

CİHANNÜMA

TEKNOLOJİ, FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

AKADEMİ DERGİSİ

2024 EKİM CİLT 3 SAYI 2
www.cihannumaakademi.org

**Cihannüma Teknoloji, Fen ve Mühendislik
Bilimleri Akademi Dergisi**
Journal of Cihannuma Technology, Engineering and
Natural Sciences Academy

ISSN: 2822-2342
E-ISSN: 2822-356X

Periyot / Period
Yılda iki sayı yayımlanır.
This journal is published biannually.

Cilt: 3 - Sayı: 2 - EKİM 2024
Volume: 3 - Issue: 2 - OCTOBER 2024

www.cihannumaakademi.org/cfbad
www.cihannumaacademy.org

Ankara- TÜRKİYE
Aralık 2025

CİHANNÜMA

TEKNOLOJİ, FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

AKADEMİ DERGİSİ

www.cihannumaakademi.org

Yayımcı / Publisher

Cihannüma Dayanışma ve
İşbirliği Derneği (Adına)

Selim CERRAH

On behalf of the Cihannuma Solidarity and
Cooperation Association

Selim CERRAH

Editör / Editor

Doç. Dr. Kadri DOĞAN
Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye

Assoc. Prof. Kadri DOĞAN
Artvin Çoruh University, Türkiye

dogankadri@artvin.edu.tr

Editör Yardımcısı / Assistant Editor

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Çağrı
AKSU
Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye

Asst. Prof. Üyesi Muhammed
Çağrı AKSU
Artvin Çoruh University, Türkiye

cagriaksu@artvin.edu.tr

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Adnan ÇALIK
*Isparta Uygulamalı Bilimler
Üniversitesi, Türkiye
Makine Mühendisliği*

Prof. Dr. Adnan ÇALIK
*Isparta University of Applied
Sciences, Türkiye
Mechanical Engineering*

adnancalik@isparta.edu.tr

Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY
*Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Matematik*

Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY
*Yıldız Technical University, Türkiye
Mathematics*

ersoya@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Burak YÖN
Munzur Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Burak YÖN
Munzur University, Türkiye

burakyon@munzur.edu.tr

Prof. Dr. Erol KAM
*İstanbul Teknik Üniversitesi,
Türkiye
Fizik*

Prof. Dr. Erol KAM
*İstanbul Technical University,
Türkiye
Physics*

kamerol@itu.edu.tr

Prof. Dr. Doğan KARADAĞ
*Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Çevre Mühendisliği*

Prof. Dr. Doğan KARADAĞ
*Yıldız Technical University, Türkiye
Environmental Engineering*

dkaradag@yildiz.edu.tr

Doç. Dr. Abid BALİN
*İstanbul Üniversitesi, Türkiye
Endüstri Mühendisliği*

Assoc. Prof. Abid BALİN
*İstanbul Univ., Türkiye
Industrial Engineering*

abitbalin@istanbul.edu.tr

Doç. Dr. Zeki Ünal YÜMÜN
*Tekirdağ Namık Kemal
Üniversitesi, Türkiye
Jeoloji Mühendisliği*

Assoc. Prof. Zeki Ünal YÜMÜN
*Tekirdağ Namık Kemal
University, Türkiye
Geological Engineering*

zyumun@nku.edu.tr

Doç. Dr. Yaşar KAHRAMAN <i>Sakarya Üniversitesi, Türkiye Makine Mühendisliği</i>	Assoc. Prof. Yaşar KAHRAMAN <i>Sakarya University, Türkiye, Mechanical Engineering</i>
kahraman@sakarya.edu.tr	
Doç. Dr. Mehmet Arif KAYA <i>Yalova Üniversitesi, Türkiye Kimya Mühendisliği</i>	Assoc. Prof. Mehmet Arif KAYA <i>Yalova University, Türkiye Chemical Engineering</i>
marifkaya@yalova.edu.tr	
Doç. Dr. Ümit GÜNEŞ Yıldız <i>Teknik Üniversitesi, Türkiye Gemi Mühendisliği</i>	Assoc. Prof. Ümit GÜNEŞ <i>Yıldız Technical University, Türkiye Naval Engineering</i>
ugunes@yildiz.edu.tr	

Yayın Kurulu / Editorial Board	
Prof. Dr. Aslan GÜLCÜ <i>Atatürk Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Aslan GÜLCÜ <i>Atatürk University, Turkey</i>
Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY <i>Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY <i>Yıldız Technical University, Turkey</i>
Prof. Dr. Bayram ŞAHİN <i>Ege Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Bayram ŞAHİN <i>Ege University, Turkey</i>
Prof. Dr. Bijan Davvaz <i>Yazd Üniversitesi, İran</i>	Prof. Dr. Bijan Davvaz <i>Yazd University, Iran</i>
Prof. Dr. Bünyamin AYDIN <i>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Bünyamin AYDIN <i>Necmettin Erbakan University, Turkey</i>
Prof. Dr. Ekrem SAVAŞ <i>Uşak Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Ekrem SAVAŞ <i>Uşak University, Turkey</i>
Prof. Dr. Erol KAM <i>İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Erol KAM <i>Istanbul Technical University, Turkey</i>
Prof. Dr. Fahrettin GÖKTAŞ <i>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Fahrettin GÖKTAŞ <i>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Turkey</i>
Prof. Dr. Fatih NURAY <i>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Fatih NURAY <i>Afyon Kocatepe University, Turkey</i>
Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA <i>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Mehmet Hakkı ALMA <i>Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Turkey</i>
Prof. Dr. Hasan GENÇ <i>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Hasan GENÇ <i>Van Yüzüncü Yıl University, Turkey</i>
Prof. Dr. İsmail KÜÇÜK <i>İstanbul Sebahattin Zaim Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. İsmail KÜÇÜK <i>Istanbul Sabahattin Zaim University, Turkey</i>

Prof. Dr. Jintai DİNG Tsinhgua <i>Cincinnati Üniversitesi, Amerika Birleşik Devletler</i>	Prof. Dr. Jintai DING Tsinhgua <i>University of Cincinnati, United States of America</i>
Prof. Dr. Kostaq Hila <i>Tiran Polytechnic Üniversitesi, Arnavutluk</i>	Prof. Dr. Kostaq Hila <i>Polytechnic University of Tirana, Albania</i>
Prof. Dr. Lokman Hakan TECER <i>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Lokman Hakan TECER <i>Tekirdağ Namık Kemal University, Turkey</i>
Prof. Dr. Lokman KUZU <i>Karabük Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Lokman KUZU <i>Karabük University, Turkey</i>
Prof. Dr. Mehmet KARACA <i>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Mehmet KARACA <i>Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Turkey</i>
Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK <i>İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK <i>Istanbul Technical University, Turkey</i>
Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ <i>Marmara Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ <i>Marmara University, Turkey</i>
Prof. Dr. Mustafa BÖYÜKATA <i>Yozgat Bozok Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Mustafa BÖYÜKATA <i>Yozgat Bozok University, Turkey</i>
Prof. Dr. Mustafa Kasım KARAHOCAĞİL <i>Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Mustafa Kasım KARAHOCAĞİL <i>Kırşehir Ahi Evran University, Turkey</i>
Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>Istanbul Commerce University, Turkey</i>
Prof. Dr. Nevzat AYDIN <i>Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Nevzat AYDIN <i>Karamanoğlu Mehmet Bey University, Turkey</i>
Prof. Dr. Sophiana TAHAR <i>Concordia University, Canada</i>	Prof. Dr. Sophiana TAHAR <i>Concordia University, Canada</i>
Prof. Dr. Vatan KARAKAYA <i>Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye</i>	Prof. Dr. Vatan KARAKAYA <i>Yıldız Technical University, Turkey</i>
Prof. Dr. Violeta Fotea Alexandru <i>Ioan Cuza Üniversitesi, Romanya</i>	Prof. Dr. Violeta Fotea Alexandru <i>Ioan Cuza University, Romania</i>
Prof. Dr. Salem Abdullah <i>Abdul Wali Khan Üniversitesi Mardan, Pakistan</i>	Prof. Dr. Salem Abdullah <i>Abdul Wali Khan University Mardan, Pakistan</i>
Dr. İbrahim Taşdemir <i>Milli Eğitim Bakanlığı, Türkiye</i>	Dr. İbrahim Taşdemir <i>Ministry of National Education, Turkey</i>

Amaç ve Kapsam

CİHANTEFMAD Teknoloji, Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi, teknoloji, mühendislik ve doğa bilimlerindeki son gelişmeleri bilim insanlarına ve okuyucularına ulaştırmayı hedefler. Dergi, bu üç temel alandaki deneysel ve kuramsal çalışmalarını kendisine konu edinir.

CİHANTEFMAD Teknoloji, Fen ve Mühendislik Bilimleri alanlarında yapılan özgün çalışmaları yayımlayan, mevcut bilimsel literatürü geliştirerek bilimsel çevrelere sunan, saygın, bilimsel bir dergi olarak Türkçe, İngilizce ve Arapça dillerinde yazılmış araştırma makalelerine ve eser tanıtma yazılarına yer veren, uluslararası hakemli bir dergidir.

Aim and Scope

JOCTENSA Journal of Cihannuma Technology, Natural Science and Engineering Academy aims to provide scientists and readers with the latest developments in technology, engineering and natural sciences. The journal focuses on experimental and theoretical studies in the abovementioned three main areas.

JOCTENSA is an international peer-reviewed journal that publishes authentic studies in the fields of Science, Technology and Engineering Sciences; expands the existing scientific literature and disseminates the studies within scientific circles. As a respected scientific journal, it includes research articles and work reviews written in Turkish, English and Arabic languages.

Dizinler / Indexing and Abstracting

Cihantefmad Akademi Dergisi aşağıdaki uluslararası indeksler tarafından taranmaktadır:

JOCTENSA is indexed and listed by the following international indexing services:

- Crossref
- Google Scholar
- Asos İndeks
- Harward Library
- ROAD
- ASCI
- ASCI
- EuroPub
- Academic Resource Index

Makale İşleme Ücreti / Article Processing Charge

Makaleler için makale işleme ücreti talep edilmez.

The journal does not charge an Article Processing Fee (APC).

Hakemlik/ Peer-review

Dergi çift taraflı kör hakemlik sistemi kullanır. Hakem listesi her yılın sonunda dergi web sayfasında yayımlanır.

The journal uses a double-sided blind review system. The referee list is published on the web page at the end of each year.

Açık Erişim / Open Access

Dergi açık erişimlidir (CC BY-NC).

The journal is an Open Access (CC BY-NC).

Adres / Executive Office

Hacı Bayram Mah. Haşimi (Kutlu) Sok. No: 12 Altındağ, Ankara, Türkiye
cihantefmad@gmail.com

Web siteleri / Websites

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/cihantefmad>
<https://www.cihannumaakademi.org/cfbad>
www.cihannumaacademy.org

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Erhan Özkan	1-17
Refrakter Malzemelerin Metalurjik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi <i>Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties for Refractory Materials</i>	
Sabit Korcak, Haluk Keleş, Yaşar Kobya, Cafer Mert Yeşilkanat	18-34
Artvin İli Rüzgar Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi ve Bölgeye Uygun Rüzgar Türbini Kurulumu İçin Fizibilite Araştırması <i>Assessment of Wind Energy Potential in Artvin Province and Feasibility Study for the Installation of a Suitable Wind Turbine in the Region</i>	
Gökhan Güven Batır	35-56
Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına Yönelik İletken Polimerler Üzerine Yapılmış Çalışmalar-WOS Bibliyometrik Analizi <i>Studies on Conducting Polymers for Sustainable Development Goals - WOS Bibliometric Analysis</i>	
Hidayet Takcı.....	57-67
Kohonen Öğrenme Kuralı Yardımıyla Centroid Değerleri Güncelleme <i>Updating Centroid Values Using Kohonen Learning Rule</i>	
Saffet Kılıçer, Yaren Can.....	68-91
Doğal Afetlerin Çelik Yapılarda Aşamalı Göçme Mekanizmasına Etkisi: Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Örneği <i>Effect of Natural Disasters on Progressive Collapse in Steel Structures: Cold-Formed Steel Example</i>	

Refrakter Malzemelerin Metalurjik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Metallurgical and Mechanical Properties for Refractory Materials

Erhan Özkan

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

ORCID: 0000-0002-3849-6713, erhan.ozkan@cbu.edu.tr

Geliş Tarihi: 21 Tem 2025 - **Kabul Tarihi:** 20 Kas 2025

DOI: 10.55205/joctensa.3220241746647

ATIF: Özkan, E., (2025). Refrakter malzemelerin metalurjik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi.
Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(2), 1-17.

ÖZ

Metalurjik süreçlerin büyük bir kısmında yer alan refrakter malzemeler genellikle mekanik dayanımlarını aşan termal gerilimlere maruz kalır ancak bu durum iyi tasarlanmış refrakter astarların büyük maddi hasarlar oluşturacak şekilde başarısız olmasına yol açmaz. Tam aksine kısmen kademeli bir aşınma sürecine tabi tutulur ve hasara rağmen yapısal stabilitelerini korurlar. Bu nedenle çekme mukavemeti dikkate alınarak gerçekleştirilen klasik mekanik testler refrakter ürünlerin hasara karşı direncini ölçmek için yeterli değildir. Kırılma sürecinin ve refrakter malzemelerin hasara karşı direncinin tespitindeki önemli ilerlemelere rağmen tipik refrakter malzemelerin özellikle yüksek sıcaklıktaki kırılma davranışına ilişkin ampirik veriler ve bilimsel çalışmalar halen yeterli seviyeye ulaşamamıştır. Bu çalışmanın amacı bahsi geçen eksikliği giderecek akademik ve teknik uygulamaların detaylarının aktarıldığı bir makalenin literatüre kazandırılmasıdır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan dört tipik refrakter malzeme üzerinde refrakter malzemelerin kırılma davranışını araştırmak için oldukça etkili olduğu kanıtlanan kama yarıma testleri 1500°C'ye kadar gerçekleştirilmiş ve bulgular mikroskopik incelemelerle desteklenmiştir. Çalışma neticesinde Andalüzit tuğlaların özgül kırılma enerjisinin 1100°C'nin üzerinde sıvı fazın oluşmasıyla önemli ölçüde zayıfladığı, silika tuğlalarının ise 1000°C'de güçlü bir şekilde yükseldiği gözlenirken, 1100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gevrek bir kırılma karakteri gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Refrakter malzemeler, Hasar analizi, Metalurjik özellikler, Mekanik dayanım.

ABSTRACT

Refractory materials involved in most metallurgical processes are often exposed to thermal stresses exceeding their mechanical strength, but this does not cause well-designed refractory linings to fail causing major material damage. On the contrary, they are partially subjected to a gradual wear process and maintain their structural stability despite damage. For this reason, classical mechanical tests performed by considering tensile strength are not sufficient to measure the resistance of refractory products to damage. Despite significant advances in the determination of the fracture process and the resistance of refractory materials to damage, empirical data and scientific studies on the fracture behaviour of typical refractory materials,

* Sorumlu Yazar: erhan.ozkan@cbu.edu.tr

especially at high temperatures, have still not reached a sufficient level. The aim of this study is to contribute to literature an article detailing the academic and technical applications that will eliminate the mentioned deficiency. For this purpose, wedge splitting tests, which have proven to be quite effective for investigating the fracture behaviour of refractory materials, were carried out up to 1500°C on four typical refractory materials commonly used, and the findings were supported by microscopic examinations. As a result of the study, it has been determined that the specific fracture energy of Andalusite bricks weakens significantly with the formation of the liquid phase above 1100°C, while the specific fracture energy of silica bricks increases strongly at 1000°C, and shows a brittle fracture character at temperatures above 1100°C.

Keywords: Refractory materials, Failure analysis, Metallurgical properties, Mechanical strength.

GİRİŞ

Refrakter astarlar yüksek sıcaklık gerektiren işlemlerden kaynaklanan ısıya karşı dayanıklı olmasının yanında ısıyı hapsedmesi ve içte kalan alanın sıcaklığının sabit kalması amaçlanarak tasarlanıp kullanılmaktadır ve bu durum kalınlıkları içerisinde büyük sıcaklık farklılıklarına neden olmaktadır (Stec ve diğerleri, 2021). Sıcak yüz olarak adlandırılan astarın bir tarafı doğrudan proses ısısına maruz kalır ve buna bağlı olarak yüksek sıcaklıklarla temas halinde olurken diğer tarafı çok daha düşük sıcaklıklarda işlem görür. Astarın bu çalışma prensibi önemli termal gradyanlar oluşturmaktadır. Isıyla temas halinde olan yüzeylerin genleşmeye çalışması, alt taraftaki kısmen soğuk parçaların serbest termal genleşmesi ve hiç ısıya maruz kalmayan parçaların sınırladığı alanlar termal gerilmelere sebep olur. İki bitişik eleman aynı fiziksel alanda genişleyemez, fiziksel olarak birbirine bağlı iki eleman da sonuçsuz olarak farklı gerilimlere maruz kalmaz. Ortaya çıkan termal gerilmeler tipik olarak refrakter malzemenin mekanik mukavemetini aşar ve buna bağlı olarak kırılmayı başlatabilir (Mamen ve diğerleri, 2019). Bununla birlikte, iyi tasarlanmış modern refrakter malzemeler ve astarlar genellikle felaketle sonuçlanacak şekilde arızalanmaz, bunun yerine kısmi aşamalı bir aşınmaya maruz kalarak mevcuttaki önemli hasarına rağmen genellikle çalışmaya devam etmek için yeterli yapısal stabiliteyi korur. Ciddi derecede çatlamış refrakter astarlar bile çoğu zaman büyük parçalara ayrılmamaktadır (Liu ve diğerleri, 2024). Bunun doğrudan bir sonucu olarak, yıkıcı kırılma meydana gelmeden hemen önce yalnızca maksimum mukavemeti değerlendiren kopma modülü ölçümleri gibi basit kırılma testleri, refrakter malzemelerin konuyla ilgili başarısızlık davranışını ve özelliklerini tespit etme konusunda yetersiz kalmaktadır (Horvat ve Ducman, 2020). Refrakter malzemeler için kırılma başlangıcına karşı dirençlerini test etmekten çok daha fazlasına yani refrakterlerin hasara karşı direncini araştırmak ve ölçmek için hem temel hem de pratik verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Kırılmaya eğilimli olan çoğu teknik seramik ve camın aksine refrakter malzemeler saf kırılma davranışından farklı bir davranış sergilerler. Yapılarındaki büyük ve mukavemeti yüksek agregatların varlığı ana çatlak ve/veya çatlakların başlangıç bölgesindeki düz ilerlemelerini saptırmakla birlikte dislokasyon hareketlerinde olduğu gibi iz bölgesindeki deformasyonlara barikat oluşturacak şekilde çatlak ilerlemesini engeller. Bu durum çok büyük iç gerilmeleri oluşturarak malzemenin plastik deformasyona uğramasına ve hatta kırılma, kopma gibi hasarların oluşmasını da beraberinde getirmektedir (Albrecht ve diğerleri, 2017).

