ancak çıktı parametreleri farklı olan 1400 'er adet örnek çözüm kullanılmıştır. Kullanılan bu örnek çözümlerin haricinde 988 'şer adet farklı örnek çözüm ile bu modeller test edilerek, sırasıyla maksimum %2.764 ve maksimum %4.076 hata ile eksenel çekme ve basınç dayanımlarının tahminde kullanılabilecekleri ortaya konulmuştur. Daha sonra geliştirilen bulanık modellere, bulanık ters mantık yöntemi 3 farklı izostatik düzlem kafes sistem örneği için uygulanarak bu kafes sistemleri oluşturan çubuk elemanların tasarımları gerçekleştirildikten sonra dayanım kontrolleri karşılaştırmalı olarak 2018 Türk Çelik yapılar Yönetmeliğinde belirtilen GKT yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bulanık mantık ve bulanık ters mantık yöntemlerinin birlikte aynı sayısal veriyi kullanarak boru kesitli çelik kafes sistem elemanların kapasitelerinin belirlenmesinde ve aynı zamanda tasarımlarının gerçekleştirilmesinde model hataları da dikkate alınarak güvenle kullanılabilecekleri ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık Mantık, Bulanık Ters Mantık, Kafes Sistemler, Tasarım, Kapasite tahmini

## Usage of the Fuzzy Inverse Logic Method in the Design of Steel Truss System Elements Constructed with Steel Pipe Profiles

### Abstract

In this study, by using the fuzzy logic method, one of the artificial intelligence methods, two fuzzy models were constituted to determine the capacities of steel pipe profiles under the effect of tensile and compressive forces. In both fuzzy models created according to the ASD method specified in the 2018 Turkish Steel Structures Regulation, while the steel grade was kept constant as S355, section diameter



( $D$ ), profile wall thickness ( $t$ ) and element length ( $L$ ) were taken into account as variable parameters. Axial tensile capacity ( $T_n$ ) and axial compressive capacity ( $P_n$ ) separately constituted the output parameters of these models. In the constitution of both models, 1400 sample solutions with the same input variable values but different output parameters were used. Apart from these sample solutions used, these models were tested with 988 sample solutions, and it was revealed that the models could be used to estimate the axial tensile ( $T_n$ ) and compressive strengths ( $P_n$ ) with a maximum error of 2.764% and 4.076%. Then, the fuzzy inverse logic method was applied to the developed fuzzy models for 3 different isostatic plane truss systems, and after the design of the elements that make up these truss systems, the strength controls were carried out comparatively according to the ASD method. At the end of the study, it has been revealed that fuzzy logic and fuzzy inverse logic methods can be used safely both in determining the capacities of the truss system elements and in their designs by using the same numerical data and by taking into account model errors.

**Keywords:** Fuzzy Logic, Fuzzy Inverse Logic, Truss Systems, Design, Capacity estimation

## 1. GİRİŞ

Yapay zekâ yöntemleri birçok alanda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da birçok probleme başarıyla uygulanmaktadır[1-6]. Ancak yapılan çalışmaların çoğunda hatta hemen hemen tümünde yapay zekâ yöntemleri, parametre tahminlerinde[7-15], belirli verilerin değerlendirilmesinde [16-20], belirli bir durumun izlenmesinde [21], tanısında [22], sınıflandırmasında [23], derecelendirilmesinde [24], tespitinde [25], kontrolünde [26-27], seçiminde [28], optimizasyonunda [29] vb. kullanılmaktadır. Yapay zekâ yöntemlerinin tümünde veriye dayalı olarak işlemler yapıldığından dolayı, geliştirilen yapay zekâ yöntemleri geliştirildikleri veri aralığında sonuç üretmektedir ve aynı zamanda bu yöntemler ile bilinen değişken parametrelere bağlı olarak çıktının ya da sonucun tahminine çalışılmaktadır. Oysa birçok bilimsel alanda olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de asıl amaç büyüklüğü önceden bilinen veya önceden kestirilen etkiler için gerekli olan tasarımların gerçekleştirilmesidir. Bu açıdan bakıldığında tasarım çalışmalarında amaçlanan bir probleme ait çıktının değil girdi parametrelerinin belirlenmesidir. Buna örnek olarak bir kirişin, bir kolunun, bir perde duvarın, bir yapının veya bir sistemin boyutlandırılmaları ve detaylandırılmaları gösterilebilir. Bir yapı elemanının belirli bir yük etkisine göre tasarımını gerçekleştirmek için önceden belirlenen boyut, malzeme ve detaylar ile bu elemanın taşıma kapasitesi belirlenerek kesit kapasitesinin mevcut yükleri taşıyıp taşımadığı kontrol edilir. Eğer kesit yetersiz veya çok büyük ise önceki kesit boyutları değiştirilir ve işlemler bu şekilde deneme yanılma yoluyla yönetmelik, mimari, konstrüktif vb. tüm koşullar sağlanıncaya kadar devam ettirilir. Klasik yapay zekâ yöntemleriyle de gerçekleştirilen tasarımlar benzer şekilde yapılmaktadır. Bunun nedeni geliştirilen matematiksel ve yapay zekâ yöntemlerinin ve/veya algoritmalarının hesap akışının girdiden çıktıya doğru oluşturulmasından kaynaklanır. Asında matematiksel olarak başka bir yol da yoktur.

İnsanoğluna yaratıcının bahsettiği en önemli yeteneklerden birisi de ön kestirim yeteneğidir. Yani insanoğlu aynı veya benzer bir iş için deneyimlediği birçok örnekleme dayanarak bu örneklerden farklı ancak bu örneklerle benzer durumlar karşısında çok başarılı tahminler uygulamalar yapabilmektedir. Buna güncel hayatta tecrübe denilmektedir. Yapay zekâ yöntemlerinden bulanık mantık yöntemi de insanoğlunun kestirim yapabilme yeteneğinin bir sonucu olarak ifade ettiği bulanık yani net olmayan çıkarımlara dayanılarak oluşturulmuş bir yapay zekâ yöntemidir. Lütüfi Zadeh [30-32] tarafından 1965 yılında ortaya atılan bulanık küme kavramının Mamdani [33-34] ve diğer birçok araştırmacı tarafından geliştirilmesiyle bulanık mantık yöntemi günümüzdeki halini almıştır.

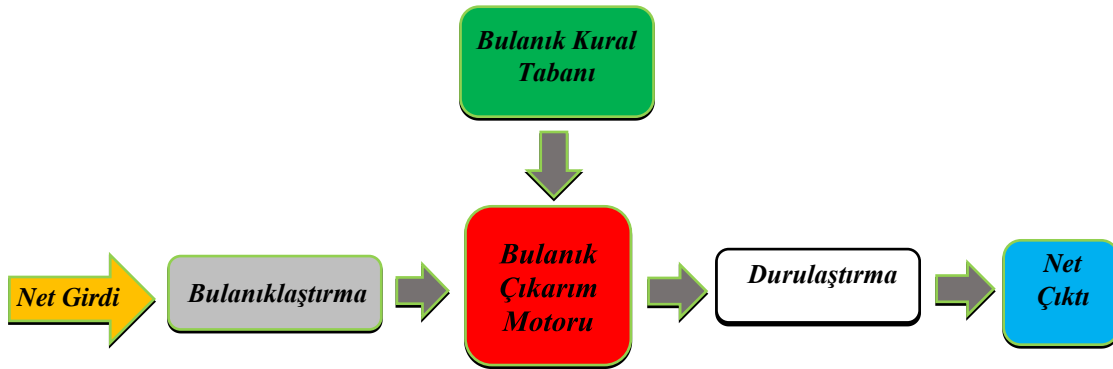
Bulanık mantık yönteminde işlem akışı diğer yapay zekâ yöntemlerinde olduğu gibi girdi parametrelerinden çıktıya doğrudur. Yani bulanık mantık yönteminin mevcut algoritması tasarımdan ziyade tahmin ve sınıflandırma vb. tür çalışmalara imkân tanımaktadır. İnsanoğlunun sadece ileri yönlü yani girdilerden çıktılara doğru kestirim yeteneğinin değil aynı zamanda çıktılardan girdilere doğru da kestirim yeteneğine sahip olduğu düşünülerek ve bulanık mantık yönteminin tüm alt yapısı kullanılarak “Bulanık Ters Mantık”

adı verilen yöntem geliştirilmiştir[35, 36]. Örnek olarak, bir yapının herhangi bir katına ait yüksekliği, plandaki ölçülerini bilen bir tuğla ustası o kat için yaklaşık olarak ne kadar tuğla gidebileceğini kestirebileceği gibi, aynı usta belirli bir tuğla miktarının kaç metre kat yüksekliğe sahip bir yapıda, kaç m<sup>2</sup> lik plana sahip yapıda kaç m<sup>2</sup> tuğla duvar yapabileceğini de kestirebilir.

Geliştirilen bu yöntem henüz çok daha yeni olmasına rağmen birçok inşaat mühendisliği problemine başarıyla uygulanmaya başlanmıştır[36] ve aynı zamanda yöntemin yapay zeka tabanlı yazılım programlarında kontrol, optimizasyon, planlama, tasarım vb. gibi problemler için birçok bilimsel alanda kullanılabilmesi öngörülebilmektedir. Bu çalışma, yapay zekânın mühendislik alanında tasarım problemlerine direkt olarak, yani başka bir yöntemle (deneme yanılma yöntemi vb.) birlikte kullanılmaksızın, uygulandığı ilk çalışmalardan biri olması bakımından ve Türkçe olarak ilk defa Türk bilim literatüründe yer alacak olması açısından önemlidir. Çalışmanın vurgulanması gereken diğer ve en önemli bir özgün yönü ise özellikle tasarım mühendislerinin çelik yapı tasarımında eleman boyutu seçimlerinin deneme yanılma yöntemi yerine uygun kesit seçiminin için ters bir tahmin yöntemi ile hızlı ve güvenilir hale getirmesidir.

### 1.1 Bulanık Mantık Yöntemi Hakkında Kısa ve Öz Bilgiler

Bulanık mantık yönteminde gerçekleştirilen işlemler 4 adımda kısaca özetlenebilir (Şekil 1). Birinci adımda problemin bilinen girdi ve çıktı daseti üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanıklaştırılır. Üyelik fonksiyonu olarak probleme uygun bir fonksiyon seçilebilir. Genellikle, üçgen, trapez, sigmoid, step fonksiyonları bilinen ve en tercih edilen üyelik fonksiyonlarındanır. Bulanık mantık yönteminin ikinci önemli işlem adımı, kural matrisinin(tablosunun) oluşturulmasıdır. Bu adımda, bulanık girdi parametrelerine ait bulanık kümelerin kombinasyonlarına tekabül eden bulanık çıkarımlar ile kural matrisi oluşturulur. Bulanık mantık çıkarım motoru ile kural matrisindeki kurallara göre bulanık çıktıların hesaplandığı üçüncü adımı, durulaştırıcılar yardımıyla bulanık çıktıların net çıktılara dönüştürüldüğü son adım takip eder. Bulanık mantık hesaplamalarında birçok durulaştırıcı metodu kullanılabilir. Bulanık mantık hesaplamalarıyla ilgili birçok detaya teknik literatürdeki birçok kitap ve makaleden ulaşılabileceğinden bu çalışmada ayrıca verilmemiştir[37].



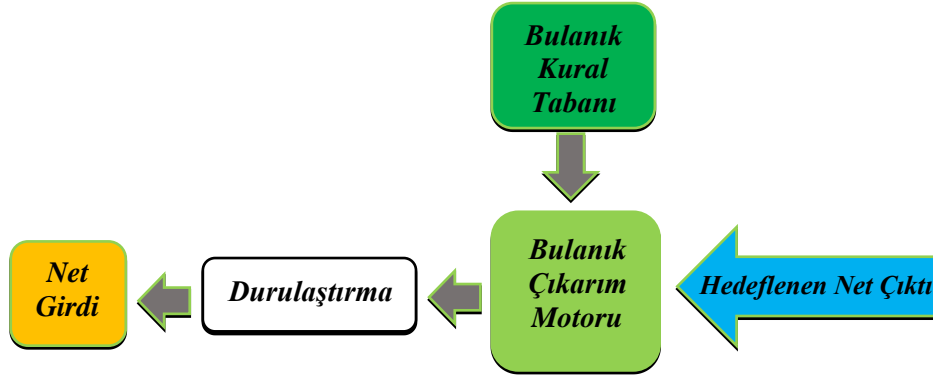
Şekil 1. Bulanık mantık yönteminde işlem akış şeması

### 1.2 Bulanık Ters Mantık Yöntemi

Bulanık ters mantık yöntemi, bu çalışmanın yazarı tarafından bulanık mantık yönteminin tüm mantıksal alt yapısıyla aynı, ancak hesap adımları bulanık mantık yöntemindeki işlem yönünün tersine doğru olacak

şekilde geliştirilmiştir. Şekil 2 'den daha açık bir şekilde anlaşılabilceği gibi bulanık ters mantık yönteminde, hedeflenen bir çıktı için girdi parametrelerinin değerleri belirlenmesine çalışılır.

Bulanık ters mantık yönteminin uygulanabilmesi için bir bulanık mantık modeline ihtiyaç vardır. Bu model özellikle bulanık ters mantık yönteminin kullanılması için geliştirilebileceği gibi, daha önceden geliştirilmiş bir bulanık mantık modeli de olabilir. Bulanık ters mantık yönteminin uygulanacağı problemde seçilen veya oluşturulan bulanık mantık modelinin hassasiyetinin önemi çok büyüktür. Başka bir deyişle bulanık ters mantık yönteminin hassasiyeti tamamıyla seçilen veya oluşturulan bulanık mantık modelinin hassasiyetine bağlıdır. Eğer bulanık mantık modelinin hassasiyeti çok iyi olursa bulanık ters mantık yönteminin de çözümleri o kadar hassas olur. Çünkü bulanık ters mantık yöntemi seçilen veya oluşturulan bulanık mantık modelinin tüm datasını olduğu gibi kullanır. Bulanık ters mantık yönteminin uygulanmasında çözüm boyutu arttıkça bulanık mantık modelinin hassasiyetinin önemi daha da artar. Yani büyük boyutlu bulanık ters mantık hesaplamalarında boyut sayısı arttıkça hata miktarı da üstel olarak artar [35, 36]. Bu nedenle bulanık ters mantık yöntemi ile düşük boyutlu hesaplamaların gerçekleştirilmesi hassasiyet açısından önemlidir. Buna ilaveten bulanık ters mantık yönteminde düşük boyuttaki hesaplamalar çok daha kolaydır. Özellikle 1 boyuttaki bulanık ters mantık hesaplamaları herhangi bir ek iterasyona gerek duyulmadan direkt olarak çözüm üretir. Ancak, elde edilen çözüm sayıları diğer boyutlardan daha az olur. Bununla birlikte, 1 boyuttaki bulanık ters mantık hesaplamalarında elde edilen çözüm sayıları da oldukça tatminkârdır. Hatta bazen üretilen çözüm sayıları o kadar çok olur ki bunların arasında seçim yapmak güçleşir. Bu nedenlerle 1 boyuttaki bulanık ters mantık hesaplama yönteminin diğer boyuttaki hesaplamaları aratmaz. Ancak yine de daha fazla sayıda çözüme ihtiyaç duyulması halinde daha büyük boyuttaki çözümlerinin daha yüksek hata miktarları ile kullanılabileceği de bir gerçektir.



Şekil 2. Bulanık ters mantık yönteminde işlem akış şeması

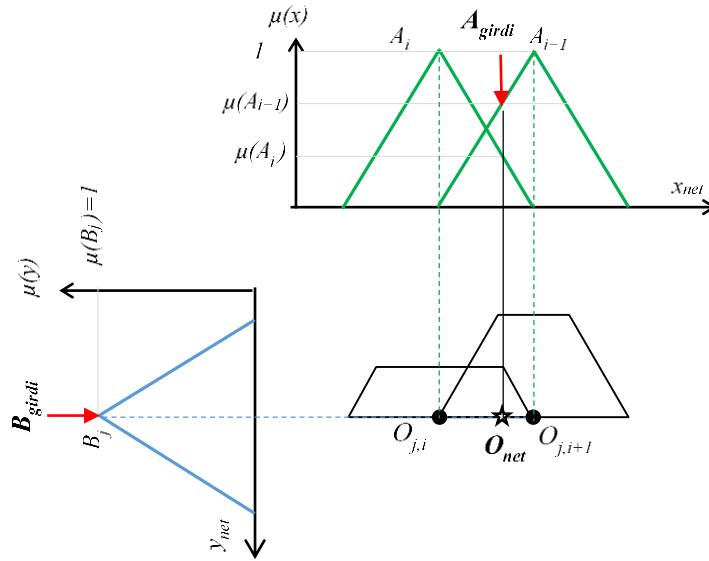
Bulanık ters mantıkta gerçekleştirilen işlemlerin sırası aşağıda adım adım açıklanmıştır.

- 1) Hassas olarak bir bulanık mantık modelinin oluşturulması veya hassas olarak geliştirilmiş bir bulanık mantık modelinin seçilmesi
- 2) Hedeflenen (arzulanan) çıktının bulanık mantık modelindeki çıktı datasında bulunabileceği konum veya konumların hesaplama boyutuna bağlı olarak belirlenmesi
- 3) Belirlenen her bir konum veya konumlar için aranan girdi parametrelerine ait bulanık koordinatların belirlenmesi
- 4) Bulanık modelde kullanılan durulaştırma yönteminin tersine(geriye) doğru uygulanmasıyla ve girdi parametrelerinin bulanık kümelerine ait üyelik fonksiyonları yardımıyla girdi parametrelerine ait net değerlerin hesap boyutuna ve kural tabanındaki koşul ifadelerine bağlı olarak hesaplanması.

Bulanık ters mantıkta hesap boyutu sayısı en fazla girdi değişkeni sayısı kadar olabilir. Ancak, 1’den daha büyük hesaplama boyutunda hesaplamalar daha zor ve daha karmaşık olmakla birlikte boyut arttıkça hesap hassasiyeti azalır [36]. Başka bir deyişle, 1 boyutlu bulanık ters mantık hesaplamaları en kolay, en anlaşılır ve en hassas çözümlerin üretildiği bulanık ters mantık hesaplamalardır. Bu çalışmada da 1 boyutlu bulanık ters mantık hesaplamaları kullanıldığından aşağıda bu hesaplamaların detaylarına yer verilmiştir.

### 1.3 Bir Boyutlu Bulanık Ters Mantık Hesaplamaları

Bir boyutlu bulanık ters mantık yönteminin her bir adımında problemin girdi parametrelerinden sadece 1 tanesi değişken olarak dikkate alınırken diğer parametreler sabit tutulurlar. Sabit tutulan parametrelerin değeri kural tabanında kullanılan üyelik 1’e tekabül eden bulanık kümelerin değerine karşılık gelebileceği gibi bunların dışında, mimari, konstrüktif, yönetmelik kısıtlamaları vb. koşul(lar) gereği farklı bir değer olarak da alınabilir. Eğer farklı bir değer kullanılacak ise bu durumda bu değer de bulanıklaştırılarak ilgili parametrenin üyelik kümelerine eklenir ve bulanık mantık yöntemi ile diğer parametrelerin bulanık kümelerinin tüm kombinasyonları için yeni çıktılar, yeni kurallar oluşturulur ve bulanık mantık modelinin kural tabanına eklenir. Eğer sabit parametrenin değeri (problemdeki bir koşul gereği olsa bile) kendi üyelik kümelerinden herhangi bir tanesinin üyelik 1’e tekabül eden değerine karşılık geliyor ise bu işlemin yapılmasına gerek yoktur. Değişken parametre hariç diğer tüm değişkenlerin değeri sabit olarak dikkate alındığında, bulanık mantık yönteminde bulanık çıktı Şekil 3 dekinde benzer şekilde 2 bulanık kümeden oluşur.



Şekil 3. Sabit  $Y$  parametresi için bulanık  $B_j$  kümesi, değişken  $X$  parametresi için ardışık  $A_i$  ve  $A_{i+1}$  bulanık kümeleri ve bulanık  $O_{j,i}$  ve  $O_{j,i+1}$  çıktıları

Şekil 3 ‘de 2 değişkenli bir problemde değişkenin biri sabit tutulduğunda ( $B_{girdi}$ ) diğer değişkenin değerine ( $A_{girdi}$ ) bağlı olarak en fazla 2 bulanık kümeli bir bulanık çıktı elde edilir. Bu iki bulanık küme bu değişken parametrenin bulanık küme uzayında birbirinin ardışığı veya komşusudur. Bulanık mantık yönteminde bir sonraki işlem seçilen durulaştırıcı yardımıyla bulanık çıktının net değere dönüştürülmesidir. Örnek olarak ağırlıklandırılmış ortalama yönteminin (*Weighted Average Method*) durulaştırıcı olarak kullanıldığı bir problemde çıktı (1) numaralı Eşitlik ile hesaplanır[37].

$$O_{net} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (1)$$

Şekil 3’deki  $A$  değişkeninin üçgen üyelik fonksiyonları ile verilen  $A_i$  ve  $A_{i+1}$  numaralı iki bulanık kümesinin arasında denklem (2) de verildiği gibi ilişki kolaylıkla yazılabilir. Bu ilişki iki komşu bulanık kümenin üyeliği 1 ‘e tekabül eden net değerleri arasında geçerlidir. Bu durumda denklem (1) deki  $O_{net}$  değeri daha basit bir şekilde denklem (3) de ki gibi yazılabilir.

$$\mu(A_i) + \mu(A_{i+1}) = 1 \quad (2)$$

$$O_{net} = O_{j,i} \times \mu_{(A_i)} + O_{j,i+1} \times \mu_{(A_{i+1})} \quad (3)$$

Üçgen üyelik fonksiyonundan farklı üyelik fonksiyonların kullanıldığı bulanık modellerde 3 numaralı denklemin yerine başka bir geçerli ilişki yazılmalıdır.

Bu denklemlerden ve Şekil 3’ten anlaşılacağı net çıktı, değişken parametrenin komşu iki bulanık kümesinin kullanıldığı bulanık çıktı kümelerinin üyeliği 1 olduğu durumdaki net  $O_{j,i}$  ve  $O_{j,i+1}$  değerlerinin arasında yer alır. Bu durum ağırlıklandırılmış ortalama yönteminin durulaştırıcı olarak kullanıldığı durumlarda geçerlidir. Diğer durulaştırıcılarda bu durum farklı olabilir. Bu nedenle farklı durulaştırıcılar için farklı ancak geçerli matematiksel eşitlikler kullanılmalıdır.  $O_{j,i}$  ve  $O_{j,i+1}$  den küçüğü ve büyüğü sırasıyla  $O_S$  ve  $O_B$  olarak adlandırılırsa, bir boyutlu ters mantık yönteminde hedeflenen veya arzu edilen  $O_D$  çıktısının Denklem (4) deki gibi bu iki değer arasında olup olmadığı araştırılır. Bunun için değişken parametre hariç diğer parametrelerin tüm olası sabit değerleri (Kendi bulanık uzaylarındaki bulanık kümelerin üyeliği 1’e tekabül eden net değerleri ) için tüm bulanık kurallar karşılaştırılarak incelenir.

$$O_S < O_D < O_B \quad (4)$$

(4) numaralı denklemi sağlayan durumların her birinde çözümün mevcut olduğu anlaşılır. Bundan sonraki adımda her bir çözüm için bulanık koordinatlar belirlenir. Bu koordinatlar her bir çözümde  $O_S$  ve  $O_B$  ‘yi çıktı olarak veren kurallardaki değişken parametrelerin bulanık kümeleridir. Bulanık ters mantık yönteminde bu bulanık kümeler her bir çözüm için geçerli bulanık kümeler olarak adlandırılırlar.

Her bir bulanık ters mantık çözümünde, değişken parametreye ait iki komşu küme ve diğer sabit parametreler için ise 1 ‘er adet bulanık küme, o çözüm için geçerli bulanık kümeleri oluştururlar. Sabit parametrelere ait net değerler bu parametrelerin geçerli bulanık kümelerinin üyeliği 1 ‘e tekabül eden değerleridir. Buna örnek olarak Şekil 4 ‘deki  $B$  değişkenine ait  $B_{girdi}$  değeri gösterilebilir. Değişken parametreye ait net değerinin bulunmasında bulanık mantık yöntemindeki hesap işleyişinin tersi gerçekleştirilir. Yani, bulanık modeldeki  $O_{net}$  çıktısının arzu edilen çıktıya  $O_D$  eşit olması için, (3) numaralı denklem 5 numaralı denklemdeki gibi yazılmalıdır.

$$O_D = O_{j,i} \cdot \mu_{(A_i)} + O_{j,i+1} \cdot \mu_{(A_{i+1})} \quad (5)$$

Denklem (2) ‘de verilen değişken parametreye ait komşu iki geçerli bulanık kümenin arasındaki üyelik ilişkisinden yararlanılarak, bu iki geçerli bulanık kümenin üyelikleri denklem (6) ve (7) deki bağıntılar ile kolaylıkla hesaplanabilir.

$$\mu_{(A_i)} = \frac{O_D - O_{j,i+1}}{O_{j,i} - O_{j,i+1}} \quad (6)$$

$$\mu_{(A_{i+1})} = \frac{O_D - O_{j,i}}{O_{j,i+1} - O_{j,i}} \quad (7)$$

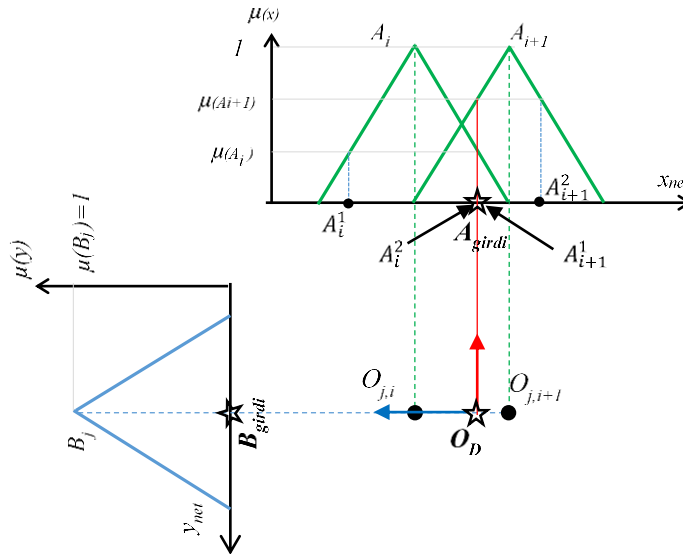
Üçgen üyelik fonksiyonu ile oluşturulmuş  $A_i$  ve  $A_{i+1}$  geçerli bulanık iki komşu kümenin her biri için denklem (6) ve denklem (7) kullanıldığında denklem (8) ve denklem (9) daki gibi 2 şer net girdi elde edilir. A değişkenine ait aranan girdi değeri ise Şekil 4 ‘den görüldüğü ve denklem (10) ‘da verildiği gibi bu iki geçerli ardışık bulanık kümenin birbirine eşit olan net girdi değerleridir.

$$f(x_i) = \mu_{(A_i)} \rightarrow x_i = \begin{cases} A_i^1 \\ A_i^2 \end{cases} \quad (8)$$

$$f(x_{i+1}) = \mu_{(A_{i+1})} \rightarrow x_{i+1} = \begin{cases} A_{i+1}^1 \\ A_{i+1}^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$X_{net} = A_i^2 = A_{i+1}^1 \quad (10)$$

Burada belirtmek gerekmektedir ki, bu çalışmada anlatılmaya çalışılan 1 boyutlu bulanık ters mantık yöntemi için verilen bağıntılar, bulanık kurallarında VE/AND teriminin kullanıldığı, üçgen üyelik fonksiyonları ile oluşturulmuş bulanık kümelerle sahip değişkenlerin olduğu ve ağırlıklandırılmış ortalama yöntemi(*Weighted Avarage Method*)’nin durulaştırıcı yöntem olarak kullanıldığı bulanık mantık modellerinde geçerlidir. Bu üç koşulun bu çalışmada kullanılmasının amacı, bir boyutlu bulanık ters mantık yöntemini daha açık ve sade olarak anlatabilmesi içindir.