Ayrıca diğer etkileşimler ile proses bölgesinde çatlak dallanması ve mikro çatlak ağlarının gelişmesi gibi durumlar potansiyel riskler oluşturmaktadır. Refrakter ürünün türüne bağlı olarak dayanıklılığı ve dolayısıyla refrakterlerin hasar görme direncini arttıracak ek mekanizmaların olduğu varsayılmaktadır (Lee ve diğerleri, 2021). Bunlar genellikle enerji yayma süreçleridir. Böylece enerji, refrakterin zarar görme süreci sırasında tüketilir ancak kırılma alanındaki matrsten uzatılmış taneleri çekmek için yeni kırık yüzeyleri oluşturmak adına doğrudan kullanılamaz. Yüksek tokluk ve buna bağlı olarak termal kaynaklı hasara karşı direnç elde etmek için mikroyapısal tasarım, yüksek performanslı refrakterlerin geliştirilmesi için umut verici ancak zorlu bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır (Liutvy ve diğerleri, 2021).

Literatür araştırmaları neticesinde refrakter ürünlerin hasara karşı direncinin ölçülmesini sağlamak amacıyla Nakayama'nın refrakter ürünler için kırılma mekanizmalarını uygulayarak geliştirdiği gözlenmiş (Nakayama, 1965), sonrasında RC Bradt'ın refrakterdeki kırılma ve hasar sürecinin anlaşılmasına güçlü bir şekilde katkıda bulunduğu tespit edilmiştir (Bradt, 2004). Sonuçta her iki araştırmacı da refrakter ürünlerin zarar verici davranışını ölçmek için kırılma testlerinin kullanımını teşvik edecek çalışmalarda bulunmuştur. Ancak bu testlerin tek başlarına yeterli olmadığı, mekanizmanın anlaşılması için kırılma testi çalışması sırasında stabil çatlak büyümesinin izlenip mekanizmalarının araştırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Horckmans ve diğerleri, 2019). Bu gereklilik neticesinde yapılan araştırmalar, çatlağın test numunesi boyunca yayılması için gereken enerjinin değerlendirilebilir ve spesifik kırılma enerjisinin G_f hesaplanabilir olduğunu ortaya koymuştur. Spesifik kırılma enerjisi ne kadar yüksek olursa hasar verme işlemi sırasında o kadar fazla enerji tüketilir ve termal yayılmaya karşı beklenen direnç de o kadar yüksek olur (Antusch ve diğerleri, 2017).

Çeşitli malzeme sınıfları için geliştirilen farklı kırılma testleri arasında kama yarma testinin (WST) refrakter malzemelerin kırılma davranışını araştırmak için en etkili yöntem olduğu kanıtlanmıştır. İlk olarak Tschegg tarafından inşaat mühendisliğine yönelik beton için geliştirilen yöntemin temel avantajı refrakter ürünlerin tipik kaba taneli yapısını temsil eden yüksek kırılma alanına (yaklaşık 65 mm x 65 mm) rağmen çatlakların istikrarlı bir şekilde yayılmasını teşvik etmektir (Tschegg ve Linsbauer, 1986). Beton malzemelerin çekme mukavemetinin bilinmesi ile yapıya ait analizlerin daha hızlı ve doğruya yakın bir şekilde yapılabilir olmasından ortaya çıkan testin uygulamaları giderek artmış ve kütle betonları, konstrüksiyonlar, yapı tasarımları gibi alanlarda sıklıkla tercih edilen bir hale gelmiştir. Yapısal anlamda benzeyen ancak işlevsel anlamda tamamen farklı bir yöne doğru evrilen refrakter malzemelerin karakterizasyon, bilgisayar destekli tasarım ve simülasyon çalışmalarında kama yarma testi veri alma sürecinde fayda sağlamakta ancak bu verilerin metalurjik ve mekanik olarak değerlendirilmesi kapsamında yetersiz kalmaktadır (Bazhin ve Glaz'ev, 2021). Buna bağlı olarak refrakter ürünlerin kırılma davranışının değerlendirilmesinin öneminin giderek daha fazla anlaşılmasına ve kabul edilmesine rağmen, ampirik verileri ve kıyaslama değerlerini bildiren bilimsel çalışmalar ve yayınlar hâlâ eksiktir. Bu çalışma, uygulamada yaygın olarak kullanılmakta olan dört tipik refrakter ürün (Andaluzit, Alümina, Silika ve Çimento Bağlı Alümina) için bu tür deneysel verileri sağlamayı ve değerlendirilen değer ve mikroskobik incelemeler ışığında gözlemlenen kırılma davranışını tartışmayı amaçlayarak hazırlanmıştır. Seçilen refrakterler farklı sektörlerde yaygın olarak kullanımına göre ve deney aralıkları ise

kullanım esnasında yaşanan sorunların çözümünü bulma amacına hizmet edecek şekilde sınıflandırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

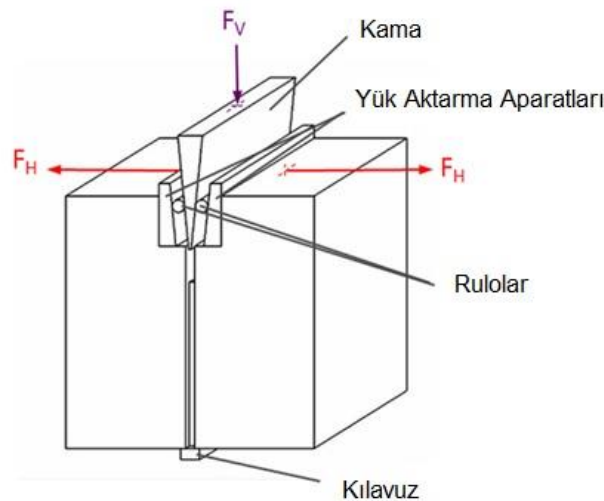
Materyal

Bu çalışmada dört farklı refrakter malzeme ele alınmıştır. Birincisi %99'un üzerinde Al_2O_3 içeriğine sahip ve seramik bağlantılı Alümina tuğlalardır. Özellikle CO ve hidrojen içeren atmosferlere çok yüksek sıcaklıklara kadar dayanıklı olan bu ürünler genellikle petrokimya ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. İkinci malzeme olan Silika tuğlalar %99'un üzerinde amorf SiO_2 içeriğine sahiptir. Asitli ortamlara karşı yüksek dirençleri nedeniyle kimya endüstrisinde, cam endüstrisinde, sıcak tamir malzemesi olarak cam eriticiler ve kok fırını tesislerinde kullanılırlar. %60 Al_2O_3 içerikli seramik bağlı Andaluzit tuğlalar ise; sünme, cüruf korozyonu ve termal şoklara karşı iyi bir direnç sunan çok yönlü bir üründür ve dolayısıyla fırın mühendisliği, demir-çelik endüstrisi, atık yakma ve cam eritme fırınlarındaki birçok uygulama için uygun bir çözümdür. %97'nin üzerinde Al_2O_3 içeriğine sahip yüksek Alümina çimentolu refrakterler dökülebilir karakterdedir (%5 SECAR 71 çimento). Genellikle yüksek termal yük ve gerilime sahip uygulamalar için sahada dökülen, silika içermeyen, şekilsiz bir refrakter üründür.

Yöntem

Kama Yarma Testi

Numuneler $100 \times 100 \times 75$ mm³ ebatlarında işlenip büyük bir oluk açılarak bir kama üzerine bastırılıp test parçası üzerine dikey olarak uygulanan yükü düşük sürtünmeyle ileten bir mekanizmaya uyum sağlanır. Test parçasında bir başlangıç ve iki kılavuz çentiği kesilir. Test sırasında kamanın tepesine uygulanan dikey F_V yükü, kesik oluğun kenarını iten ve test parçasını kontrollü bir şekilde ayrılmaya iten iki yatay F_H kuvvetine dönüştürülür. Şekil 1'de test numunesi ve uygulanan yüklerin yer aldığı görsel yer almaktadır.



Şekil 1. Kama yarma testinin prensibi

Uygulanan kuvvet F_V ve test parçasının açılması δ (çatlak ağzı açıklığının yer değiştirmesi) bir yük yer değiştirme diyagramında izlenir ve derlenir. Spesifik kırılma enerjisi G_f daha sonra yatay kuvvetin yataydaki yer değiştirmeye δ 'nın entegre edilmesiyle hesaplanır.

$$G_f = \frac{1}{A} \cdot \int_0^{\delta_{\max}} F_H \cdot d\delta \quad (1)$$

$\delta_{\max}$, test sırasında test parçasının maksimum yer değiştirmesine karşılık gelir ve A kırılma yüzey alanıdır. Ayrıca aşağıdaki denkleme göre çentik çekme mukavemeti belirlenir:

$$\sigma_{NT} = \frac{F_{H\max}}{b \cdot h} + \frac{6 \cdot F_{H\max} \cdot y}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

Burada $F_{H\max}$, yük/yer değiştirme diyagramında ölçülen maksimum yatay kuvvettir. b ve h , oluşturulan kırılma yüzeyinin genişliğini ve yüksekliğini belirtir, y ise yatay kuvvetin etki çizgisinin ağırlık merkezine dik mesafesini temsil eder (Harmuth ve Tschegg, 1997). Yaklaşım bu parametreleri deneysel olarak iki yolla belirlemektedir. Bunlar, komplians ve pik-yük metodudur. Birinci yöntemde kırılma parametreleri, kapalı devre deney ekipmanı kullanarak, Şekil 1'de görüldüğü gibi çentikli bir üç noktalı eğilme numunesinin (ki bu çalışmada da bu tip numuneler de kullanıldı) Yük-Çatlak Ağzı Açılımı (P-CMOD) ilişkisinden faydalananarak hesaplanır. Modeldeki kritik çatlak boyu, başlangıç ve pik yük sonrası pik yükün %95 değerinde ölçülen gibi iki komplians değerinden faydalananarak hesaplanır. Komplians yönteminde, aynı zamanda başlangıç ve pik yükteki komplians değerlerinden refrakter malzemenin elastisite modülü de hesaplanabilir.

Kama yarma ölçümleri dört farklı refrakter malzemeden yapılmış test parçaları üzerinde üniversal bir presle donatılmış deneysel bir test fırınında oda sıcaklığından 1500°C'ye kadar gerçekleştirildi. Her malzeme için sıcaklık başına üç ölçüm (oda sıcaklığı, 250°C, 450°C, 700°C, 900°C, 1000°C, 1100°C, 1250°C ve 1500°C) 0,5 mm.dak yükleme hızıyla gerçekleştirildi. Test parçalarının termal homojenliğini sağlamak için ölçümlere başlamadan önce test parçaları 1 saat test sıcaklığında tutuldu.

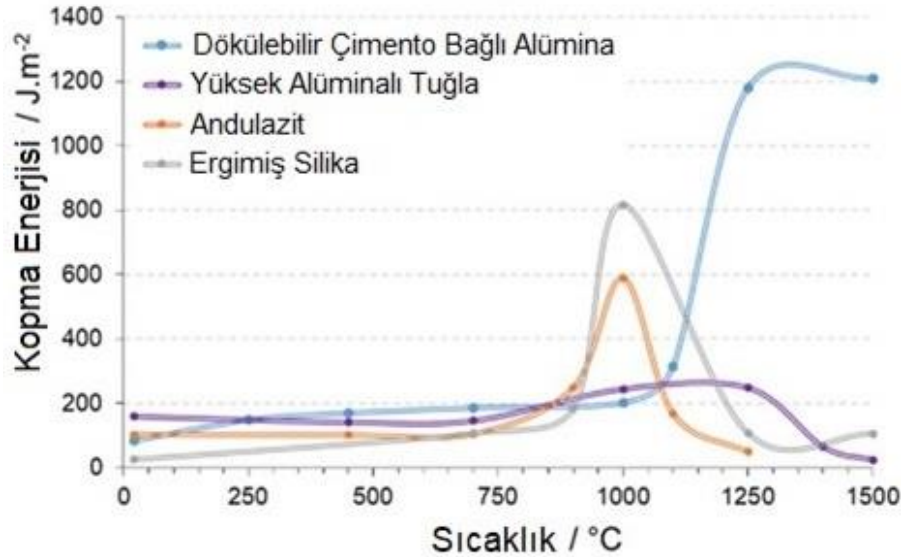
Mikroyapı Analizi

Çatlak yolu geleneksel olarak kırılmanın karakterinin iyi bir göstergesi olduğundan WST'den sonra test parçaları üzerinde mikroskopik incelemeler yapıldı. Tipik olarak uygulanan kuvvet maksimum ölçüm yükünün %90'ının altına düştüğünde WST'ler durdurulur. Sonuç olarak test parçası yukarıdan aşağıya doğru kırılmasına rağmen ölçüm sonunda tek parça halinde kalır. Bu nedenle test parçasının kırılma yüzeyine dik bir düzlemde yukarıdan aşağıya kesilmesiyle çatlak yolu (kesitsel) net bir şekilde gözlenebilir. Kesme işlemi sırasında çatlak kenarının aşınmasını önlemek için çatlağın tabanından epoksi reçine dökülerek süreç takip edilmiştir. Mikroskopik resimler ise Nikon LV150NA Düz Tip Endüstriyel Mikroskop ile alınmıştır.

BULGULAR

Termomekanik Bulgular

Termomekanik testler neticesinde tüm test numuneleri 900°C'nin altında 150 J.m⁻²'yi zorlukla aşan orta düzeyde spesifik kırılma enerjisi sergiledi ki bu durum malzemelerin belirlenen sıcaklık aralığında oldukça kırılma eğilimi sahip olduğunu işaret etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. İncelenen refrakter malzemeler için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çentik gerilme mukavemetinin gelişimi

Test edilen malzemelerin tamamı 900°C'nin üzerinde spesifik kırılma enerjisinde büyük bir artış yaşadı. Bu durum malzemenin sürünme davranışında bir değişiklik olduğunu daha özel olarak da sünekliğin geliştiğini göstermektedir ancak elde edilen süneklik seviyesi ve sıcaklığın daha da artmasıyla malzemelerin davranışları büyük ölçüde farklılık içermektedir (Tablo 1).

Tablo 1. İncelenen refrakter malzemelerin ölçülen termomekanik özellikleri

Sıcaklık (°C)	Malzeme	G _f (J.m ⁻²)	σ _{NT} (MPa)	E (GPa)
Oda Sıcaklığı	Alümina	160	11,5	70
	Andaluzit	103	6,4	40
	Silika	26	2,6	16
	Çimento Bağlı Alümina	85	10	60
250	Çimento Bağlı Alümina	149	10,4	45
450	Alümina	141	11,5	83
	Andaluzit	102	6,2	50
	Çimento Bağlı Alümina	170	11,6	49
700	Alümina	146	11,4	83
	Andaluzit	106	7,4	48

	Silika	107	6,3	40
	Çimento Bağlı Alümina	187	10,3	50
900	Andaluzit	249	7,4	22
	Silika	184	5,8	14
1000	Alümina	245	12,5	53
	Andaluzit	589	7,4	18
	Silika	817	4,4	9
	Çimento Bağlı Alümina	203	8,6	39
1100	Andaluzit	169	2,7	8,5
	Çimento Bağlı Alümina	316	7,7	30
1250	Alümina	249	10,2	50
	Andaluzit	49,3	1,5	9,5
	Silika	108	4,5	40
	Çimento Bağlı Alümina	1181	5,8	16
1400	Alümina	66	2,2	13
1500	Alümina	25	0,8	5
	Silika	106	4,5	35
	Çimento Bağlı Alümina	1210	6,9	16

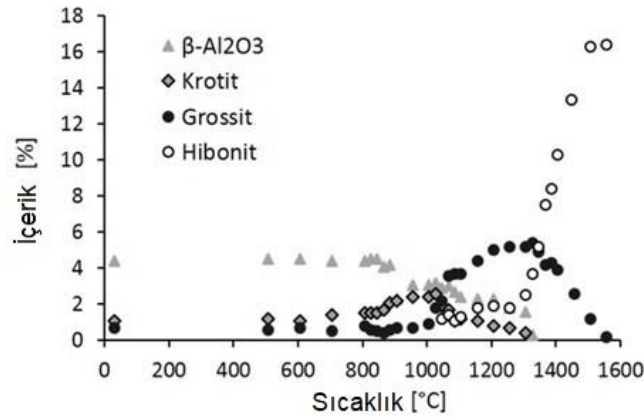
Belki de en basit davranış çentik gerilme mukavemeti ($\sigma_{NT} > 10$ MPa) ve 1000°C'nin biraz üzerinde artan neredeyse sabit bir spesifik kırılma enerjisi ile gösterilen en yüksek mekanik direnci sergileyen Alümina tuğlalarda gözlemlendi. Bunun sebebi birinci sıvı faz oluşmasına bağlı olarak spesifik kırılma enerjisinin 1400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda büyük ölçüde düşmesidir. Bu mekanizma sebebiyle Alümina tuğlalar 1250°C'ye kadar oldukça kırılğan bir davranış sergilemektedir.

Yüksek alüminalı çimento bağlı refrakter dökülebilir malzemenin mekanik direnci yaklaşık 10 MPa'lık bir çentik gerilme mukavemeti ile nispeten yüksek bir değerde başladı ve hatta yüksek alüminalı tuğlalar için değerlendirilen değerlerle karşılaştırılabilir değerlere ulaşmak için 450°C'ye kadar hafifçe arttı. Hidrat fazlarının aşamalı ayrışması daha yüksek çimento içeriğine sahip dökülebilir malzemelerde olduğu gibi dökülebilir malzemenin mekanik performansını etkilememiştir (Klunghirun ve diğerleri, 2024). Çentik çekme mukavemeti 600°C ile 1250°C arasında azalmış ancak 1500°C'de sinterleme ve Hibonitin (CA6) büyümesi nedeniyle mukavemet yeniden artmıştır (Şekil 3).

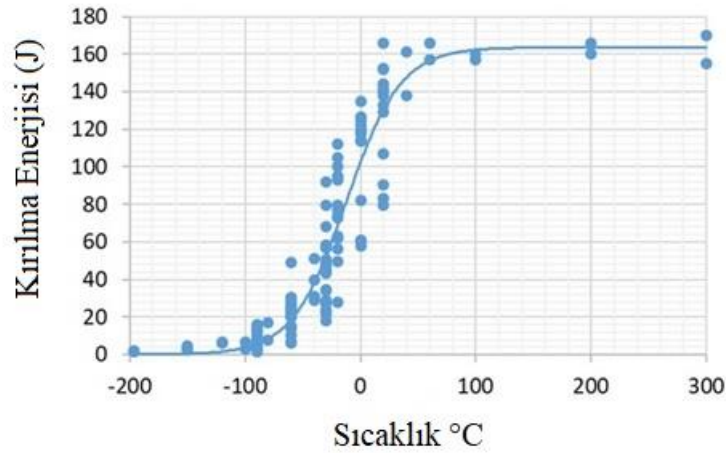
1000°C ile 1200°C arasında yüksek alümina dökülebilir malzemeyi kırmak için gereken enerjide ciddi bir artış olduğu gözlemlendi. Özellikle spesifik kırılma enerjisinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gelişimini gösteren eğrinin şekli çelik üzerinde gerçekleştirilen Charpy darbe testiyle elde edilen eğrilere oldukça benzemektedir (Şekil 4). Bu nedenle gözlem olgusu kırılğan-sünek bir geçiş olarak tanımlanmıştır.

Alümina numune malzemelere kıyasla Andaluzit tuğlalar çok daha orta düzeyde bir mekanik direnç (~ 7 MPa) sergiledi. Bununla birlikte spesifik kırılma enerjisi 900°C'de önemli ölçüde arttığından daha düşük sıcaklıklarda kırılğanlıktan süneklığe bir geçiş yaşadığı gözlemlendi ancak 1100°C civarında ilk sıvı fazın oluşumu mekanik mukavemetini büyük ölçüde düşürmüştür. Yük-deplasman eğrilerinin şekli hala oldukça sünek bir davranış gösterirken,

değerlendirilen dayanımlar 1100°C'nin üzerinde sıfıra yakın bir değer vermiştir. Bu verilere dayanarak Andaluzit test parçaları 1500°C'de kayda değer bir dayanıklılık sergilememektedir (Vadász ve diğerleri, 2022).



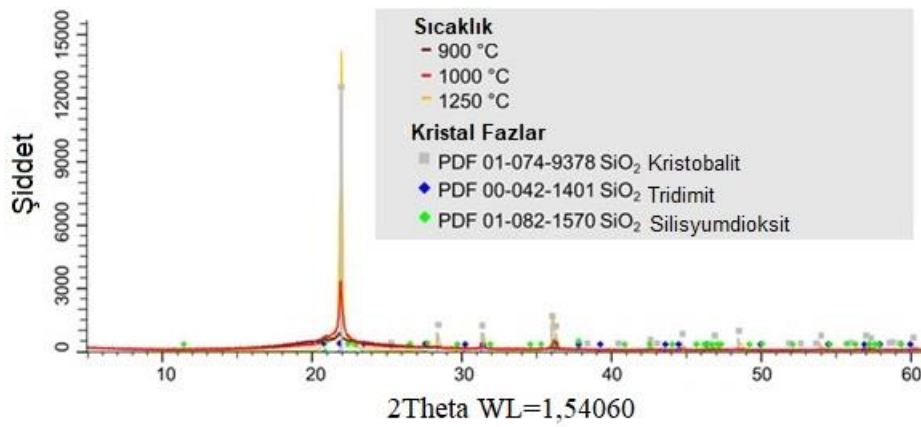
Şekil 3. Yüksek alüminalı çimento bağlı refrakter tuğla yüksek sıcaklık x ışını difraktometresi (Podwórny ve diğerleri, 2018)



Şekil 4. Ferritik bir çelik için charpy darbe testi ile elde edilen gevrek-sünek geçiş eğrisi (Marini, 2020)

Erimiş silika tuğlalar oda sıcaklığında oldukça düşük bir çentik çekme mukavemeti (~2.6 MPa) sergilerken 700°C'nin üzerinde orta değerlere (>4 MPa) yükseldi ve en az 1500°C'ye kadar neredeyse aynı seviyede kaldı ancak hepsinden önemlisi artan sıcaklıkla birlikte spesifik kırılma enerjisinin artışı net bir şekilde gözlenmiştir. Eritilmiş silika tuğlaların oda sıcaklığında en düşük mukavemeti sunduğu gerçeğiyle uyumlu olarak araştırılan tüm malzemeler arasında açık ara en düşük değere ulaştıktan sonra 1000°C'de bu çalışmada ölçülen ikinci en yüksek spesifik kırılma enerjisi seviyesine erişildi ve bu değer yalnızca yüksek alüminalı dökülebilir malzemeyle eşleşti. Son olarak, 1250°C'nin üzerinde spesifik kırılma enerjisi şaşırtıcı bir şekilde artıştan önce değerlendirilenlere benzer şekilde düşük seviyelere geri döndü ancak malzeme mukavemetinde bir düşüş gözlenmedi. Bu durum malzemeyi zayıflatır bir sıvı fazın

varlığının olmadığını açık bir ispatıdır (Brochen ve diğerleri, 2022). Buna göre malzemenin kendi başına kırılmandan süneklığe geçişe maruz kalmadığı bunun yerine deformasyona ve hasara dayanma yeteneğinin yaklaşık 1000°C'de keskin bir şekilde arttığı tespit edildi. WST'den sonra test parçaları üzerinde yapılan X-ışını kırınımı ve Raman mikro spektroskopisi ölçümleri 900°C'nin altında kristobalit izi boyunca test parçalarında neredeyse yalnızca amorf silikanın mevcut olduğunu ve 1000°C'de kristobalitin bir test parçasında mevcut olduğunu göstermekle birlikte 1250°C'de test parçası neredeyse tamamen kristobalit oluşmaktadır (Şekil 5). Test parçasının 1000°C civarındaki iki fazlı yapısı magnezya tuğlalarıyla karşılaştırıldığında magnezya-spinel tuğlalarda gözlemlenen artışa benzer şekilde erimiş silika tuğlanın hasara karşı direnç kapasitesindeki artışı açıklamaktadır ayrıca amorf silika yaklaşık 1000°C'de yumuşamaya başlar ve bu durum erimiş silika tuğlaya daha fazla süneklilik sağlayarak amorf silikanın tamamı kristobalite dönüştükçe ortadan kalkar.



Şekil 5. 900°C, 1000°C ve 1250°C'de WST'den sonra erimiş silika test parçalarının XRD spektrumları

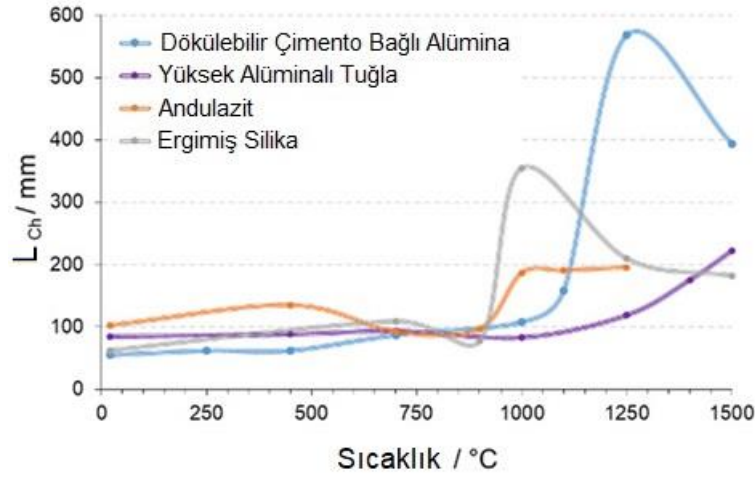
Refrakter malzemelerin davranışını değerlendirmeye yönelik tamamlayıcı bir yaklaşım olarak kama yarıma ölçümlerinden elde edilen malzeme özellikleri kırılmalık sayısı B gibi değerler şeklinde birleştirilebilir

$$B = \frac{\sigma_t^2 \cdot L}{G_f \cdot E} \quad (3)$$

Bu formülde σ_t çekme dayanımıdır (WST sonuçları karşılaştırıldığında σ_{NT} ile ikame edilebilir) ve L dikkate alınan elemanın karakteristik boyutudur. Kırılmalık numarası B çatlak başlangıcında elastik olarak depolanan gerinim enerjisinin elemanı iki parçaya bölmek için gerekli kırılma yüzeyi enerjisine oranına karşılık gelir. Refrakter malzemenin kırılmalığını L boyutunu varsaymadan değerlendirmek için Harmuth ve Bradt tarafından alternatif olarak kırılmalık sayısı B ile ters orantılı olan karakteristik uzunluk olarak adlandırılan uzunluk önerilmiştir (Harmuth ve Bradt, 2010):

$$L_{Ch} = \frac{G_f \cdot E}{\sigma_t^2} \quad (4)$$

İncelenen tüm malzemeler 900°C'nin altında düşük L_{Ch} değeri sergiledi ki bu durum sıcaklık aralığında oldukça kırılğan bir davranışa sahip olduğunun bir kanıtıdır (Şekil 6).

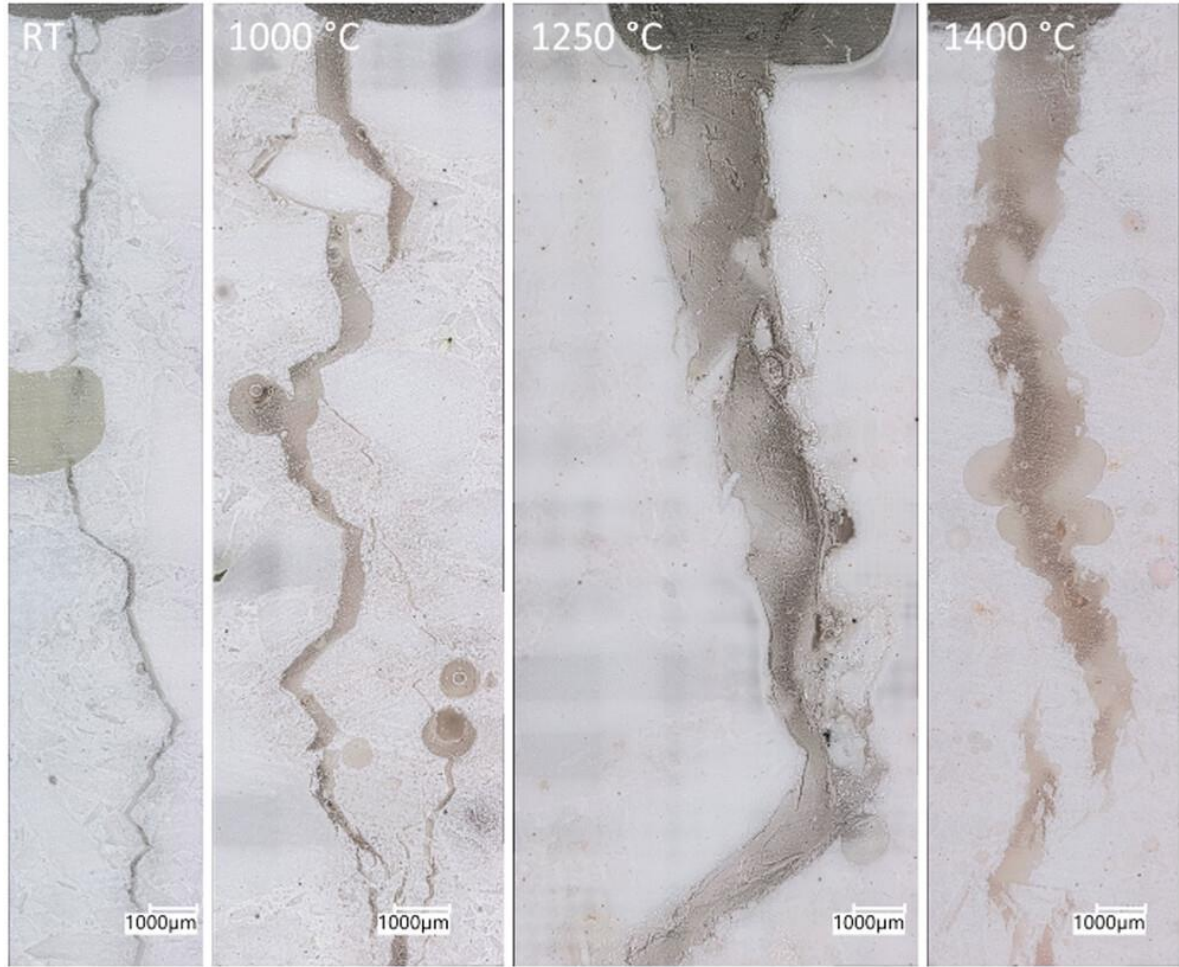


Şekil 6. Seçilen refrakter malzemeler için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak karakteristik uzunluk L_{Ch} 'nin değişimi

Bununla birlikte yüksek alüminalı tuğlaların 1250°C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde sıcaklığa bağlı artışa paralel olarak bir azalma görülmektedir. Bu etki aynı zamanda spesifik kırılma enerjisinin önemli ölçüde azalmasına rağmen Andaluzit ve erimiş silika tuğlaların karakteristik uzunluğunun orta düzeyde korunmasını da açıklamaktadır. Tersine yüksek alüminalı dökülebilir malzeme hala sünek bir davranış sergilerken 1500°C'de kırılma direncinde önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu sıcaklıkta Hibonit kristallerinin sinterlenmesi ve büyümesi kırılğanlığın artmasına neden olur.

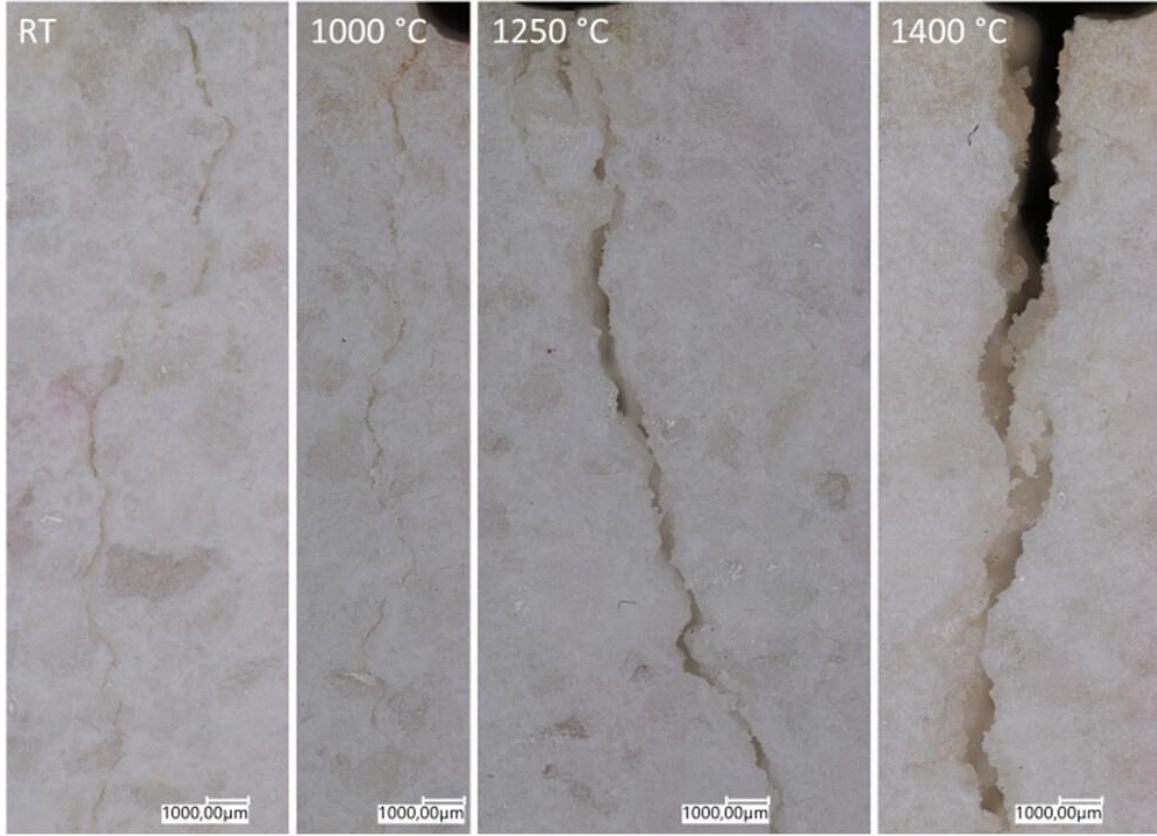
Mikroskobik Bulgular

Numunelerin kırılğanlığının azalması daha doğru tabirle hasarı tolere etme yeteneğinin artması testin sonunda çatlak ağzının daha büyük açılmasıyla ilişkilidir. Andaluzit tuğla ve erimiş silika tuğlalar için 900°C'nin altında ve yüksek alümina tuğlalar ile dökülebilir malzemeler için 1250°C'nin altında çatlak ağzı oldukça sıkı olur ve L_{Ch} düşük kalır, bu sıcaklıkların üzerinde ise çok daha büyük çatlak açılması gözlenir. Hasara karşı artan tolerans yeteneği çatlak dallanmasına, sapmasına ve köprüleşmesine de yansır. Bu işlemler spesifik kırılma enerji tüketimini artırır ve dolayısıyla ana çatlakın doğrudan yayılmasını engeller. Bu olgu özellikle 1100°C'nin üzerindeki dökülebilir yüksek alüminalı malzemelerde ve 900°C'nin üzerindeki Andaluzit tuğlalarda belirgindir (Şekil 7-9).



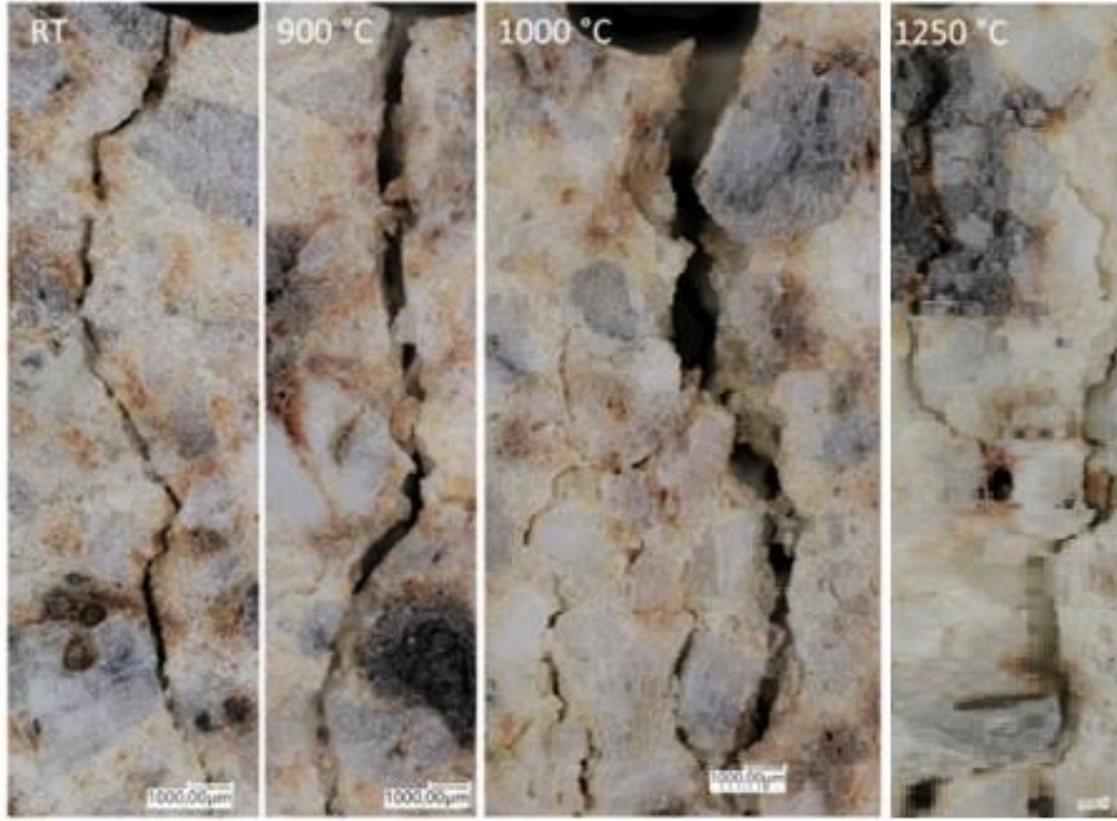
Şekil 7. Yüksek alüminalı çimento bağlı dökülebilir malzeme için farklı sıcaklıklarda çatlak yolu mikroskop görüntüleri

Şekil 8’de yüksek alümina numunelerin farklı sıcaklıklardaki çatlak yoluna ait mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Oda sıcaklığındaki çatlak ilerlemesi çimento bağlı alümina test numunelerine kıyasla daha düşük seviyede olduğu net bir şekilde gözlemlenirken bu fark aynı şekilde 1400°C için de aynı seviyede tespit edilmektedir.