Şekil 4. Bir boyutlu bulanık ters mantık yönteminde üyelik derecelerinin ve net girdi değerlerinin belirlenmesi

#### 1.4 Eksenel Çekme ve Basınç Etkisindeki Çelik Boru Profillerin GKT Yöntemine Göre Dayanımlarının Belirlenmesi

Türk Çelik Yapılar yönetmeliğinde[38], çelik yapıların hesap ve tasarımı için önerilen yöntemlerden birisi güvenlik katsayısı ile tasarım (*GKT*) yöntemidir. Bu yöntemde göre boru kesitli profillerin eksenel çekme ve eksenel basınç etkisi altındaki dayanımları,  $A_g$ ; toplam (kayıpsız) en kesit alanını,  $A_n$ ; net (kayıplı) en kesit alanını,  $A_e$ ; etkin net en kesit alanını,  $U$ ; gerilme düzensizliği etki katsayısını (bu çalışmada  $U=1$  alınmıştır),  $R_a$ ; *GKT* yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanımı,  $R_n$ ; karakteristik dayanımı,  $\Omega$ ; güvenlik katsayısını,  $t$ ; boru kesitli elemanların tasarım et kalınlığını,  $L$  eleman boyunu,  $i$ ; atalet yarıçapını,  $I$ ; kesit atalet momentini,  $F$ ; kesit alanını ve  $D$ ; kesit çapını ifade etmek üzere (11-16) numaralı denklemlerle belirlenebilmektedir.

$$\text{Güvenli çekme kuvveti dayanımı } T_g = T_n / \Omega \quad (11)$$

$$T_n = \min(T_{n(akma)}, T_{n(kırılma)}) \quad (12)$$

$$\Omega = \begin{cases} 1.67 & (\text{Akma sınır durumu}) \\ 2 & (\text{Kırılma sınır durumu}) \end{cases} \quad (13)$$

$$T_{n(akma)} = F_y A_g \quad (14)$$

$$T_{n(kırılma)} = F_u A_e \quad (15)$$

$$A_e = U A_n \quad (\text{Bu çalışmada çekme etkisindeki elemanlarda } U=1 \text{ alınmıştır}) \quad (16)$$

Bu denklemlerdeki  $F_y$  karakteristik akma gerilmesi ve  $F_u$  karakteristik çekme gerilmesinin değeri bu çalışmada *S355 H* ve  $t \leq 40 \text{ mm}$  için  $F_y = 355 \text{ MPa}$  ve  $F_u = 510 \text{ MPa}$  olarak dikkate alınmıştır[38]. Bu çalışmada eksenel çekme etkisindeki elemanlar için sadece akma ve kırılma sınır durumlarına göre hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Eleman uç birleşimlerindeki blok kırılma sınır durumları dikkate alınmamıştır.

*GKT* yöntemine göre boru kesitli profillerin eksenel basınç etkisi altındaki dayanımları ise  $F_{cr}$ ; kritik burkulma gerilmesini,  $L_c$ ; eleman burkulma boyunu,  $F_e$ ; elastik burkulma gerilmesini,  $i$ ; atalet yarıçapını,  $E$ ; elastisite modülünü ( $200 \text{ GPa}$ ), ifade etmek üzere (17) ve (25)'nci denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir. Çalışmada basınç etkisindeki kafes sistem elemanlarında eğilmeli burkulmanın meydana geldiği ve elemanların uçlarının mafsallı olduğu kabulü ile (burkulma boyu katsayısı  $k=1$  alınarak) hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Güvenli basınç kuvveti dayanımı } P_g = \frac{P_n}{\Omega} \quad (17)$$

Narin olmayan kesitlerde  $D/t > (0.11E/F_y)$ ;

$$P_n = F_{cr} \times A_g \quad (18)$$

Narin kesitlerde  $D/t \leq (0.11E/F_y)$ ;

$$P_n = F_{cr} \times A_e \quad (19)$$

$$\Omega = 2 \quad (20)$$

$$\frac{L_c}{i} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \left( \text{veya } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \right) \text{ için } F_{cr} = \left[ 0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (21)$$

$$\frac{L_c}{i} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \left( \text{veya } \frac{F_y}{F_e} > 2.25 \right) \text{ için } F_{cr} = 0.877 \times F_e \quad (22)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{L_c}{i} \right)^2} \quad (23)$$

$$A_e = A_g \quad \left( \frac{D}{t} \leq 0.11 \frac{E}{F_y} \text{ için} \right) \quad (24)$$

$$A_e = \left( \frac{0.038 \times E}{F_y \times (D/t)} + \frac{2}{3} \right) A_g \quad \left( 0.45 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} < 0.45 \frac{E}{F_y} \text{ için} \right) \quad (25)$$

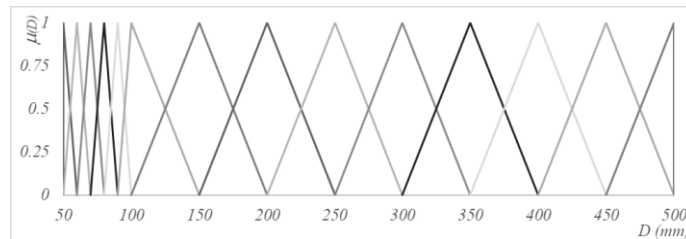
## 2. BORU ENKESİTLİ PROFİLLERİN EKSENEL BASINÇ VE ÇEKME KAPASİTELERİNİN TAHMİNİ İÇİN BULANIK MANTIK MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Bu çalışmada 14 farklı çap, 5 farklı et kalınlığı ve 20 farklı eleman uzunluğu için oluşturulan 1400 adet farklı boru en kesitli profilin GKT yöntemine göre aksel çekme ve aksel basınç kuvveti taşıma kapasiteleri ayrı ayrı belirlenerek elde edilen tüm datalar ayrı ayrı iki farklı bulanık modelin oluşturulmasında kullanılmıştır. Başka bir deyişle Tablo 1 'de çap, et kalınlığı ve eleman uzunluğu için verilen değerler hem boru kesitli profillerin aksel çekme kuvveti dayanımını belirlemek için, hem de aksel basınç kuvvetini belirlemek için oluşturulan iki ayrı bulanık mantık modelinde kullanılmıştır. Çalışmada, malzeme sınıfı sabit S355 H olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Bulanık modellerin geliştirilmesinde kullanılan parametreler ve değerleri

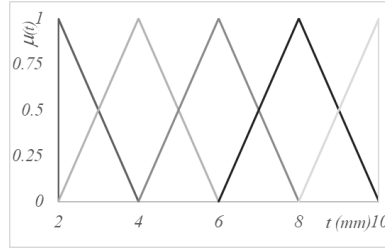
Parametreler	Değerler
$D$ (mm)	50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500
$t$ (mm)	2, 4, 6, 8, 10
$L$ (mm)	500, 1000, 1500, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000, 3200, 3400, 3600, 3800, 3900, 4000, 4100, 4200, 4300, 4400, 4500

Bulanık modellerin oluşturulmasında girdi parametreleri ve bu parametrelere ait değerler aynı olduğundan, her iki modelde de girdi parametrelerine ait değerler aynı şekilde bulanıklaştırılarak kullanılmışlardır. Bulanıklaştırmada üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Dış çap ( $D$ ), profil et kalınlığı ( $t$ ) ve boru uzunluğu ( $L$ ) için sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 de gösterildiği gibi bulanık kümeler oluşturulmuştur.

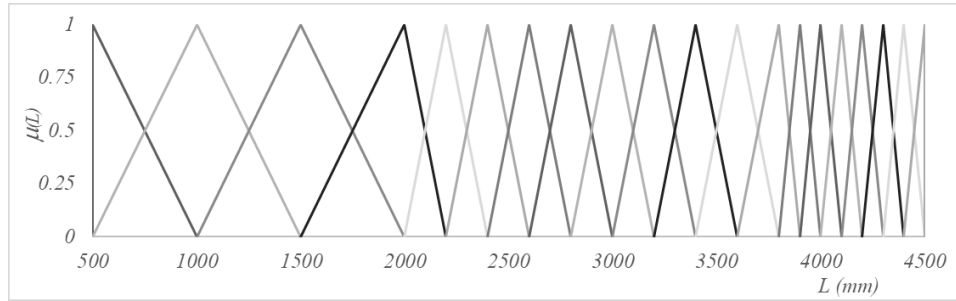


Şekil 5. Profil dış çapı ( $D$ )'na ait bulanık kümelerin üçgen üyelik fonksiyonları ile gösterimleri





Şekil 6. Profil et kalınlığına ( $t$ ) ait bulanık kümelerin üçgen üyelik fonksiyonları ile gösterimleri



Şekil 7. Eleman uzunluğuna ( $L$ ) ait bulanık kümelerin üçgen üyelik fonksiyonları ile gösterimleri

Çekme dayanımının tahmini için oluşturulan bulanık kümelerin tüm kombinasyonları için toplam 1400 adet eksenel çekme hesabı *GKT* yöntemine göre yapılmıştır. Elde edilen dayanım değerleri sınıflandırıldığında 68 adet farklı çekme dayanımı sonucunun olduğu anlaşılmıştır. 64.111 kN ile 3272.336 kN değerleri arasında olan bu tüm 68 dayanım değeri üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak bulanıklaştırılarak bulanık çıktılar oluşturulmuştur. Benzer şekilde basınç dayanımının tahmini için oluşturulan bulanık kümelerin tüm kombinasyonları için de toplam 1400 adet eksenel basınç hesabı *GKT* yöntemine göre yapılmıştır. Elde edilen dayanım değerleri sınıflandırıldığında 1400 adet farklı basınç dayanımı sonucunun olduğu anlaşılmıştır. 4.454 kN ile 3270.285 kN değerleri arasında olan tüm 1400 adet basınç dayanımı değeri üçgen üyelik fonksiyonu yardımıyla bulanıklaştırılarak bulanık basınç modeli oluşturulmuştur.

Çekme için 68 adet bulanık çıktının, basınç için 1400 adet bulanık çıktının ayrı ayrı bir grafikte verilmesi mümkün olmadığından bu çalışmada verilmemiştir. Her iki model için de 1400 ‘er adet çözüm için bulanık girdi ve çıktı kümelerine ait bulanık kümeler kullanılarak 1400 ‘er adet kural oluşturulmuştur.

Tüm kurallarda “*VE*” koşul terimi kullanılmıştır. Çekme ve Basınç dayanımını tahmin için oluşturulan kurallara birer örnek (26) ve (27) numaralı denklemlerde sırasıyla verilmiştir.

$$\text{Eğer } D = \{D\}_i \text{ ve } t = \{t\}_j \text{ ve } L = \{L\}_k \text{ ise } T_g = \{T_g\}_m \quad (26)$$

$$\text{Eğer } D = \{D\}_i \text{ ve } t = \{t\}_j \text{ ve } L = \{L\}_k \text{ ise } P_g = \{P_g\}_m \quad (27)$$

## 2.1 Bulanık Mantık Modellerinin Test Edilmesi ve Doğrulanması

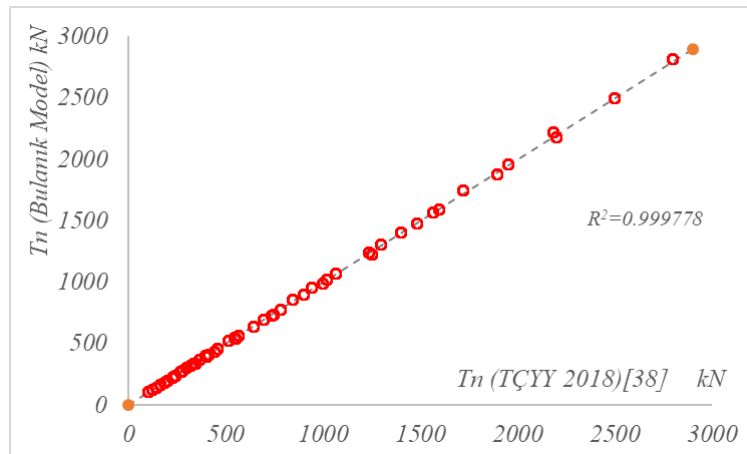
Boru en kesitli profillerin *GKT* yöntemine uygun olarak aksenal basınç ve aksenal çekme kapasitelerinin tahmini için oluşturulan her iki bulanık model, geliştirilmeleri esnasında kullanılan 1400 ‘er adet örneğin dışında Tablo 2 de verilen girdi parametrelerine ait değerlerin tüm kombinasyonları için test edilmişlerdir. Başka bir ifade ile test aşamasında Tablo 2 de *D* parametresi için 13 adet, *t* parametresi için 4 adet ve *L* parametresi için 19 adet değer tüm kombinasyonları için  $13 \times 4 \times 19 = 988$  adet örnek kullanılmıştır. Bu test sayısının 1400 adet örnek ile bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modellerin test edilmesinde oran olarak %70 ‘i aşan sayıda veri kullanıldığı için yeterli olduğu ortadadır.

Tablo 2. Bulanık modellerin test edilmesinde kullanılan parametre değerleri

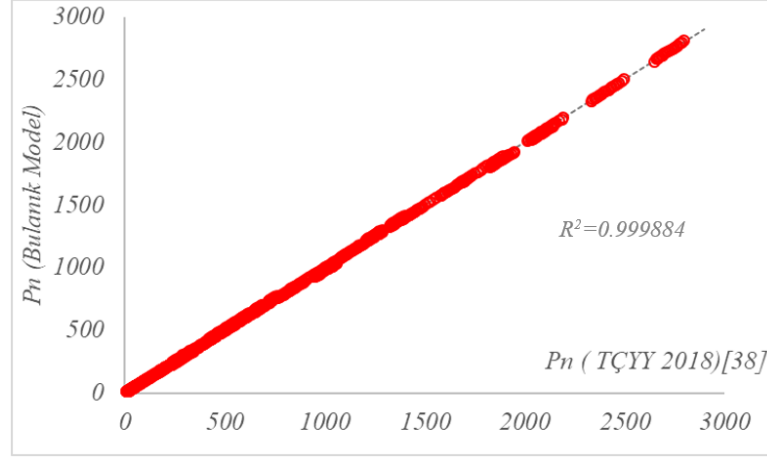
Parametreler	Değerler
<i>D</i> (mm)	55, 65, 75, 85, 95, 125, 175, 225, 275, 325, 375, 425, 475
<i>t</i> (mm)	3, 5, 7, 9
<i>L</i> (mm)	750, 1250, 1750, 2100, 2300, 2500, 2700, 2900, 3100, 3300, 3500, 3700, 3850, 3950, 4050, 4150, 4250, 4350, 4450

Oluşturulan bulanık mantık modellerinin test sonuçlarını değerlendirilebilmesi için *GKT* yöntemi ile test örneklerinin çözümlemeleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar ile bulanık modellerin çıktıkları arasında korelasyon ve yüzde hata hesaplamaları yapılmıştır. Yüzde hata hesaplamalarında Denklem (28)’de verilen eşitlik kullanılmıştır. Çekme dayanımı tahmini için geliştirilen modelde *GKT* yöntemi sonuçları ile bulanık model tahminleri arasında  $R^2=0.999778$  ‘luk bir korelasyon olduğu belirlenmiş (Şekil 8) ve bulanık tahminlerdeki en büyük % hata  $E_{y-max}=2.764$ , en küçük % hata  $E_{y-min}=-2.603$  ve ortalama yüzde hata  $E_{y-ort}=-0.100$  olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı tahmini için geliştirilen modelde ise *GKT* yöntemi sonuçları ile bulanık model tahminleri arasında  $R^2=0.999884$  lük bir korelasyon olduğu belirlenmiş (Şekil 9) ve bulanık tahminlerdeki en büyük % hata  $E_{y-max}=4.927$ , en küçük % hata  $E_{y-min}=-3.761$  ve ortalama % hata  $E_{y-ort}=0.281$  olarak elde edilmiştir.

$$E_{y-max} = \frac{Dayanım^{Model} - Dayanım^{GKT}}{Dayanım^{GKT}} \times 100 \quad (28)$$



Şekil 8. Çekme dayanımı tahmini için oluşturulan bulanık mantık modeli ile *GKT* yöntemine göre hesaplanan çekme dayanımlarının dağılımları ve uyumları



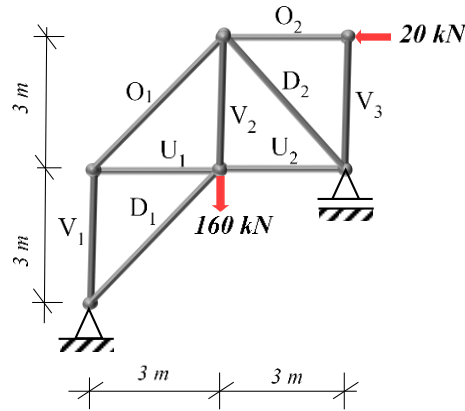
Şekil 9. Basınç dayanımı tahmini için oluşturulan bulanık mantık modeli ile GKT yöntemine göre hesaplanan basınç dayanımlarının dağılımları ve uyumları

### 3. BULANIK TERS MANTIK YÖNTEMİ İLE EKSENEL ÇEKME VE BASINÇ ETKİSİNDEKİ BORU KESİTLİ PROFİLLERİN TASARIMLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu çalışmada boru kesitli profiller ile oluşturulmuş Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12 de verilen 3 farklı basit düzlem izostatik kafes sistem çubuklarının (elemanlarının) tasarımları gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla bu üç örneğe ait veriler bu çalışmada geliştirilen iki bulanık model üzerine bulanık ters mantık yöntemi kullanılarak uygulanmıştır.

Bulanık ters mantık ile kafes sistem çubuk elemanlarının tasarımlara geçmeden önce kafes sistemleri oluşturan tüm çubuk elemanların boyları belirlenmiştir. Daha sonra kafes sistemlerin statik analizleri yapılarak her bir kafes elemana etkiyen basınç ve çekme kuvvetleri belirlenmiştir (Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5). Bulanık ters mantık yönteminde her bir çubuk eleman için boy ve eksenel kuvvet değeri (model hataları dikkate alınacak ve alınmayacak şekilde) bulanık ters mantık yöntemine girdi verisi olarak sunulmuş ve çubuk elemanın dış çapı ve et kalınlığı belirlenerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

1' nci kafes sistem örneği:

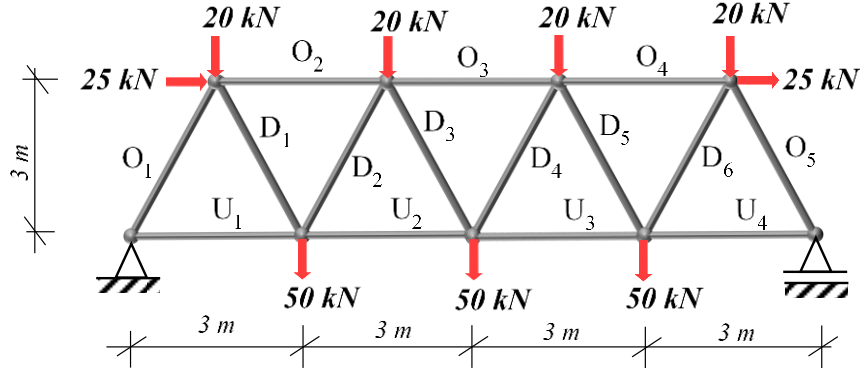


Şekil 10. Bulanık ters mantık yöntemi ile tasarımları gerçekleştirilen 1' nci kafes sistem

Tablo 3. 1'inci kafes sistem örneği için çubuk eleman boyları ve eksenel kuvvetler

Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)	Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)	Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)
$O_1$	-113.100	4242.641	$U_2$	60.000	3000.000	$V_3$	0.000	3000.000
$O_2$	-20.000	3000.000	$V_1$	-80.000	3000.000	$D_1$	-28.300	4242.641
$U_1$	80.000	3000.000	$V_2$	140.000	3000.000	$D_2$	-84.800	4242.641

2' nci kafes sistem örneği:

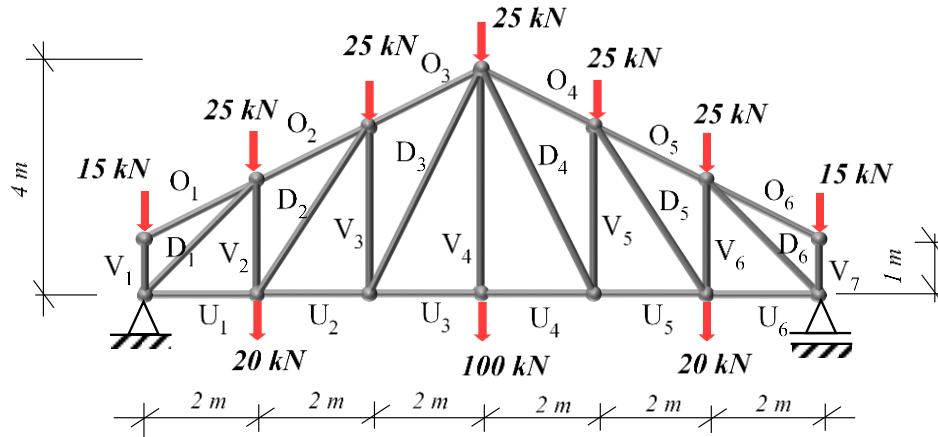


Şekil 11. Bulanık ters mantık yöntemi ile tasarımları gerçekleştirilen 2' nci kafes sistem

Tablo 4. 2'nci kafes sistem örneği için çubuk eleman boyları ve eksenel kuvvetler

Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)	Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)	Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)
$O_1$	-114.598	3354.102	$U_1$	101.25	3000	$D_2$	-36.336	3354.102
$O_2$	-117.5	3000	$U_2$	158.75	3000	$D_3$	13.975	3354.102
$O_3$	-140	3000	$U_3$	146.25	3000	$D_4$	41.926	3354.102
$O_4$	-92.5	3000	$U_4$	63.75	3000	$D_5$	-64.287	3354.102
$O_5$	-142.549	3354.102	$D_1$	92.238	3354.102	$D_6$	120.189	3354.102

3' ncü kafes sistem örneği:



Şekil 12. Bulanık ters mantık yöntemi ile tasarımları gerçekleştirilen 3' ncü kafes sistem

Tablo 5. 3'üncü kafes sistem örneği için çubuk eleman boyları ve eksenel kuvvetler

Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)	Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)	Çubuk Adı	N (kN)	L (mm)
$O_1$	1.421E-14	2236.068	$U_2, U_5$	146.67	2000	$V_4$	100	4000
$O_2, O_5$	-148.140	2236.068	$U_3, U_6$	141.25	2000	$D_1, D_6$	-187.383	2828.427
$O_3, O_4$	-163.978	2236.068	$V_1, V_7$	-15.00	1000	$D_2, D_5$	-25.539	3605.551
$O_6$	1.137E-14	2236.068	$V_2, V_6$	41.250	2000	$D_3, D_4$	12.112	4472.136
$U_1, U_4$	132.500	2000	$V_3, V_5$	-10.833	3000			

#### 4. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bulanık ters mantık yönteminin uygulanması esnasında model hataları Tablo3, Tablo 4 ve Tablo 5 'de verilen çubuk kuvvetlerini artırıcı yönde olacak şekilde (29) numaralı denklem kullanılarak dikkate alınmıştır. Çekme etkisindeki çubuk elemanlar için hata  $E_y=0.03$  (% 3), Basınç etkisindeki elemanlar için hata  $E_y=0.05$  (% 5) alınmıştır. Çalışmada hem model hataları dikkate alınmadan, hem de dikkate alınarak gerçekleştirilen tasarımlar 1'nci, 2'nci ve 3'ncü kafes sistem örneği için Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8 de sırasıyla verilmişlerdir. Bu tablolarda, bulanık ters mantık yöntemi ile gerçekleştirilen boru kesitli çubuk eleman tasarımlarına ait alanlar ve talep/kapasite oranlarına da yer verilmektedir.

$$N_h = N \times (1 + E_y) \quad (29)$$

Kafes çubuk eleman tasarımlarının güvenilir olup olmadığı, taşınması talep edilen eksenel yükün, kesitin yük taşıma kapasitesine oranlanması ile elde edilen talep/kapasite oranı ile anlaşılabilir. Tablo 6, 7 ve 8 'de verilen bulanık model hataları dikkate alınmadan gerçekleştirilen tasarımlarda talep/kapasite oranlarının 1 'e çok yakın olduğu anlaşılabilir. Ancak burada model hataları dikkate alınmadan tasarımlar gerçekleştirildiği için bu tasarımların bir kısmında bu oranın çok az da olsa 1'den büyük değerler aldığı görülmektedir. Diğer taraftan bulanık model hatalarının dikkate alındığı tasarımlarda talep/kapasite oranları, 1'inci kafes sistemdeki  $U_1$  çubuk elemanının tek bir tasarımı hariç diğer tüm kafes elemanlarında 1'den küçük ancak 1'e çok yakın değerler elde edilmiştir. 1'inci kafes sistemdeki  $U_1$  çubuğunda ise bu oran 1.008 olarak elde edilmiştir. Proje uygulamalarında eleman ve sitem güvenliği açısından bulanık ters mantık yöntemi ile elde edilen çap ve kalınlık değerlerinin yukarı yönlü yuvarlatılarak seçilmesi gerçekleştirilmelidir. Yapılacak bu tür yukarı yönlü yuvarlatma işlemleri düşünüldüğünde talep ve kapasite oranlarının tüm kafes çubuk elemanları için daha düşük olacağı yani daha güvenilir tasarımların ortaya çıkacağı gerçektir. Yani, model hataları dikkate alınarak ve kesit çap ve kalınlığı seçimi için yukarı yuvarlatma işlemleri ile birlikte boru kesitli kafes sistem çubuk elemanlarının tasarımlarının bu çalışmada geliştirilen bulanık modeller yardımıyla gerçekleştirileceği ortadadır.

Burada belirtmek gerekmektedir ki talep/kapasite oranlarının 1'e çok yakın değerler olması elde edilen tasarımların optimum olduklarını göstermez. Optimum tasarımlar ancak bulanık ters mantık hesaplamalarının değişken girdi sayısı ile aynı boyutta (bu çalışmada 2 boyutlu) gerçekleştirilen hesaplamalarından elde edilen tasarımlar arasında aranabilir. Bu çalışmada 1 boyutlu bulanık ters mantık yöntemi kullanıldığından elde edilen tasarımların talep/kapasite oranları 1 'e eşit bile olsalar, bu tasarımların tümünün veya bu tasarımlardan birinin optimum tasarım olduğunu söylemek doğru olmaz.

Bulanık ters mantık yöntemi ile gerçekleştirilen tasarımlarda birden çok sayıda alternatif tasarımın elde edilmesi çap ve kalınlık seçiminde tasarımcı için bir sorun gibi gözükse de ekonomik tasarımlar için kesit alanı hesaplamaları ile tasarım seçimi kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Örnek olarak Tablo 6, 7 ve 8 'de elde

edilen her bir tasarıma ait alanlar hesaplanarak verilmiştir. Kesit alanı en küçük olan tasarımlar 1 boyutlu bulanık mantık yöntemi ile gerçekleştirilen tasarımların en ekonomidir ancak optimum kesit değildirlir.

Tablo 6. 1'inci kafes sistem için bulanık ters mantık tasarımları

Çubuk Adı	(Eksenel kuvvet=N için)				(Eksenel kuvvet=N.(1+Ey) için)			
	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite
O <sub>1</sub>	88.882	10.000	2478.151	1.003	94.328	8.000	2169.656	0.963
	99.933	6.000	1770.604	1.002	90.279	10.000	2522.049	0.952
	92.956	8.000	2135.165	1.011	112.555	4.000	1364.141	0.977
	90.000	9.481	2398.237	0.997	101.190	6.000	1794.280	0.963
	148.947	2.000	923.296	0.998	100.000	6.378	1875.819	0.951
	110.719	4.000	1341.068	1.027	153.330	2.000	950.833	0.950
	100.000	5.987	1768.295	1.001	150.000	2.069	961.699	0.944
O <sub>2</sub>	51.586	4.000	597.987	1.019	52.282	4.000	606.726	0.975
	50.000	4.780	679.091	0.989	50.000	5.122	722.185	0.943
	62.242	2.000	378.513	1.010	63.167	2.000	384.325	0.965
	60.000	2.334	422.801	0.986	60.000	2.472	446.683	0.938
U <sub>1</sub>	50.000	2.414	360.929	1.043	50.000	2.501	373.244	1.008
	61.896	2.000	376.338	1.000	63.693	2.000	387.628	0.971
	60.000	2.068	376.324	1.000	60.000	2.132	387.574	0.971
U <sub>2</sub>	50.000	2.000	301.593	0.936	50.000	2.000	153.938	0.936
V <sub>1</sub>	67.910	8.000	1505.709	1.010	69.043	8.000	1534.166	0.956
	65.122	10.000	1731.706	1.022	66.083	10.000	1761.893	0.972
	72.144	6.000	1246.781	1.010	73.168	6.000	1266.088	0.965
	70.000	7.063	1396.477	0.992	70.000	7.571	1484.803	0.946
	80.205	4.000	957.619	0.997	81.485	4.000	973.707	0.951
	80.000	4.041	964.286	0.996	80.000	4.296	1021.792	0.946
	90.000	2.827	774.165	0.991	90.000	2.980	814.722	0.944
	103.865	2.000	640.037	0.991	106.607	2.000	657.265	0.939
	100.000	2.166	665.647	0.996	100.000	2.283	700.939	0.947

Tablo 6. (devam) 1'inci kafes sistem için bulanık ters mantık tasarımları

Çubuk Adı	(Eksenel kuvvet=N için)				(Eksenel kuvvet=N.(1+Ey) için)			
	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite
V <sub>2</sub>	55.696	4.000	649.631	1.014	57.170	4.000	668.154	0.986
	50.000	4.640	661.155	0.996	50.000	4.805	682.241	0.965
	60.000	3.672	649.808	1.014	60.000	3.784	668.346	0.985
	70.000	3.175	666.559	0.988	70.000	3.275	686.595	0.959
	80.000	2.706	657.027	1.002	80.000	2.788	676.396	0.974
	90.000	2.412	663.720	0.992	90.000	2.481	682.131	0.965
	104.790	2.000	645.849	1.020	108.418	2.000	668.647	0.985
	100.000	2.096	644.617	1.022	100.000	2.168	666.442	0.988
V <sub>3</sub>	50.000	2.000	301.593	0.000	50.000	2.000	301.593	0.000
D <sub>1</sub>	59.235	10.000	1546.751	1.007	65.651	6.000	1124.401	0.973
	64.660	6.000	1105.707	1.023	62.111	8.000	1359.967	0.966
	61.323	8.000	1340.160	1.009	60.170	10.000	1576.151	0.953
	60.000	9.382	1491.916	0.994	72.628	4.000	862.402	0.965
	71.593	4.000	849.403	1.009	70.000	4.734	970.591	0.946
	70.000	4.445	915.407	0.995	88.813	2.000	545.463	0.956
	87.305	2.000	535.986	1.007	80.000	2.901	702.663	0.940
	80.000	2.747	666.644	0.987				
D <sub>2</sub>	85.040	8.000	1936.229	1.014	86.345	8.000	1969.014	0.965
	81.474	10.000	2245.407	1.007	82.583	10.000	2280.278	0.962
	91.139	6.000	1604.830	1.008	92.457	6.000	1629.667	0.962
	90.000	6.370	1673.705	1.001	90.000	6.799	1777.152	0.951
	129.257	2.000	799.578	0.976	132.207	2.000	818.114	0.933
	101.530	4.000	1225.597	1.009	102.907	4.000	1242.897	0.967
	100.000	4.284	1288.095	0.996	100.000	4.539	1361.201	0.948

Tablo 7. 2'nci kafes sistem için bulanık ters mantık tasarımları

Çubuk Adı	(Eksenel kuvvet= $N$ için)				(Eksenel kuvvet= $N.(1+Ey)$ için)			
	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite
O <sub>1</sub>	77.364	10.000	2116.300	1.014	78.601	10.000	2155.167	0.961
	86.366	6.000	1514.862	1.011	87.779	6.000	1541.489	0.960
	81.000	8.000	1834.692	1.006	82.102	8.000	1862.396	0.962
	80.000	8.597	1928.529	0.997	80.000	9.256	2057.063	0.950
	97.261	4.000	1171.956	1.001	99.112	4.000	1195.212	0.953
	90.000	5.208	1387.307	0.994	90.000	5.516	1463.984	0.948
	133.875	2.000	828.593	0.974	137.754	2.000	852.970	0.934
	100.000	3.710	1122.335	0.996	100.000	3.906	1179.180	0.951
O <sub>2</sub>	76.119	8.000	1712.010	1.013	77.312	8.000	1742.008	0.962
	72.946	10.000	1977.494	1.016	73.952	10.000	2009.114	0.970
	81.483	6.000	1422.822	1.000	82.761	6.000	1446.902	0.953
	80.000	6.526	1506.402	0.996	80.000	6.979	1601.082	0.947
	92.168	4.000	1107.956	1.000	94.016	4.000	1131.169	0.953
	90.000	4.299	1157.557	0.997	90.000	4.554	1222.583	0.948
	129.571	2.000	801.550	0.965	133.598	2.000	826.854	0.926
	100.000	3.268	993.094	0.993	100.000	3.441	1043.702	0.946
O <sub>3</sub>	76.800	10.000	2098.594	1.016	78.000	10.000	2136.269	0.964
	86.375	6.000	1515.042	1.001	87.898	6.000	1543.733	0.953
	80.561	8.000	1823.649	1.001	81.717	8.000	1852.698	0.955
	80.000	8.308	1871.125	0.998	80.000	8.942	1996.164	0.950
	99.243	4.000	1196.856	0.999	90.000	5.580	1479.941	0.949
	90.000	5.276	1404.376	0.995	149.792	2.000	928.607	0.954
	144.994	2.000	898.458	0.993	101.438	4.000	1224.444	0.951
	100.000	3.929	1185.898	0.998	100.000	4.148	1249.179	0.950
O <sub>4</sub>	68.125	10.000	1826.040	1.011	69.236	10.000	1860.944	0.957
	75.345	6.000	1307.117	1.015	76.529	6.000	1329.441	0.965
	71.040	8.000	1584.360	1.004	71.979	8.000	1607.975	0.961
	70.000	8.792	1690.606	0.994	70.000	9.508	1806.853	0.948
	84.206	4.000	1007.894	1.000	85.686	4.000	1026.496	0.953
	80.000	4.839	1142.632	0.991	80.000	5.134	1207.605	0.945
	90.000	3.306	900.416	0.993	90.000	3.483	946.763	0.947
	112.434	2.000	693.875	0.978	115.604	2.000	713.795	0.928
100.000	2.533	775.644	0.992	100.000	2.669	816.128	0.944	

Tablo 7 (Devam). 2'nci kafes sistem için bulanık ters mantık tasarımları

Çubuk Adı	(Eksenel kuvvet= $N$ için)				(Eksenel kuvvet= $N.(1+Ey)$ için)			
	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite
O <sub>5</sub>	86.377	8.000	1969.834	1.012	87.748	8.000	2004.295	0.961
	82.535	10.000	2278.758	1.013	83.683	10.000	2314.817	0.967
	92.851	6.000	1637.098	1.001	94.389	6.000	1666.091	0.954
	90.000	6.825	1783.279	0.996	90.000	7.269	1889.369	0.950
	106.056	4.000	1282.468	1.001	108.272	4.000	1310.323	0.953
	100.000	4.740	1418.632	0.995	100.000	5.011	1495.468	0.948
	153.600	2.000	952.532	1.007	159.806	2.000	991.521	0.950
	150.000	2.057	955.984	0.995	150.000	2.155	1000.876	0.881
U <sub>1</sub>	50.000	3.184	468.314	1.017	50.000	3.294	483.362	0.985
	60.000	2.636	475.032	1.003	60.000	2.717	488.978	0.974
	77.806	2.000	476.303	1.000	70.000	2.322	493.638	0.965
	70.000	2.249	478.717	0.995	80.101	2.000	490.721	0.971
U <sub>2</sub>	50.000	5.378	753.959	0.990	50.000	5.566	776.983	0.961
	62.914	4.000	740.332	1.009	65.053	4.000	767.214	0.973
	60.000	4.208	737.580	1.012	60.000	4.361	762.269	0.980
	70.000	3.623	755.516	0.988	70.000	3.737	777.908	0.960
	80.000	3.075	743.164	1.005	80.000	3.169	764.904	0.976
	90.000	2.719	745.681	1.001	90.000	2.798	766.402	0.974
	120.988	2.000	747.623	0.999	125.102	2.000	773.471	0.966
	100.000	2.420	741.795	1.007	100.000	2.502	766.371	0.974
U <sub>3</sub>	57.889	4.000	677.195	1.016	59.429	4.000	696.547	0.988
	50.000	4.886	692.471	0.994	50.000	5.059	714.229	0.963
	60.000	3.839	677.366	1.016	60.000	3.957	696.609	0.988
	70.000	3.324	696.352	0.988	70.000	3.429	717.185	0.959

	80.000	2.829	685.835	1.003	80.000	2.915	706.003	0.974
	90.000	2.515	691.106	0.995	90.000	2.586	710.294	0.969
	110.189	2.000	679.774	1.012	113.980	2.000	703.592	0.978
	100.000	2.204	677.083	1.016	100.000	2.280	699.833	0.983
<i>U<sub>4</sub></i>	50.000	2.000	301.593	0.994	50.000	2.000	301.593	0.994
<i>D<sub>1</sub></i>	50.000	2.846	421.595	1.029	50.000	2.947	435.616	0.998
	60.000	2.393	433.150	1.002	60.000	2.467	445.917	0.975
	71.059	2.000	433.908	1.000	73.130	2.000	446.925	0.972
	70.000	2.034	434.275	0.999	70.000	2.100	447.988	0.970
<i>D<sub>2</sub></i>	57.232	8.000	1237.327	1.025	58.168	8.000	1260.870	0.969
	55.188	10.000	1419.609	1.038	55.994	10.000	1444.959	0.985
	66.579	4.000	786.392	1.020	67.687	4.000	800.318	0.968
	60.632	6.000	1029.794	1.014	61.439	6.000	1045.003	0.971
	60.000	6.419	1080.536	1.003	60.000	6.954	1158.892	0.951
	70.000	3.414	714.086	0.994	70.000	3.604	751.672	0.949
	81.289	2.000	498.186	1.007	82.549	2.000	506.104	0.960
80.000	2.127	520.265	0.999	80.000	2.250	549.677	0.949	
<i>D<sub>3</sub></i>	50.000	2.000	301.593	0.218	50.000	2.000	301.593	0.218
<i>D<sub>4</sub></i>	50.000	2.000	301.593	0.654	50.000	2.000	301.593	0.654
<i>D<sub>5</sub></i>	67.830	8.000	1503.702	1.019	68.945	8.000	1531.714	0.964
	65.137	10.000	1732.166	1.026	66.101	10.000	1762.470	0.975
	72.188	6.000	1247.608	1.013	73.213	6.000	1266.937	0.967
	70.000	7.046	1393.493	0.998	70.000	7.536	1478.838	0.953
	80.162	4.000	957.081	1.003	81.298	4.000	971.360	0.959
	80.000	4.037	963.352	1.001	80.000	4.294	1021.373	0.950
	99.821	2.000	614.627	0.998	90.000	2.861	783.214	0.941
	90.000	2.712	743.764	0.988	101.986	2.000	628.233	0.948
					100.000	2.100	645.965	0.949
	<i>D<sub>6</sub></i>	50.000	3.866	560.285	1.009	50.000	3.997	577.702
60.000		3.138	560.542	1.009	60.000	3.234	576.724	0.980
70.000		2.703	571.531	0.989	70.000	2.790	589.034	0.960
80.000		2.315	564.868	1.001	80.000	2.385	581.627	0.972
92.770		2.000	570.328	0.991	94.549	2.000	581.503	0.972
90.000		2.091	577.557	0.979	90.000	2.150	593.346	0.953

Tablo 8. 3'üncü kafes sistem için bulanık ters mantık tasarımları

Çubuk Adı	(Eksenel kuvvet=N için)				(Eksenel kuvvet=N.(I+Ey) için)			
	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite
<i>O<sub>1</sub></i>	50.000	2.000	301.593	0.000	50.000	2.000	301.593	0.000
<i>O<sub>2</sub>, O<sub>5</sub></i>	69.111	8.000	1535.897	1.002	66.892	10.000	1787.320	0.961
	65.861	10.000	1754.929	1.011	76.661	6.000	1331.931	0.952
	75.097	6.000	1302.447	1.001	70.338	8.000	1566.717	0.953
	70.000	7.642	1497.038	0.998	70.000	8.175	1587.795	0.952
	88.579	4.000	1062.848	0.998	80.000	5.379	1261.019	0.946
	80.000	5.088	1197.482	0.993	90.870	4.000	1091.637	0.951
	90.000	3.874	1048.316	0.997	90.000	4.084	1102.331	0.950
	138.644	2.000	858.558	0.978	144.080	2.000	892.713	0.940
	100.000	3.175	965.798	0.995	100.000	3.340	1014.342	0.948
<i>O<sub>3</sub>, O<sub>4</sub></i>	68.066	10.000	1824.188	1.007	69.207	10.000	1860.042	0.956
	78.442	6.000	1365.491	0.999	72.963	8.000	1632.710	0.954
	71.669	8.000	1600.174	1.002	70.000	9.534	1811.117	0.951
	70.000	8.864	1702.466	0.997	80.169	6.000	1398.057	0.950
	80.000	5.710	1332.694	0.996	80.000	6.036	1402.573	0.950
	93.474	4.000	1124.359	0.999	96.006	4.000	1156.181	0.952
	90.000	4.336	1166.809	0.995	90.000	4.580	1229.131	0.947
	100.000	3.528	1069.388	0.996	100.000	3.711	1122.705	0.950
	150.352	2.000	932.124	0.997	158.289	2.000	981.993	0.948
	150.000	2.004	931.820	0.997	150.000	2.098	974.793	0.946
<i>O<sub>6</sub></i>	50.000	2.000	301.593	0.000	50.000	2.000	301.593	0.000
<i>U<sub>1</sub>, U<sub>4</sub></i>	53.064	4.000	616.554	1.011	54.459	4.000	634.085	0.983
	50.000	4.344	623.072	1.000	50.000	4.501	643.324	0.969
	60.000	3.472	616.507	1.011	60.000	3.578	634.188	0.983
	70.000	2.996	630.623	0.988	70.000	3.091	649.694	0.959

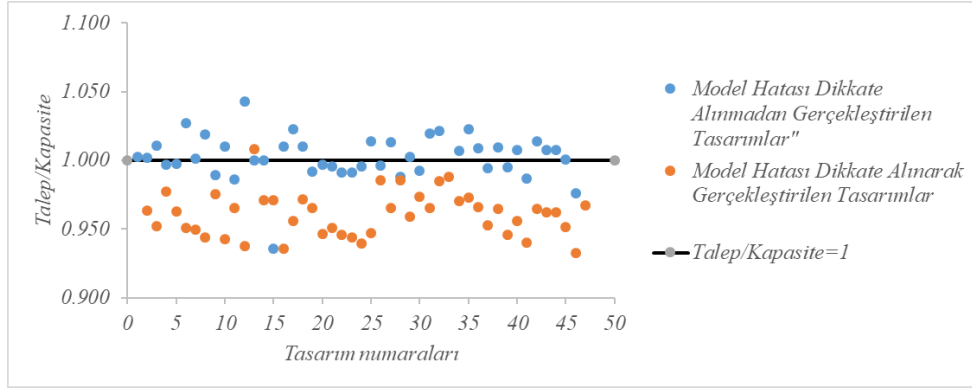


	80.000	2.558	622.332	1.002	80.000	2.636	640.737	0.973
	99.002	2.000	609.481	1.023	90.000	2.354	648.245	0.962
	90.000	2.289	630.769	0.988	101.745	2.000	626.716	0.995
					100.000	2.035	626.273	0.995
	58.037	4.000	679.047	1.016	59.581	4.000	698.452	0.988
	50.000	4.902	694.561	0.993	50.000	5.076	716.361	0.963
	60.000	3.850	679.212	1.016	60.000	3.968	698.499	0.988
	70.000	3.334	698.349	0.988	70.000	3.440	719.232	0.959
$U_2, U_5$	80.000	2.837	687.767	1.003	80.000	2.924	707.986	0.975
	90.000	2.521	692.944	0.996	90.000	2.594	712.182	0.969
	110.552	2.000	682.054	1.012	114.353	2.000	705.937	0.977
	100.000	2.211	679.262	1.016	100.000	2.287	702.071	0.983
	56.135	4.000	655.144	1.014	57.622	4.000	673.834	0.986
	50.000	4.689	667.448	0.996	50.000	4.856	688.673	0.965
	60.000	3.705	655.334	1.014	60.000	3.819	674.016	0.986
	70.000	3.205	672.529	0.988	70.000	3.306	692.727	0.959
$U_3, U_6$	80.000	2.730	662.796	1.003	80.000	2.814	682.327	0.974
	90.000	2.433	669.203	0.993	90.000	2.502	687.771	0.966
	105.870	2.000	652.634	1.018	109.531	2.000	675.638	0.983
	100.000	2.117	651.116	1.021	100.000	2.191	673.128	0.987
$V_1, V_7$	50.000	2.000	301.593	0.304	50.000	2.000	153.938	0.304
$V_2, V_6$	50.000	2.000	301.593	0.643	50.000	2.000	153.938	0.643
$V_3, V_5$	50.916	2.000	307.350	1.021	51.646	2.000	311.934	0.977
	50.000	2.180	327.474	1.003	50.000	2.323	347.938	0.949
	50.000	3.139	462.101	1.018	50.000	3.248	476.992	0.986
	60.000	2.603	469.282	1.002	60.000	2.683	483.071	0.974
$V_4$	76.870	2.000	470.423	1.000	79.116	2.000	484.535	0.971
	70.000	2.219	472.568	0.995	70.000	2.291	487.316	0.975
	85.472	8.000	1947.094	1.002	86.993	8.000	1985.310	0.953
	81.215	10.000	2237.273	1.000	82.437	10.000	2275.688	0.954
	93.522	6.000	1649.750	0.999	95.458	6.000	1686.242	0.952
$D_1, D_6$	90.000	6.759	1767.428	0.995	90.000	7.175	1867.066	0.948
	111.008	4.000	1344.705	0.998	113.963	4.000	1381.832	0.950
	100.000	5.054	1507.430	0.996	100.000	5.336	1587.043	0.949
	183.407	2.000	1139.812	0.995	191.827	2.000	1192.720	0.949
	150.000	2.462	1141.264	0.964	150.000	2.579	1194.327	0.921

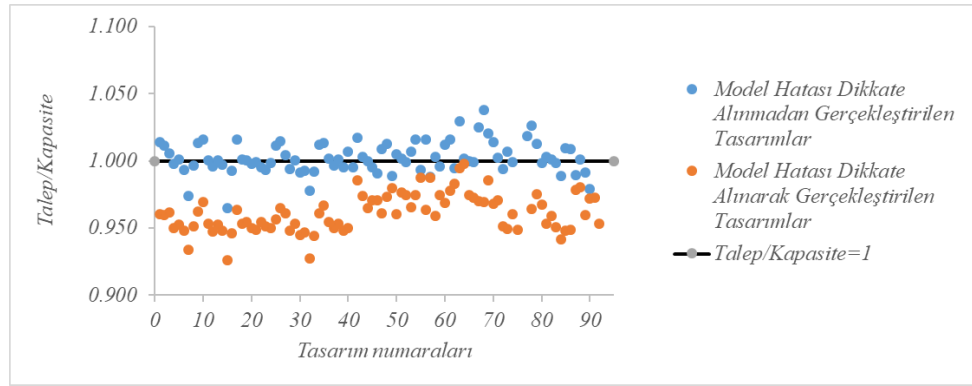
Tablo 8. (Devam). 3'üncü kafes sistem için bulanık ters mantık tasarımları

Çubuk Adı	(Eksenel kuvvet=N için)				(Eksenel kuvvet=N.(1+Ey) için)			
	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite	D (mm)	t (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Talep Kapasite
$D_2, D_5$	56.653	6.000	954.781	1.031	57.574	6.000	972.141	0.978
	53.726	8.000	1149.222	1.035	54.498	8.000	1168.625	0.985
	52.187	10.000	1325.338	1.028	52.844	10.000	1345.972	0.984
	62.369	4.000	733.484	1.021	63.283	4.000	744.969	0.974
	60.000	4.833	837.547	0.998	60.000	5.154	888.016	0.951
	75.907	2.000	464.371	1.009	77.178	2.000	472.359	0.959
	70.000	2.715	573.920	0.985	70.000	2.869	605.061	0.938
$D_3, D_4$	50.000	2.000	301.593	0.189	50.000	2.000	301.593	0.189

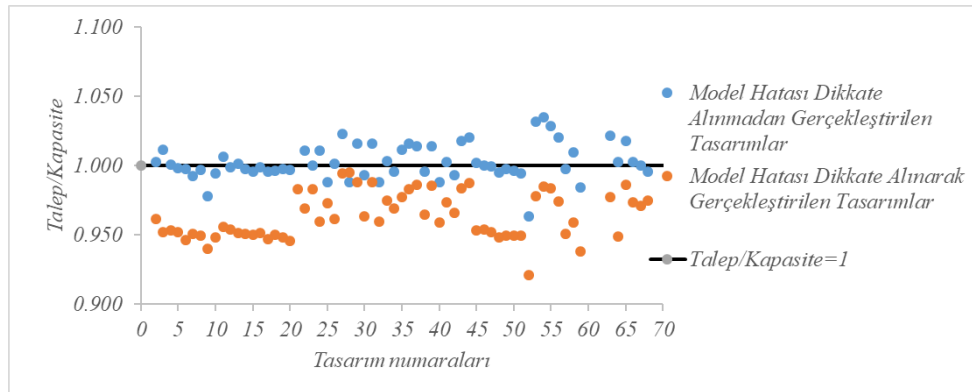
1'inci kafes sistem örneği için, Tablo 6 'da model hatalarının dikkate alınarak ve alınmadan gerçekleştirilen bulanık ters mantık tasarımlarına ait kapasite/tasarım oranlarına ait dağılımlar Şekil 13 de daha açık bir şekilde görülmektedir. Bu Şekilde  $V_3$  çubuğuna ait dağılım verisine yer verilmemiştir. Çünkü  $V_3$  çubuğundaki eksenel kuvvet değeri sıfırdır ve minimum kesit boyutlarına sahip boru profillerin kullanılması ile bu çubuğun tasarımı gerçekleştirilir. Bu çubuktaki eksenel kuvvetin kullanılan bulanık mantık modelindeki değişken değer aralığı sınırlarının dışında olması nedeniyle bulanık ters mantık yöntemiyle de bir tasarım edilmesi söz konusu değildir. 1'inci kafes sistem örneğine benzer olarak 2 ve 3'üncü örnek kafes sistem elemanları için gerçekleştirilen talep/kapasite dağılımları Şekil 14 ve Şekil 15 'de verilmektedir. Bu şekillerde 1'inci kafes sistem örneğindeki ile aynı sebeplerle 2'nci kafes sistem örneği için Şekil 14 'de  $U_4, D_3$  ve  $D_4$  çubuklarına, 3'üncü kafes sistem örneği için Şekil 15 de  $O_1, O_6, V_1, V_2, V_6, V_7, D_3$  ve  $D_4$  çubuklarına ait birer tasarım verisine yer verilmemiştir.



Şekil 13. 1'inci Kafes sistem örneği çubuk eleman tasarımları için talep/kapasite dağılımı



Şekil 14. 2'nci Kafes sistem örneği çubuk eleman tasarımları için talep/kapasite dağılımı



Şekil 15. 3'üncü kafes sistem örneği çubuk eleman tasarımları için talep/kapasite dağılımı

Burada belirtmek gerekir ki, boru kesitli profiller çift simetri eksenine sahip olduklarından bu çalışmada geliştirilen bulanık modeller 1 boyutlu bulanık ters mantık yöntemiyle birlikte, bu tür profiller ile teşkil edilmiş hem düzlem hem de uzay kafes sistem çubuklarının aksenal kuvvet dayanımı tahmininde ve tasarımında kullanılabilirler.

Bu çalışmadaki örnek problemlerin girdi verilerinde herhangi bir sınırlama yapılmadan tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Oysa bir kafes sistem elemanının tasarımında çap ve kalınlık değişkenlerinden biri

zorunlu olarak sabit tutulması gerekebilir. Bulanık ters mantık yönteminin bu tür konstrüktif, mimari vb. kısıtlamalar ile de başarıyla sonuçlar ürettiğini belirtmekte fayda vardır.

Bu çalışmada 2018 Türk Çelik Yapılar yönetmeliğine göre çekme kuvveti etkisindeki elemanları için eleman boyunun atalet yarıçapına oranı  $L/i \leq 300$  koşulu da dikkate alınmış ancak basınç kuvveti etkisindeki elemanlar için eleman boyunun atalet yarıçapına oranı  $L/i \leq 200$  koşulu veri datasını sınırlandırdığından ve dolayısıyla kapsamlı bir bulanık mantık modelinin geliştirilmesine engel teşkil ettiğinden dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, çalışmanın tasarımlarda kullanılması durumunda narinlik kriterlerinin sağlanıp sağlanmadığı, özellikle basınç çubuklarında  $L/i \leq 200$  narinlik koşulunun gerçekleştirilen tasarımlardan sonra mutlaka kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunlara ilaveten 2018 Türk Çelik Yapılar yönetmeliğine göre boru en kesitli elemanların kesit hesaplarında tasarım et kalınlığı tozaltı ark kaynağının kullanılması durumunda nominal et kalınlığına, elektrik direnç kaynağı kullanılması durumunda nominal et kalınlığının 0.93 katına eşit olarak alınması gerektiğinden, bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modellerinin ve hesaplamaların tozaltı ark kaynağı kullanılması durumunda kullanılabilirliğini belirtmekte fayda vardır. Elektrik direnç kaynağı kullanılması durumunda bu çalışmada verilen bulanık mantık modellerinin revize edilerek bulanık ters mantık yöntemiyle birlikte tasarım ve hesaplamalarda kullanılması mümkündür.

## 5.SONUÇLAR

Bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuç ve önerilerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Çelik boru profiller ile teşkil edilmiş kafes sistemlerin çekme kuvveti etkisindeki çubuk elemanlarının  $64.111 \text{ kN}$  ile  $3272.336 \text{ kN}$  arasındaki dayanımlarının tahmininin bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modeli ile maksimum yüzde  $E_{y-max} = 2.764$  hata ile gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

Çelik boru profiller ile teşkil edilmiş kafes sistemlerin basınç kuvveti etkisindeki çubuk elemanlarının  $4.454 \text{ kN}$  ile  $3270.285 \text{ kN}$  arasındaki dayanımlarının tahmininin bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modeli ile maksimum yüzde  $E_{y-max} = 4.927$  hata ile gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

Çelik boru profiller ile teşkil edilmiş kafes sistemlerin  $64.111 \text{ kN}$  ile  $3272.336 \text{ kN}$  arasında çekme kuvvetine maruz çubuk elemanların tasarımlarının, bir boyutlu bulanık ters mantık yönteminin bu çalışmada çekme dayanımı tahmini için geliştirilen bulanık mantık modeli ile birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilebileceği kanıtlanmıştır. Bulanık ters mantık hesaplamalarında kullanılan bulanık mantık modelinin hatasının da dikkate alınmasıyla çekme çubukları için emniyetli tasarımların gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

Çelik boru profiller ile teşkil edilmiş kafes sistemlerin  $4.454 \text{ kN}$  ile  $3270.285 \text{ kN}$  arasında basınç kuvvetine maruz çubuk elemanların tasarımlarının, bir boyutlu bulanık ters mantık yönteminin bu çalışmada basınç dayanımı tahmini için geliştirilen bulanık mantık modeli ile birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilebileceği kanıtlanmıştır. Bulanık ters mantık hesaplamalarında kullanılan bulanık mantık modelinin hatasının da dikkate alınmasıyla basınç çubukları için emniyetli tasarımların gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modelleri gerek bu halleriyle gerekse daha da geliştirilerek yapay zeka tabanlı tasarım ve dayanım hesaplamaları yapabilen paket programlara entegre edilerek güvenle kullanılabilirler.

Bulanık mantık ve bulanık ters mantık yöntemlerinin, aynı sayısal veriler üzerinde birlikte kullanımlarıyla hem tahminlerde hem de tasarımlarda güçlü ve alternatif yöntemler olduğu bu çalışmada başarıyla sunulmuştur.