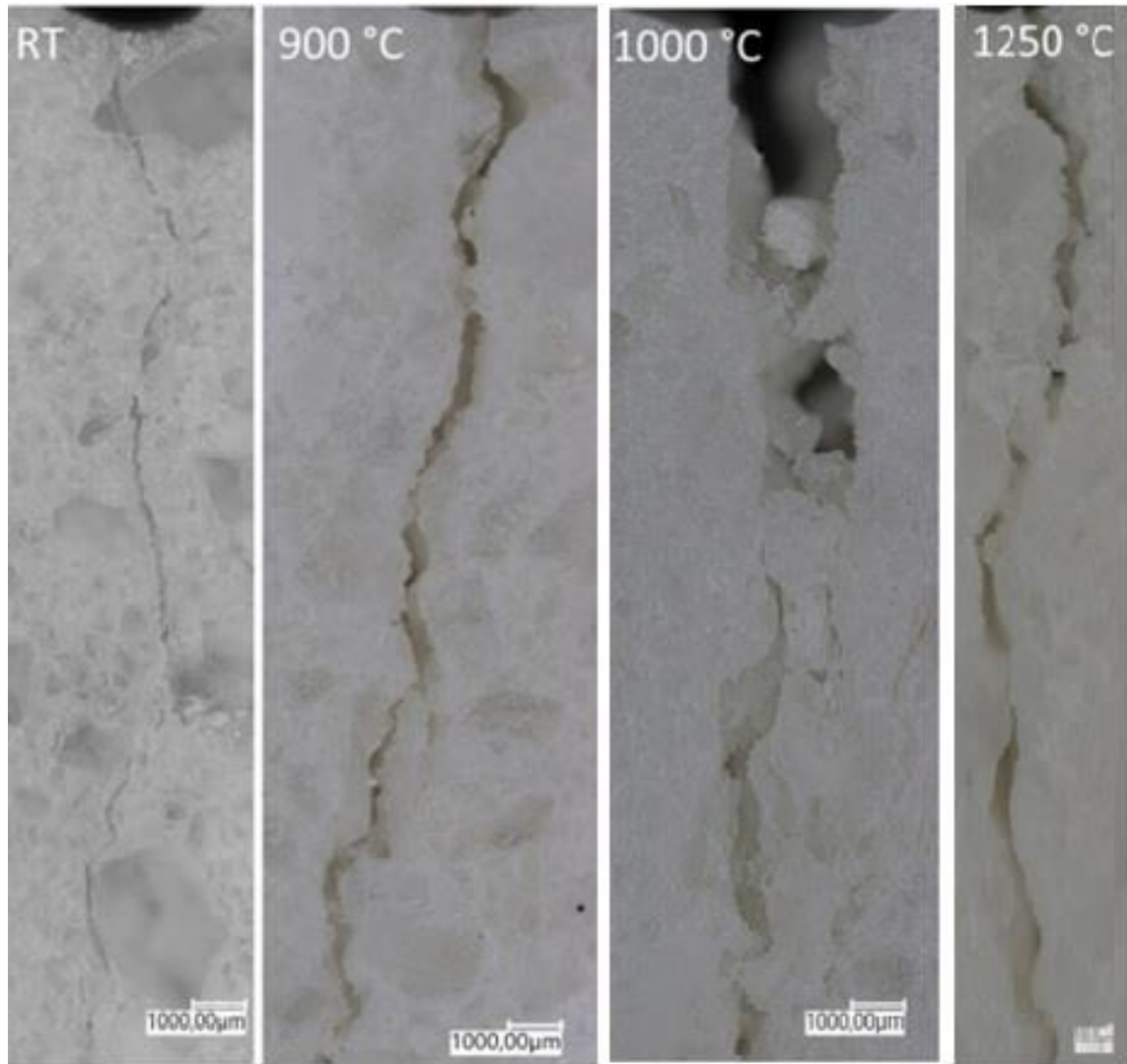
Şekil 8. Yüksek alüminyumlu tuğlalar için farklı sıcaklıklarda çatlak yolu görselleri

Şekil 9’da ise Andaluzit numunelerinin test sonrası optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Burada oda sıcaklığındaki çatlama seviyesi yüksek alümina ile aynı seviyede bulunurken 1000°C’de dramatik bir artış gözlenmektedir. Baskın olarak taneler-arası ve çok az miktarda tane içi kırılma gözlenmiştir ve kırılma tipi artan sıcaklıkta meydana gelen segregasyonlar ile tane-içi kırılmadan taneler-arası kırılmaya dönüşmektedir (Shulong ve diğerleri, 2011).



Şekil 9. Andalusit tuğlalar için farklı sıcaklıklardaki çatlak yolu mikroskop resimleri

Eritilmiş silika tuğlanın alışılmadık davranışı mikroskopik incelemelerle doğrulanmıştır (Şekil 10), 1000°C'de malzemenin hasar görmesini tolere etme yeteneği özellikle büyük çatlak açıklığı ve köprüleme ile yansıtılmaktadır. 1000°C'nin altında ve üstünde çatlak ağzı çok sıkıdır ve yayılması kolaydır. Horckmans ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı çalışmada bu durum şu şekilde açıklanmaktadır; genel olarak iri tanelerde tane-içi kırılma, daha küçük tanelerde ise tane-içi ve taneler-arası kırılmanın birlikte olduğu gözlenmiştir ayrıca oluşan mikro çatlakların birbirlerine bağlanarak küçülen silika tane sınırları etrafında ilerlemesi için daha fazla iş enerjisi gerektirmektedir ve eritilmiş silika malzemede tane içi kırılma tipinin diğer silika malzemelere göre baskın olması yüksek çentik gerilme mukavemetiyle bütünleşmektedir.



Şekil 10. Erimiş silika tuğlalar için farklı sıcaklıklarda çatlak yolu görünüşleri

SONUÇ

Son yıllarda refrakter ürünlerin servis sırasındaki hasarını anlamamızda dikkate değer bir ilerleme kaydedilmiştir ancak özellikle yüksek sıcaklıklar için refrakter ürünlerin kırılma davranışının tanımlanmasına yönelik hala çok az ampirik veri ve kılavuz değerler mevcuttur. Dört ticari refrakter ürün (yüksek Alüminalı, erimiş Silika ve Andaluzit tuğlaların yanı sıra yüksek alüminalı çimento bağlı dökülebilir) üzerinde yapılan kama yarıma ölçümleri oldukça düşük sıcaklıklarda refrakter ürünlerin belirli koşullar altında oldukça kırılğan bir şekilde davranma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Genel anlamda kırılma enerjisi 150 J.m^{-2} 'yi zorlukla aşabilmektedir. 900°C Andaluzit tuğlalar ile 1100°C yüksek Alüminalı çimento bağlı dökülebilir refrakterlerde kırılğandan süneklığe geçiş gözlemlendi. 500 J.m^{-2} hatta 1000 J.m^{-2} (çimento bağlı dökülebilir) üzerindeki spesifik kırılma enerjisi seviyeleri kırılğanlıkta güçlü bir azalma ve karakteristik uzunlukta bir artışla birlikte ölçülmüştür. Refrakter malzemelerin yüksek sıcaklıktaki hasarı tolere etme yeteneğindeki bu artış test parçalarının çatlak ağzının

daha geniş açılması ve mikroskopik incelemelerde gözlemlenen çatlak dallanması, bükülmesi ve köprülenmesi ile doğrudan ilişkilidir. Yapılan çalışmalar sonucunda farklı alümina esaslı agregaların yüksek alüminalı dökülebilir refrakterlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri üzerinde farklı etkilere sahip olduğuna dair bulgular elde edilmiştir (Vadász ve diğerleri, 2022). Alümina esaslı agregaların fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerindeki farklılıkların dökülebilir refrakter özellikleri üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Literatür bulgularından anlaşılabileceği üzere tabular alüminanın beyaz ergimiş alüminaya göre daha düşük açık gözenekliliğe ve yüksek birim hacim ağırlığa sahip olması tabular alüminadan üretilen deney numunelerinin açık gözeneklilik ve su emme değerlerinin beyaz ergimiş alüminadan üretilen deney numunelerine göre daha düşük ve birim hacim ağırlıklarının ise daha yüksek olmasının temel nedeni olarak açıklanabilir (Harmuth ve Bradt, 2010). Tabular alüminanın yüksek alüminalı dökülebilir refrakterin soğukta basma mukavemeti üzerinde beyaz ergimiş alüminaya göre daha olumlu etkiye sahip olması yukarıda da ifade edildiği üzere tabular alüminanın düşük açık gözeneklilik ve yüksek birim hacim ağırlık değerlerine sahip olması nedeni ile izah edilebilir. Buna ilaveten sinterlemede tabular alüminanın beyaz ergimiş alüminaya nazaran daha reaktif olması ve bunun sonucu olarak daha sık bir yapının elde edildiği de düşünülebilir (Brochen ve diğerleri, 2022). Sinterlenmiş haldeki dökülebilir refrakter özelliklerinden açık gözeneklilik ve su emme değerlerinin beklentilerin dışında ham haldeki refrakter numunelerin değerlerden yüksek olması çalışmada belirlenen sinterleme sıcaklığının yetersiz olmasından kaynaklandığı ve optimum değerlerin eldesi için sinterleme sıcaklığının artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Albrecht, G., Kaiser, S., Giessen, H., & Hentschel, M. (2017). Refractory plasmonics without refractory materials. *Nano letters*, 17(10), 6402-6408.
- Antusch, S., Reiser, J., Hoffmann, J., & Onea, A. (2017). Refractory materials for energy applications. *Energy Technology*, 5(7), 1064-1070.
- Bazhin, V. Y., & Glaz'ev, M. V. (2021). Combined refractory materials with addition of technogenic waste for metallurgical assemblies. *Refractories and Industrial Ceramics*, 61, 644-648.
- Bradt, R. C. (2004). Fracture of refractories. *MECHANICAL ENGINEERING-NEW YORK AND BASEL-MARCEL DEKKER THEN CRC PRESS/TAYLOR AND FRANCIS*, 178, 11
- Brochen, E., Dannert, C., Paul, J., & Krause, O. (2022). Investigation of fracture behavior of typical refractory materials up to service temperatures. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 4(2), 68-76.
- Harmuth, H., & Bradt, R. C. (2010). Investigation of refractory brittleness by fracture mechanical and fractographic methods. *Interceram/Refractories manual*, 6-10.
- Harmuth, H., & Tschegg, E. K. (1997). A fracture mechanics approach for the development of refractory materials with reduced brittleness. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 20(11), 1585-1603.
- Horckmans, L., Nielsen, P., Dierckx, P., & Ducastel, A. (2019). Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 297-304.

- Horvat, B., & Ducman, V. (2020). Influence of particle size on compressive strength of alkali activated refractory materials. *Materials*, 13(10), 2227.
- Klunghirun, W., Theerapapvisetpong, A., & Serivalsatit, K. (2024). Castable refractory materials from magnesium oxychloride cement-bonded cordierite-mullite. *Materials Letters*, 375, 137217.
- Lee, J., Mahandra, H., Hein, G. A., Ramsay, J., & Ghahreman, A. (2021). Toward sustainable solution for biooxidation of waste and refractory materials using neutrophilic and alkaliphilic microorganisms—A review. *ACS Applied Bio Materials*, 4(3), 2274-2292.
- Liu, H., Huo, X., Zhao, P., Xu, R., Zhang, X., Yu, J., ... & Ding, B. (2024). Confined Gelation Synthesis of Flexible Barium Aluminate Nanofibers as a High-Performance Refractory Material. *ACS nano*.
- Liutyi, R., Liuta, D., & Petryk, I. (2021). Structural construction of binders based on orthophosphoric acid and refractory materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 6667769.
- Mamen, B., Kolli, M., Ouedraogo, E., Hamidouche, M., Djoudi, H., & Fanttozi, G. (2019). Experimental characterisation and numerical simulation of the thermomechanical damage behaviour of kaolinitic refractory materials. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 55, 555-565.
- Marini, B. (2020). Empirical estimation of uncertainties of Charpy impact testing transition temperatures for an RPV steel. *EPJ N-Nuclear Sciences & Technologies*, 6, 57.
- Nakayama, J. (1965). Direct measurement of fracture energies of brittle heterogeneous materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 48(11), 583-587.
- Podwórny, J., Dudek, K., Psiuk, B., Krause, O., Holleyn, F., Brochen, E., ... & Dannert, C. (2018, September). High-temperature phase transformations in the matrix of high-alumina monolithics. In *Proceedings of the 61st International Colloquium on Refractories, UROGRESS, Aachen, Germany* (pp. 26-27).
- Shulong M., Yong L., Jialin S., Yue L., Wenbin X. (2011). *Advanced Materials Research, Preparation and Properties of MgO-MgAl₂O₄-FeAl₂O₄ Bricks in Cement Kiln*, 250 [25], 554-560.
- Stec, J., Tarasiuk, J., Wroński, S., Kubica, P., Tomala, J., & Filipek, R. (2021). Investigation of molten metal infiltration into micropore carbon refractory materials using X-ray computed tomography. *Materials*, 14(12), 3148.
- Tschegg, E. K., & Linsbauer, H. N. (1986). Prüfeinrichtung zur Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten. *Austrian Patent AT B*, 390328.
- Vadász, P., Medved', D., Plešingerová, B., & Labaj, J. (2022). Evaluation of Corrosion of Refractory Materials Using Electron Microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 28(3), 983-992.

Yazar Katkıları

Bu çalışmanın deney ve uygulama kısımlarının tamamı Erhan Özkan tarafından hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması

Bu çalışmada yazar tarafından çıkar çatışmasının olmadığı rapor edilmiştir.

Etik Bildirim

Bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler için etik kurul izni ve yasal özel bir izin gerekmemektedir.

Artvin İli Rüzgar Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi ve Bölgeye Uygun Rüzgar Türbini Kurulumu İçin Fizibilite Araştırması

Assessment of Wind Energy Potential in Artvin Province and Feasibility Study for the Installation of a Suitable Wind Turbine in the Region

Sabit Korcak^{1*}, Haluk Keleş², Yaşar Kobya³, Cafer Mert Yeşilkanat⁴

1)Department of Basic Sciences, Faculty of Engineering, Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye
ORCID:0000-0003-1140-6391, skorcak@artvin.edu.tr

2)Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Technology, Karadeniz Teknik University, Of, Trabzon, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1127-1060, halukkeles@ktu.edu.tr

3)Department of basic sciences, Faculty of Engineering, Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye
ORCID: 0000-0001-7919-7552, ykobya@artvin.edu.tr

4)Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education, Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye
ORCID: 0000-0002-7508-7548, cmyesilkanat@artvin.edu.tr

Geliş Tarihi: 28 Tem 2025 - **Kabul Tarihi:** 5 Ara 2025

DOI: 10.55205/joctensa.3220241748144

ATIF: Korcak, S., Keleş, H., Kobya, Y., & Yeşilkanat, C. M. (2025). Artvin ili rüzgar enerji potansiyelinin değerlendirilmesi ve bölgeye uygun rüzgar türbini kurulumu için fizibilite araştırması. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 18-34.

ÖZ

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi amacıyla türbin kurulumunda izlenmesi gereken başlıca aşamalar; rüzgar hızı ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, elde edilen verilerin analiz edilmesi, enerji üretim potansiyelinin belirlenmesi ve uygun türbin seçiminin yapılmasıdır. Bu süreçte en kritik parametre, ölçüm yapılan alanı temsil edebilecek uygun bir noktadan güvenilir rüzgar hızı verilerinin elde edilmesidir. Rüzgar enerji santrali kurulumları için yalnızca rüzgar hızı ve yönü değil, aynı zamanda hava yoğunluğu, sıcaklık, nem ve basınç gibi meteorolojik değişkenler de dikkate alınmalıdır. Bu parametreler, özellikle türbinlerin korozyona uğraması ve sistem performansını etkileyen çevresel koşullar açısından önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sıcaklık, nem ve basınç değerlerinin mevsimsel değişimleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasıyla birlikte, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelinin yerel ölçekte haritalanması da önem kazanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesinde rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek amacıyla bir rüzgar ölçüm istasyonu kurulmuştur. Böylece bölgeye ait rüzgar verileri yerel ölçekte toplanmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretiminin ekonomik olarak uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Ölçümler sonucunda, zeminden 20 metre yükseklikteki rüzgar hızları genel olarak "hafif rüzgar" sınıfında değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, söz konusu rüzgar hızlarıyla

* Sorumlu Yazar: skorcak@artvin.edu.tr

özellikle su pompalama sistemleri gibi düşük güçlü uygulamalar ile ikincil düzeyde enerji üretimi için uygun koşulların sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, Rüzgar potansiyeli, Artvin

ABSTRACT

The primary stages involved in the installation of wind turbines for electricity generation include wind speed measurements, analysis of the collected data, determination of energy production potential, and selection of a suitable turbine. Among these steps, obtaining reliable wind speed data from a representative location within the measurement area is the most critical parameter. For the establishment of wind power plants, not only wind speed and direction but also other meteorological parameters—such as air density, temperature, humidity, and atmospheric pressure—must be considered. These variables are particularly important due to their influence on environmental conditions that affect system performance and turbine corrosion. Therefore, seasonal variations in temperature, humidity, and pressure should be evaluated comprehensively. In recent years, increasing interest in the utilization of renewable energy sources has emphasized the importance of locally mapping the wind energy potential across Turkey.

Within the scope of this study, a wind measurement station was established at the Seyitler Campus of Artvin Çoruh University to assess the wind energy potential of the region. As a result, localized wind data were collected and analyzed. Based on the evaluation of these data, the economic feasibility of wind-based electricity generation in the area was investigated. The measurements indicated that the wind speeds at a height of 20 meters above ground level generally fall within the "light wind" category. Consequently, it was concluded that such wind speeds are suitable primarily for low-power applications, such as operating water pumping systems and supporting secondary-level electricity production.

Keywords: Wind Energy, Wind Potential, Artvin

GİRİŞ

Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve dışa bağımlılığın mümkün olduğunca azaltılması açısından, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının artırılması büyük önem taşımaktadır. Rüzgar enerjisi gibi yerli ve temiz enerji kaynaklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesine yönelik, bilimsel temellere dayanan güvenilir veri ve analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle çevre dostu enerji teknolojilerinin ülke ekonomisine kazandırılması artık bir tercih değil, zorunluluktur. Dünya genelinde nüfus artışı, kentleşme, yaşam standartlarındaki yükselme, sanayileşmenin hız kazanması ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak makine ve araç çeşitliliğinin artması, enerji sektörünü günümüzün en stratejik alanlarından biri haline getirmiştir. Ancak, mevcut konvansiyonel enerji üretim ve tüketim yöntemlerinin; insan sağlığı, çevre ve doğal kaynaklar üzerinde yerel, bölgesel ve küresel düzeyde olumsuz etkiler yarattığı da bilinmektedir. Bu nedenle, enerjinin çevreye zarar vermeden üretilmesi ve tüketilmesi öncelikli hedef olmalıdır.