## REFERANSLAR

- [1] Chandwani, V., Agrawal, V., & Nagar, R. (2013). Applications of soft computing in civil engineering: a review. *International Journal of Computer Applications*, 81(10).
- [2] Armaghani, D. J., Hatzigeorgiou, G. D., Karamani, C., Skentou, A., Zoumpoulaki, I., & Asteris, P. G. (2019). Soft computing-based techniques for concrete beams shear strength. *Procedia Structural Integrity*, 17, 924-933.
- [3] Naderpour, H., Nagai, K., Haji, M., & Mirrashid, M. (2019). Adaptive neuro-fuzzy inference modelling and sensitivity analysis for capacity estimation of fiber reinforced polymer-strengthened circular reinforced concrete columns. *Expert Systems*, 36(4), e12410.
- [4] Uzunoğlu, M., & Kap, T. (2012). Prediction of concrete compressive strength in buildings that would be reinforced by fuzzy logic. *International Journal of Physical Sciences*, 7(31), 5193-5201.
- [5] Tekeli, H., Korkmaz, K. A., Demir, F., & Carhoglu, A. I. (2014). Comparison of critical column buckling load in regression, fuzzy logic and ANN based estimations. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 26(3), 1077-1087.
- [6] Mirrashid, M., & Naderpour, H. (2020). Recent trends in prediction of concrete elements behavior using soft computing (2010–2020). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-21.
- [7] Garzón-Roca, J., Marco, C. O., & Adam, J. M. (2013). Compressive strength of masonry made of clay bricks and cement mortar: Estimation based on Neural Networks and Fuzzy Logic. *Engineering Structures*, 48, 21-27.
- [8] Ozkul, S., Ayoub, A., & Altunkaynak, A. (2014). Fuzzy-logic based inelastic displacement ratios of degrading RC structures. *Engineering structures*, 75, 590-603.
- [9] Doran, B., Yetilmezsoy, K., & Murtazaoglu, S. (2015). Application of fuzzy logic approach in predicting the lateral confinement coefficient for RC columns wrapped with CFRP. *Engineering Structures*, 88, 74-91.
- [10] Naderpour, H., & Alavi, S. A. (2017). A proposed model to estimate shear contribution of FRP in strengthened RC beams in terms of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Composite Structures*, 170, 215-227.
- [11] Golafshani, E. M., Rahai, A., Sebt, M. H., & Akbarpour, H. (2012). Prediction of bond strength of spliced steel bars in concrete using artificial neural network and fuzzy logic. *Construction and building materials*, 36, 411-418.
- [12] Ud Darain, K. M., Jumaat, M. Z., Hossain, M. A., Hosen, M. A., Obaydullah, M., Huda, M. N., & Hossain, I. (2015). Automated serviceability prediction of NSM strengthened structure using a fuzzy logic expert system. *Expert systems with applications*, 42(1), 376-389.
- [13] Amani, J., & Moeini, R. (2012). Prediction of shear strength of reinforced concrete beams using adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural network. *Scientia Iranica*, 19(2), 242-248.
- [14] De Iuliis, M., Kammouh, O., Cimellaro, G. P., & Tesfamariam, S. (2019). Downtime estimation of building structures using fuzzy logic. *International journal of disaster risk reduction*, 34, 196-208.

- [15] Cao, Y., Fan, Q., Azar, S. M., Alyousef, R., Yousif, S. T., Wakil, K., ... & Alaskar, A. (2020, October). Computational parameter identification of strongest influence on the shear resistance of reinforced concrete beams by fiber reinforcement polymer. In *Structures* (Vol. 27, pp. 118-127). Elsevier.
- [16] Allali, S. A., Abed, M., & Mebarki, A. (2018). Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic. *Engineering Structures*, 166, 117-127.
- [17] Cao, Y., Zandi, Y., Rahimi, A., Petković, D., Denić, N., Stojanović, J., ... & Assilzadeh, H. (2021, December). Evaluation and monitoring of impact resistance of fiber reinforced concrete by adaptive neuro fuzzy algorithm. In *Structures* (Vol. 34, pp. 3750-3756). Elsevier.
- [18] Şen, Z. (2010). Rapid visual earthquake hazard evaluation of existing buildings by fuzzy logic modeling. *Expert systems with Applications*, 37(8), 5653-5660.
- [19] Şen, Z. (2011). Supervised fuzzy logic modeling for building earthquake hazard assessment. *Expert systems with applications*, 38(12), 14564-14573.
- [20] Harirchian, E., & Lahmer, T. (2020, December). Developing a hierarchical type-2 fuzzy logic model to improve rapid evaluation of earthquake hazard safety of existing buildings. In *Structures* (Vol. 28, pp. 1384-1399). Elsevier.
- [21] Choi, S. K., Tareen, N., Kim, J., Park, S., & Park, I. (2018). Real-time strength monitoring for concrete structures using EMI technique incorporating with fuzzy logic. *Applied Sciences*, 8(1), 75.
- [22] Chao, C. J., & Cheng, F. P. (1998). Fuzzy pattern recognition model for diagnosing cracks in RC structures. *Journal of computing in civil engineering*, 12(2), 111-119.
- [23] Elenas, A., Vrochidou, E., Alvanitopoulos, P., & Andreadis, I. (2013). Classification of seismic damages in buildings using fuzzy logic procedures. In *Computational Methods in Stochastic Dynamics* (pp. 335-344). Springer, Dordrecht.
- [24] Cukaric, A., Camagic, I., Dutina, V., Milkic, Z., & Jovic, S. (2019). Parameters ranking based on influence on dynamical strength of ultra-high performance concrete by neuro fuzzy logic. *Struct Concr*, 433, 1-7.
- [25] Govardhan, P., Kalapatapu, P., & Pasupuleti, V. D. K. (2021, August). Identification of Multiple Cracks on Beam using Fuzzy Logic. In *2021 International Conference on Emerging Techniques in Computational Intelligence (ICETCI)* (pp. 165-169). IEEE.
- [26] Khoshnoudian, F., & Molavi-Tabrizi, A. (2012). Responses of isolated building with MR Dampers and Fuzzy Logic. *International Journal of Civil Engineering*, 10(3).
- [27] Zabihi-Samani, M., & Ghanooni-Bagha, M. (2019). Optimal semi-active structural control with a wavelet-based cuckoo-search fuzzy logic controller. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(4), 619-634.
- [28] Elbeltagi, E., Hosny, O. A., Elhakeem, A., Abd-Elrazek, M. E., & Abdullah, A. (2011). Selection of slab formwork system using fuzzy logic. *Construction Management and Economics*, 29(7), 659-670.
- [29] Sung, Y. C., & Su, C. K. (2010). Fuzzy genetic optimization on performance-based seismic design of reinforced concrete bridge piers with single-column type. *Optimization and Engineering*, 11(3), 471-496.

- [30] Zadeh, L. A. (1965). Information and control. Fuzzy Sets, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [31] Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics, (1), 28-44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- [32] Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III. Information Sciences, 9(1), 43-80. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
- [33] Mamdani, E. H. and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7(1), 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- [34] Mamdani, E. H. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. International Journal of Man-Machine Studies, 8(6), 669-678. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(76\)80028-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(76)80028-4)
- [35] Öztekin, E. (2021). Fuzzy inverse logic: part-1. introduction and bases. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , 11 (3) , 675-691 . DOI: 10.17714/gumusfenbil.894674
- [36] Öztekin, E. (2021). Fuzzy inverse logic: part-2. validation and evaluation of the method. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , 11 (3) , 768-791 . DOI: 10.17714/gumusfenbil.894879
- [37] Dong, W. M., & Wong, F. S. (1987). Fuzzy weighted averages and implementation of the extension principle. Fuzzy sets and systems, 21(2), 183-199.
- [38] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2018. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara

## Theoretical Investigation on Effect of Helicopter Main Rotor Parameters in Required Power

Semanur Altıntaş<sup>1\*</sup> , Mehmet Bakırcı<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup>Karabük University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering, Karabük, Türkiye.  
\*email:semanur\_0378@outlook.com

### Abstract

The main rotor is the principal factor effecting helicopter performance and fuel consumption. There are many basic geometric parameters that constitute the main rotor design. Radius and chord are among these basic geometric parameters. In this study, it is aimed to examine the effects of variation in radius and chord on required power at different flight conditions. Based on the design values of B0105 and S-76 from utility helicopter the group, the power calculations were made for the main rotor only when the radius and only the chord changed between +8% and -8%, and both parameters changed between +8% and 8%. These calculations were repeated for hover, 50 knots, 90 knots, 130 knots forward flights, and for sea level, 5000 ft, 10000 ft altitudes. With the variation of radius and chord, the cases that the maximum reductions and increases in required power were revealed. Results shows Increasing the chord alone resulted in an increase in required power in all flight conditions. It has been observed that the combinations obtained by variation the radius and chord of maximum decrease and increase amount in the required power are different from according to the altitude, hover condition and forward flight velocity.

**Keywords:** Helicopter main rotor, Required power, Hover, Forward flight velocity, Blade radius and chord length

## Helikopter Ana Rotor Parametrelerinin Gerekli Güçteki Etkisinin Teorik İncelenmesi

### Özet

Ana rotor, helikopter performansını ve yakıt tüketimini etkileyen temel faktördür. Ana rotor tasarımını da etkileyen birçok temel geometrik parametre bulunmaktadır. Yarıçap ve veter bu temel geometrik parametreler arasındadır. Bu çalışmada, farklı uçuş şartlarında yarıçap ve veter değerlerinin değişimlerinin gerekli güçteki etkilerinin incelenmesi amaçlandı. Hafif sınıf helikopter grubundan B0105 ve S-76 helikopterlerinin tasarım değerleri baz alındı. Yalnızca yarıçapın ve yalnızca genişliğin %8 ile %8 arasında değiştiği ve her iki parametrenin de %8 ile %8 arasında değiştiği durumlarda gerekli güç hesaplamaları yapıldı. Bu hesaplamalar, hover, 50 knots, 90 knots, 130 knots ileri uçuşlarda ve deniz seviyesi, 5000 ft, 10000 ft irtifalar için tekrarlandı. Yarıçap ve veter uzunluğunun değişimi ile gerekli güçteki maksimum azalma ve artışların olduğu durumlar ortaya konuldu. Genişliğin artırılması, tüm uçuş koşullarında gerekli güçte artışa neden olurken, genişliğin azaltılması gerekli güçte azalmaya neden olduğu saptandı. Ancak sadece yarıçap değişiminin gerekli güçteki etkisi, irtifalara ve ileri uçuş hızlarına göre

farklılık göstermektedir. Yarıçap ve genişliğin değiştirilmesi ile elde edilen kombinasyonların da gerekli güçteki maksimum azalma ve artış miktarları, irtifalara, askı durumu ve ileri uçuş hızlarına göre farklılık göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Helikopter ana rotor, gerekli güç, askı, ileri uçuş hızı, pal yarıçap ve veter uzunluğu

## 1. INTRODUCTION

The conceptual design process of a helicopter begins with planning combination changes from geometric parameters to achieve the best design. Parameter changes are decided based on the results of performance evaluations. Parameter selection decisions vary depending on which performance evaluation is intended; For example, while the minimum required power calculation is aimed at low speeds in one evaluation, the capacity to carry more loads may be important in another performance evaluation [1]. The main rotor design is the preliminary step of helicopter conceptual design. The main rotor is the most important subcomponent in helicopters as it provides lift, thrust and control [2]. Lift against gravity generates thrust to sustain cruise flight, and control forces for manoeuvres at different altitudes and velocity. The main rotor consumes most of the power produced by the motor. For these reasons, the main rotor is the factor in defining helicopter performance [3]. Among the basic parameters of the main rotor geometric design, there are radius, chord, rotor tip speed, angular velocity, blade section airfoil. There are many studies on helicopter main rotor design and optimization in the literature. Mihr Mistry and Farhan Gandy [4] studied a Uh-60 helicopter-like utility helicopter design values with 3 different total weights of 16000, 18300 and 24 000 lbs. They examined the power consumption of the helicopter with changes in the radius and angular velocity.

### Nomenclature

<i>EASA</i>	European Aviation Safety Agency	$V_i$	Induced Velocity
<i>CFD</i>	Computer Fluid Dynamics	$P_{i(hover)}$	Induced Power at Hover
$V_{tip}$	Tip Velocity	$P_{pr(hover)}$	Profile power at Hover
$R$	Radius	$P_{pp}$	Parasit Power
$c$	Chord	$PT_{(hover)}$	Total Power in Hover
$\sigma$	Solidity	$P_{pr(fwd)}$	Profile Power in Forward Flight
$\Omega$	Angular velocity	$PT_{(fwd)}$	Total power in Forward flight
$W$	Gross Weight	$EFPA_{(ff)}$	Equivalent Flat Plate area in Forward Flight
$T$	Thrust	$AR$	Aspect Ratio
$C_{d0}$	Profile Drag Coefficient	$\rho$	Density
$B$	Tiploss factor	$V_D$	Thrust component of the induced velocity of the main rotor

They showed on graphs the relationships between power consumption with radius and angular velocity changes at different forward flight velocity, hover and 3 different altitudes. In their study, they investigated the cases where only the radius, only the angular velocity and both parameters were changed by changing the radius from +17% to -16%, and the angular velocity by  $\pm 11\%$ . They achieved up to 14% reductions in required power at low gross weight and low speeds with a change in angular velocity alone, and up to 20% reductions in required power at high altitude and 24 000 lbs total weight with just a change in the radius. In combinations where the radius is increased and the angular velocity is decreased, they have provided reductions of up to 30% in required power at high altitude and 24000 lbs total weight. Kim Chul Koo [1].



calculated the required forces at hover, 60 knots and 150 knots forward flight velocity in the standard sea-level with  $\pm 10\%$  variation in the radius, chord and angular velocity of the baseline rotor parameters of UH 1N helicopter. By taking into account other parameters affected by the change of these parameters such as solidity, blade tip speed, rotor disc area, calculations were made in 6 different cases. He concluded that an increase in width and angular velocity would generally result in an increase in required power at forward flight speeds. Stanislaw Kachel et al. [5] analyzed the results of the methods of modern helicopter designs. They examined the values of 70 different rotorcraft parameters in terms of EASA requirements. The values of the main rotor design parameters such as radius, chord, solidity, blade aspect ratio were examined. These parameters were compared with the values of small and large helicopters and attack, general purpose, light class, cargo helicopters separated according to their mission profile. In their article, they explained the basic mathematical optimization steps in the helicopter preliminary design phase. M F Afthon and MA Moelyadi [6] optimized the 5 blade design parameters of an unmanned helicopter to increase the power endurance and reduce the required power. These are root chord, taper location, taper ratio, pitch angle, tip twist angle parameters. They calculated thrust and power with BEMT theorem and CFD. As a result of the optimization, they achieved an optimum blade design that increased efficiency by 11% with a 9.4% reduction in required power. Joanne L. Walsh et al. [7] studied the optimization steps for helicopter suspension and minimum required power in forward flight. They presented a systematic evaluation of the interactions of rotor blade design variables. They compared their advanced rotor design optimization for military helicopters with rotor values designed with traditional approaches. In this study, it is aimed to calculate the effects of increases and decreases in the radius and chord length of the blade geometries on the main rotor of the two selected helicopters on the amount of power to be consumed in the main rotor under different flight conditions.

Table 1. Helicopter baseline parameters for Bo105 and S-76 helicopters

Baseline rotor parameters		B0105 helicopter	S-76 helicopter
Description	Unit	Value	value
Radius	ft	16	22
Number of Blades	-	4	4
Chord	ft	0.88	1.26
Angular velocity	rad/sec	44.4	30.7
Rotor solidity	-	0.07	0.07
Weight	Ibs	5511	10000
Airfoil	-	NACA0012	SC-1095R8

These calculations were repeated hover and three different forward velocity. Increases and decreases in required power were examined at partially low (50 knots) and partially high cruise speeds (90 knots-130 knots) and their values in different flight conditions were calculated. Another reason for choosing 50 knots and 130 knots forward flight velocity is the minimum power consumption and maximum forward flight speed of the BO105 helicopter. Three different situations are included in the calculations: sea level, 5000 ft and 10000 ft altitude. S76 and BO105 helicopters basic rotor parameter values taken from the literature [8-10] are shown in Table 1.

## 2. MATERIAL AND METHOD

The thrust force that with the rotation of the blades on the main rotor of the helicopter consisted, in the vertical direction to the rotor plane balances the weight of the helicopter and this balancing beside provides the required force in the forward direction in forward flight. The thrust required in the forward direction varies depending on the acceleration requirement in forward flight, the angular accelerations required in the maneuvers, and the parameters affecting the dynamic calculations such as the mass moment of inertia of the helicopter fuselage. In order for the rotor to make this movement, it must overcome the profile resistance and induced resistance forces formed in the blade in the case of hover, and in addition to these, the parasitic resistance forces in forward flight. (see Figure 1.)

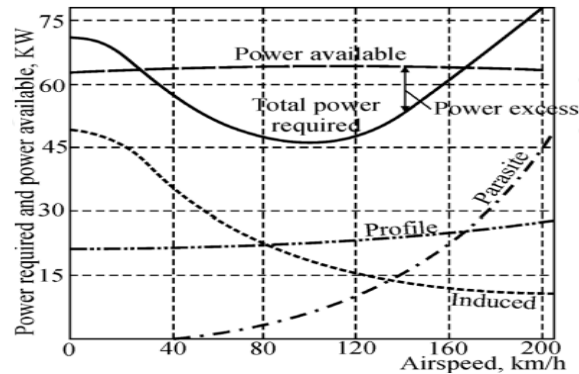


Figure 1. Power required and power available in straight and level flight.[11]

The power required the rotor to continue this movement is equal to the product of the torque on the rotor shaft and the rotational angular velocity of the rotor. The helicopter engine provides this power. The amount of power required by the helicopter is not just for the main rotor; for tail rotor, fuselage, other power-consuming mechanical and electronic components, there are also losses [12]. The thrust required in the rotor determines the torque value, which affects the amount of power required in the main rotor. The thrust that can be obtained depends on the rotor hub and blade design, rotor rotation speed and flight conditions. For blade design, airfoil selection, blade length and chord are important decision. However, there are some limiting criteria for such design parameters. For example, strength and vibration problems caused by excessive shear stress, normal force, centrifugal force and bending moment values that will occur in the blade impose a limit on the blade's aspect ratio, rotor solidity and angular rotation values. While AR value is defined as the ratio of blade length to chord (or blade span ratio), stiffness is more related to the number of blades in the rotor. The aspect ratio should be between 15 and 20 for single main rotor helicopters [13]. The fact that the blade tip speed is below certain values of the Mach value is also related to the aerodynamic restrictions and the strength, vibration and noise problems that will be caused by the centripetal forces. If the blade tip speed is greater than the Mach number of 0.3, the compressible property of the air should be taken into account, while if this value is close to or higher than 1, undesirable aerodynamic flow conditions such as shocks occur in the helicopter [14]. That the helicopter flies at different altitudes, the change in air density, which is the most important factor, significantly affects the thrust that can be obtained and the amount of power required. Another situation that affects thrust and power calculations is that the air between the rotor plane and the ground creates additional lifting force like a pillow during the helicopter's flight close to the ground and especially in the hover [15]. This situation is mostly explained by the reduction of the blade end losses due to the ground effect of the vortices formed at the blade tips. The amount of power required by the helicopter in the main rotor varies according to the flight conditions. For example, the amount of power required for suspended position is greater than the amount required for forward flight at low speed. For each helicopter, forward flight is made at minimum power at a critical speed. Establishing the relations between the force,

moment, power values in the helicopter main rotor and the rotor and especially the blade geometry (length, chord, section profile and making the calculations is according to the wing element momentum theorem. However, equations that are more reliable were obtained by making empirical corrections to these theoretical formulas with the data obtained from the experimental and field flight tests obtained after the helicopter design. Some of these, that are required to calculate the required power according to the helicopter main rotor design, presented in the literature and used in this study, are the equations in the range equations (2.1) to (2.17).

## 2.1 Calculation Procedure

1. The following equations are used for main rotor basic blade geometry calculations [13].

$$V_{tip} = \Omega R \quad (2.1)$$

$$A = \pi R^2 \quad (2.2)$$

$$\sigma = \frac{bc}{\pi R} \quad (2.3)$$

$$AR = \frac{R}{c} \quad (2.4)$$

2. The thrust coefficient is calculated by equation (2.5) [16].

$$C_T = \frac{T}{\rho R^2 \pi V_{tip}^2} \quad (2.5)$$

3. To for account losses due to tip vortex interactions, the tip loss factor is calculated by equation (2.6)[13]

$$B = 1 - \sqrt{2C_T} \quad (2.6)$$

4. Putting this value of in the equation of the power coefficient equation 2.7 Leads to:

$$B = 1 - \frac{\sqrt{2T(\rho R^2 V_{tip}^2)^{-1}}}{b} \quad (2.7)$$

5. According to the momentum theorem, induced power is equal to the product of rotor thrust and induced velocity ( $P_i = TV_i$ ). Taking into account the effect of tip loss factors, the equation  $P_i = BTV_i$  is formed. For the aim of the present analysis, the vertical drag produced by the main rotor downwash on the fuselage and appendages is also disregarded. According to Glauert's hypothesis, the induced velocity and main rotor thrust are related by equation (2.8) [17].

$$V_i = \sqrt{\frac{T}{2\pi R^2 \rho V_D}} \quad (2.8)$$

$$V_D = \sqrt{(v_i - V \sin \alpha)^2 + (V \cos \alpha)^2} \quad (2.9)$$

6. That a hovering condition is analyzed, such that  $V = 0$ ,  $D = 0$ , and  $T = W$ , a closed-form expression is obtained for the induced velocity from equation [18] (2.8). The induced power in the hover is calculated by equation (2.10). Newton Raphson approach is used for the  $V_D$  solution in forward flight.

$$P_{i(hover)} = \frac{1}{1 - (\sqrt{2T(\rho R^2 V_{tip}^2)^{-1}})^{-1} b^{-1}} \frac{T}{\sqrt{2\pi R^2 \rho}} \quad (2.10)$$

7. In hover the profile power resulting from the blade profile drag is calculated by equation Assuming an average drag coefficient such as  $c_{d0}$  from the BEM theorem and a constant veter length, the following equation can be obtained. (2.11).[13]

$$P_{pr(hover)} = 0.125\sigma C_{d_o} \rho A V_{tip}^3 \quad (2.11)$$

8. Equation 2.3 instead of solidity, equation 2.1 instead of  $V_{tip}$ , equation 2.2 instead of  $A$

$$P_{pr(hover)} = 0.125bcC_{d_0} \rho \Omega^3 R^4 \quad (2.12)$$

9. In the hover, the required power on the main rotor is calculated by equation (2.5).[13]

$$P_{T_{hover}} = P_{i(hover)} + P_{p(hover)} \quad (2.13)$$

10. In forward flight the profile power resulting from the blade profile drag is calculated by equation. [13]

$$P_{pr(fwd)} = (1 + 4.3\mu^2)(P_{pr(hover)}) \quad (2.14)$$

11. The advanced ratio is calculated by equation (2.15).[13]

$$\mu = \frac{V_{fwd}}{V_{tip}} \quad (2.15)$$

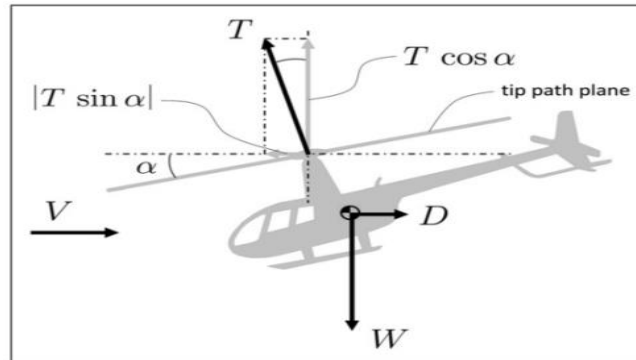


Figure 2. Side view of rotorcraft platform. [18]

12. Non-carrying body elements such as the main body, landing gear, main rotor head, engine hoods, vertical and horizontal tail, tail rotor head cause parasitic drag. Parasitic drag ( $D$ ), measured parallel to but opposite to the direction of flight, also includes form drag and surface friction associated with these fuselage elements. The power required to create the  $T \sin \alpha$  (see figure 2) component of the thrust is called the "parasite power". Equality (2.16) [13].

$$P_p = 0,5 \rho V_{fwd}^3 EFPA(ff) \quad (2.16)$$

$$P_{T_{fwd}} = P_{pr} + P_i + P_p \quad (2.17)$$

In this study, blade tip losses were subsumed, but ground effect was not included in the calculations. These calculations were made for steady level. MATLAB and EXCEL programs were used to make the calculations and create the graphics.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig.3 and Fig.4 shows the values obtained by calculating the required power in the main rotor at forward flight speeds of Bo105 and S-76 helicopters at sea level, 5000 ft, 10000 ft altitude. Figure 5 shows Experimental data describe the relationship between speed and total required power of the B0105 helicopter. The calculations are only the required power on the main rotor. The difference is that the required amount of power in the tail rotor is not included in the calculation. The required power in the main rotor accounts for a too amount of the total required power. Considering this situation, it is seen that the calculation is close to the experimental data.

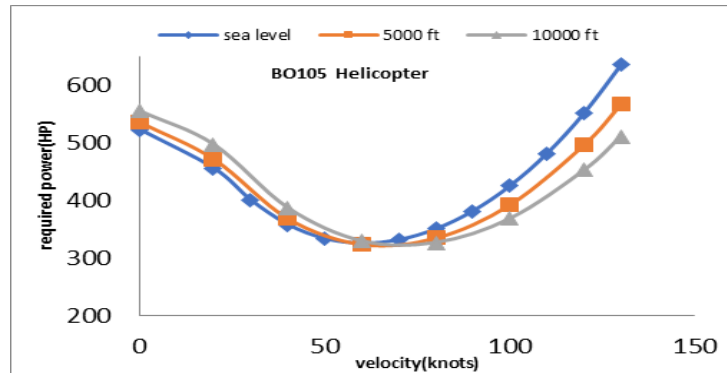


Figure 3. The required power calculation in the main rotor for the Bo105 helicopter baseline rotor in three different altitudes

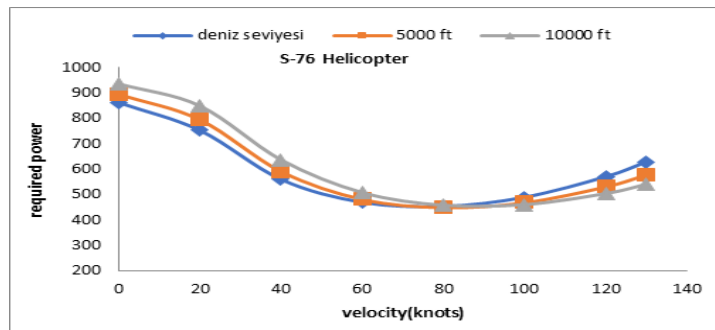


Figure 4. The required power calculation in the main rotor for the S-76 helicopter baseline rotor in three different altitudes

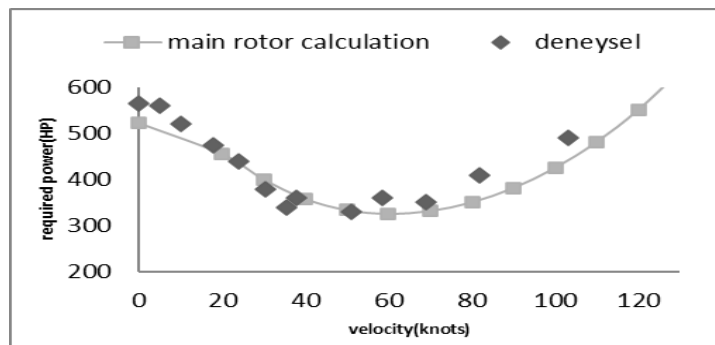


Figure 5. Trim power values for the Bo-105 baseline rotor ( flight experimental data (Ref. 19)) as compared to main rotor required power calculations at sea level

### 3.1 BO105 Helicopter

#### 3.1.1 Required power as a function of only radius

While the rotor radius of the Bo105 helicopter was 16 ft, this value was changed according to different values between 14.6 ft and 17.2 ft, and the change in the required power on the rotor was investigated. Power values are calculated as a function of R change only. No changes were made to the chord length. Fig.6a. Showing by reducing the radius at sea level, a reduction in all flight conditions is achieved. The maximum reduction in required power is 6.1% at 90 knots forward velocity. Increasing the radius resulted in increase at hover and 3 different forward flight velocity. Fig6b Shows Reducing the radius at 5000 ft altitude results in a reduction in required power at forward flight speeds of 90 knots and 130 knots, while resulting in increased at hover.

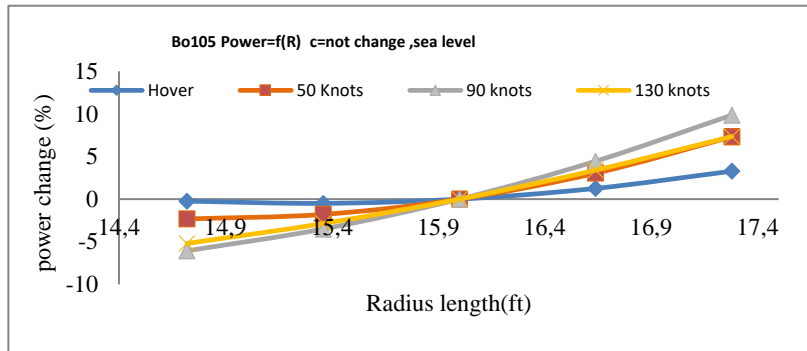


Figure 6a. standart sea level

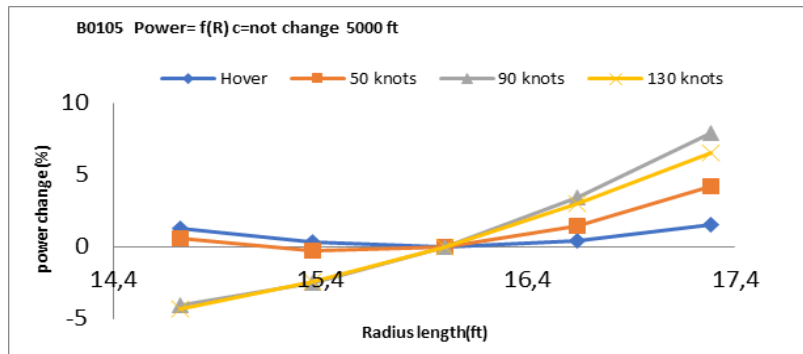


Figure 6b. 5000 ft altitude

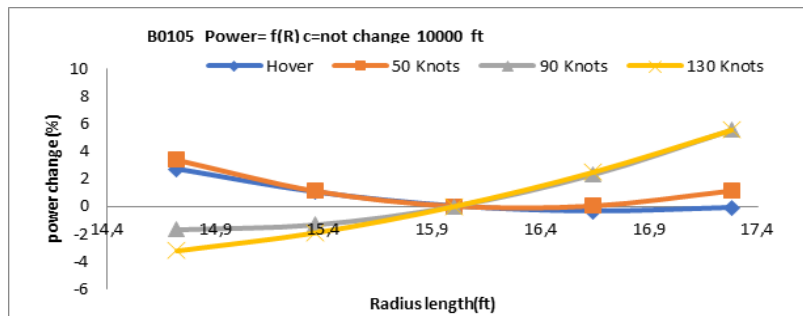


Figure 6c. 10000 ft altitude

5000 ft altitude results in a reduction in required power at forward flight speeds of 90 knots and 130 knots, while resulting in increased at hover. The maximum reduction in required power is 4.2% at a forward flight velocity of 130 knots. Fig6.c shows an increase in the radius 10000 ft results in a reduction in required power in the hover and an increase in required power at forward flight velocity. Increasing the radius by 4% (R=16.64 ft) results in a maximum reduction of 0.38% in required power in the hover. With a decrease in the radius, 90 and 130 knots forward. There is an increase in required power at flight velocity. The maximum reduction in required power is 3.7% at a forward flight velocity of 130 knots. In general, the induced power decreases as the radius increases, but the profile power increases. The reduction provided by the induced power is equated with the increase in the profile power. The cases where the decrease in induced power outweighs the increase in profile power varies with altitude and forward flight velocity.

### 3.1.2 Required power as a function of only chord

Table 2 shows the percentage change in required power with chord variation for Bo105 helicopter. In all cases where the chord length is reduced, the required power is reduced, while increasing the chord length causes an increase in the required power. As the chord length decreases, the aspect ratio decreases and the solidity increases. The maximum changes in required power at all altitudes are at 50 knots and 90 knots forward flight velocity. The maximum reduction in required power is 3.35% at sea level 50 knots flight velocity. As the altitude increased, the change in required power decreased.

Table 2. Effect of chord change of Bo105 helicopter on required power value

Bo105 Helicopter		Chord length change (%)				
Altitude	Velocity	0.92c	0.96c	1.04c	1.08c	
	(knots)					
required power change(%)	sea level	Hover	-2.02	-1.01	1.01	2.02
		50	-3.35	-1.67	1.67	3.35
		90	-3.30	-1.65	1.65	3.30
		130	-2.34	-1.17	1.17	2.34
	5000 ft	Hover	-1.70	-0.85	0.85	1.70
		50	-2.85	-1.42	1.42	2.85
		90	-3.03	-1.52	1.52	3.03
		130	-2.26	-1.13	1.13	2.26
	10000 ft	Hover	-1.41	-0.70	0.70	1.41
		50	-2.36	-1.18	1.18	2.36
		90	-2.72	-1.36	1.36	2.72
		130	-2.15	-1.07	1.07	2.15

### 3.1.3 Required power as a function of Radius and chord

The required power changes as a function  $f(R, c)$  in the hover of the Bo105 helicopter are shown in Fig.7a, Fig7b, and Fig7c. for three different conditions (sea level, 5000 ft and 10000 ft altitudes), respectively. Fig7.a Shows In the Bo105 helicopter, when the radius were reduced at sea level by 1.94% and the chord is reduced by 7.9%, a maximum reduction in required power of 2.21% is obtained. These values are the combination of R is value of 15.69 ft and c is value of 0.815 ft. The maximum increase in required power is approximately 5.10% in combinations where the radius and chord are increased by 8%. Fig7.b shows when the radius was increased at 5000 ft altitude by 4.93% and the chord is decreased by 7.8%, the maximum reduction in required power by 1.9% is obtained. These values are the combination of R is 16.79ft and c is value of 0.82. In the combination of the radius and chord are increased by 8%, there is an increase in the required power by 3.71%. Fig7.c shows when the radius is increased at 10000 ft altitude by 4.93%

and the chord were decreased by 4.31%, a maximum reduction of 1.82% in required power is obtained. These values are the combination of R is value of 16.79 ft and c is value of 0.84. The maximum increase in required power is 3.66% in the combination of the radius is reduced by 8% and the chord is increased by 8%.

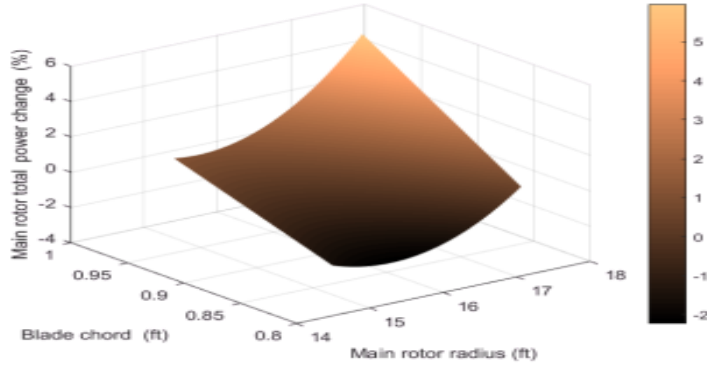


Figure 7a. Sea level

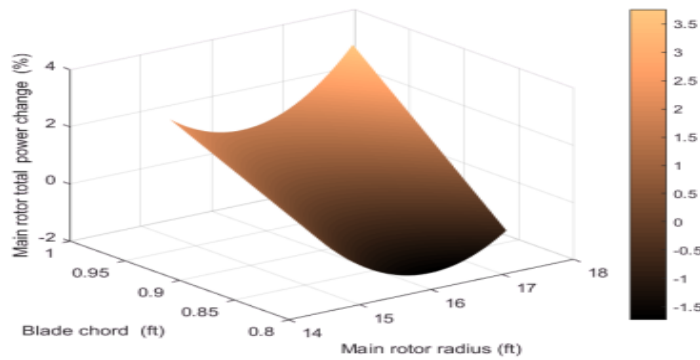


Figure 7b. 5000 ft altitude

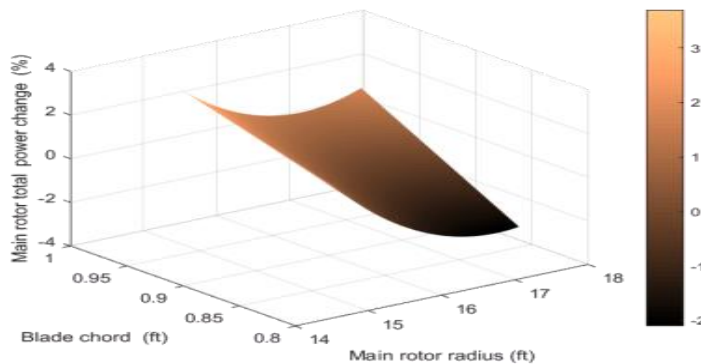


Figure 7c. 10000 ft altitude

Figure 7. Required power variation for hover with radius and chord change of Bo105 helicopter



Table 3 shows the radius and chord combinations selected for three different situations and the changes in the required power in these combinations. These situations are the minimum required power, the maximum required power and the other selected combinations that decrease required power.

There are many combinations of R and c that the required power decreases and increases in the rotor. The combinations of R and c, where the maximum decreases in the required power, vary according to the altitudes and flight speeds. For hover state, the maximum decrease in required power was obtained with the radius decreases at sea level with that the radius increases at other altitudes. In 50 knots forward velocity sea level, when the R value is reduced by 6% and the c value by 8%, the required power decreases by 4.85%.

Table 3. Required power variation of radius and chord combinations for different flight conditions

B0105		max Power Reduction				other combination				max power increment			
altitude	velocity (knots)	R	c	HP	%	R	c	HP	%	R	c	HP	%
sea level	Hover	0.98R ↓	0.92c ↓	-11.55	-2.21	0.97R ↓	0.96c ↓	-7.27	-1.39	1.08R ↑	1.08c ↑	26.66	5.1
	50	0.94R ↓	0.92c ↓	-16.21	-4.85	0.98R ↓	0.96c ↓	-8.68	-2.6	1.08R ↑	1.08c ↑	39.49	11.83
	90	0.92R ↓	0.92c ↓	-32.47	-8.51	0.94R ↓	1.06c ↑	-11.17	-2.93	1.08R ↑	1.08c ↑	54.37	14.25
	130	0.92R ↓	0.92c ↓	-44.22	-6.97	0.96R ↓	1.02c ↑	-12.84	-2.02	1.08R ↑	1.08c ↑	66.01	10.4
5000 ft	Hover	1.49R ↑	0.92c ↓	-10.18	-1.90	0.98R ↓	0.94c ↓	-6.27	-1.17	1.08R ↑	1.08c ↑	19.28	3.60
	50	0.98R ↓	0.92c ↓	-9.94	-2.94	0.98R ↓	0.96c ↓	-5.49	-1.62	1.08R ↑	1.08c ↑	27.05	8.00
	90	0.92R ↓	0.92c ↓	-22.49	-6.28	0.94R ↓	1.02c ↑	-9.99	-2.79	1.08R ↑	1.08c ↑	42.57	11.89
	130	0.92R ↓	0.92c ↓	-34.26	-6.04	0.94R ↓	0.94c ↓	-27.41	-4.83	1.08R ↑	1.08c ↑	53.89	9.50
10000 ft	Hover	1.49R ↑	0.96c ↓	-10.09	-1.82	0.99R ↓	0.98c ↓	-0.61	-0.11	0.98R ↓	1.08c ↑	20.28	3.66
	50	1.02R ↑	0.93c ↓	-8.33	-2.38	1.02R ↑	0.96c ↓	-4.91	-1.40	0.92R ↓	1.08c ↑	17.72	5.06
	90	0.94R ↓	0.92c ↓	-13.08	-3.82	0.96R ↓	0.96c ↓	-7.92	-2.31	1.08R ↑	1.08c ↑	31.36	9.16
	130	0.92R ↓	0.92c ↓	-24.75	-4.84	0.94R ↓	1.04c ↑	-9.02	-1.77	1.08R ↑	1.08c ↑	42.60	8.34

Radius and chord change : ↑ for increase , ↓ (-) no change  
for decrease

### 3.2 S76 Helicopter

#### 3.2.1 Required power as a function of only radius

While the rotor radius of the S-76 helicopter was 22 ft, this value was changed according to different values between 20.2 ft and 23.8 ft, and the change in the required power on the rotor was investigated. Power values are calculated as a function of R change only. Fig.8a. shows with the reduction of the radius at sea level, the required power decreases at forward flight speeds of 90 knots and 130 knots, while causing an increase in other flight situations. With increasing radius, there is an increase in required power in all flight situations. Maximum changes in required power occur at a forward flight speed of 130 knots. Maximum reduction in required power is 5.60%. Fig.8b. shows reducing the radius at 5000 ft altitude results in a reduction in required power at 90 knots and 130 knots forward flight velocity, and an increase in required power at hover and 50 knots forward flight velocity. With the increase in the radius, the required power increases at 90 knots and 130 knots forward flight velocity. The maximum reduction in required power is 4% at 130 knots velocity. Fig.8c. shows At 10000 ft, reducing the radius results in reduction in required power at 130 knots, while hover causes an increase in required power at a forward flight velocity of 50 knots and 90 knots. By increasing the radius, the required power is reduced at hover and at 50 knots forward flight velocity. The maximum reduction in required power is 2.8% with the increase in the radius.

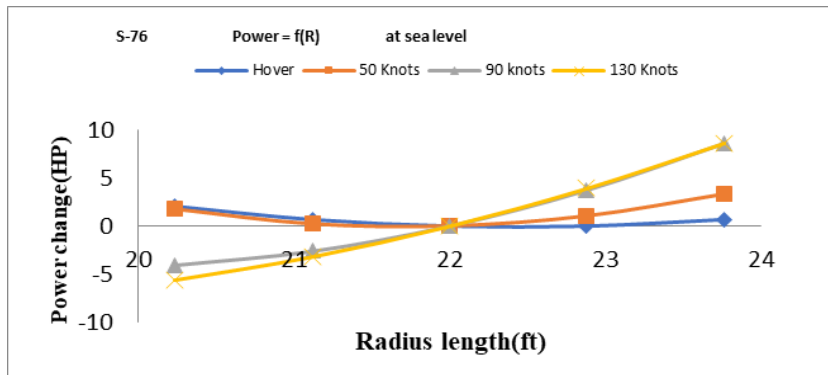


Figure 8a. sea level

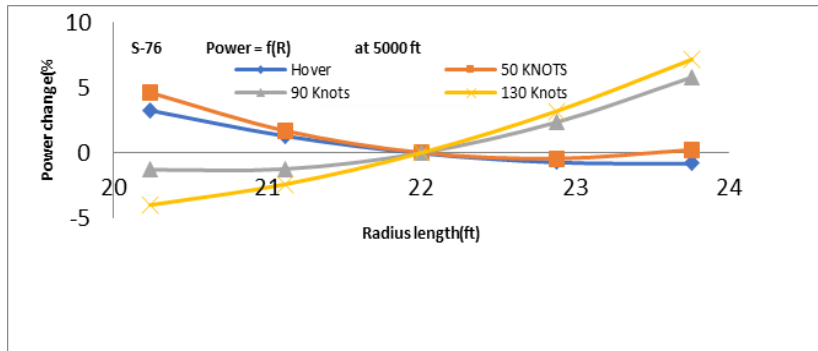


Figure 8b. 5000 ft

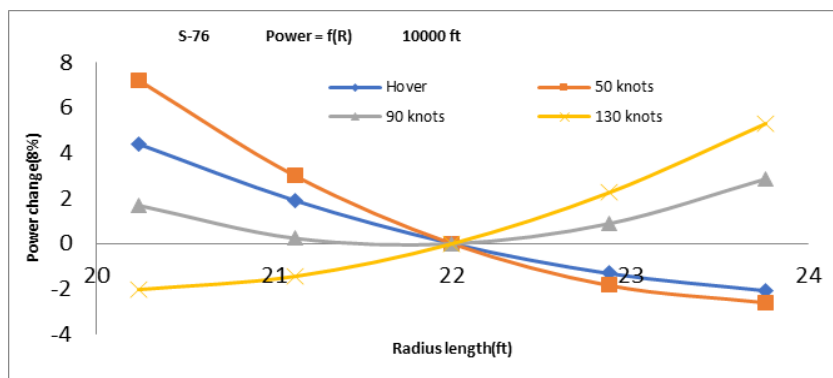


Figure 8c. 10000 ft

Figure 8. Required power variation radius of S76 helicopter in different flight conditions

### 3.2.2 Required power as a function of only chord

While the chord length the S-76 helicopter was 1.26 ft, this value was changed according to different values between 1.16 ft and 1.36 ft, and the change in the required power on the rotor was investigated. Table 4. shows in all cases that the rotor blade chord length of the S-76 helicopter is reduced, the required power

reduction is obtained. The maximum reduction in the required power amount is 3.48 at sea level, at a forward flight speed of 90 knots. The increase and decrease in the chord length and the amount of change in the required power are equal.

Table 4. Effect of chord change of Bo105 helicopter on required power value

S-76 Helicopter		Chord length change (%)					
		Velocity					
Altitude	(knots)	0.92c	0.96c	1.04c	1.08c		
required power change(%)	sea level	Hover	-1.54	-0.77	0.77	1.54	
		50	-2.83	-1.41	1.41	2.83	
		90	-3.48	-1.74	1.74	3.48	
		130	-3.13	-1.56	1.56	3.13	
	5000 ft	Hover	-1.28	-0.64	0.64	1.28	
		50	-2.33	-1.16	1.16	2.33	
		90	-3.07	-1.54	1.54	3.07	
		130	-2.88	-1.44	1.44	2.88	
	10000 ft	Hover	-1.05	-0.52	0.52	1.05	
		50	-1.87	-0.94	0.94	1.87	
		90	-2.64	-1.32	1.32	2.64	
		130	-2.64	-1.32	1.32	2.64	

### 3.2.3 Required power as a function of Radius and chord

Fig.9a. Shows In the S-76 helicopter When the radius is increased at sea level by 3.81% and the chord is decreased by 7.85%, a maximum reduction of 1.76% in required power is obtained. These values are the combination that R= 22.84 ft and c= 1.16. Fig.9b. Shows When the radius is increased at 5000 ft altitude by 4.31% and the chord is decreased by 7.69%, a maximum reduction of 2.18% in required power is obtained. These values are the combination of R= 22.95 ft and c= 1.16 ft. Fig.9c. In the S-76 helicopter, when the radius is increased at 10000 ft altitude by 6.22% and the chord is decreased by 6.75%, the maximum reduction in required power by 2.94% is obtained. These values are the combination of R= 23.37 ft and c= 1.18 ft.

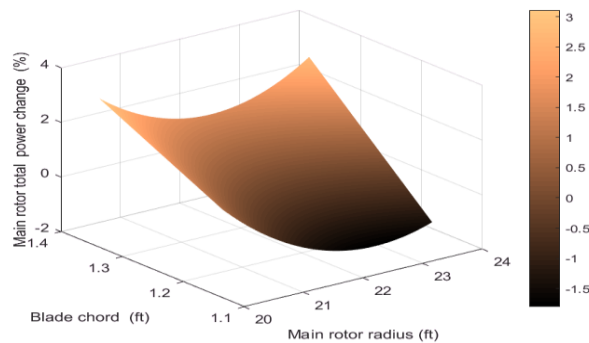


Figure 9a. Sea level

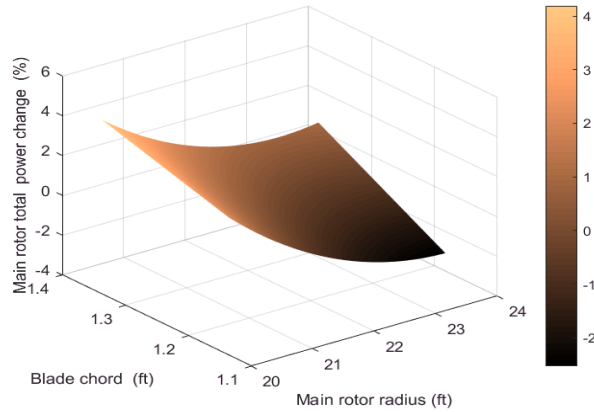


Figure 9b. 5000 ft altitude

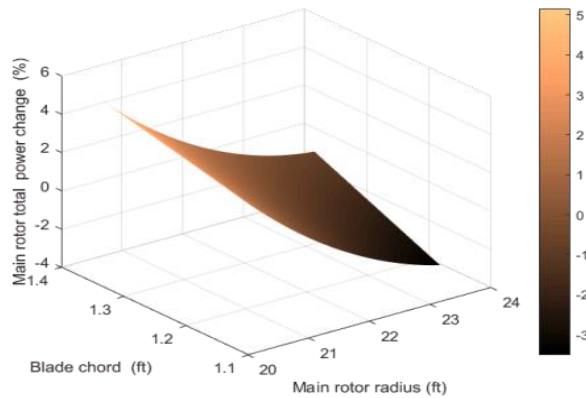


Figure 9c. 10000 ft altitude

Figure 9. Required power variation for hover with radius and chord change of Bo105 helicopter

Table 5 shows in order to reduce the required power in the rotor, R value is 2% and c value is 8 % at sea level 50 knots forward flight velocity, R value is 8% and c value is 8% at 90 knots velocity, R value is 8% and c value is % at 130 knots velocity. It is seen from Table.3 that 8 should be reduced. However, for minimum fuel consumption in 50 knots forward flight at 5000 ft altitude, the R value should be increased by 2% and the chord value should be decreased by 7%.

When the radius length R (Radius) value is reduced by 8% and the width c (chord) value is reduced by 8% in the Bo105 helicopter blade, when the new values are taken, it is calculated that the required power amount in the rotor will decrease by 44 HP by approximately 6.97%. When the radius length R value and width c value are reduced by 8% and the width c value is reduced by 8% in the S-76 helicopter blade, it is calculated that there will be a 49 HP reduction in the required power amount in the rotor, approximately 7.93%.

Table 5. Required power variation of radius and chord combinations for different flight conditions

B0105		max Power Reduction				other combination				<u>max power increment</u>			
altitudes	velocity (knots)	R	c	HP	%	R	c	HP	%	R	c	HP	%
sea level													
	Hover	1.04R ↑	0.92c ↓	15.16	-1.76	1.04R ↑	0.95c ↓	-9.48	-1.1	1.08R ↑	1.08c ↑	23.85	2.77
	50	1R(-)	0.92c ↓	-14.18	-2.83	0.98R ↓	0.94c ↓	-10.1	-2.01	1.08R ↑	1.08c ↑	35.72	7.12
	90	0.92R ↓	0.92c ↓	-30.82	-6.63	0.94R ↓	1.06c ↑	-6.46	-1.39	1.08R ↑	1.08c ↑	61.22	13.17
	130	0.92R ↓	0.92c ↓	-49.79	-7.93	0.96R ↓	1.02c ↑	-15.76	-2.51	1.08R ↑	1.08c ↑	79.38	12.65
5000 ft													
	Hover	1.04R ↑	0.92c ↓	19.49	-2.18	1.06R ↑	0.96c ↓	-13.23	-1.48	0.93R ↓	1.08c ↑	33.08	3.70
	50	1.04R ↑	0.92c ↓	-16.69	-3.18	1.06R ↑	0.96c ↓	-9.08	-1.73	1.08R ↑	1.08c ↑	17.58	3.35
	90	0.96R ↓	0.92c ↓	-17.59	-3.88	0.94R ↓	1.02c ↑	-3.60	-0.79	1.08R ↑	1.08c ↑	44.73	9.86
	130	0.92R ↓	0.92c ↓	-35.61	-6.17	0.94R ↓	0.94c ↓	-29.15	-5.05	1.08R ↑	1.08c ↑	62.80	10.87
10000 ft													
	Hover	1.04R ↑	0.93c ↓	27.50	-2.94	1.07R ↑	0.95c ↓	-27.22	-2.91	0.92R ↓	1.06c ↑	46.96	5.02
	50	1.06R ↑	0.94c ↓	-23.03	-4.12	1.02R ↑	0.96c ↓	-11.58	-2.07	0.92R ↓	1.08c ↑	47.93	8.57
	90	1R(-)	0.92c ↓	-11.95	-2.64	0.96R ↓	0.96c ↓	-4.06	-0.90	1.08R ↑	1.08c ↑	28.67	6.33
	130	0.92R ↓	0.92c ↓	-21.69	-4.02	0.94R ↓	1.04c ↑	-4.10	-0.76	1.08R ↑	1.08c ↑	47.07	8.72

Radius and chord change : ↑ for increase , ↓ (-) no for decrease change




#### 4. CONCLUSION

This paper examines effect and possible reductions in rotor power requirement over a range of airspeed, and operating altitude achieved by using variation in rotor radius and chord. Only in all cases that C decreases (hover, forward flight) the required power is decreased. With the increase of the C value, the required power increases. Results similar to those obtained in the study of Kim C. K. [1] were obtained from the literature. Therefore, the following conclusion can be reached: in order to reduce the required power, it is necessary to reduce the chord length, provided that it remains within the strength limits. The effect of only the change of the radius on the required power differed according to the altitudes and velocity. In general, for both helicopters, only at forward flight speeds of 90 and 130 knots, the reduction of the required power in the rotor can be achieved by reducing the R. That the combinations obtained with the R and C changes are examined, the following results are obtained: For the Hover, the maximum decrease in the required power in the main rotor depending on the altitude is between 1.82%-2.21% for the Bo105 helicopter, and 1.76%-2% for the S-76 helicopter. It occurs in the range of 94. These maximum reductions can be achieved by increasing R and decreasing C at altitudes of 5000 ft and 10000 ft for both helicopters. In other words, by changing the R and C values, the reduction in the amount of power required in the rotor for hover can be achieved more in the S-76 helicopter than in the Bo105 helicopter. By changing the R and C values, the maximum reduction in the required power in the rotor at forward flight speeds is obtained in the range of 2.38%-8.51% in the Bo105 helicopter for different situations (different velocity values and altitudes), this range is in the S-76 helicopter 2.64-7.93%. This study is important in two respects. The first is that it shows that fuel savings can be achieved when the helicopter blades we will design are made according to the correct values for the determined purposes. The second is the possibility that blade designs that change according to these calculations when smart materials are used effectively are an initial study in terms of power optimization. As a continuation of this study, the calculations can be repeated by taking into account the ground effect. The results obtained can be compared by analyzing the effect of blade design parameters on the required power with Computer Fluid Dynamics (CFD).

## REFERANSLAR

- [1] Kim, C. K. (1985), 'The Effects Of Parameter Variation On Helicopter Performance', Naval Postgraduate School.
- [2] Rohin K. M., Berend G. v. d. W., Christoph G. Balzarek (2021), 'Linearly variable chord-extension morphing for helicopter rotor blades', CEAS Aeronautical Journal, 55.
- [3] Johnson, W. (1994), 'Helicopter Theory', Dover Publications Inc New York, p:278-310.
- [4] Mihir M., Farhan G. (2014), Helicopter Performance Improvement with Variable Rotor Radius and RPM, Journal of The American Helicopter Society, 59, 042010.
- [5] Stanisław K., Robert R., Jakub K. (2021), 'Review of Modern Helicopter Constructions and an Outline of Rotorcraft Design Parameters', Problems Of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering, 12, 3 (45), 27-52.
- [6] Afthon M. F., Moelyadi M. A. (2020), 'A Study in Aerodynamic Optimization of UAV Helicopter Rotor-Blades Planform in Vertical Motion', International Journal of Aviation Science and Engineering, Volume 2, Issue 1, June, 1-8
- [7] Joanne L. W., Gene J. B., Michael F. R. (1987), 'Optimization Methods Applied to the Aerodynamic Design of Helicopter Rotor Blades', Journal of The American Helicopter Society, 34-44.
- [8] Even A. F. (1978), 'Aerodynamic Design of the Sikorsky S-76 SPIRIT™ Helicopter', Journal of The Helicopter Society, 15-17.
- [9] Hasan I. (2007), 'Helikopter Ön Tasarım Otomasyonu', İstanbul Technical University.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/MBB\\_Bo\\_105](https://en.wikipedia.org/wiki/MBB_Bo_105)
- [11] Constantin R., Michael T. (2017), 'Helicopter Flight Physics', DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.71516>
- [12] Mustafa Cavcar (1992), 'Helikopter Taşımacılığında Yakıt Sarfiyatı Minimizasyonu Açısından Tasarım ve Performans Analizi', İstanbul Technical University
- [13] Layton, Donald M. (1984), 'Helicopter Design Manual', Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [14] Stephen Glenn Kee (1983), 'Guide for Conceptual Helicopter Design', Naval Postgraduate School Monterey, California.
- [15] Mehmet Ş., Nilay S. U., Dilek F. K. (2016), 'Model Helikopter Döner Kanat Sistemi İçin Yer Etkisi Durumunda Performans ve Akış Araştırması', VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı.
- [16] Seddon, J. (1990), 'Basic helicopter aerodynamics', BSP Professional Books, Oxford.
- [17] Johnson W. (1994), 'Helicopter Theory', New York: Dover Publications, Inc., Pp. 299–300.