Türkiye'nin birincil enerji üretimi, toplam enerji tüketiminin yalnızca %28,5'ini karşılayabilmektedir. Enerjide dışa bağımlılık oranı 1990 yılında %52 iken, bu oran 2000'de %68'e, 2011'de %72'ye ve 2014'te %75 seviyelerine yükselmiştir. Bu veriler, dışa bağımlılığın

giderek arttığını göstermektedir. 2014 yılı itibarıyla Türkiye'nin enerji ithalatı yaklaşık 97 milyon TEP (Ton Eşdeğer Petrol) düzeyindedir ve bunun ekonomik karşılığı yaklaşık 54 milyar dolardır. Bu ithalatın %15'i taşkömürü, %36'sı petrol ve %36'sı doğalgazdan oluşmaktadır ((DEKTMK), 2014).

Tüm bu nedenlerle yerli enerji üretiminin artırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli bakımından dünya genelinde önemli bir konuma sahiptir. Bu doğrultuda, hem enerji arz güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından yenilenebilir enerjiye yönelik politikalar, ülke stratejilerinde öncelikli bir yer tutmalıdır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Rüzgar Enerjisi

Alternatif enerji kaynakları arasında, hidrojen enerjisi kadar önemli ve faydalı olabilecek bir diğer kaynak da rüzgâr enerjisidir. Temiz, bol ve yenilenebilir olması ile öne çıkan rüzgâr enerjisi, dünya genelinde geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Elektrik üretiminde rüzgâr enerjisinden yararlanma girişimleri yaklaşık 100 yıl öncesine dayanmaktadır. Özellikle 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi, rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesini hızlandırmış ve bu alandaki teknolojik ilerlemeleri tetiklemiştir.

Rüzgâr enerjisi, "rüzgâr türbini" olarak adlandırılan büyük pervanelere sahip yüksek kuleler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Az sayıda büyük enerji üretim merkezleri yerine, ülke geneline yayılmış küçük ölçekli rüzgâr türbinleri kurmak, hem ekonomik hem de stratejik açıdan daha avantajlıdır. 1990'lı yıllardan itibaren kullanım oranı hızla artan rüzgâr enerjisi, sahip olduğu çevresel ve ekonomik avantajlar sayesinde küresel ölçekte dikkat çekmeye devam etmektedir.

Rüzgâr hızı, türbinlerin üretebileceği enerji miktarı açısından kritik bir faktördür. Rüzgârın enerji potansiyeli, ortalama rüzgâr hızının küpü ile orantılı olarak artar; örneğin, rüzgâr hızı iki katına çıktığında enerji içeriği sekiz katına ulaşır. Bu bağlamda, rüzgâr enerjisi 21. yüzyılda ve sonrasında en fazla gelecek vadeden enerji teknolojilerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Filik, 2007).

Rüzgar Enerjisinin Başlıca Avantajları

Rüzgâr enerjisi, sürdürülebilir enerji politikaları çerçevesinde giderek daha fazla önem kazanan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Sahip olduğu çevresel, ekonomik ve teknik avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Doğal ve bol bir kaynak olması: Rüzgâr, atmosferde sürekli olarak var olan ve serbestçe erişilebilen bir enerji kaynağıdır.
- Çevresel etkilerinin düşük olması: Rüzgâr enerjisi üretimi sırasında sera gazı ve diğer zararlı emisyonlar salınmadığından çevre dostudur.
- Yenilenebilir ve temiz olması: Kaynağı tükenmeyen doğal süreçlere (güneş radyasyonu, atmosfer hareketleri, yeryüzü topografyası) bağlı olduğundan sürdürülebilir bir enerji çözümüdür.

- Enerjide dışa bağımlılığı azaltması: Rüzgâr enerjisi, yerli kaynaklarla üretilbildiğinden dış kaynaklara olan enerji bağımlılığını azaltır.
- Fiyat dalgalanmalarından etkilenmemesi: Kaynağı doğrudan doğadan geldiği için enerji maliyetleri zamanla artış gösterme eğiliminde değildir.
- Ekonomik katkı ve istihdam potansiyeli: Rüzgâr enerjisi yatırımları, inşaat, bakım ve işletme süreçlerinde yerel istihdam yaratma kapasitesine sahiptir.
- Düşük işletme ve bakım maliyetleri: Diğer enerji üretim sistemlerine kıyasla daha düşük işletme ve bakım maliyetlerine sahiptir.
- Düşük üretim maliyeti: Özellikle teknolojik gelişmelerle birlikte birim enerji başına maliyetler önemli ölçüde düşmüştür.
- Artan teknolojik güvenilirlik: Modern rüzgâr türbinleri daha güvenilir ve verimli sistemler sunmaktadır.
- Yerel enerji üretimine olanak tanınması: Küçük ölçekli türbin sistemleri sayesinde bireyler ya da küçük topluluklar kendi elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir.

Rüzgar Enerjisinin Başlıca Dezavantajları

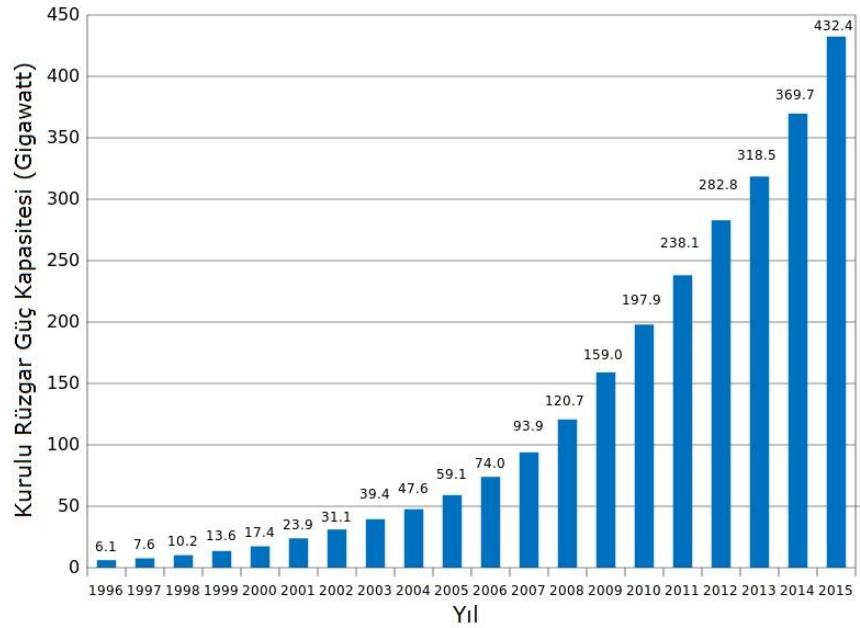
Rüzgâr enerjisi önemli avantajlara sahip olmakla birlikte, bazı teknik ve çevresel sınırlamaları da içermektedir:

- Enerji üretiminde süreksizlik: Rüzgâr hızının değişkenliği, sabit ve sürekli enerji üretimini sınırlamakta, dolayısıyla enerji arz güvenliği açısından dezavantaj oluşturabilmektedir.
- Yüksek alan ihtiyacı: Rüzgâr türbinlerinin kurulumu geniş arazilere ihtiyaç duyduğundan, özellikle tarım veya yerleşim bölgelerinde arazi kullanımı açısından sorun teşkil edebilir.
- Gürültü kirliliği: Türbinlerin çalışması sırasında ortaya çıkan mekanik ve aerodinamik sesler, çevre sakinleri için rahatsız edici olabilir.
- Görece düşük enerji yoğunluğu: Fosil yakıtlar ve nükleer enerjiye kıyasla birim alandan elde edilen enerji miktarı daha düşüktür.
- Yüksek ilk yatırım maliyeti: Türbinlerin üretimi, nakliyesi, montajı ve şebekeye entegrasyonu yüksek başlangıç maliyetleri gerektirir.
- Atık yönetimi sorunları: Özellikle kullanım ömrünü tamamlayan kompozit türbin kanatlarının geri dönüştürülmesi günümüzde çevresel açıdan önemli bir sorundur.
- Yüksek mekanik karmaşıklık ve risk: Rüzgâr türbinleri çok sayıda hareketli ve dinamik parçadan oluştuğundan, diğer enerji üretim sistemlerine kıyasla daha fazla teknik arıza ve bakım ihtimali barındırır.

Dünyada Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, son yıllarda dünya genelinde kullanımı en hızlı artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri hâline gelmiştir. Her ne kadar günümüzde küresel elektrik üretimi içindeki payı hâlâ sınırlı olsa da, bu alandaki yatırımlar ve teknolojik gelişmeler hızla artmaktadır. 2020 yılına yönelik yapılan projeksiyonlarda, dünya elektrik talebinin yaklaşık %12'sinin rüzgâr enerjisi ile karşılanması hedeflenmiştir. Güncel verilere göre, dünyada rüzgâr enerjisinden elde

edilen toplam kurulu güç yaklaşık 432,4 GW düzeyindedir. Bu kapasitenin yıllara göre değişimi Şekil 1’de gösterilmektedir. Rüzgâr enerjisinden en fazla yararlanan ülke ise Çin’dir. Çin, toplam kurulu rüzgâr gücünün yaklaşık 145,104 GW’lık kısmına (%33,56) sahiptir. Ancak bu kapasite, ülkenin toplam elektrik ihtiyacının yalnızca yaklaşık %3,3’ünü karşılamaktadır. 2025 yılı için hazırlanan “Çin Elektrik Arz-Talep Analiz Raporu”na göre, sadece bu yıl devreye alınacak güneş enerjisi kapasitesi 380 GW, rüzgâr enerjisi kapasitesi ise 140 GW olarak öngörülmüyor. Bu büyümeyle birlikte güneş ve rüzgârın toplam elektrik kurulu gücü içindeki payının yıl sonunda yüzde 48,2’ye ulaşması hedefleniyor (<https://temizenerji.org>).



Şekil 1. Dünya genelinde yıllara göre kurulu rüzgar güç kapasitesi (GWEC, 2015).

Rüzgâr enerjisinden en fazla yararlanan ülkeler, küresel ölçekte bu alandaki teknolojik gelişmeleri ve yatırımları yönlendiren başlıca aktörler konumundadır. Çin’in ardından, rüzgâr enerjisi kurulu gücü açısından öne çıkan diğer ülkeler sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Almanya, Hindistan, İspanya, Birleşik Krallık, Kanada, Fransa, İtalya ve Brezilya olarak sıralanmaktadır. Bu ülkeler, gerek sahip oldukları doğal rüzgâr potansiyeli gerekse uyguladıkları enerji politikaları sayesinde rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasında önemli rol oynamaktadır. Söz konusu ülkelerin yıllara göre rüzgâr enerjisinden elde ettikleri elektrik üretim kapasiteleri Tablo 1’de ayrıntılı olarak sunulmuştur (GWEC, 2015).

Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Türkiye’de rüzgâr enerjisi üretimi, 1998 yılında İzmir’in Çeşme ilçesinde kurulan ilk rüzgâr santrali ile başlamıştır. Bu santral, toplam 12 adet rüzgâr türbinine sahip olup 7,2 MWe kurulu güce sahiptir. Günümüzde ise Türkiye’de bulunan Rüzgar Enerji Santrallerinin toplam kurulu gücü 12.103 MW’dır. 2021 yılında Rüzgar Enerji Santralleri ile 31.137.427.230 kilovatsaat elektrik üretimi yapılmıştır. Toplam elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %11,03’sini rüzgâr enerjisinden karşılamaktadır (<http://www.enerjiatlası.com>, 2016). Türkiye, rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından önemli bir coğrafi avantaja sahiptir. Rüzgâr enerjisi açısından en verimli

bölgeler sırasıyla Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz kıyı şerididir. Bu bölgelerdeki yüksek rüzgâr potansiyeli, rüzgâr santrallerinin kurulumu için elverişli alanlar sunmaktadır. Özellikle Ege Bölgesi ve Trakya, yıl boyunca istikrarlı rüzgâr hızlarına sahip olmaları nedeniyle Türkiye'nin en verimli rüzgâr enerjisi üretim alanları arasında yer almaktadır. Yapılan çeşitli araştırmalar, Türkiye'nin sahip olduğu teknik ve ekonomik rüzgâr enerjisi potansiyelinin, ülkenin toplam elektrik ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Aylık bazda rüzgâr hızlarının değişimi ve bölgesel dağılımı ise aşağıdaki tabloda detaylı biçimde sunulmuştur (Bkz. Tablo 2) (Filik, 2007).

Tablo 1. Ülkeler ve yıllara göre rüzgar enerjisinden elektrik üretim kapasitesi (GW) (GWEC, 2015).

	Ülke	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Çin	2,599	5,912	12,210	25,104	44,733	62,733	75,564	91,412	114,76	145,10
2	ABD	11,603	16,819	25,170	35,159	40,200	46,919	60,007	61,110	65,879	74,472
3	Almanya	20,622	22,247	23,903	25,777	27,214	29,060	31,332	34,250	39,165	44,947
4	Hindistan	6,270	7,850	9,587	10,925	13,064	16,084	18,421	20,150	22,465	25,088
5	İspanya	11,630	15,145	16,740	19,149	20,676	21,674	22,796	22,959	22,987	23,025
6	Birleşik Krallık	1,963	2,389	3,288	4,070	5,203	6,540	8,445	10,711	12,440	13,603
7	Kanada	1,460	1,846	2,369	3,319	4,008	5,265	6,200	7,823	9,694	11,205
8	Fransa	1,589	2,477	3,426	4,410	5,660	6,800	7,196	8,243	9,285	10,358
9	İtalya	2,123	2,726	3,537	4,850	5,797	6,747	8,144	8,558	8,663	8,958
10	Brezilya	237	247	339	606	932	1,509	2,508	3,466	5,939	8,715
11	İsveç	571	831	1,067	1,560	2,163	2,970	3,745	4,382	5,425	6,025
12	Polonya	153	276	472	725	1,107	1,616	2,497	3,390	3,834	5,100
13	Portekiz	1,716	2,130	2,862	3,535	3,702	4,083	4,525	4,730	4,914	5,079
14	Danimarka	3,140	3,129	3,164	3,465	3,752	3,871	4,162	4,807	4,845	5,063
15	Türkiye	65	207	433	801	1,329	1,799	2,312	2,958	3,763	4,718

Tablo 2. Ege ve Trakya Bölgesinde Rüzgâr Hızının Aylara Göre Dağılımını (Filik, 2007).

Bölge	30m'deki Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Maksimum Rüzgarlı Aylar	Maksimum Rüzgarlı Saatler
Çanakkale, Balıkesir	7-7,5	Kasım-Şubat, Mayıs-Eylül	16.00-03.00
İzmir	7,5-9	Kasım-Şubat, Mayıs-Eylül	12.00-21.00
Bodrum	7-7,5	Aralık, Mayıs-Eylül	09.00-22.00
Datça	7-7,5	Aralık, Mayıs-Eylül	09.00-22.00

Türkiye’de Rüzgar Enerji Potansiyeli

Bir bölgeye santral kurulumunu belirleyen ana etken altyapı ve enerji potansiyeli belirleme çalışmalarıdır. Bu nedenle bölgenin rüzgar enerji potansiyelini belirleyebilmek için en az 1 yıl süreyle süreklilik arz eden ölçümler yapılmalıdır. Bölgede bir santral kurulması durumunda elektrik üretiminin ekonomik olup olmayacağını tespiti ancak alınan ham verilerin istatistiksel analizinin yapılması ile mümkündür. Bu nedenle rüzgâr enerjisi santrallerinin verimli ve sürdürülebilir şekilde işletilebilmesi için, santral kurulumu öncesinde yapılan potansiyel analizleri büyük önem taşımaktadır. Bu analizler sayesinde, ileride karşılaşılabilecek teknik ve ekonomik sorunlar önceden öngörülebilir, böylece rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru ve eksiksiz biçimde belirlenmesi sağlanabilir (Yıldızay, 2014).

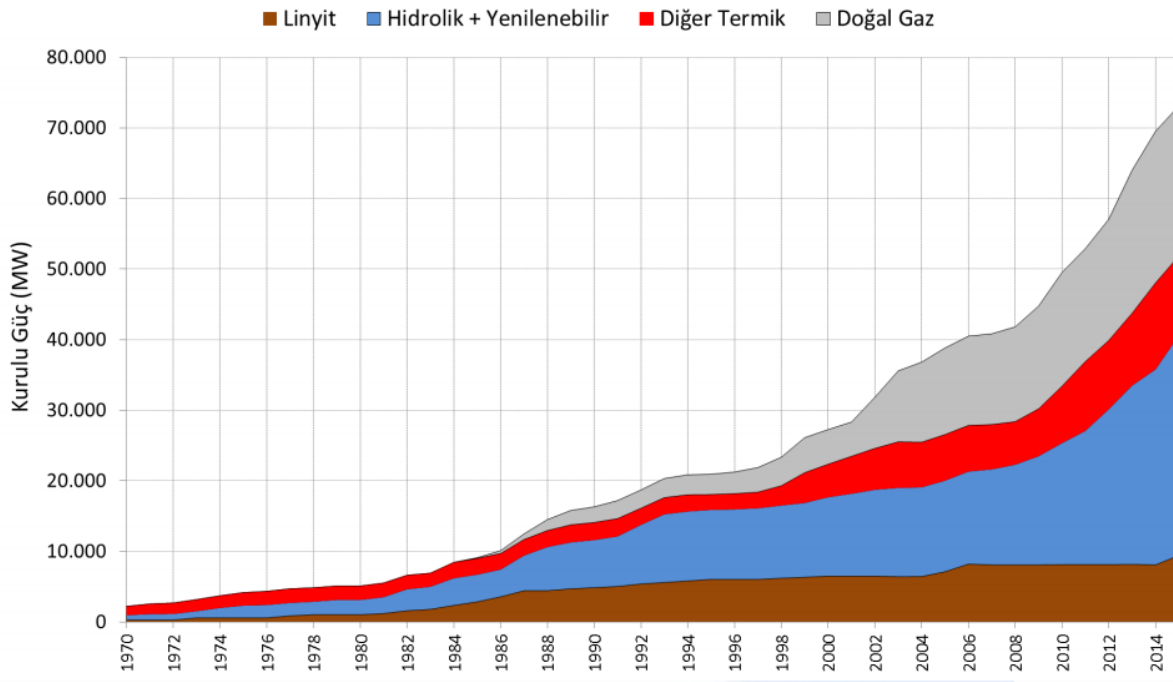
Rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yönelik çeşitli yöntemler ve sayısal modelleme araçları kullanılmaktadır. Bu kapsamda en yaygın olarak kullanılan yazılımlardan biri, Danimarka RISO Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen ve Avrupa Rüzgâr Atlası’nın hazırlanmasında da kullanılan WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) adlı bilgisayar programıdır. Türkiye’de rüzgâr dağılımının modellenmesinde de yaygın biçimde kullanılan WAsP yazılımı, ülke genelindeki 45 adet rüzgâr ölçüm istasyonundan elde edilen meteorolojik verilere dayalı olarak çalışmaktadır. Şekil 2’de sunulan rüzgâr dağılım haritası da bu program aracılığıyla elde edilmiştir (http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html, 2015).