## Plastik Atıkların Betonda Değerlendirmesindeki Güncel Durum

Mustafa Altuğ Peker<sup>1</sup>, Oğuzhan Atas<sup>1\*</sup>, Murat Aksel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye.

\*oguzhan.atas@alanya.edu.tr

### Özet

Nüfusun hızlı artışı ve elektronik, otomotiv, ambalaj gibi sanayi ürünlerinde kullanılan hammaddeler plastik kullanımına olan talebi her geçen yıl artırmaktadır. Endüstriyel olarak kullanımı faydalı olan plastik ürünlerin ekonomik ömrünün tükenmesiyle çevresel ortamda kirliliğe sebep olmaktadır. Atık haline gelen plastik ürünler çeşitli yöntemlerle yeniden değerlendirilerek çevre kirliliği azaltılmak istenmektedir. Bu değerlendirmelerin başında; yakılarak enerji üretimi ve geri dönüşüm ile yeni ürün üretimi gelmektedir. Ancak bu dönüşüm yapılsa bile %35-55 oranında ciddi bir miktar atık depolanmak zorunda kalmaktadır. Depolanan plastik hacminin beton üretiminde değerlendirilerek atık miktarının azaltılması son derece ideal bir çözüm olabilmektedir. Bu derleme makalesinde literatürde plastik atıkların betonda kullanımı ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalar taze beton özellikleri, betonun mekanik özellikleri ve durabilite özellikleri olarak değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda farklı birçok plastik türü, mikro, makro boyutta ve lif olarak kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar plastik türü, incelenen parametre ve beton performansına etkisi bakımından değerlendirilmiş ve sonuçlar kısmında verilmiştir. Bu konu hakkında çalışma yapan araştırmacılar için son derece faydalı bir derleme haline gelmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Plastik Atık, Sürdürülebilirlik, Beton Mekanik Özellikleri, PET, HDPE, PP, PVC

## Current Situation in the Evaluation of Plastic Wastes in Concrete

### Abstract

The rapid increase in population and raw materials used in industrial products such as electronics, automotive, and packaging increase the demand for plastic use every year. Plastic products, which are useful for industrial use, cause pollution in the environment with the depletion of their economic life. It is desired to reduce environmental pollution by revaluing plastic products that have become waste through various methods. At the start of these evaluations, energy production, recycling, and making new things through incineration were talked about. Even if this conversion is completed, a significant amount of waste (35–55%) must be stored. Reducing the amount of waste by evaluating the stored plastic volume in concrete production can be an ideal solution. In this review article, studies on the use of plastic waste in concrete were examined in the literature. The examined studies evaluated the concrete properties, mechanical properties, and durability properties of concrete. In experimental studies, many different types of plastic have been used, such as micro, macro, and fiber. Studies in the literature have been evaluated in terms of the type of plastic, the parameter studied, and its effect on concrete performance, and are given in the results section. It has become an extremely useful compilation for researchers who will work on this subject.

**Keywords:** Plastic Waste, Sustainability, Mechanical Properties of Concrete, PET, HDPE, PP, PVC

Geliş/Received: 21 Ara 2022 / 21 Dec 2022

Kabul Ediliş/Accepted: 30 Ara 2022 / 30 Dec 2022

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu petrolü keşfedip, petrokimya konusunda ilerleme kaydedince doğal hammadde kullanılarak yapılan her tür ürünün yerini hızlı bir şekilde petrolden elde edilen veya farklı kaynaklı polimerlerin sentezlenmesiyle elde edilen plastikten ürünler almaya başlamıştır. Nüfus artışına ek olarak tüketim alışkanlıklarında değişim ve plastik sanayindeki sıçrama günümüzde plastiğin hemen hemen her ürünün içinde yer almasına neden olmuştur. Tekstil, kozmetik, otomotiv, elektronik, ambalaj sanayileri plastik kullanım alanının başını çekmektedir. Durabilitesi yüksek, üretimi kolay ve ucuz, korozyon gibi dış faktörler kaynaklı aşınmaya karşı dirençli olduğu için her tür sektörden talebin olduğu plastiğin yıllık üretim miktarı 2020 yılı için dünyada 360 milyon tonu aşmıştır ve bu değer 2050 yılında iki katına çıkması beklenmektedir [1], [2]. Çin, toplam üretim miktarının %32'sini üreterek plastik üretiminin başını çekmektedir. Plastik endüstriyel olarak ekonomik açıdan faydalı bir madde olmasına rağmen üretim, kullanım ve kullanım sonrasında plastikler çevresel ortama kirletici olarak girmektedirler. Bu kirleticilerin doğada çözünmesi içeriğine bağlı olarak binlerce yıl sürebilmektedir [3]–[5].

Plastiklerin endüstriyel amaçlarla kullanıma başlamasından 2015 yılına kadar üretilen tüm plastiğin %30'unun halen kullanılmakta olduğu, %12'sinin yakılarak enerji üretiminde kullanıldığı, %9'unun geri dönüştürüldüğü ve geri kalan miktarın ise çöp depo sahalarında ve çevre ortamına kirletici olarak karıştığı tahmin edilmektedir [6]. Gerek düzenli gerekse de vahşi depolama ile arazide biriktirilen plastik atık miktarının toplam üretilen plastiğin %35-%55 arasında olduğu tahmin edilmektedir [2], [7]. Arazide depolanan plastikler sebebiyle özellikle arazi bedellerinin yüksek olduğu bölgelerde yerel idareler arazi maliyetlerini karşılayamamakta ve yetersiz bütçeler sebebiyle vahşi depolama ile biriktirilen plastik atıklar hem yeraltı suyunu hem de yüzeysel drenajla tüm sucul ekosistemleri kirletmektedir. Özellikle nihai alıcı ortam olan deniz/göl gibi büyük kütleli su sistemine taşınan ve biriken hem kaynaktan hem taşınım sürecinde hem de alıcı ortamda çeşitli şekillerde çözünen (biyolojik, fiziksel, kimyasal) plastik atıklar, mikroplastik adı verilen ve 1 µm ile 5 mm arasında boyutlara sahip plastik parçacıklara ufalanırlar.

Yıllarca çeşitli araştırmacılarla farklı bölgelerde deniz ekosisteminde mikroplastik bildirimini yapılmasına rağmen [8]–[11] konunun çevresel olarak önemi ancak Stefatos vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada ortaya konulmuş ve konunun detayları tartışılmıştır [12]. Günümüze değin pek çok farklı araştırma grubu konunun farklı boyutlarını incelemiştir. Deniz ekosistemi içinde mikroplastiklerle ilgili, mikroplastik kirleticilerin kaynaklarını ve kaynaktan önlenme yöntemleri [13], [14], karadan deniz alıcı ortamına taşınım süreçleri [15]–[17], plastik kirleticilerin deniz ortamındaki dağılımı ve taşınımı [18]–[21] ve ekosistem içindeki canlılara etkisi [22]–[24] incelenmiştir.

Kıyı bölgelerinde mikroplastik birikimi ve davranışı ile ilgili çalışmalar sürekli güncelliğini korumakta ve mikroplastiklerin yakın deniz bölgesi ve kıyı yakınındaki davranışlarına dair araştırmalar sürmektedir [25]–[28]. Bakaraki Turan vd. (2021) yılında yaptıkları istatistiksel çalışmada MP'lerle ilgili deniz ve okyanuslardaki araştırmaların son yıllarda artarak devam ettiğini göstermişlerdir. Ancak, bu araştırmaların yalnızca oldukça küçük bir kısmı (2020 yılı için yaklaşık %1'i) yakın kıyı bölgesindeki dalga - sediment - MP ilişkisini irdelemektedir [29].

Mikroplastikler çeşitli kaynaklardan yayıldıkları için farklı boyut, renk, yoğunluk ve polimer özellikleri sergilemektedir. Bu durum var olan problemi tanımla konusunda karşılaşılan bir zorluktur. Kaynaklarına göre, mikroplastikler birincil ve ikincil olarak sınıflandırılırlar. Birincil kaynaklı MP'ler, doğrudan su ortamına giriş yaparken, ikincil kaynaklı MP'ler büyük plastiklerin mekanik ufalanma, UV ışınları, mikroorganizmalar aracılığı ile parçalanma, kimyasal (örn., asidite) ve fiziksel etkilerle çözünme (örn., sıcaklık) gibi etkilerle ufalanması ile oluşurlar. Kozmetik, el işleri, tekstil ürünleri, gıda maddelerinde dahi kullanılan simler, senettik ürünlerden kopan lif ve iplikçikler ile plastik eşyaların döküntüleri, karayolu taşıtlarının lastikleri, kirletici gazlardaki plastik parçacıklar, günlük tüketim ürünlerinin çöplerinin parçalanmasıyla oluşan MP'ler sırasıyla birincil ve ikincil kaynaklara örnek olarak verilebilir [19], [21], [22], [30].



Genel olarak, üretim aşamasında plastikler kullanım amaçlarına göre farklı kimyasal formlarda ve değişik içeriklerde üretilirler. Kendi çevresel etkisine ek olarak içeriğine eklene flatant, ağır metal gibi sucül ekosisteme zarar verecek maddeler de MP'lerde bulunmaktadır. Plastik döküntüler, diklorodifeniltrikloroetan (DDT), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve polibromlu difenil eterler (PBDE'ler) gibi zararlı kimyasalları dünya çapında deniz suyundan kolayca biriktirerek, konsantrasyonlarını büyüklük sıralarına göre arttırırlar [31]. Kendisinde ağır metal, flatant gibi katkı maddesi bulunduran MP'ler sucül ekosistem içinde hidrofobik toksik kirleticileri de kendisine yapıştırmaktadır. MP'ler boyutlarının küçüklüğü sebebiyle sucül ekosistemde yaygın olarak canlılar tarafından besin zannedilerek yutulmakta ve böylece besin zincirine bu şekilde giriş yapmaktadırlar [32]. Büyük su kütlelerinde akıntı, dalga, rüzgar vb. dış faktörlerle kolaylıkla taşınabilen ve doğada binlerce yıla yakın indirgenmemeleri nedeniyle MP'ler denizlerde ve okyanuslarda önemli bir kirlilik unsuru ve bir çevre tehdididir [30]. Türkiye kıyılarında yapılan araştırmalarda da besin ekosistemine girmiş yenilebilir balık türlerinin vücudundan toplanmış MP'lere dair çalışmalar bulunmaktadır [24].

Sadece su ekosisteminde değil havada [33], [34], toprakta [35], [36], kutuplarda bile [37], [38] mikroplastik kirliliğine rastlanmaktadır. Ayrıca insan metabolizmasında dahi mikroplastikler bulunmuştur [39]. Durumun ciddiyeti son derece yüksektir ve plastik atıkların mutlaka kontrol altına alınması ve üretilmiş plastiklerin mümkünse farklı şekillerde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yöntemlerden biri atık plastiklerin yapı teknolojilerinde kullanılmasıdır ve bu konuda son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmış ve araştırmalar devam etmektedir.

## 2. BETONDA ATIK PLASTİK KULLANIMI

Bu bölümde atık plastiğin beton ve harcın taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisinin yanı sıra dayanıklılık özelliklerini araştıran çalışmalar incelenmiştir. Polietilen Tereftalat (PET), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC) literatürde en sık kullanılan plastik türleridir. Literatürde çalışmalarda farklı türdeki bu plastiklerin harç ve betonda; agrega, lif ve filler yani dolgu malzemesi olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu atıkların çok az bir kısmı direkt olarak kullanılırken; büyük bir kısmı fiziksel ve/veya kimyasal geri dönüşüm teknikleriyle kullanılacak duruma getirilmiştir.

Atık plastiklerden agrega ve lif üretimi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. PET şişelerden lif üretilen bir yöntem kullanılarak, beton ve PET lifler, %3'e varan lif içeriğinde kolaylıkla karıştırılabilmektedir. Yapılan teslerde PET'in ıslanma direncinin PVA'dan daha düşük, PP'den daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca PET liflerin yanma testi sırasında hiçbir toksik gaz üretmediği görülmüştür. Önerilen yöntemle üretilen betonlar, Japonya'da kaldırım olarak ve Hishikari Madeni'nde ana kapı desteği olarak kullanılmıştır [40]. Geri dönüştürülmüş atık PET şişelerden üretilen ince agrega kullanılarak hafif agregalı betonun geliştirilmesi konusunda yapılan bir çalışmada ise kullanılan agregaların üretim süreçleri paylaşılmıştır [41].

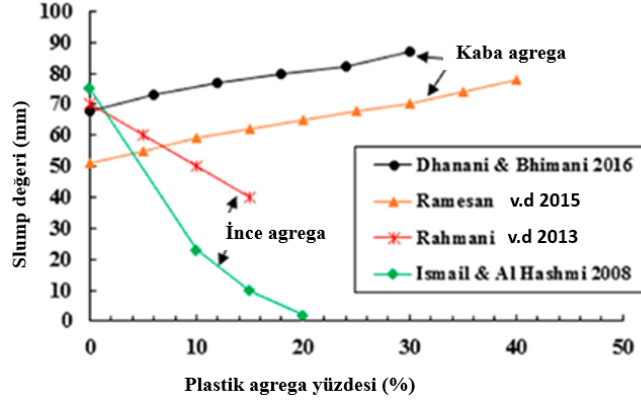
### 2.1 Taze Beton Özellikleri

Bir betonun sertleşmiş özellikleri taze betonun özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Beton karışımının kıvamı ve sıkıştırılması, nihai mukavemeti ve dayanıklılığı için hayati bir önem taşır. Bu nedenle taze betonun en önemli özellikleri işlenebilirliği ve kıvamıdır. Geri dönüştürülmüş veya atık plastikler, bir beton karışımına ince veya kaba agrega olarak eklendiğinde, betonun taze özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Bu bölümde, ince ve kaba agrega olarak geri dönüştürülmüş ve atık plastikler içeren betonun taze özellikleri araştırılmıştır.

#### 2.1.1 İşlenebilirlik

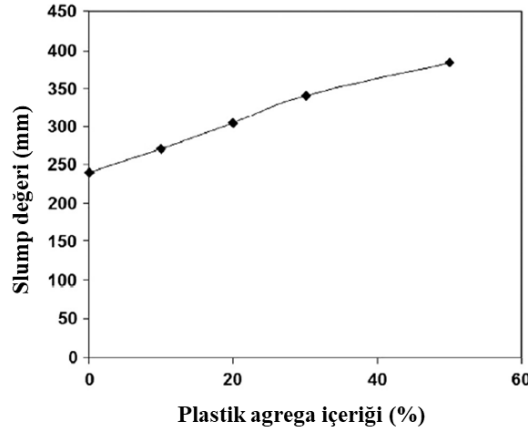
Betonda çökme, taze betonun işlenebilirliğini tanımlamak için yaygın olarak kullanılır. Agregada gradasyonu, agregaların şekli, su/çimento oranı ve karışımdaki akışkanlaştırıcı miktarı gibi faktörler betonun işlenebilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Çeşitli araştırmacılar, ince ve kaba agrega olarak atık plastiklerin betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisini araştırmıştır [41]–[46]. Araştırma bulguları atık plastiklerin etkisi altında somut işlenebilirliğin çelişkili performanslarını göstermiştir.

Geri dönüştürülmüş atık plastiklerin betonda iri agregaya olarak kullanıldığı çalışmalarda, sonuçlar geri dönüştürülmüş ve atık plastiklerin yüzdesi %40'a kadar arttıkça beton çökmesinin arttığını göstermiştir (Şekil 1). Çökmedeki artış, doğal iri agregaya yerine kullanılan geri dönüştürülmüş plastik miktarı arttıkça, su emmenin azalması nedeniyle karışımdan daha fazla su elde edildiğini göstermektedir [47]–[49]. Kum, ince plastik atık agregaya ile değiştirildiğinde ise şekilde gösterildiği gibi, işlenebilirlikte kaba plastik atık agregaya göre zıt bir eğilim gözlemlenir. İnce geri dönüştürülmüş plastik içeriği arttıkça betonun çökmesi azalır [48], [50], [51].



Şekil 1. İnce ve kaba plastik agregaların betonun çökmesine etkisi [48]

Geri dönüştürülmüş plastik atık içeren harcın çökmesi incelenmiştir [52]. Yapılan çalışmada, plastik atığın nehir kumu ile karşılaştırılması durumunda pürüzsüz bir dış yüzeye sahip olduğunu ve karışımın işlenebilirliğinin arttığını belirtilmiştir. Harç içeren plastik atıkların, kontrol karışımına kıyasla daha fazla çökme değerine sahip olduğu bulunmuştur (Şekil 2). Ayrıca harçtaki ince plastik atık agregalar yüzey alanını artırarak kendiliğinden yerleşen harcın işlenebilirliğini iyileştirmiştir. Plastik atık agregalar suya dayanıklı yapılarından dolayı karışımın işlenebilirliğini artırmıştır.



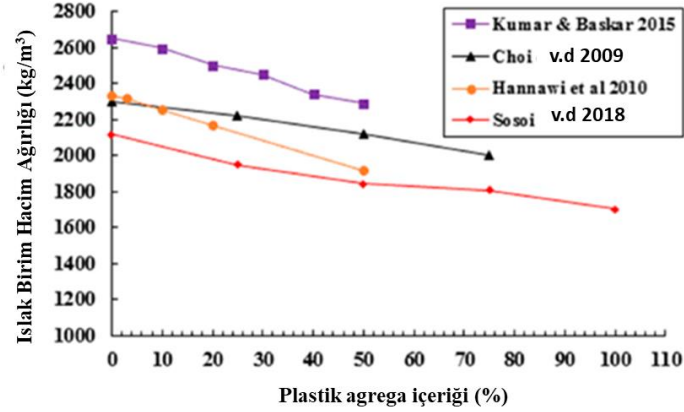
Şekil 2. Plastik atık miktarının harç akışkanlığına etkisi [52]

### 2.1.2 Kuru ve Doygun Birim Hacim Ağırlıkları

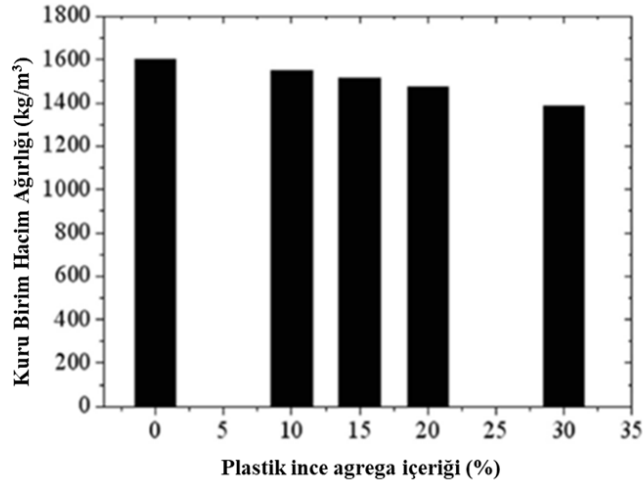
Betonun birim hacim ağırlığı, karışım bileşimlerinin özgül ağırlığına ve betonun kompasitesine bağlıdır. Atık plastikler, doğal agregalara kıyasla tipik olarak daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, ikame düzeyi ile orantılı olarak hem doygun hem de kuru birim hacim ağırlığının azalması beklenir. Plastik atık içeren kendiliğinden yerleşen harcın birim hacim ağırlığının nehir kumunun %50'si yerine geçene kadar sürekli azaldığını gözlemlenmiştir [52]. Plastik atık içeren betonun kuru ve doygun birim hacim ağırlıklarının plastik

atık agrega oranı arttıkça azaldığını belirtilmiştir [53]. Yapılan bir başka çalışmada ise, agrega olarak polikarbonatların ve PET atıkların dahil edilmesiyle harç ve betonun kuru ve doymun birim hacim ağırlığının azaldığı aktarılmıştır [54]. Bu sonuçlara göre, bir harç veya beton numunesinin birim hacim ağırlığındaki azalma, yapının toplam ağırlığını ve inşaat maliyetini azaltabilir.

Şekil 3 ve Şekil 4'te literatürdeki bazı çalışmalardaki kuru ve doymun birim hacim ağırlıklarının plastik atık içeriğiyle değişimi gösterilmiştir [48].



Şekil 3. Doymun birim hacim ağırlığının plastik atık içeriğiyle değişimi [41], [55]–[57]



Şekil 4. Kuru birim hacim ağırlığının plastik atık içeriğiyle değişimi [58]

### 2.1.3 Hava İçeriği

Atık plastik agrega içeren betonun hava içeriği ile ilgili çalışmalar literatürde az sayıdadır. Geleneksel ince agrega bulunan betonda ince agrega yerine farklı plastik agrega eklenerek farklı yüzdesel oranlardaki değerlerin hava içeriği karşılaştırılmıştır [59]. Bu çalışmada maksimum 4 mm boyutundaki plastik agrega kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, ince agregaların %20'sine kadar plastik agrega içeren çeşitli beton karışımlarının hava içeriklerinde önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte ince agreganın %30, %50 ve %100 oranında plastik agrega ile değiştirilmesi durumuna herhangi bir plastik içermeyen kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %110, %167 ve %387 daha yüksek hava içeriği bulunmuştur. Bu sonuçlar betona plastik agrega ilavesinin hava içeriğini arttırdığını ortaya koymaktadır.

Benzer sonuçlar başka çalışmalarda da bildirilmiştir. Düzensiz şekilli plastik agrega kullanımından dolayı betondaki hava içeriği artabilir. Hava içeriğindeki artış doğal kum ve plastik ince agreganın karışmaması

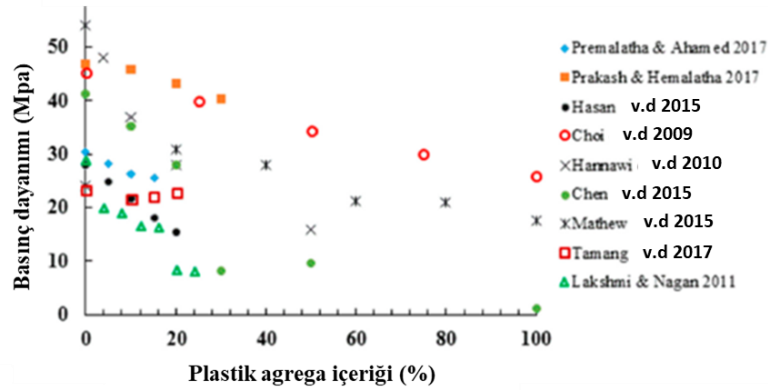
sonucu da ortaya çıkabilir. Ayrıca polimerlerin hidrofobik doğası gereği atık plastik agregaların yüzeyinde hava kabarcığı oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle, bazı yazarlar bu tür karışımlarda hava sürükleyici katkıların kullanılmasını da önermektedir [60]–[62].

## 2.2 Mekanik Özellikler

Çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri pratik uygulamaya uygunluğunu gösteren en önemli parametrelerden biridir. Bu bölümde literatürdeki geri dönüştürülmüş atık plastik içeren beton ve harcın mekanik özelliklerinin özetlenmesi amaçlanmaktadır.

### 2.2.1 Basınç Dayanımı

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde plastik agrega içeren harç ve beton karışımının basınç dayanımı genellikle olumsuz etkilendiği görülmektedir. Pürüzsüz plastik agregalar ile çimento matrisi arasındaki zayıf bağlanmanın karışımı zayıflattığı görülmüştür [63], [64]. Benzer şekilde, çeşitli boyutlarda PET agrega kullanarak yapılan çalışmada basınç dayanımında azalma bulgusuna ulaşılmıştır [53]. Başka bir çalışmada araştırmacılar kullandıkları beton karışımındaki kumu %50 oranına kadar polivinil klorür (PVC) granülleri ile değiştirmiştir. Atık borulardan elde ettikleri bu granülleri bir işleme tabii tutmadan direkt olarak kullanmışlardır. Ürettikleri numuneler 28. günde referans beton ile karşılaştırıldığında %50 plastik agrega içeren karışımın yaklaşık %50 oranında daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Aynı beton karışımında %30 oranında plastik kullanıldığı durumda mukavemet azalması yaklaşık %25 olmuştur [65]. Hem kaba hem de ince agrega olarak farklı yüzdelerde atık plastik içeren betonun basınç dayanımını inceleyen bazı çalışmalar şekilde gösterilmiştir [48].



Şekil 5. Atık plastik agrega içeren betonların 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması [41], [56], [59], [66]–[70]

Literatürdeki az sayıdaki çalışmada ise plastik atık agregaların düşük oranda kullanılması durumunda basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Örneğin, hafif kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımında geri dönüştürülmüş plastik atık agreganın %20'den daha az kullanıldığı durumlar için bir artış bulunmuştur. Yüksek oranlarda plastik kullanıldığı durumlarda ise basınç dayanımındaki düşüş devam etmektedir. Yazarlar basınç dayanımındaki bu artışı atık plastik olarak kullandıkları endüstriyel plastik döşeme ve araba tamponlarına bağlamışlardır [58]. Benzer bir sonuç, başka çalışmalarda da elde edilmiştir. Atık PET plastiklerin doğrudan bir şekilde agrega olarak kullanıldığı çalışmada, plastik agreganın %10 oranına kadar değiştirilmesi durumu için artan bir basınç dayanımı bulmuşlardır. Yazarlar bu sonucu kırılmanın başladığı noktadaki plastik parçacıkların varlığına bağlamışlardır [71].

Betonda atık plastik liflerin kullanıldığı çalışmalarda da benzer bulgular rapor edilmiştir. Lifli betonun basınç dayanımı, lif içeriği ve uzunluk yüzdeleri arttıkça azalmıştır. 5 mm uzunluğundaki ve %0.5, %1, %1.5 ve %2 lif içeriğine sahip beton karışımları sırasıyla %5, %10, %15 ve %21 daha düşük basınç dayanımına ulaşmıştır. Aynı miktardaki lif içeriği için 10 mm ve 15 mm'lik lif uzunluklarında ise, sırasıyla

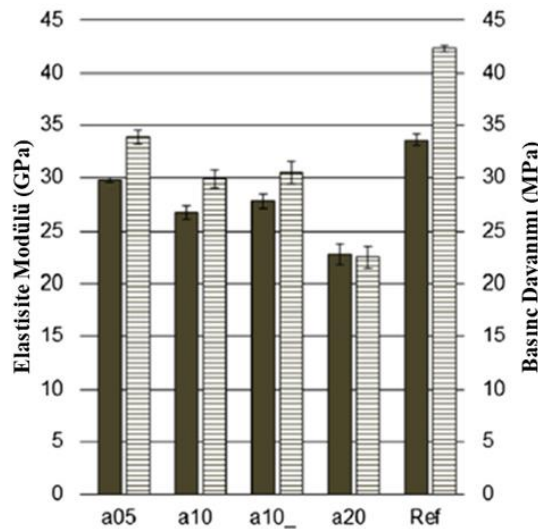
%8, %13, %18, %26 ve %8, %15, %21, %28 oranında daha düşük mukavemet değeri elde edilmiştir [72]. Lif oranı arttıkça betonun daha düşük basınç dayanımına sahip olmasının nedeni başka bir çalışmada tartışılmıştır. Çalışmanın sonucunda betona liflerin eklenmesiyle matristeki hava boşluklarının sayısının arttığı bunun da basınç dayanımında azalmaya yol açtığı belirtilmiştir. Ayrıca, plastik liflerin pürüzsüz yüzeylerinden dolayı çimento matrisi ile aralarında iyi bağlanma sağlanamamaktadır. Bundan dolayı aralarında zayıf bir ara yüzey bölgesi oluştuğu için dayanımın azalmasına sebep olmaktadır [48].

Plastik ve çimento esaslı malzemeler arasında kimyasal bağ olmadığı için plastik ve çimento arasındaki bağın geliştirilmesiyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Bağlanma özelliklerini geliştirmek için geri dönüştürülmüş plastiklerin farklı kimyasal türleri (oksitleyici kimyasallar) ile işlenmesini önermiştir. Yazarlar yaptıkları çalışmada atık HDPE (High Density Polyetylene) plastikleri çok ince parçalanmış halde dolgu olarak kullanmıştır. Parçalanmış plastikler; su, çamaşır suyu, çamaşır suyu + NaOH 'a maruz bırakılmış ve daha sonra betona ilave edilerek basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Çamaşır suyu+ NaOH karışımında bekletilmiş plastikten %0,5 (kütlece) kullanıldığında 28 gün sonunda referans betona göre benzer ama biraz daha iyi basınç dayanımı elde edildiği görülmüştür [73].