Şekil 2. Türkiye’nin rüzgar enerji potansiyeli haritası (http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html, 2015).

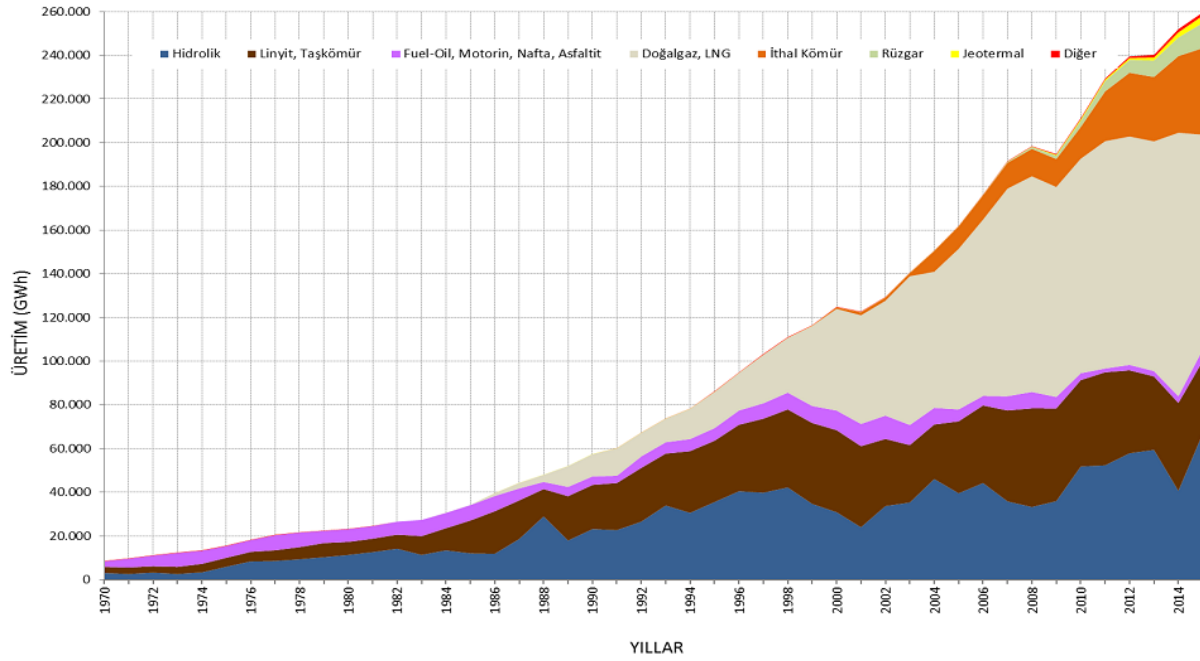
Günümüzde bir ülkenin gelişmişlik düzeyinin önemli göstergelerinden biri, kişi başına düşen enerji tüketimidir. Enerji, sanayileşmenin temel altyapı unsurlarından biri olmasının yanı sıra, modern yaşamın sürdürülebilirliği açısından da vazgeçilmez bir kaynak niteliğindedir. Bu nedenle, ülkelerin enerji politikaları hem ulusal hem de uluslararası düzeyde stratejik öneme sahiptir.

Fosil yakıtların tükenme riski, dışa bağımlılığın artması ve çevresel etkiler gibi faktörler, ülkeleri güvenilir, yeterli, ekonomik ve çevre dostu enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Sanayileşme, nüfus artışı ve ekonomik büyüme eğilimi içerisinde olan Türkiye'de de, enerji talebi sürekli olarak artmaktadır. Bu bağlamda, mevcut enerji kaynaklarının verimli şekilde kullanılması ve enerji arz güvenliğinin sağlanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinden azami düzeyde yararlanılması büyük önem arz etmektedir. Şekil 3'de Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretiminin yıllara göre dağılımı ve Şekil 4'de ise Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminin değişimi verilmiştir (<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016). Bu tablo, Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye yöneliminde genel bir artış eğilimi sergilediğini göstermektedir.

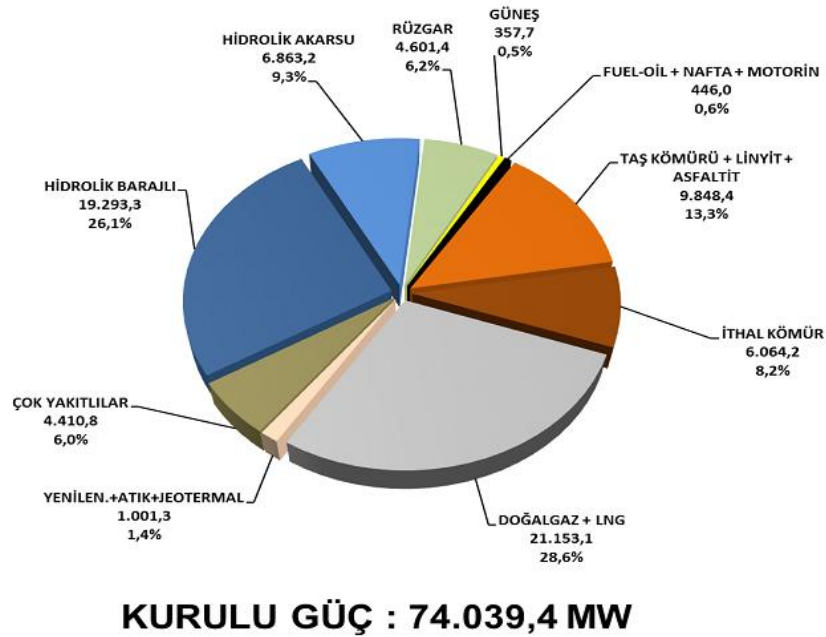


Şekil 3. Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü ve yıllara göre değişimi (<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016).

Ülkemizde 2016 mart sonu itibari ile elektrik enerjisi kurulu gücü toplam 74039.4 MW'dır (Şekil 5). Buna karşılık kurulu güç içerisindeki yenilenebilir kaynaklarından rüzgar enerjisinin toplam kurulu güç değeri 4601,4 MW'dır. Bunun toplam kurulu güç içerisindeki payı ise %6,2'dir (Şekil 5). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2023 yılına kadar planlanan kapasite 20 GW'tır. Tamamen temiz ve neredeyse sıfır olan işletme maliyetleri nedeniyle rüzgar enerjisi ile ilgili yapılan projeler, ülkemiz menfaatleri açısından büyük önem arz etmektedir (Şekil 3).

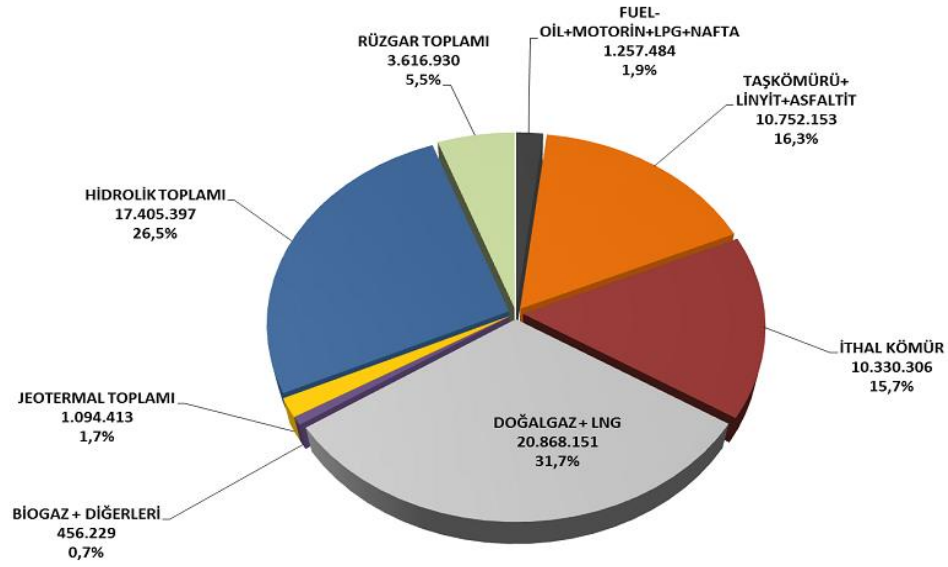


Şekil 4. Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Üretimi ve yıllara göre değişimi
(<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016).



Şekil 5. Türkiye'nin elektrik enerjisi kurulu gücü
(<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016).

Ülkemizde elektrik enerjisi üretimi 65781.064 MWh'dir (Şekil 4). Buna karşılık elektrik üretimi içinde yenilenebilir kaynaklarından rüzgar enerjisinin toplam kurulu güç değeri 3616.930 MWh'dir. Bunun toplam kurulu güç içerisindeki payı ise %5,5'dir (Şekil 6).

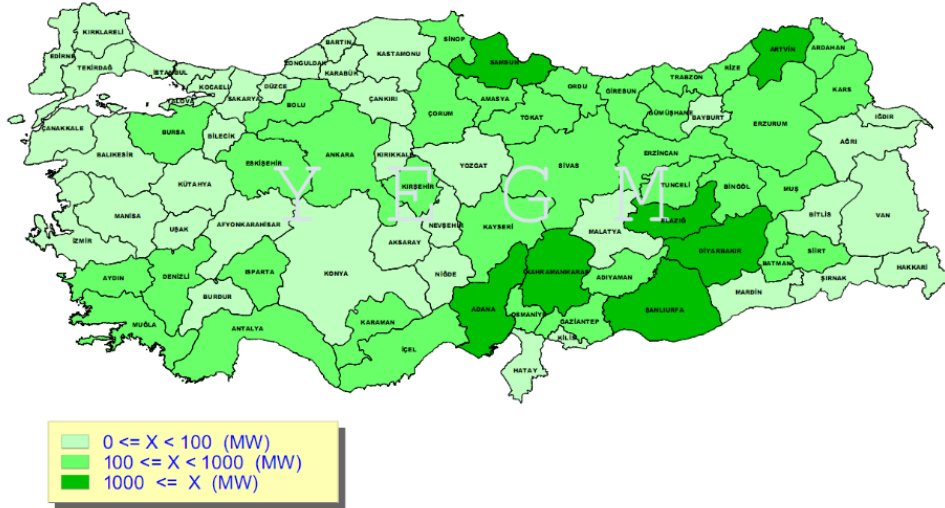


ÜRETİM : 65.781.064 MWh

Şekil 6. Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi
(<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016).

Artvin’de Elektrik Üretimi

Artvin, Türkiye’nin en çok elektrik üreten şehirlerinden birisidir. Özellikle Hidroelektrik enerjiden üretilen elektrik ön plana çıkmaktadır. Şekil 7’te Türkiye’nin hidroelektrik enerjiden elektrik üretimi haritalandırılmıştır.



Şekil 7. Türkiye’nin hidroelektrik enerjiden elektrik üretim haritası
(<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016).

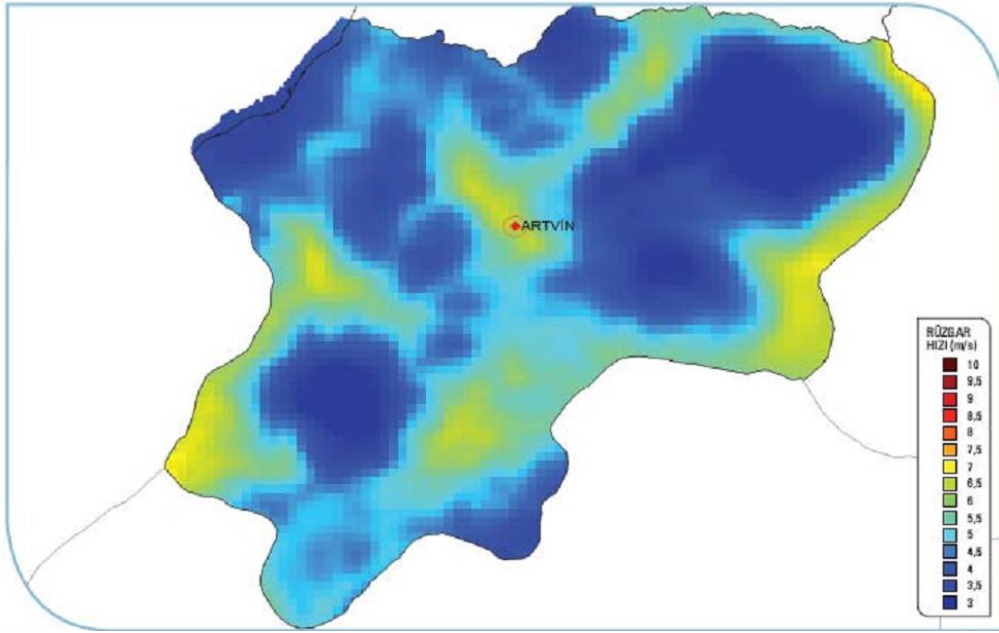
Türkiye'nin gövde yüksekliği en fazla olan Deriner barajı (Sahip olduğu 249 metre gövde yüksekliği ile Türkiye'nin en yüksek, Dünya'nın 6. yüksek barajı) bu bölgede yer almaktadır. Tablo 3'de Artvin yöresine ait elektrik üretim tesisleri ve kurulu güç görülmektedir.

Tablo 3. Artvin iline ait elektrik üretim tesisleri ve kurulu güçleri (<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, 2016).

NO	SANTRAL ADI	KURULU (MW)	GÜÇ YAKIT CİNSİ	ENERJİ TÜRÜ
1	Aralık HES (Kar-En Karadeniz Elektrik Ür. A.Ş.)	12.410	Akarsu	Hidrolik
2	Arpa Reg. ve HES (MCK Elektrik Üretim A.Ş.)	32.412	Akarsu	Hidrolik
3	Artvin Barajı ve HES (Doğuş Enerji Üretim A.Ş.)	166.090	Barajlı	Hidrolik
4	Borçka	300.600	Barajlı	Hidrolik
5	Cansu HES (Cansu Elektrik) (Artvin)	16.158	Akarsu	Hidrolik
6	Çakırlar HES (Anadolu Elektrik)	16.750	Akarsu	Hidrolik
7	Çifteköprü Reg. ve HES (Çifteköprü Elektr.)	20.073	Akarsu	Hidrolik
8	Deriner	669.700	Barajlı	Hidrolik
9	Diyoban HES (ATİ İnşaat Enerji Üretim ve Tic.)	7.777	Akarsu	Hidrolik
10	Erenköy Reg. ve HES (Boydak Enerji Ür.)	21.456	Akarsu	Hidrolik
11	Erenler Reg. ve HES (BME Birlik Enerji Mutl. EN.)	45.000	Akarsu	Hidrolik
12	Esental (MeteK Hidro Enerji San. ve Tic. A.Ş.)	5.000	Akarsu	Hidrolik
13	Hızır Reg. ve HES (Özylmaz Enerji Elektr. Ür. Ltd. Şti.)	1.955	Akarsu	Hidrolik
14	Hopa	50.000	Fuel-Oil	Termik
15	Kabaca Regülatörü ve HES (Erva Enerji)	8.748	Akarsu	Hidrolik
16	Muratlı	115.000	Barajlı	Hidrolik
17	Murgul Bakır (C. Kaya)	24.220	Akarsu	Hidrolik
18	Papart HES (Elite Elektrik Üretim)	26.443	Akarsu	Hidrolik
19	Yayla Reg. ve HES (Boydak Enerji Ür.)	19.670	Akarsu	Hidrolik

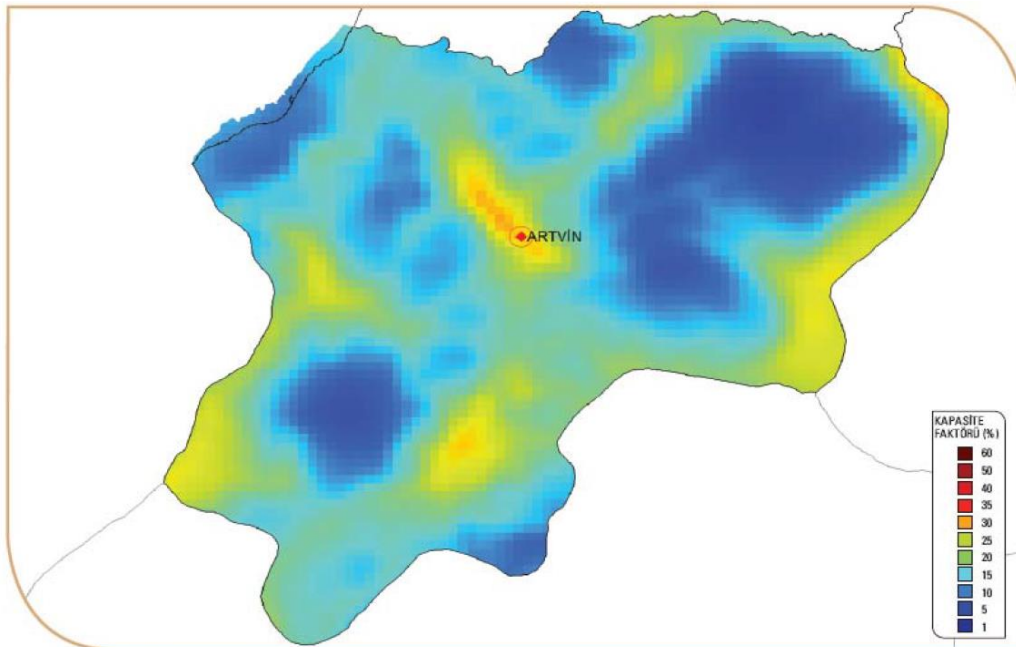
BULGULAR

Yapılan çalışmada kullanılan veriler bu çalışma kapsamında kurulan ölçüm noktasından ve meteoroloji il müdürlüğünden alınmıştır. Zeminden 20m yüksekliğindeki bir noktadan anemometre yardımı ile ölçümler yapılmıştır. Ölçümler Artvin'in arazi koşulları sebebiyle Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultusunda yapılmıştır. Dik amaçlar arasında akan Çoruh Nehri'de bu doğrultuda akmaktadır ve vadisini bu doğrultuda oluşturmuştur. Yamaçların çok dik olması sebebiyle Artvin'deki rüzgar akımı sadece vadi boyunca olmaktadır. Oldukça dar bir alana sıkışan rüzgar akımı, kesit alanının daralma etkisi ile lokal olarak çok yüksek hızlara ulaşabildiği tespit edilmiştir. Ekonomik bir RES yatırımı için 7 m/s veya üzerinde rüzgar hızı gerekmektedir. Şekil 8'da Artvin ilinin 50 m yükseklikte rüzgar hız haritası verilmiştir.



Şekil 8. Artvin ili rüzgar haritası (http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html, 2016).

Ekonomik RES yatırımı için %35 veya üzerinde kapasite faktörü gerekmektedir. 50m yükseklikte Artvin ili kapasite faktörü Şekil 9’da verilmiştir.

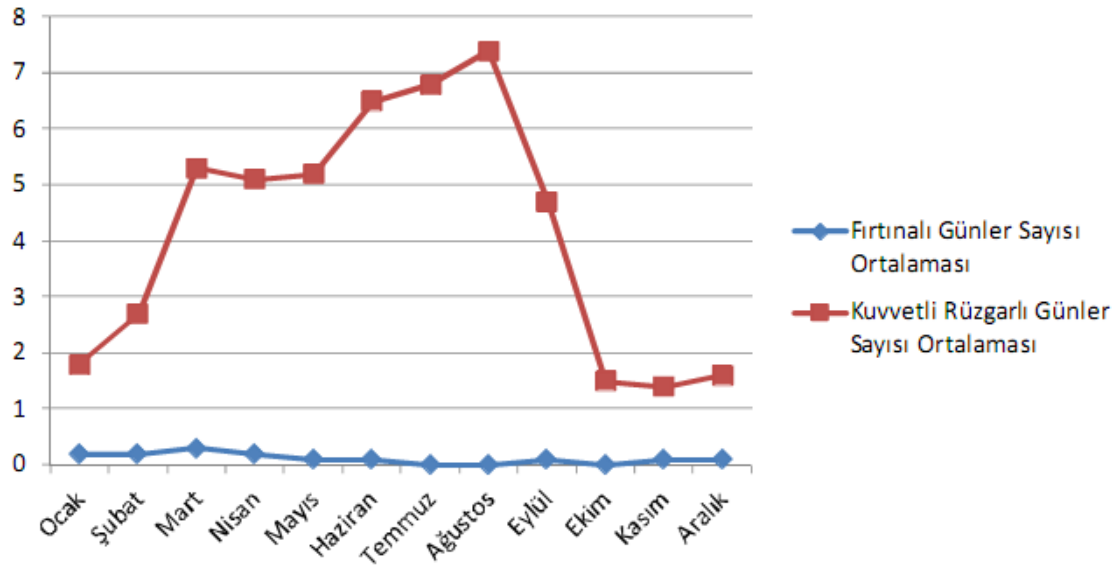


Şekil 9. Artvin ili rüzgar kapasite faktörü (50m) (http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html, 2016).

Tablo 4'de sunulan verilere göre, Artvin ilinde yıllık ortalama rüzgâr hızı 1,56 m/s olarak ölçülmüştür. Aylık bazda değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama rüzgâr hızları 2015 ve 2016 yıllarında Temmuz ve Ağustos aylarında 2,0 m/s ile gerçekleşmiştir. Buna karşılık, en düşük aylık ortalama rüzgâr hızları ise Ekim, Kasım ve Aralık aylarında 1,2 m/s olarak kaydedilmiştir. Artvin'de ölçülen en yüksek anlık rüzgâr hızı, Kasım ayında 24,2 m/s değerine ulaşmış olup, bu rüzgâr kuzeybatı (NW) yönünden esmiştir. Yıllık hakim rüzgâr yönü ise batı-kuzeybatı (WNW) olup, bu yönden gelen rüzgârlar 55.752 esme sayısı ile toplamın yaklaşık %18,9'unu oluşturmaktadır. Bu yönlü rüzgârların ortalama hızı 2,2 m/s'dir. WNW yönünü, 42.270 esme sayısı ile kuzeybatı (NW) yönlü rüzgârlar izlemekte ve bu rüzgârların ortalama hızı 2,0 m/s olarak hesaplanmaktadır. Öte yandan, Artvin'de en az esme sayısı 6.271 (%2,1) ile doğu (E) yönünden gerçekleşmiş ve bu yönlü rüzgârların ortalama hızı 1,1 m/s'dir (Bkz. Tablo 3). İklimsel veriler doğrultusunda, Artvin'de kuvvetli rüzgârlı gün sayısı yıllık ortalama olarak 52,5 gün, fırtınalı gün sayısı ise 1,2 gün olarak tespit edilmiştir. Bu veriler, bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin sınırlı olmakla birlikte belirli dönemlerde ve yönlerde değerlendirmeye açık olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Artvin ili ortalama rüzgar hız ve yön değerleri (AMİ, 2014).

Meteorolojik Eleman	Aylar												YILLIK
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)	1,3	1,5	1,7	1,7	1,6	1,8	2,1	2,0	1,7	1,1	1,1	1,2	1,56
Maksimum Rüzgâr Hızı (m/s)	21,9	30,6	22,8	22,0	18,8	21,5	17,9	17,3	19,3	17,8	24,2	23,0	30,6
En Hızlı Esen Rüzgârın Yönü	SE	W	SE	SW	NW	SSW	WNW	W	SSE	NW	NW	SE	W



Şekil 10. Artvin Meteoroloji İstasyonu'na Ait Fırtınalı ve Kuvvetli Rüzgârlı Günler Grafiği

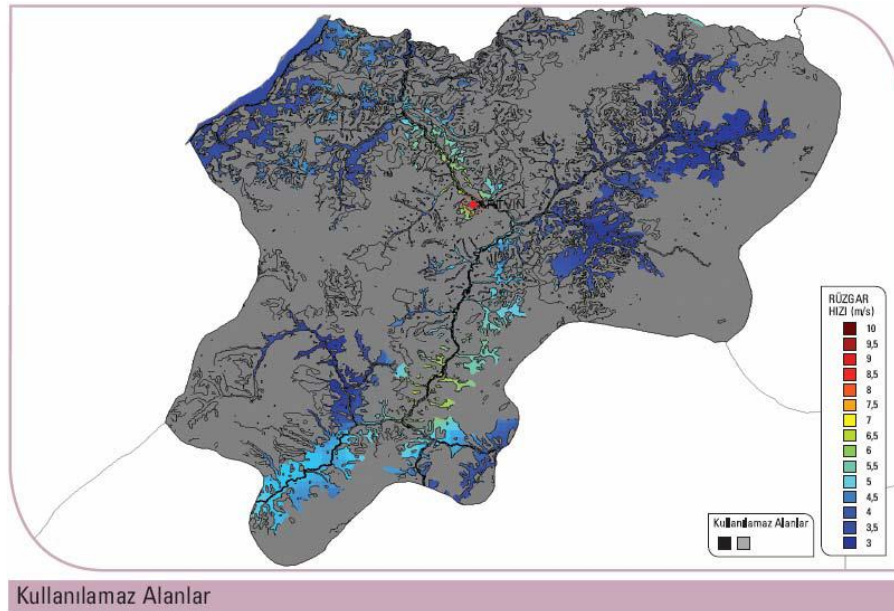
Artvin Meteoroloji İstasyonu'na Ait Fırtınalı ve Kuvvetli Rüzgârlı Günler Grafiği ise Şekil 10'da verilmektedir. Tabloya göre Rüzgar türbini için verimli rüzgar Mart-Eylül ayları arası en uygun aylardır. Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesinde ölçülen rüzgar hızları genel ortalamaları ise Tablo 5'de verilmektedir. Tablo 4'deki veriler MGM'nün Artvin ili için 2014 yılı

ortalama rüzgar hızları ile yakın değerler göstermektedir. MGM 2014 Artvin rüzgar hız değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 5. Ölçülen rüzgar hızları genel ortalamaları

2014 Yılı 20m Kuzeybatı – Güneydoğu (Seyitler Yerleşkesi)	
Ortalama rüzgar hızı (m/s)	3,7
En düşük rüzgar hızı (m/s)	0,4
En yüksek rüzgar hızı (m/s)	18,3

Şekil 11’den de görülebileceği üzere, Artvin’de rüzgar hızının en yüksek olduğu alanlar Çoruh Vadisi boyunca olduğu görülmektedir. Özellikle Artvin Merkez ilçe ile Borçka ilçesi arasında vadi boyunca faydalı enerjiye dönüştürülebilecek seviyede rüzgar potansiyeli olduğu anlaşılmaktadır. İlgili bölgede lokal ölçüm istasyonları kurulabilirse çok daha ayrıntılı sonuçlar alınması mümkün olacaktır.



Şekil 11. Artvin ili rüzgar santrali kurulabilir alanlar (Koç, 2014)

Ölçüm yapılan bölgede rüzgar hız değerleri gece boyunca en düşük değerlerde seyretmekte fakat sabah saatlerinde ve öğleden sonra en yüksek seviyelerine ulaşmakta olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 12’de Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesine BAP projesi kapsamında kurulan rüzgar türbini görülmektedir.



Şekil 12. Seyitler Yerleşkesinde kurulu rüzgar türbini

SONUÇ

Bu çalışmada Seyitler Yerleşkesi Mühendislik Fakültesi bölgesinde 20m Kuzeybatı – Güneydoğu yönüne ait ortalama rüzgar hızı 3,75623 – 3,79298 m/s olarak belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda Seyitler Yerleşkesi Mühendislik Fakültesi bölgesinde elde edilen hız değerleri, Şekil 10’da verilen bilgiler ışığında Tablo 6’daki verilerin ışığında rüzgar hızının hafif sınıfta olduğu görülmektedir. Dolayısıyla hafif sınıfta kalan rüzgar hızlarıyla, su pompaları çalıştırmak ve ikinci derece güç üretimi uygun olacağı öngörülmektedir.

Türkiye, sınırlı miktarda petrol ve doğal gaz rezervlerine sahip bir ülke olduğundan, enerji ihtiyacının önemli bir kısmını ithalat yoluyla karşılamak zorundadır. Bu durum, ülke ekonomisi üzerinde ciddi bir dış ticaret açığına ve enerji arz güvenliği açısından risklere yol açmaktadır. Enerjide dışa bağımlılığın azaltılması amacıyla, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesi stratejik önem taşımaktadır. Türkiye, sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli açısından oldukça avantajlı bir konumdadır. Yapılan teknik değerlendirmelere göre Türkiye'nin yıllık enerji potansiyeli aşağıdaki gibi belirlenmiştir (<https://www.enerji.gov.tr>, 2016):

- Hidroelektrik enerji: 47.497 MW/yıl
- Rüzgâr enerjisi: 48.000 MW/yıl
- Güneş enerjisi: 56.000 MW/yıl
- Jeotermal enerji: 610 MW/yıl
- Biyokütle enerjisi: 2,6 milyon TEP/yıl

Bu kaynakların değerlendirilmesi sürecinde, detaylı ve yerel koşullara özgü fizibilite çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir bulunan projelerin hayata geçirilmesi durumunda, Türkiye'nin hem enerji arz güvenliği sağlanabilir, hem de dışa bağımlılığı azaltılarak ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli kazanımlar elde edilebilir. Dolayısıyla, mevcut potansiyelin rasyonel biçimde kullanıma sunulması, geleceğe yönelik stratejik bir adım olacaktır.

Tablo 6. Rüzgar hızının türbine etkisi (<https://www.enerji.gov.tr>, 2016).

Rüzgar Hızı	Rüzgar Kategorisi	Rüzgar Türbinine Etkisi
0,0 – 1,8	Sakin	Yok
1,3 – 3,0	Çok Hafif	Yok
3,1 – 5,8	Hafif	Su pompalarını çalıştırabilir
5,9 – 8,5	Orta	Yararlı elektrik üretimi
8,6 – 11,0	Sert	Yararlı elektrik üretimi
11,1 – 14,0	Kuvvetli	Tam kapasite etkin
14,1 – 20,9	Çok Kuvvetli	Tam kapasite etkin
21,0 –	Fırtına	Zarar verici boyutta

Artvin yöresine yönelik daha kapsamlı rüzgar potansiyeli araştırılmasına ihtiyaç vardır. Bu konuda yapılacak olan çalışmaların önü açıktır. Çok daha uzun süreli ve çok daha fazla ölçüm noktasından daha fazla veri elde edilerek, gerçek şartlar daha iyi simüle edilebilir.

Artvin, ülkemizde enerji üretimi anlamında önde gelen illerden birisidir. Özellikle çoruh vadisi boyunca yapılacak daha detaylı rüzgar potansiyel araştırmaları daha anlamlı sonuçlar verecektir. İlgili vadideki rüzgar potansiyeli oldukça yüksektir.

KAYNAKLAR

- (DEKTMK), D. E. (2014). *Türkiye Enerji Verileri*. Ankara: Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi.
- AMİ. (2014). *Artvin Meteoroloji İstasyonu*. Rüzgar verileri. adresinden alındı
- Filik, Ü. B. (2007). Eskişehir'deki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyel Analizi. IV. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*. Gaziantep: EMO.
- GWEC. (2015). *Global Wind Energy Council (GWEC), Global wind report:Annual market update*. Gwec.net.
- http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html. (2015). *Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM)*. Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli. adresinden alındı
- http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html. (2016). *Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM)*. Rüzgar enerjisi REPA duyurusu. adresinden alındı
- <http://www.enerjiatlası.com>. (2016). <http://www.enerjiatlası.com>. Türkiye'nin Enerji atlası. adresinden alındı

<http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>. (2016). *Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)*. Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücü:2016 Mart sonu verileri. adresinden alındı
<https://temizenerji.org>. (tarih yok). <https://temizenerji.org>. adresinden alındı
<https://www.enerji.gov.tr>. (2016). *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. Resmi web sitesi. adresinden alındı
Koç, T. (2014). Kağıdağ yarımadası ve ortam. *Türkiye Coğrafya Dergisi*, 31, 167-182.
Yıldızay, H. D. (2014). Eskişehir'de rüzgar ve güneş enerji potansiyelinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 5(1), 49-50.

Yazar Katkıları

Sabit Korkak: Çalışmanın kavramsallaştırılması, metodolojinin oluşturulması, hesaplamaların ve analizlerin yapılması, görselleştirmeler, orijinal taslak yazımı ve makalenin büyük bölümünün düzenlenmesi.

Haluk Keleş: Metodolojik danışmanlık, sonuçların yorumlanması, analizlerin doğrulanması ve makalenin bilimsel açıdan gözden geçirilmesi.

Cafer Mert Yeşilkanat: Veri doğrulama, literatür taramasına katkı ve yazım sürecine destek.

Yaşar Kobya: Sonuçların değerlendirilmesine katkı, teknik öneriler ve nihai okuma süreçleri.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından çıkar çatışmasının olmadığı rapor edilmiştir.

Not

Artvin Çoruh Üniversitesi (AÇÜ) Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölüm Çalışanı Dr. Öğr. Üyesi Kazım Onur DEMİRARSLAN'a, AÇÜ MYO Mobilya-Dekorasyon Atölyesi çalışanlarına ve AÇÜ Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) Koordinatörlüğüne 2013F42.02.01 nolu projeye desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Etik Bildirim

Çalışma için etik kurul izni gerekmiyor.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına Yönelik İletken Polimerler Üzerine Yapılmış Çalışmalar-WOS Bibliyometrik Analizi

Studies on Conducting Polymers for Sustainable Development Goals - WOS Bibliometric Analysis

Gökhan Güven Batır

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Yıldızeli Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü,
Sivas, Türkiye

ORCID: 0000-0001-9568-5767, gokhanbatir@cumhuriyet.edu.tr

Geliş Tarihi: 22 Eki 2025 - **Kabul Tarihi:** 20 Kas 2025

DOI: 10.55205/joctensa.3220241808808

ATIF: Batır, G.G. (2025). Sürdürülebilir kalkınma amaçlarına yönelik iletken polimerler üzerine yapılmış çalışmalar-wos bibliyometrik analizi. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (2), 35-56.

ÖZ

Bu çalışmada, 2015–2023 yılları arasında Web of Science (WoS) veri tabanında yayımlanan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile ilişkili iletken polimer araştırmaları bibliyometrik açıdan analiz edilmiştir. "Conduct* polymer" terimi kullanılarak yapılan aramada, SKA ile ilgili 8172 yayına ulaşılmış ve bu yayınlar tür, ülke, yazar, atıf ve anahtar kelime bakımından incelenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, araştırmaların multidisipliner bir yapıda olduğu ve en çok yayının "Multidisipliner Malzeme Bilimi" kategorisinde yer aldığı görülmüştür. En yaygın yayın türü makale olmuştur. En çok yayın yapan ülkeler bazında Çin ilk sırada yer alırken, Türkiye 8. Sırada yer almıştır. En üretken yazar 76 yayınlı Wang Y olarak belirlenmiştir. Yazar ağ analizlerinde ise Magnus Berggren, 59 kişilik ağıyla ve yüksek atıf ortalamasıyla öne çıkmıştır.

SKA kapsamında en çok çalışılan alanlar sırasıyla SKA 3 (Sağlık ve Kaliteli Yaşam), SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) ve SKA 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji) olmuştur. Anahtar kelime analizleri, "conducting polymer" teriminin "conductive polymer" teriminden daha sık kullanıldığını ve Polianilin, PEDOT, Süperkapasitör gibi konuların yoğun çalışıldığını göstermiştir. Bu çalışma, alanın enerji, sağlık ve çevre gibi kritik konularda hızla geliştiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları, İletken Polimer, Bibliyometrik.

ABSTRACT

This study provides a bibliometric analysis of conductive polymer research related to Sustainable Development Goals (SDGs) published in the Web of Science (WoS) database between 2015 and 2023. Using the term "Conduct* polymer," 8172 publications related to SDGs were identified and analyzed in terms of type, country, author, citation, and keywords.

According to the analysis results, the research has a multidisciplinary structure, with most publications falling under the "Multidisciplinary Materials Science" category. The most common type of publication has been the article. China ranks first among countries with the

* Sorumlu Yazar: gokhanbatir@cumhuriyet.edu.tr

highest number of publications, while Turkey is in 8th place. The most productive author was identified as Wang Y with 76 publications. In author network analyses, Magnus Berggren stood out with a network of 59 people and a high average citation rate.

Within the scope of SDGs, the most studied areas were SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 7 (Affordable and Clean Energy), respectively. Keyword analyses showed that the term "conducting polymer" was used more frequently than "conductive polymer," and topics such as Polyaniline, PEDOT, and Supercapacitor were intensively studied. This study reveals that the field is rapidly developing in critical areas such as energy, health, and environment.

Keywords: Sustainable Development Goals, Conducting Polymer, Bibliometric.

GİRİŞ

Bibliyometrik araştırma yönteminde, literatüre nicel ölçümler uygulanarak çalışmalar; yazar, yayın, alıntı ve içerik bakımından incelenmektedir. Bibliyometrik araştırmanın en önemli özelliği, bilimsel bir alanda gerçekleşen çalışmaların ve değişen eğilimlerin ölçülmesidir. Birleşmiş Milletler (BM) 25 Eylül 2015 tarihinde New York'ta düzenlenen Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi'nde bir araya gelen ülke liderleri ile 2030 yılına kadar dünyada yoksulluğun tüm boyutlarıyla ortadan kaldırılması ve insanlığın ortak refahının sağlanması için 17 amaç ve 169 hedeften oluşan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını kabul etmiştir (<https://sdgs.un.org/>). Bu çalışmada Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına yönelik iletken polimerler üzerine 2015-2023 yılları arasında yapılan çalışmalar bibliyometrik olarak incelenmiştir.