## 2.2.2 Elastisite Modülü

Plastik atık içeren betonun basınç dayanımı özelliklerine benzer şekilde, normal agreganın atık plastik agregaya ile değiştirilme yüzdeleri arttıkça betonun elastisite modülü doğrusal olarak azalmıştır [56], [71]. Plastiklerin düşük elastisite modülüne sahip olmaları bu sonuçtaki temel etkidir [74].

Agrega yerine plastiklerin lif olarak kullanıldığı durumlarda da sonuçlar farklı değildir. Betonda geri dönüştürülmüş PET'ten elde edilen liflerin kullanıldığı bir yöntem sunulmaktadır [75]. Geri dönüştürülmüş PET lif takviyeli betonun performansını araştırmak için, hacimce %0,5, %0,75 ve %1,0 lif oranları için polipropilen (PP) lif takviyeli beton ile üretilen numuneler karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve kısıtlanmış kuruma rötesi gibi malzeme özelliklerini ölçmek için uygun deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, lif oranı arttıkça hem basınç dayanımının hem de elastisite modülünün azaldığını göstermektedir. Başka bir çalışmada, yapısal betonda kullanılan geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) plastik liflerin potansiyel faydalarını araştırılmıştır. Betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri, yedi seri numunenin test edilmesiyle incelenmiştir. Betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü etkilenmemiştir [76]. Son olarak literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde atık plastik agregaya içeren betonun elastisite modüldeki düşüşün basınç dayanımındaki düşüşten daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 6) [60], [77].



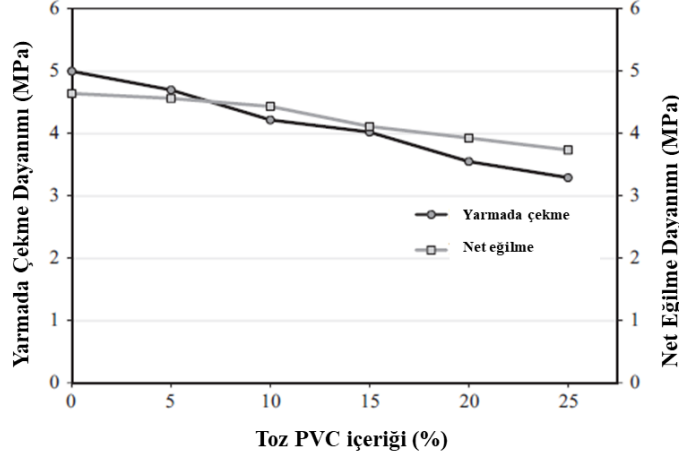
Şekil 6. Atık plastik agregaya kullanılan betonların elastisite modülü-basınç dayanımı karşılaştırması [60]

### 2.2.3 Eğilme/çekme Özellikleri

Harç veya betonun eğilme mukavemeti, karışıma plastik eklenmesinden olumsuz olarak etkilenmektedir. Plastik atık içeren harçların eğilme mukavemeti, plastik atık içeriğinin artmasıyla genellikle azalmaktadır[52]. Geri dönüştürülmüş atık PE ve PVC agrega içeren harç numuneleri üzerinde yapılan bir çalışmada artan plastik oranıyla kontrol numunesine göre eğilme mukavemetinde yaklaşık üç kat azalma olduğunu belirtilmiştir [78]. Geri dönüştürülmüş PET ve PC (polikarbonat) plastik agrega içeren harcın eğilme mukavemetinin kontrol karışımına göre değişmediğini gözlemlenmiştir [54]. Başka bir araştırma, sırasıyla %25, %50 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş PVC plastik atık agrega içeren harcın eğilme mukavemetinde yine sırasıyla %20, %23 ve %54 azalma olduğu sonucuna varmıştır [79]. Eğilme mukavemetinde bu azalmaların sebebi çimento esaslı malzeme ile plastik atık arasındaki zayıf bağdan kaynaklanıyor olabilir.

Harç ve beton numunelerinin yarmada çekme mukavemeti artan plastik atık oranıyla azalmaktadır. Geri dönüştürülmüş PET agrega içeren betonun yarmada çekme mukavemetinde azalma gösterdiğini belirtilmiştir [80]. Benzer şekilde, çeşitli oranlarda ince ve kaba agrega olarak PET kullanılan çalışmalarda, yarmada çekme mukavemetinde azalma tespit edilmiştir [53]. Başka bir çalışma da PVC atık agregalı beton üzerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir [65].

Sadece PET ince agrega içeren harcın eğilme ve çekme dayanımlarını PET ve kumun birlikte kullanıldığı harç ile karşılaştırılmıştır [81]. PET ve kum agregalarının bir arada kullanıldığı harçların mukavemeti, sadece PET agrega içeren harçlardan daha yüksek çıkmıştır. Yazarlar PET agregaları hiçbir işleme tabi tutmadan doğrudan kullanmıştır. Yapılan başka bir çalışmada, betondaki PVC tozu içeriği arttıkça, betonun nihai yarmada çekme ve eğilme mukavemetinin kademeli olarak azaldığını gözlemlenmiştir (Şekil 7). Bu sonuçların sebebi genellikle atık agrega plastik ilavesiyle basınç dayanımında olan azalmayla benzer şekilde plastik agregalar ve çimento matrisi arasındaki zayıf ara katmana bağlanmıştır[77].

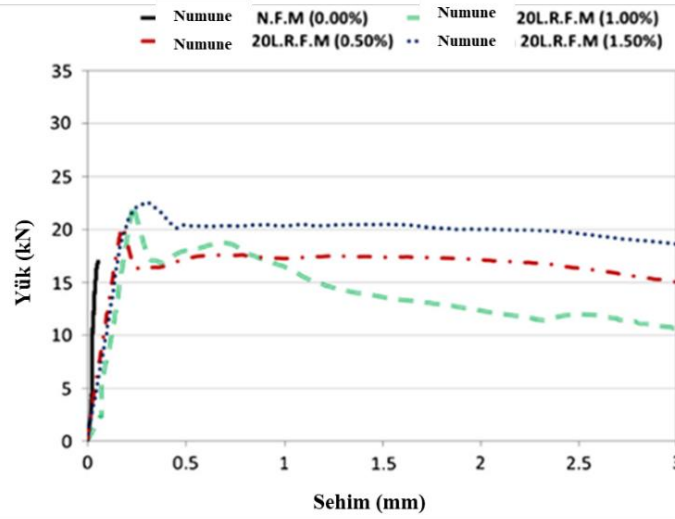


Şekil 7. PVC tozu içeriğine bağlı olarak eğilme ve çekme dayanımlarındaki değişim [77]

Bazı yazarlar, belli düzeyde plastik içeriğinin betonun eğilme/çekme mukavemetini artırabileceğini bildirmiştir. Doğal agregaların bir kısmı yerine atık geri dönüştürülmüş plastik agrega kullanılmasının betonun eğilme ve yarmada çekme dayanımını %15-20 civarında artırabileceği gözlemlenmiştir [58]. Benzer bulgular atık ve geri dönüştürülmüş atık plastik agrega kullanan başka çalışmalarda da elde edilmiştir. Bununla birlikte atık plastik agregaların %20'den daha fazla kullanılması, yine de eğilme ve çekme mukavemetinde azalmaya yol açmıştır [49], [71], [82].

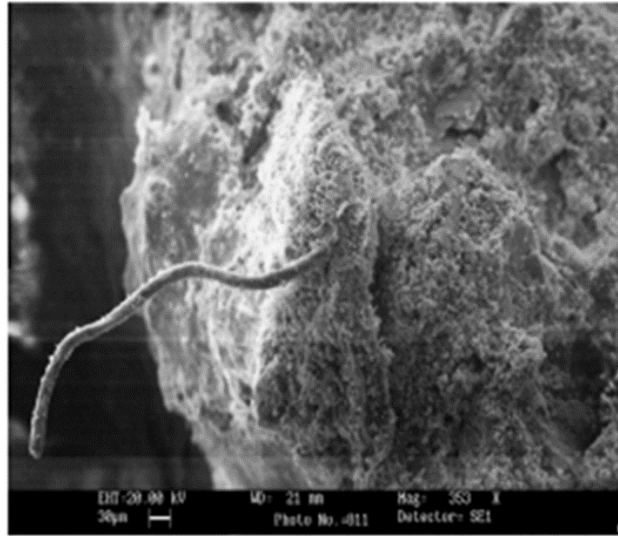
Geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) plastik lif kullanarak yapılan bir çalışmada, eğilme dayanımında %3 ila %14 arasında artış gözlemlenmiştir [76]. Geri dönüştürülmüş plastik atık liflerinin Portland çimento harcının eğilme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için laboratuvar

deneyler yapılmıştır [83]. Deneysel sonuçlar, kontrol harcına kıyasla, plastik liflerle güçlendirilmiş harçların eğilme tokluğunda yaklaşık 26 ila 61 kat, eğilme mukavemetinde ise %6 ila %84 arasında önemli bir artış olduğunu göstermiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Lifsiz ve farklı oranlarda geri dönüştürülmüş atık plastik lif içeren betonların eğilme dayanımlarının karşılaştırması [83]

Ayrıca, betonda bir miktar plastik agrega kullanımının sünekliği artırma eğiliminde olabileceğini bu bölümde belirtmekte fayda vardır. Ancak bu durum tamamen kullanılan plastiğin türü ile ilgilidir. Bu nedenle ihtiyaca bağlı olarak, daha iyi performans için uygun plastik türleri kullanılmalıdır. Eğilme kapasitesinin düşük plastik atık agrega (PET ve PC) kullanım yüzdelerinde arttığı, ancak plastik agrega içeriğinin normal agrega ile aynı seviyeye yani %50'ye ulaştığında ise daha fazla oranda arttığı belirtilmiştir [84]. Bu sonuç plastik/çimento matrisi ara yüzünün mikro çatlakların yayılmasına engel olmasına bağlanmıştır. Bununla birlikte plastik agregaların kendileri de mikro çatlakların yayılmasını önleyip birleşmelerini geciktirebilir. Başka bir çalışmada ise geri dönüştürülmüş atık plastiklerin bir bölümünün kısa liflere benzer bir şekle sahip olduğu (Şekil 9) ve malzemeye bir miktar tokluk sağlayarak çatlaklı belirli bir dereceye kadar köprüleyebildiği öne sürülmüştür [85].



Şekil 9. Atık plastiğin lif benzeri şeklinin SEM görüntüsü [85]

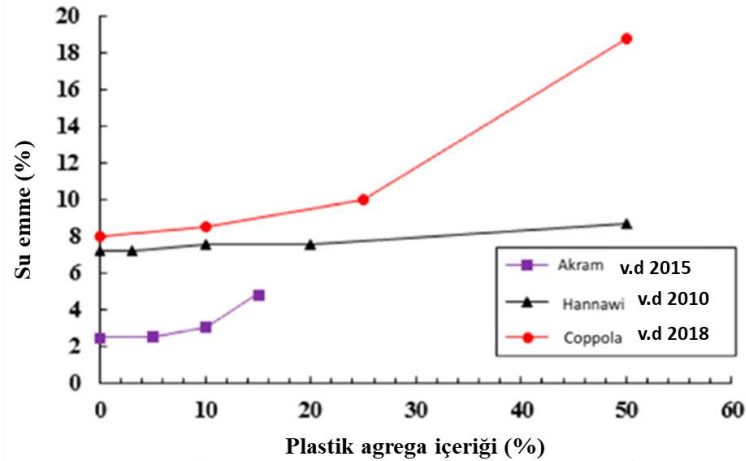
## 2.3 Durabilite Özellikleri

Betonun durabilitesi yani dayanıklılığı, sıvı ve gazların beton içerisine geçmesiyle doğrudan ile ilgilidir. Atık malzemelerin betonda kullanılması için geri dönüştürülmesi veya doğrudan kullanımı olası kirleticilerin mevcudiyeti nedeniyle durabiliteyi etkileyebileceğinden önemlidir. Mevcut araştırmalar, plastik agregaların doğal agregalar gibi iyi bir dayanıklılığa sahip olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte bazı çalışmalar, betona başka özel malzemeler karıştırılarak veya plastiğin özellikleri değiştirilerek dayanıklılığın geliştirilebileceğini belirtmiştir [48].

Bu bölümde, atık plastik içeren betonun durabilitesi üzerinde yapılan araştırmalar incelenmiştir.

### 2.3.1 Su Emme ve Porozite

Atık plastik içeren betonun dayanıklılığını değerlendirmek için çeşitli araştırmacılar tarafından beton numuneleri üzerinde su emme ve porozite deneyleri yapılmıştır. Elektronik atık plastik içeren beton üzerinde su emmeyle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Elektronik atık (e-atık), kullanım ömrünü doldurmuş buzdolabı, radyo, televizyon, klima, cep telefonu, bilgisayar ve diğer birçok elektronik aletten oluşmaktadır. Yapılan bir çalışmada su emme değeri, betondaki geri dönüştürülmüş elektronik atık plastik içeriği arttıkça katlanarak artmıştır. %15 oranında kaba e-atık içeren betonda referans betona göre %100'e yakın daha yüksek su emme görülmüştür [86]. Başka bir çalışmada araştırmacılar hafif harç üretiminde kullandığı karışımdaki doğal kumu %10, %25 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş atık plastik agregaya ile değiştirmiştir. %10 oranında plastik agregaya kullanılması durumunda referans numune ile benzer miktarda su emme değeri elde edilmiştir. Ancak karışımın plastik yüzdesi arttıkça su emme artmaktadır. %50 oranında plastik kullanılan harcın referans numuneye göre %117 daha yüksek su emdiği belirlenmiştir. Plastik agregaların neden olduğu daha yüksek miktardaki porozite, betonun su emmesindeki bu değişikliğin sebebidir [87]. %20 oranında PE ve PVC plastik agregaya içeren beton üzerinde yapılan deneylerde 28. günde yaklaşık %200 ve %140 daha yüksek porozite bulunmuştur [78]. Bazı çalışmanın plastik agregaya içeriği arttıkça su emmenin arttığını gösteren grafik şekilde verilmiştir.



Şekil 10. Su emme kapasitesinin atık plastik agregaya ile değişimi [56], [86], [87]

Yığma duvar harcında geleneksel agregalar yerine belli yüzdelerde PET şişe granüllerinin kullanımını araştırılmıştır. Atık PET şişeler toplanmış ve duvar harcı bileşimine eklenmeden önce boyut küçültmeye ve bazı kimyasal işlemlere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, harç bileşimine kum yerine atık PET granüllerin eklenmesiyle basınç dayanımının azaldığını ve harcın su emme ve porozitesinin arttığını göstermiştir [88].

### 2.3.2 Donma Çözünme Direnci

Donma ve çözünme direnci, malzemenin döngüsel donma ve çözünmeye karşı dayanma özelliği olarak tanımlanabilir. Herhangi bir malzemenin dayanıklılığını tanımlayan en önemli parametrelerden biridir.



Harç ve beton numunelerinde atık polistiren köpük plastiklerin ince ve kaba agrega formunda kullanımı üzerinde çalışılmış ve atık plastik oranı arttıkça donma direncinin ve buna bağlı olarak da dayanıklılığın arttığını bulunmuştur [89]. Benzer şekilde harçta kullanılan atık polistiren köpük plastik agregaların donma-çözülme direncini artırdığını gözlemlenmiştir [90]. Bu çalışmalarda atık polistiren köpükler parçalanıp fırınlandıktan sonra agrega olarak kullanılmıştır.

### 2.3.3 Rötire

Rötire, dış yükler uygulanmadan önce bile betonun çatlamasına neden olabildiği için kontrolü çok önemlidir. Literatürde atık geri dönüştürülmüş plastik agregaların betonun rötiresi üzerindeki etkisi araştırıldığında çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Bazı yazarlar, karışımda artan atık geri dönüştürülmüş plastik oranı ile rötrenin de arttığını bildirmiştir. Rötire çimento hamurunun büzülmesi ve agrega içeriği ve sertliği olmak üzere temelde iki malzeme parametresine bağlı olduğu için bu davranış beklenebilir. Agregalar büzülmediği için betonda içsel kısıtlamalara yol açarlar. Bu nedenle daha sert agregalar aslında daha düşük büzülme yani rötire anlamına gelir. Geri dönüştürülmüş atık plastik agregalar, doğal agregalardan daha yumuşak olduğundan, bu tip agrega kullanımının rötirede bir artışa yol açması beklenir [48].

Yapılan bir çalışmada, betonda %100 oranında atık PET agrega kullanılması durumunda kuruma rötiresinde %50 PET agrega içeren betona göre %56'lık bir artış kaydedildiğini bildirilmiştir [81]. Bir başka çalışmada, %20 atık PET agrega içeren betonda referans betona kıyasla kuruma rötiresinde %20'lik bir artış ölçülmüştür [91]. Betonda artan geri dönüştürülmüş atık PET agrega içeriği ile daha yüksek rötire gözlemlenmiştir [84]. Plastik agrega içeren betonun daha yüksek rötire değerine sahip olması plastik agregaların geleneksel agregalara göre daha düşük elastisite modülüne sahip olmasıyla açıklanabilir.

Bazı yazarlar ise genel genelin aksine betona geri dönüştürülmüş atık plastik agregaların eklenmesi sonucu kuruma rötiresinde azalma olduğunu belirtmiştir [92]. Bu durumu atık agregaların geçirimsiz doğası gereği agregalar tarafından emilen su miktarını azaltmasına ve böylece betonda çimento hidrasyonu için daha fazla serbest su kalmasına bağlamışlardır. Kuruma rötiresine betonda su kaybının sonucu olarak ortaya çıkan çekme kuvveti neden olduğu için plastik agregaların geçirimsizliği sonucu betonda kuruma rötiresi azalabilir.

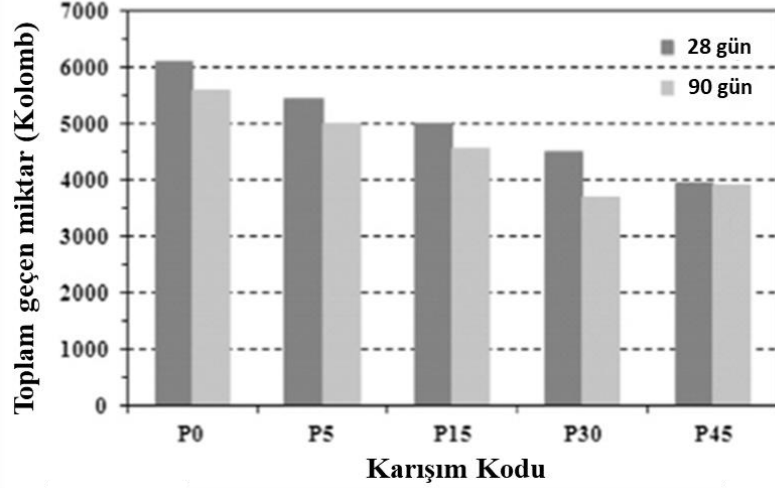
Beton veya harca atık plastik agrega eklenmesinin bir sonucu olarak kuruma rötiresindeki artış literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak bildirilmesine rağmen, aynı zamanda kısıtlanmış rötire çatlaklarında ise azalmaya neden olmuştur. Geri dönüştürülmüş atık PET agrega eklenmesi sonucu harçtaki kısıtlanmış rötire çatlaklarının daha geç ortaya çıktığını ve genişliklerinin de azaldığı bildirilmiştir [84]. Geri dönüştürülmüş atık HDPE agregalar ile de benzer bulgular elde edilmiştir [93]. Bu sonuçlar, atık plastik agregaların çatlak oluşumundan önce deformasyon kapasitesini iyileştirmesine bağlanmıştır. Ayrıca, PET pul şeklindeki parçacıklar lif gibi davranarak köprüleme yapmış ve çatlak açıklığını kısıtlamıştır [48].

Lifler de ise durum agregalara göre daha farklıdır. Kuruma rötiresinden kaynaklanan çatlakların geri dönüştürülmüş PET liflerin çatlak kontrol ve köprüleme özellikleri sayesinde düz betona göre daha iyi olduğunu belirtilmiştir [75]. Geri dönüştürülmüş HDPE liflerin rötire çatlaklarını azaltıp betonun dayanıklılık özelliklerini geliştirerek performansa katkıda bulunduğu belirtilmiştir [76]. Geri dönüştürülmüş plastik atık lif içermeyen kontrol numunelerine kıyasla, artan miktarda lif ile güçlendirilmiş harç numunelerin plastik rötire çatlaklarında önemli bir azalma olduğunu belirtilmiştir [83]. Plastik lifler çimento esaslı malzemelerin sünekliğini iyileştirmekte ve köprüleme etkisi sonucu çatlakların büyümesini engellemektedir.

### 2.3.4 Klor Penetrasyonu

Atık veya geri dönüştürülmüş atık plastik içeren betonun klor penetrasyonuna direnci konusunda çelişkili sonuçlar bildirilmiştir. Doğal ince agreganın bir kısmının atık PVC granüller ile değiştirilmesiyle hazırlanan sertleşmiş betonun 28 ve 91 günlük klor iyonu penetrasyonuna karşı direncini araştırılmıştır [65]. Betonun klor iyonu geçirgenliğine karşı direnci, kür süresi ve PVC içeriğindeki artışla artmıştır (Şekil 11). Doğal agreganın %45 oranında PVC granüller ile değiştirilerek hazırlanan ve 28 gün kürlenmiş betonda, atık PVC

granül içermeyen ve aynı kür ortamında olan betona kıyasla klor geçişinde yaklaşık %36'lık bir azalma bulmuşlardır. Yazarlar betonun klorür iyonu penetrasyonuna karşı direncindeki artışı iyonun geçişini engelleyen geçirimsiz PVC granüllerine bağlamaktadır.



Şekil 11. Çeşitli oranlara atık plastik içeren betonun klor penetrasyonuna karşı gösterdiği direncin karşılaştırması [65]

Beton karışımındaki doğal kaba agreganın bir kısmı yerine atık poliüretan (PUR) köpük içeren betonun klorür difüzyon katsayıları değerlendirilmiştir [43]. Yazarlar, PUR plastik agregası içeren betonun yalnızca doğal agregası içeren referans betona göre daha düşük bir klorür difüzyonuna sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bazı yazarlar ise aksi yönde bulgular elde etmiştir. Betona geri dönüştürülmüş atık plastik agregası eklenmesiyle klor penetrasyonuna karşı dirençte küçük bir azalma bulunmuştur. Ancak araştırmacılar yaptıkları çalışmada %5 oranına kadar, yani düşük miktarlarda atık plastik agregası kullanmıştır [93]. Artan atık geri dönüştürülmüş plastik agregası oranıyla klor penetrasyonunun arttığını bildirilmiştir [92]. Davranışın neden böyle olduğuna dair bir açıklama yapmalarına rağmen bu sonucun artan boşluk oranına bağlı olduğu düşünülebilir. Betona plastik agregası eklenmesiyle hava içeriğinin artabileceği daha önceki bölümlerde tartışılmıştı. Hava içeriğiyle birlikte boşluk oranı artan betonda daha yüksek klor girişi beklenebilir. Betona klor penetrasyonu kürle doğrudan ilgilidir. Kür koşullarının iyi olması sonucu betonun mikro yapısı daha yoğun olur ve klor penetrasyonu engellenir.

### 2.3.5 Karbonatlaşma

Çeşitli tipteki çimento harçlarının karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Sadece PET agregası içeren harcın 28 gün ve daha sonrasındaki kür için karbonatlaşma derinliği, PET ve kum agregası içeren harca göre daha düşük olmuştur. Yazarlar, sadece PET agregası içeren harca göre kum ve PET karışımı içeren harcın daha gözenekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu porozitesi yüksek harç, PET ve kum agregalarının birbirleriyle yeterince iyi birleşmemesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır [81]. Betonda kullanılan geri dönüştürülmüş atık PET ve PVC agregası içeriği arttıkça beton numunelerinin karbonatlaşma derinliğinin de arttığı bulunmuştur [78], [92].

### 2.3.6 Isıl İletkenlik

Betonun ısıl iletkenliğinin doğal agregaların atık plastiklerle değiştirilmesinden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Bu konuda yapılan birkaç çalışmada araştırmacılar, betona geri dönüştürülmüş atık plastik agregası eklenmesi sonucunda betonun ısıl iletkenliğinde bir azalma olduğunu belirtmiştir. Termal

iletkenliğin kuru birim hacim ağırlığı ile orantılı olduğunu gözlenmiştir [60]. Yazarlar bu düşüşü atık plastik agregaların kuma kıyasla daha düşük termal iletkenliğe sahip olmasına bağlarken başka yazarlar [85] plastik ilavesiyle betondaki hava boşluklarının artmasına bağlamıştır. Sonuç olarak, plastik atık agregaya içeren beton, doğal agregaya içeren betona kıyasla önemli ölçüde daha iyi yalıtım özelliklerine sahiptir.

### 2.3.7 Yüksek Sıcaklıklara Karşı Direnç

Farklı yüksek sıcaklıklarda (hem ince hem de iri agregaya olarak) farklı yüzdelerde PET içeren betonun basınç dayanımı araştırılmıştır [94]. Betondaki PET agregaya içeriği ve sıcaklık arttıkça mukavemet kademeli olarak azalmıştır. Yazarlara göre dayanımın düşük olmasının nedeni, dengesiz bir ısıl eğime yol açan ve çimento matrisinde çatlakların oluşmasına neden olan PET agregaya içeren betonun gözenekli yapısıdır. Ayrıca, PET agregaların termal bozunması da matriste ayrılmaya yol açarak erken çatlaklara neden olabilir ve mukavemet düşebilir.

## 3. ATIK PLASTİKLERİN BETONDA KULLANIMININ SONUÇLARI

Çimento esaslı malzemelerde atık plastik kullanımı ilgili yapılan literatür taramasına dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Atık plastik kaba agregaya içeriği belli bir orana kadar arttıkça işlenebilirlik artar. Bu seviyenin üzerinde ise azalır. İşlenebilirlik; parçacık şekline, boyutuna, pürüzlülüğüne, karışımın su-çimento oranına ve çimento hamuru miktarına bağlı olarak etkilenebilir.
- Atık plastik agregaların düzensiz şekli, doğal kumla iyi karışamaması ve plastiğin hidrofobik doğası nedeniyle betonun hava içeriğinde artışa neden olarak gözenekli bir yapı oluşturur.
- Atık plastik agregaya içeriğindeki artış hem plastik agregaların hafifliğine hem de oluşan gözenekli yapıya bağlı olarak betonun birim hacim ağırlığını azaltır.
- Atık plastik agregaya oranındaki artışla birlikte basınç dayanımında kademeli bir azalma meydana gelmektedir. Ancak bazı çalışmalar, düşük seviyelerde atık plastik kullanılması durumunda basınç dayanımında bir artış olduğunu göstermiştir.
- Atık plastiklerin lif olarak kullanılması durumunda betondaki lif oranı ve lif uzunluğuna bağlı olarak basınç dayanımında azalma olmuştur.
- Betonun elastisite modülü, atık plastik agregaya içeriği arttıkça doğrusal olarak azalmaktadır. Ancak elastisite modülündeki bu düşüş basınç dayanımındaki düşüşe göre daha azdır.
- Atık plastik içeren betonun eğilme ve yarmada çekme mukavemetinde bir azalma olduğu görülmüştür. Ancak doğal agreganın %20'den az atık plastik lif ile değiştirilmesi durumunda eğilme/çekme özelliklerinde orta düzeylerde bir artış elde edilebilir.
- Atık plastik agregaya kullanılması ile betonun sünekliği önemli ölçüde artmıştır.
- Atık plastik ilavesi betondaki rötre çatlaklarının artmasına, betonun daha fazla su emmesine, betona daha fazla klor girişine ve betonun daha düşük ısı iletkenliğe sahip olmasına sebep olmuştur.

Literatür araştırmasında atık plastiğin herhangi bir geri dönüşüm sürecine maruz bırakılmadan direkt olarak betona eklenmesiyle yapılan çalışmaların sayısı, geri dönüştürülmüş atık plastik kullanılan çalışmalara göre oldukça azdır. Konuyla ilgili yapılan derleme çalışmalarda da bu bölümde olduğu gibi bu iki tip atık agregaları içeren çalışmalar birlikte değerlendirilmiştir. Atıkların direkt olarak kullanıldığı çalışmalara bakıldığında tamamına yakınında kolay ulaşılabirliği sebebiyle PET ve PVC plastikler kullanılmıştır. Az sayıdaki çalışmada ise kullanılan atığın geri dönüşüm süreciyle ilgili herhangi bir bilgi verilmemiştir. Farklı tür plastik atıkların doğrudan kullanıldığı çalışmalar literatürde eksik görülmüştür. Yapılan literatür araştırmasında bulunan bazı çalışmaların çeşitli parametrelere göre listelenip özetlenmiş hali aşağıdaki tabloda da verilmiştir.

Tablo 1. Literatür taramasında bulunan çalışmaların çeşitli parametrelere göre listesi

Parametre	Plastik	Çalışma ve Bulgu
İşlenebilirlik	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş Kaba Agregası)	Dhanani ve Bhimani (2016) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik arttığını belirtmiştir.
İşlenebilirlik	HDPE (Geri Dönüştürülmüş Kaba Agregası)	Ramesan vd. (2015) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik arttığını belirtmiştir.
İşlenebilirlik	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Rahmani vd. (2013) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik azaldığını aktarmıştır.
İşlenebilirlik	Belirtilmemiş (İnce Agregası)	Ismail ve Al Hashmi (2008) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik azaldığını aktarmıştır.
İşlenebilirlik	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Safi vd. (2013) artan plastik oranıyla birlikte işlenebilirlik arttığını belirtmiştir.
Birim Hacim Ağırlığı	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Safi vd. (2013), birim hacim ağırlığının en fazla %50 oranında doğal agrega yerine plastik atık kullanılması durumunda sürekli azaldığını gözlemlemiştir.
Birim Hacim Ağırlığı	PC (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Hannawi ve Agbodjan (2015) birim hacim ağırlığının atık plastik arttıkça azaldığını aktarmıştır.
Birim Hacim Ağırlığı	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Choi vd. (2009) birim hacim ağırlığının atık plastik arttıkça azaldığını aktarmıştır.
Birim Hacim Ağırlığı	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Sosoi vd. (2018) betonun birim hacim ağırlığının atık plastik arttıkça azaldığını aktarmıştır.
Hava İçeriği	HDPE (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Chen vd. (2015) betondaki atık plastik yüzdesi arttıkça hava içeriği arttığını belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	PET ve PC (Doğrudan Kaba ve İnce Agregası)	Hannawi vd. (2010) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	HDPE (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Chen vd. (2015) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	E-Plastik (Kaba Agregası)	Lakshmi ve Nagan (2010) düşük plastik oranlarında az miktarda atık olduğunu, plastik miktarı arttıkça ise dayanımın azaldığını belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş Kaba Agregası)	Mathew vd. (2013) %22 oranında plastik atık kullanılması durumunda plastik atık içeren betonun en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Prakash ve Hemalatha (2019) plastik oranı arttıkça basınç dayanımı düştüğünü belirtmiştir.
Basınç Dayanımı	PP (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Yang vd. (2015) basınç dayanımında plastik atığın %20'den az kullanıldığı durumlar için bir artış bulmuştur. Plastik oranı arttıkça düşüş elde edilmiştir.
Basınç Dayanımı	Belirtilmemiş (Doğrudan Lif)	Bhogayata ve Narendra (2018) betonun basınç dayanımı, lif içeriği ve uzunluk yüzdeleri arttıkça azalmıştır.
Elastisite Modülü	Belirtilmemiş (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Premalatha ve Ahamed (2017) plastik arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	PET (Doğrudan Kaba Agregası)	Hossain ve Shaad (2016) plastik atık arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009) plastik atık arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	PET (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Kim vd. (2010) plastik atık lif arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Elastisite Modülü	HDPE (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Pešić vd. (2016) plastik atık lif arttıkça betonun elastisite modülünün azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Safi vd. (2013), plastik atık içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının azaldığını belirtmiştir.

Eğilme/Çekme	PE ve PVC (Geri Dönüştürülmüş Agregası)	Ruiz-Herrero vd. (2016), plastik atık içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımının üç kata kadar azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Doğrudan Kaba ve İnce Agregası)	Albano vd. (2009), plastik atık içeriğinin artmasıyla yarmada çekme dayanımının azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009), plastik atık içeriğinin artmasıyla yarmada çekme dayanımının azaldığını belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Akçaözoğlu vd. (2010) PET atık ve kum agreganın birlikte kullanıldığı harçların dayanımının, PET içerenden fazla olduğunu bildirmiştir.
Eğilme/Çekme	PP (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Yang vd. (2015) %15'e kadar plastik atık kullanımının betonun eğilme ve yarmada çekme dayanımını artırabileceğini belirtmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Doğrudan Kaba Agregası)	Hossain ve Shaad (2016) %10 oranında plastik atık kullanımında referans beton ile aynı çekme dayanımı elde etmiştir.
Eğilme/Çekme	PET (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Al-Tulaian vd. (2016) plastik lif içeren harçların eğilme mukavemetinde ise %6 ila %84 arasında bir artış olduğunu göstermiştir.
Eğilme/Çekme	HDPE (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Pešić vd. (2016) plastik lif kullanarak yaptıkları çalışmada, eğilme dayanımında %3 ila %14 arasında artış gözlemlenmiştir.
Eğilme/Çekme	PET ve PC (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Hannawi vd. (2013) eğilme kapasitesinin düşük plastik atık agregası (PET ve PC) kullanım yüzdelerinde arttığını belirtmiştir.
Su Emme ve Porozite	PP ve PE (Geri Dönüştürülmüş İnce Agregası)	Coppola vd. (2018) karışımın plastik yüzdesi arttıkça su emmenin arttığını belirtmiştir.
Su Emme ve Porozite	PE ve PVC (Geri Dönüştürülmüş Agregası)	Ruiz-Herrero vd. (2016) PE ve PVC plastik atık içeren beton üzerinde yaptığı deneylerde %200 ve %140 daha yüksek porozite bulmuştur.
Donma Çözünme	EPS (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Kan ve Demirboğa (2009), atık plastik oranı arttıkça donma direncinin ve buna bağlı olarak da dayanıklılığın arttığını bulmuşlardır.
Rötre	PET (Doğrudan İnce Agregası)	Akçaözoğlu vd. (2010) %50 atık agregası içeren betona göre tamamen atık agregası içeren betonun kuruma rötresi %56 artmıştır.
Rötre	PET (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Silva vs. (2013) kuruma rötresinde azalma olduğunu belirtmiştir. Bunu plastik atık agreganın geçirimsizliğine bağlamıştır.
Rötre	PET ve PC (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Hannawi vd. (2013) harçtaki kısıtlanmış rötre çatlaklarının daha geç ortaya çıktığını ve genişliklerinin de azaldığını bildirmiştir.
Rötre	PET (Geri Dönüştürülmüş Lif)	Kim vd. (2010) kuruma rötresinden kaynaklanan çatlakların atık liflerin çatlak kontrol ve köprüleme özellikleri sayesinde iyileştiğini belirtmiştir.
Klor Penetrasyonu	PVC (Doğrudan İnce Agregası)	Kou vd. (2009), plastik atık içeriğinin artmasıyla klor geçişinin azaldığını bildirmiştir.
Klor Penetrasyonu	PET (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Silva vd. (2013), artan atık plastik agregası oranıyla klor penetrasyonunun arttığını bildirmiştir.
Karbonatlaşma	PET (Geri Dönüştürülmüş Kaba ve İnce Agregası)	Silva vd. (2013), artan atık plastik agregası oranıyla karbonatlaşma derinliğinin arttığını belirtmiştir.
Isıl İletkenlik	PET, PE, PVC, PP, PS (Geri Dönüştürülmüş Agregası)	Jacob-Vaillancourt ve Sorelli (2018) atık plastiğin artmasıyla betonun ısı iletkenliğinde bir azalma olduğunu belirtmiştir.
Yüksek Sıcaklık	PET (Doğrudan Kaba ve İnce Agregası)	Saxena vd. (2018) plastik atık içeriği ve sıcaklık arttıkça dayanımın kademeli olarak azaldığını belirtmiştir.

#### 4. SONUÇ

Dünyada üretilmiş ve üretilecek plastiklerin büyük bir kısmı kullanım ömrünü tamamladığında ya alıcı ortamı kirletmekte ya da depo sahalarında alan işgal etmektedirler. Bu durum plastik atıkların azaltılması, geri dönüştürülmesi ve başka kullanım alanlarında değerlendirilmesi için gerekli çalışmaların önemini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında plastik atıkların inşaat teknolojisinde beton içerisinde kullanılması yoluyla atıkların yapılarda depolanması üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Bu durum hem atıkların güvenle depolanabileceği yeni alanlar yaratılması hem de hammadde maliyetlerinden tasarruf edilmesine imkân sağlamaktadır.

Yapılan araştırmalarda kolay ulaşılabilirliği sebebiyle genellikle PET ve PVC plastikler kullanılmıştır. Bunların dışında HDPE ve PP de literatürde sıklıkla kullanılmıştır. Günümüzde üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle birlikte yaygın olarak kullanılan PLA (Polilaktik Asit) biyoplastik bir malzemedir. PLA'nın beton içerisinde kullanımı benzer şekilde araştırılmaya gerek duymaktadır.

Konu hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla geri dönüştürülmüş plastik atıklar kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Plastik atıkların herhangi bir dönüşüm işlemine tabi tutulmadan direkt olarak kullanımı veya tam dönüşüm süreci yerine kısmi ısıl işlem uygulanması ve/veya mekanik parçalama gibi basit proseslerle kullanılabilir hale getirilmesi sonucunda betonun mukavemeti başta olmak suretiyle farklı etkileri halen araştırmaya muhtaç bir konudur. Bu durum geri dönüşüm maliyetlerinin de ortadan kaldırılması ve böylece uygulamanın düşük maliyetli bir sürece dönüşmesi açısından önemlidir. Hatta bu konuda kısa ve orta vadede çevresel koşullara maruz kalmış gerek su, toprak vb. kontrolsüz ortamlarda bulunan plastik atıkların hem de yeni oluşmuş plastik atıkların karşılaştırmalı değerlendirmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

#### REFERANSLAR

- [1] Plastics Europe, "Plastics the fact 2021", *Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.*, ss. 1-34, 2021.
- [2] F. Field Actions Science Reports, "Plastics Recycling Worldwide : Current Overview and Desirable", *Reinventing Plastics*, sy 19, s. 11, 2019.
- [3] J. Dullius, C. Ruecker, V. Oliveira, R. Ligabue, ve S. Einloft, "Chemical recycling of post-consumer PET: Alkyd resins synthesis", *Prog Org Coat*, c. 57, sy 2, ss. 123-127, Eki. 2006, doi: 10.1016/j.porgcoat.2006.07.004.
- [4] J. D. Badia, E. Strömberg, S. Karlsson, ve A. Ribes-Greus, "The role of crystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET)", *Polym Degrad Stab*, c. 97, sy 1, ss. 98-107, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.10.008.
- [5] S. Papong vd., "Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective", *J Clean Prod*, c. 65, ss. 539-550, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.09.030.
- [6] R. Geyer, J. R. Jambeck, ve K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Sci Adv*, c. 3, sy 7, Tem. 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [7] J. Siddiqui ve G. Pandey, "A Review of Plastic Waste Management Strategies", *Int. Res. J. Environment Sci. International Science Congress Association*, c. 2, sy 12, ss. 84-88, 2013.
- [8] R. J. Morris, "Floating plastic debris in the Mediterranean", *Mar Pollut Bull*, c. 11, sy 5, s. 125, 1980, doi: 10.1016/0025-326X(80)90073-9.
- [9] A. Golik ve Y. Gertner, "Litter on the israeli coastline", *Mar Environ Res*, c. 33, sy 1, ss. 1-15, 1992, doi: 10.1016/0141-1136(92)90002-4.
- [10] B. S. Galil, A. Golik, ve M. Türkay, "Litter at the bottom of the sea: A sea bed survey in the Eastern Mediterranean", *Mar Pollut Bull*, c. 30, sy 1, ss. 22-24, 1995, doi: 10.1016/0025-326X(94)00103-G.
- [11] J. G. Shiber, "Plastic pellets on the coast of Lebanon", *Mar Pollut Bull*, c. 10, sy 1, ss. 28-30, 1979, doi: 10.1016/0025-326X(79)90321-7.
- [12] A. Stefatos, M. Charalampakis, G. Papatheodorou, ve G. Ferentinos, "Marine debris on the seafloor of the Mediterranean Sea: Examples from two enclosed gulfs in western Greece", *Mar Pollut Bull*, c. 38, sy 5, ss. 389-393, 1999, doi: 10.1016/S0025-326X(98)00141-6.
- [13] M. Bergmann, L. Gutow, ve M. Klages, *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3.

- [14] R. Coyle, G. Hardiman, ve K. O. Driscoll, “Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, c. 2, s. 100010, 2020, doi: 10.1016/j.cscee.2020.100010.
- [15] J. R. Jambeck vd., “Plastic waste inputs from land into the ocean”, *Ciencia*, c. 347, sy 6223, ss. 768-771, 2015.
- [16] M. Siegfried, A. A. Koelmans, E. Besseling, ve C. Kroeze, “Export of microplastics from land to sea. A modelling approach”, *Water Res*, c. 127, ss. 249-257, 2017, doi: 10.1016/j.watres.2017.10.011.
- [17] L. C. M. Lebreton, J. Van Der Zwet, J. W. Damsteeg, B. Slat, A. Andrady, ve J. Reisser, “River plastic emissions to the world’s oceans”, *Nat Commun*, c. 8, ss. 1-10, 2017, doi: 10.1038/ncomms15611.
- [18] M. Bergmann, L. Gutow, ve M. Klages, *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3.
- [19] J. P. da Costa, P. S. M. Santos, A. C. Duarte, ve T. Rocha-Santos, “(Nano)plastics in the environment - Sources, fates and effects”, *Science of the Total Environment*, c. 566-567, ss. 15-26, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.041.
- [20] M. Wagner ve S. Lambert, “Modeling the Fate and Transport of Plastic Debris in Freshwaters: Review and Guidance”, içinde *Freshwater Microplastics - The Handbook of Environmental Chemistry*, 2018, s. 302. doi: 10.1007/978-3-319-61615-5.
- [21] H. S. Auta, C. U. Emenike, ve S. H. Fauziah, “Distribution and importance of microplastics in the marine environment A review of the sources, fate, effects, and potential solutions”, *Environ Int*, c. 102, ss. 165-176, 2017, doi: 10.1016/j.envint.2017.02.013.
- [22] S. B. Sheavly ve K. M. Register, “Marine debris & plastics: Environmental concerns, impacts and solutions”, *J Polym Environ*, c. 15, sy 4, ss. 301-305, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0074-3.
- [23] S. Gündoğdu, İ. N. Yeşilyurt, ve C. Erbaş, “Potential interaction between plastic litter and green turtle *Chelonia mydas* during nesting in an extremely polluted beach”, *Mar Pollut Bull*, c. 140, sy January, ss. 138-145, 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.01.032.
- [24] S. Gündoğdu, C. Çevik, ve N. Temiz Atas, “Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tracts of some edible fish species along the Turkish coast”, *Turkish Journal of Zoology*, c. 44, sy 4, ss. 312-323, 2020, doi: 10.3906/zoo-2003-49.
- [25] D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, ve M. Barlaz, “Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, c. 364, sy 1526, ss. 1985-1998, 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0205.
- [26] M. A. Browne vd., “Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks”, *Environ Sci Technol*, c. 45, sy 21, ss. 9175-9179, 2011, doi: 10.1021/es201811s.
- [27] S. Gündoğdu ve C. Çevik, “Micro- and mesoplastics in Northeast Levantine coast of Turkey: The preliminary results from surface samples”, *Mar Pollut Bull*, c. 118, sy 1-2, ss. 341-347, 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.03.002.
- [28] A. Cózar vd., “Plastic accumulation in the mediterranean sea”, *PLoS One*, c. 10, sy 4, ss. 1-12, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0121762.
- [29] N. Bakaraki Turan, H. Sari Erkan, ve G. Onkal Engin, “Current status of studies on microplastics in the world’s marine environments”, *J Clean Prod*, c. 327, sy May, s. 129394, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129394.
- [30] A. L. Andrady, “Microplastics in the marine environment”, *Mar Pollut Bull*, c. 62, sy 8, ss. 1596-1605, 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
- [31] E. L. Teuten vd., “Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, c. 364, sy 1526, ss. 2027-2045, 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0284.
- [32] K. L. Law ve R. C. Thompson, “Microplastics in the seas”, *Science (1979)*, c. 345, sy 6193, ss. 144-145, Tem. 2014, doi: 10.1126/science.1254065.
- [33] J. Munyaneza vd., “A review of atmospheric microplastics pollution: In-depth sighting of sources, analytical methods, physiognomies, transport and risks”, *Science of The Total Environment*, c. 822, s. 153339, May. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153339.
- [34] Z. Liu vd., “Distribution and possible sources of atmospheric microplastic deposition in a valley basin city (Lanzhou, China)”, *Ecotoxicol Environ Saf*, c. 233, s. 113353, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113353.
- [35] M. Sajjad vd., “Microplastics in the soil environment: A critical review”, *Environ Technol Innov*, c. 27, s. 102408, Ağu. 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102408.
- [36] G. S. Zhang ve Y. F. Liu, “The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China”, *Science of The Total Environment*, c. 642, ss. 12-20, Kas. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.004.

- [37] P. S. Ross vd., “Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic inputs”, *Nat Commun*, c. 12, sy 1, ss. 4-12, 2021, doi: 10.1038/s41467-020-20347-1.
- [38] E. Rota, E. Bergami, I. Corsi, ve R. Bargagli, “Macro- and Microplastics in the Antarctic Environment: Ongoing Assessment and Perspectives”, *Environments - MDPI*, c. 9, sy 7, ss. 1-17, 2022, doi: 10.3390/environments9070093.
- [39] H. A. Leslie, M. J. M. van Velzen, S. H. Brandsma, A. D. Vethaak, J. J. Garcia-Vallejo, ve M. H. Lamoree, “Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood”, *Environ Int*, c. 163, s. 107199, May. 2022, doi: 10.1016/j.envint.2022.107199.
- [40] T. Ochi, S. Okubo, ve K. Fukui, “Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber”, *Cem Concr Compos*, c. 29, sy 6, ss. 448-455, Tem. 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002.
- [41] Y. W. Choi, D. J. Moon, Y. J. Kim, ve M. Lachemi, “Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles”, *Constr Build Mater*, c. 23, sy 8, ss. 2829-2835, Ağu. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036.
- [42] H. A. Bulut ve R. Şahin, “A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste”, *Compos Struct*, c. 178, ss. 50-62, Eki. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.058.
- [43] A. ben Fraj, M. Kismi, ve P. Mounanga, “Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete”, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010i.
- [44] M. Frigione, “Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete”, *Waste Management*, c. 30, sy 6, ss. 1101-1106, Haz. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
- [45] S. M. Hama ve N. N. Hilal, “Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, c. 6, sy 2, ss. 299-308, Ara. 2017, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2017.01.001.
- [46] B. Jaivignesh ve A. Sofi, “Study on Mechanical Properties of Concrete Using Plastic Waste as an Aggregate”, içinde *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ağu. 2017, c. 80, sy 1. doi: 10.1088/1755-1315/80/1/012016.
- [47] A. Ramesan, S. S. Babu, ve A. Lal, “Performance of Light-Weight Concrete with Plastic Aggregate”, 2015. [Çevrimiçi]. Available: www.ijera.com
- [48] A. J. Babafemi, B. Şavija, S. C. Paul, ve V. Anggraini, “Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review”, *Sustainability (Switzerland)*, c. 10, sy 11. MDPI, Eki. 25, 2018. doi: 10.3390/su10113875.
- [49] G. v. Dhanani ve P. D. Bhimani, “Effect of Use Plastic Aggregates as Partial Replacement of Natural Aggregates in Concrete with Plastic Fibres”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, [Çevrimiçi]. Available: www.irjet.net
- [50] E. Rahmani, M. Dehestani, M. H. A. Beygi, H. Allahyari, ve I. M. Nikbin, “On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles”, *Constr Build Mater*, c. 47, ss. 1302-1308, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
- [51] Z. Z. Ismail ve E. A. AL-Hashmi, “Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement”, *Waste Management*, c. 28, sy 11, ss. 2041-2047, Kas. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.
- [52] B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, ve M. Maallem, “The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties”, *Constr Build Mater*, c. 43, ss. 436-442, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049.
- [53] N. Saikia ve J. de Brito, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 34, ss. 385-401, Eyl. 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [54] K. Hannawi ve W. Prince-Agbodjan, “Transfer behaviour and durability of cementitious mortars containing polycarbonate plastic wastes”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, c. 19, sy 4, ss. 467-481, Nis. 2015, doi: 10.1080/19648189.2014.960100.
- [55] K. S. Kumar ve K. Baskar, “Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries”, *J Mater Cycles Waste Manag*, c. 17, sy 4, ss. 718-724, Eki. 2015, doi: 10.1007/s10163-014-0303-5.
- [56] K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, ve W. Prince, “Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates”, *Waste Management*, c. 30, sy 11, ss. 2312-2320, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.028.
- [57] G. Sosoi, M. Barbuta, A. A. Serbanoiu, D. Babor, ve A. Burlacu, “Wastes as aggregate substitution in polymer concrete”, içinde *Procedia Manufacturing*, 2018, c. 22, ss. 347-351. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.052.



- [58] S. Yang, X. Yue, X. Liu, ve Y. Tong, “Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles”, *Constr Build Mater*, c. 84, ss. 444-453, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038.
- [59] C.-C. Chen, N. Jaffe, M. Koppitz, W. Weimer, ve A. Polocoser, “CONCRETE MIXTURE WITH PLASTIC AS FINE AGGREGATE REPLACEMENT”, 2015.
- [60] C. Jacob-Vaillancourt ve L. Sorelli, “Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams”, *Constr Build Mater*, c. 182, ss. 561-572, Eyl. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.083.
- [61] W. C. Tang, Y. Lo, ve A. Nadeem, “Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete”, *Cem Concr Compos*, c. 30, sy 5, ss. 403-409, May. 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002.
- [62] R. Ravindrarajah, “Institute for Research in Construction”, 1999.
- [63] S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas, ve A. Faqiri, “Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review”, *Waste Management*, c. 113. Elsevier Ltd, ss. 157-175, Tem. 15, 2020. doi: 10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- [64] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, ve A. Alaskar, “Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 253. Elsevier Ltd, Ağu. 30, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.
- [65] S. C. Kou, G. Lee, C. S. Poon, ve W. L. Lai, “Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes”, *Waste Management*, c. 29, sy 2, ss. 621-628, Şub. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.
- [66] J. Premalatha ve S. A. Ahamed, “EXPERIMENTAL STUDY ON CONCRETE WITH PLASTIC AGGREGATES”, *SSRG International Journal of Civil Engineering- (ICRTCETM-2017)*, ss. 358-363, 2017, [Çevrimiçi]. Available: [www.internationaljournalsrsg.org](http://www.internationaljournalsrsg.org)
- [67] W. L. Tamang Thingh, T. Wangmo, K. T. Darjay, K. S. Phuntsho, P. Namgyal, ve U. Wangchuk, “Use of Plastics in Concrete as Coarse Aggregate”, *International Journal of Education and applied research*, c. 7, sy 2, ss. 9-13, 2017.
- [68] R. Lakshmi ve S. Nagan, “INVESTIGATIONS ON DURABILITY CHARACTERISTICS OF E-PLASTIC WASTE INCORPORATED CONCRETE”, 2011. [Çevrimiçi]. Available: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)
- [69] M. Prakash ve B. Hemalatha, “Replacement of Waste Material in Concrete using Recycled Plastic”, *International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE)*, c. 6, sy 3, ss. 41-46, 2019.
- [70] P. Mathew, S. Varghese, T. Paul, ve E. Varghese, “Recycled Plastics as Coarse Aggregate for Structural Concrete”, *Int J Innov Res Sci Eng Technol*, c. 2, 2013, [Çevrimiçi]. Available: [www.ijrset.com](http://www.ijrset.com)
- [71] A. M. Azhdarpour, M. R. Nikoudel, ve M. Taheri, “The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; A laboratory evaluation”, *Constr Build Mater*, c. 109, ss. 55-62, Nis. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.
- [72] A. C. Bhogayata ve N. K. Arora, “Impact strength, permeability and chemical resistance of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers”, *Constr Build Mater*, c. 161, ss. 254-266, Şub. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.135.
- [73] T. R. Naik, S. S. Singh, C. O. Huber, ve B. S. Brodersen, “Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites”, *Cem Concr Res*, c. 26, sy 10, ss. 1489-1492, 1996, doi: 10.1016/0008-8846(96)00135-4.
- [74] L. Ferreira, J. de Brito, ve N. Saikia, “Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate”, *Constr Build Mater*, c. 36, ss. 196-204, Kas. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098.
- [75] S. B. Kim, N. H. Yi, H. Y. Kim, J. H. J. Kim, ve Y. C. Song, “Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete”, *Cem Concr Compos*, c. 32, sy 3, ss. 232-240, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
- [76] N. Pešić, S. Živanović, R. Garcia, ve P. Papastergiou, “Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres”, *Constr Build Mater*, c. 115, ss. 362-370, Tem. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050.
- [77] M. Gesoglu, E. Güneyisi, O. Hansu, S. Etlı, ve M. Alhassan, “Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder”, *Constr Build Mater*, c. 140, ss. 562-569, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139.
- [78] J. L. Ruiz-Herrero vd., “Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste”, *Constr Build Mater*, c. 104, ss. 298-310, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005.

- [79] C. Aciu, D. A. Ilutiu-Varvara, D. L. Manea, Y. A. Orban, ve F. Babota, "Recycling of plastic waste materials in the composition of ecological mortars", içinde *Procedia Manufacturing*, 2018, c. 22, ss. 274-279. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.042.
- [80] C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, ve A. Gutiérrez, "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios", *Waste Management*, c. 29, sy 10, ss. 2707-2716, Eki. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.
- [81] S. Akçaözöğlü, C. D. Atiş, ve K. Akçaözöğlü, "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete", *Waste Management*, c. 30, sy 2, ss. 285-290, Şub. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.
- [82] R. Umadevi, C. R. Shashi Kiran, ve S. S. Sahana, "Recycled Plastics and Crushed Rock Powder As Coarse Aggregate and Fine Aggregate in Structural Concrete", *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT)*, c. 3, sy 19, 2015, [Çevrimiçi]. Available: www.ijert.org
- [83] B. S. Al-Tulaian, M. J. Al-Shannag, ve A. R. Al-Hozaimy, "Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar", *Constr Build Mater*, c. 127, ss. 102-110, Kas. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131.
- [84] K. Hannawi, W. Prince, ve S. K. Bernard, "Strain Capacity and Cracking Resistance Improvement in Mortars by Adding Plastic Particles", 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.
- [85] F. Iucolano, B. Liguori, D. Caputo, F. Colangelo, ve R. Cioffi, "Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties", *Mater Des*, c. 52, ss. 916-922, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.025.
- [86] A. Akram, C. Sasidhar, ve K. Mehraj Pasha, "E-Waste Management by Utilization of E-Plastics in Concrete Mixture as Coarse Aggregate Replacement", *Int J Innov Res Sci Eng Technol*, c. 04, sy 07, ss. 5087-5095, Tem. 2015, doi: 10.15680/ijirset.2015.0407008.
- [87] B. Coppola, L. Courard, F. Michel, L. Incarnato, P. Scarfato, ve L. di Maio, "Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates", *Constr Build Mater*, c. 170, ss. 200-206, May. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083.
- [88] M. M. Rahman, M. A. Mahi, ve T. U. Chowdhury, "Utilization of waste PET bottles as aggregate in masonry mortar", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, c. 2, sy 11, ss. 1030-1035, 2013, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259646892>
- [89] A. Kan ve R. Demirboğa, "A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates", *J Mater Process Technol*, c. 209, sy 6, ss. 2994-3000, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017.
- [90] V. Ferrándiz-Mas ve E. García-Alcofel, "Durability of expanded polystyrene mortars", *Constr Build Mater*, c. 46, ss. 175-182, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029.
- [91] M. B. Hossain, P. Bhowmik, ve K. M. Shaad, "Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent material", 2016.
- [92] R. v. Silva, J. de Brito, ve N. Saikia, "Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates", *Cem Concr Compos*, c. 35, sy 1, ss. 23-31, Oca. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.
- [93] P. Soroushian, A. I. Eldarwish, A. Tlili, ve K. Ostowari, "Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete", *Magazine of Concrete Research*, c. 51, sy 1, ss. 27-33, 1999.
- [94] R. Saxena, S. Siddique, T. Gupta, R. K. Sharma, ve S. Chaudhary, "Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste", *Constr Build Mater*, c. 176, ss. 415-421, Tem. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019.