Literatür incelendiğinde, polimer biliminin farklı alt dallarındaki bilimsel üretim ve eğilimleri ortaya koymak amacıyla çeşitli bibliyometrik analizlerin gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu çalışmalar, belirli uygulama alanlarına veya malzeme türlerine odaklanarak alanın gelişimini haritalandırmıştır. Baharin ve arkadaşları, iletken polimer sensörlerinin amonyak gazı tespitindeki kullanımını Scopus veritabanı üzerinden incelemiş ve sensör teknolojilerindeki araştırma yoğunluğunu ortaya koymuştur (Baharin vd. 2024). Benzer şekilde Prathap, polimer güneş pilleri üzerine yapılan araştırmaların bibliyometrik bir değerlendirmesini sunarak enerji alanındaki uygulamalara dikkat çekmiştir (Prathap 2014). Malzeme odaklı çalışmalarda ise melamin bazlı gözenekli polimerik malzemelerin sentez stratejileri incelenmiş (Alkayal 2025); Mittas ve arkadaşları moleküler baskılanmış polimerler (MIPs) üzerine araştırma dinamiğini analiz etmiştir (Mittas vd. 2023). Ayrıca Bazan ve arkadaşları, oral formülasyonlarda polisakkaritlerin kullanımını ve bilimsel işbirliklerini irdelemiştir (Bazan vd. 2025).

Sürdürülebilirlik ve çevresel etki bağlamında yapılan çalışmalar incelendiğinde sürdürülebilir polimerler üzerine sadeleştirilmiş bir bibliyometrik haritalama yapılarak alanın genel çerçevesi çizilmiştir (De Sousa 2022). Srivastava ve Saxena, son 30 yılın sürdürülebilir mühendislik çalışmalarını bibliyometrik olarak gözden geçirmiş ve döngüsel ve yeşil polimer biliminin yükselişini vurgulamıştır (Srivastava ve Saxena 2025). Tănase ve arkadaşları ise fiber takviyeli polimerlerin sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri üzerine kapsamlı bir literatür taraması sunmuştur (Tănase vd. 2024). Türkiye özelinde de iklim krizi, karbon ayak izi ve sürdürülebilirlik kavramlarına yönelik genel bibliyometrik analizler mevcuttur (Ata ve Aksu 2023; Durmuş ve Gücüyeter 2024; Şahin ve Demiral 2023).

Ancak, yukarıda değinilen çalışmalar ya genel olarak polimerlere, ya spesifik bir uygulama alanına (sensör, güneş pili vb.) ya da genel sürdürülebilirlik kavramına odaklanmıştır. İletken polimerlerin, Birleşmiş Milletler'in belirlediği Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile doğrudan ilişkisini ele alan ve bu kesişim noktasındaki bilimsel üretimi bütüncül bir yaklaşımla analiz eden bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu bağlamda çalışmamız, iletken polimer araştırmalarının SKA hedefleriyle nasıl örtüştüğünü ortaya koyarak literatürdeki bu boşluğu doldurmayı ve kuramsal çerçeveye katkı sunmayı hedeflemektedir.

Bu amaç doğrultusunda çalışmada, aşağıdaki sorulara yanıt aramaktadır:

-SKA ve iletken polimerler alanındaki bilimsel üretimin (yayın sayısı, türü ve yıllara göre dağılımı) genel eğilimi nasıldır?

-Alana en çok katkı sağlayan ve en etkili olan aktörler (yazarlar, ülkeler, kurumlar ve dergiler) hangileridir?

-İletken polimer araştırmaları, Birleşmiş Milletler'in 17 Sürdürülebilir Kalkınma Amacı'ndan hangileriyle daha güçlü bir ilişki içerisindedir?

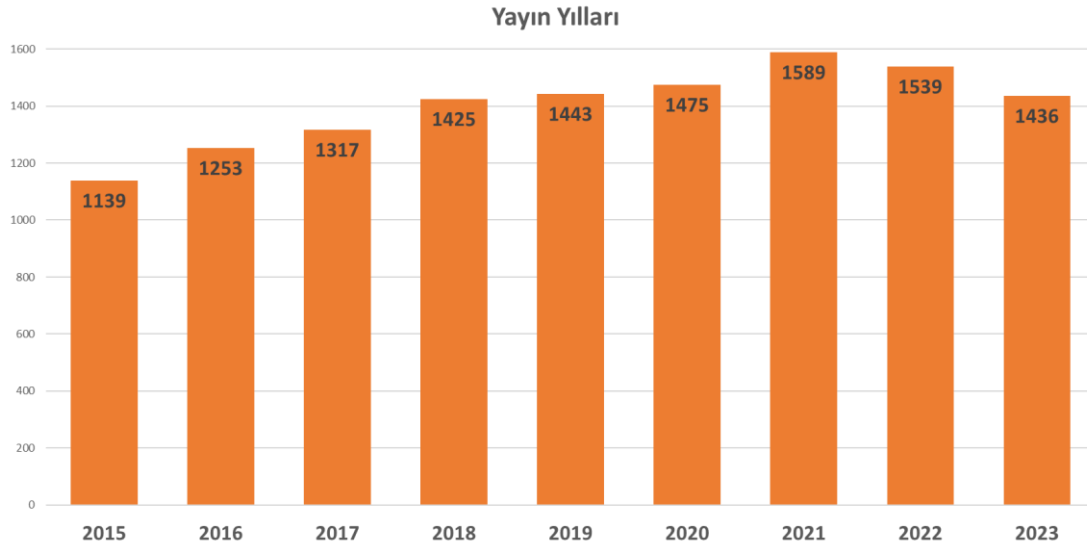
-Alandaki güncel araştırma eğilimleri, kavramsal yapı ve öne çıkan anahtar kelimeler zaman içinde nasıl bir değişim göstermiştir?

MATERYAL VE YÖNTEM

Web of Science (WoS) nitelikli akademik çalışmalar açısından güvenilir bir veri kaynağı olduğu için literatür taramaları bu platformda yapılmıştır (Ata ve Aksu 2023; Durmuş ve Gücüyeter 2024; Şahin ve Demiral 2023; Usta 2023). Verilerin görselleştirilmesi ve haritalanması aşamasında ise Van Eck ve Waltman (2010) tarafından geliştirilen VOSviewer yazılımı kullanılmıştır. VOSviewer, bibliyometrik ağları (yazar işbirlikleri, ortak atıf, anahtar kelime eşleşmeleri vb.) oluşturmak ve görselleştirmek için "Görselleştirme Benzerlikleri" (Visualization of Similarities - VOS) tekniğini kullanan güçlü bir araçtır. Diğer yazılımlara kıyasla, büyük veri setlerini daha anlaşılır kümeler (cluster) halinde sunması ve grafiksel arayüzünün yorumlamayı kolaylaştırması nedeniyle çalışmada tercih edilmiştir. Çeşitli polimerler ile ilgili yapılmış olan bibliyometrik çalışmalar bulunmaktadır (Alkayal 2025; Baharin vd. 2024; Bazan vd. 2025; Mittas vd. 2023; Prathap 2014; De Sousa 2022; Srivastava ve Saxena 2025; Tănase vd. 2024). Fakat sürdürülebilirlik ve iletken polimerleri birlikte ele alan bibliyometrik çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle bibliyometrik analiz için WoS'daki tarama "conduct* polymer" olarak "topic" düzeyinde 2015-2023 yılları arası seçilerek yapılmıştır. Topic araması yapılırken özellikle * ifadesi konulmuştur. Çünkü yayınların bazılarında iletkenlik için "conducting" şeklinde bahsedilirken bazılarında ise "conductive" şeklinde ifadeler kullanılmıştır.

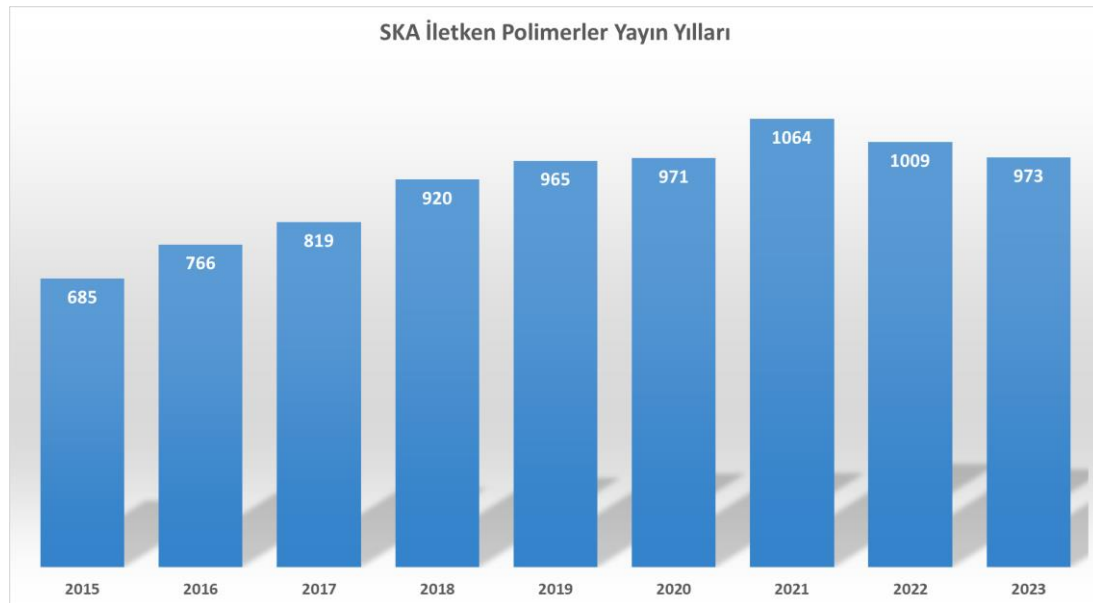
BULGULAR

Hiçbir sınırlama yapılmadan çıkan sonuçlara bakıldığında dünya genelinde çıkan yayın sayısı 12616 olarak bulunmuştur. Yıllara göre sürdürülebilir kalkınma amaçları seçilmeden çıkan yayın sayısı Şekil 1'de verilmiştir.



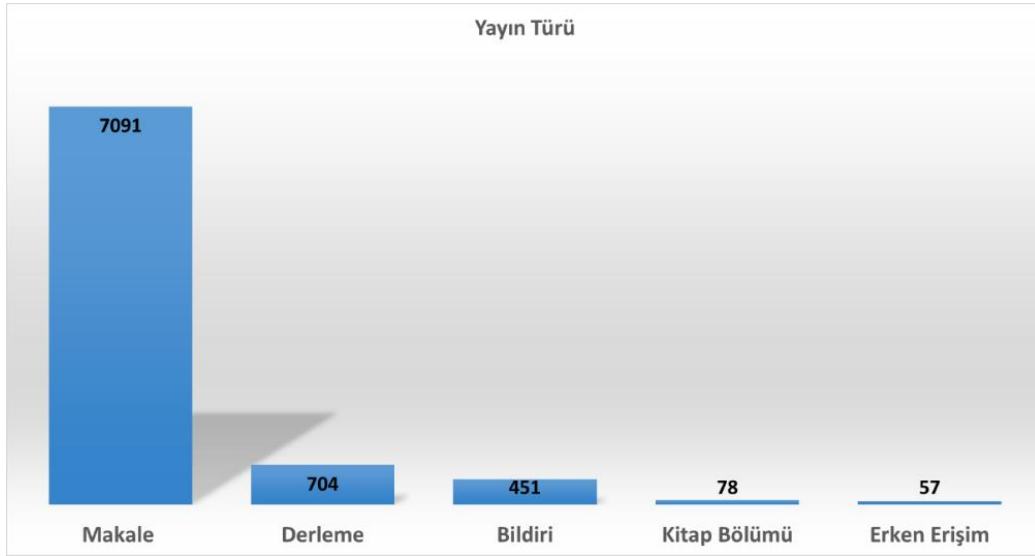
Şekil 1. İletken polimer için yayınlanan makale sayısının yıllara göre değişimi

WoS'ta Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarının kabul edildiği ilk yıl olan 2015 ile 2023 yılları arası yapılan yayınlar olacak şekilde kısıtlanarak devam edilmiştir. Bu şekilde kısıtlama yapıldığında 8172 adet yayın bulunmuştur (Şekil 2).



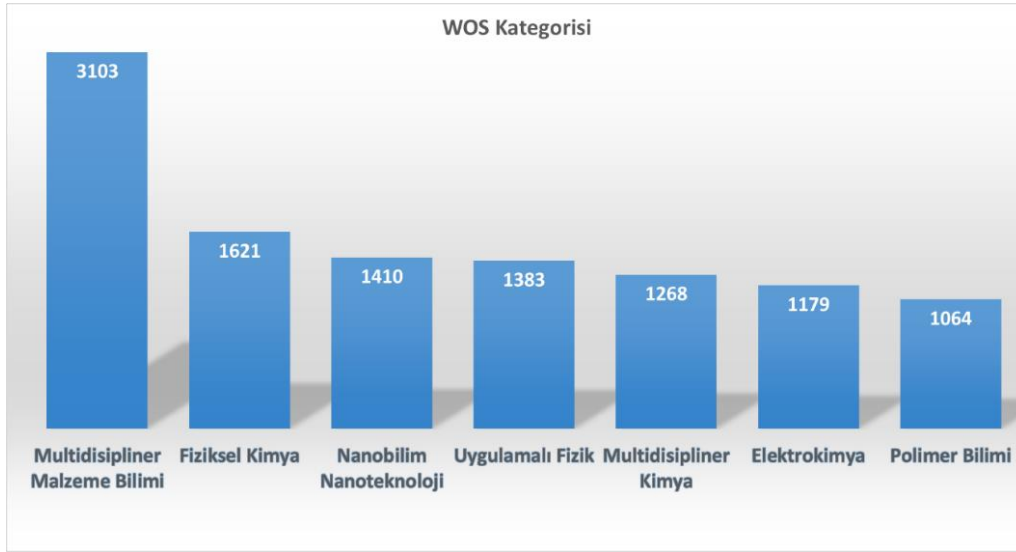
Şekil 2. SKA'ya yönelik iletken polimer için yayınlanan makale sayısının yıllara göre değişimi (2015-2023)

Son yıllardaki makale sayılarına bakıldığında istikrarlı şekilde devam ettiği görülmüştür (Şekil 2).



Şekil 3. SKA'ya yönelik iletken polimer yayın türleri sayısı

İletken polimerler konusunda yapılan yayın türleri incelendiğinde en fazla yapılan çalışma türünün makale olduğu ve yayın yapılmıştır (Şekil 3). Bunu sırasıyla derleme ve konferans bildirimi izlemiştir.



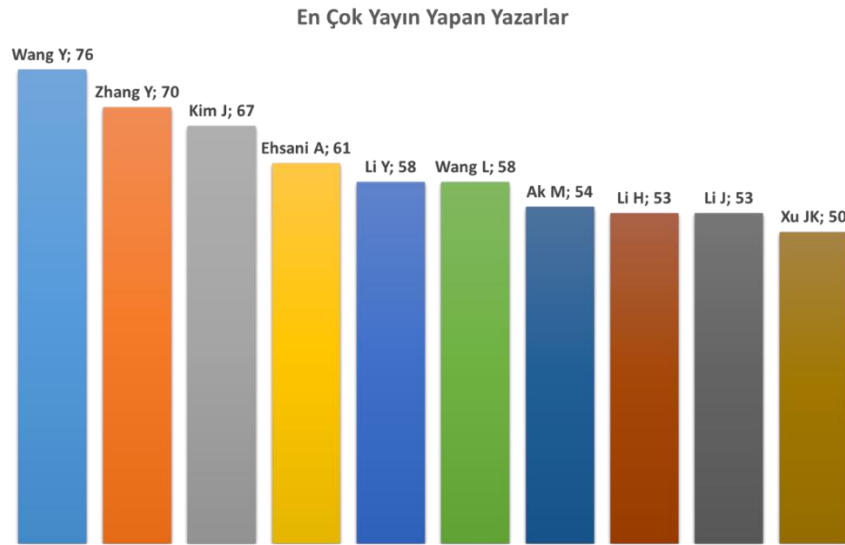
Şekil 4. WoS'ta seçilen kategoriler

WoS kategorileri kapsamında en çok yapılan çalışmaların 7 tanesi Şekil 4'de belirtilmiştir. WoS kategorilerine göre Multidisipliner Malzeme Bilimi kategorisinde çok yayın yapıldığı görülmüştür. Bu da artık iletken polimerlerin sentezlendikten sonra farklı bilim dallarında kullanımlarının yaygınlaştığını kanıtlamaktadır. Bu kategoriyi sırasıyla Fiziksel Kimya ve Nanobilim Nanoteknoloji takip etmiştir.



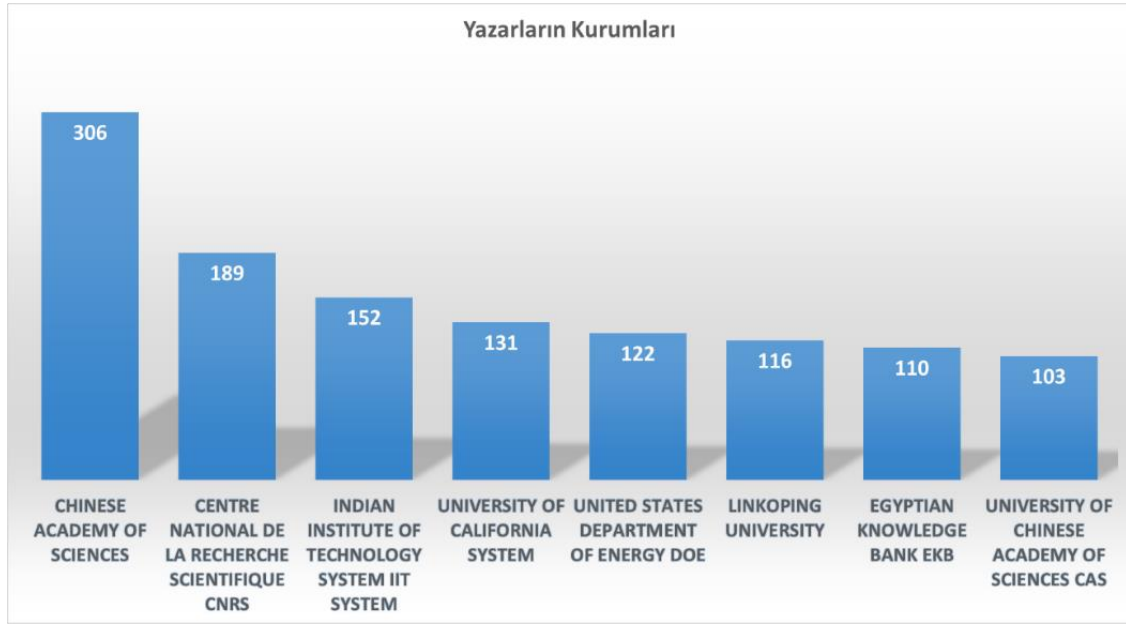
Şekil 5. Dergilerin listesi

Dergi listeleri incelendiğinde ACS APPLIED MATERIALS INTERFACES ve ELECTROCHIMICA ACTA ilk iki sırada yer almaktadır (Şekil 5).

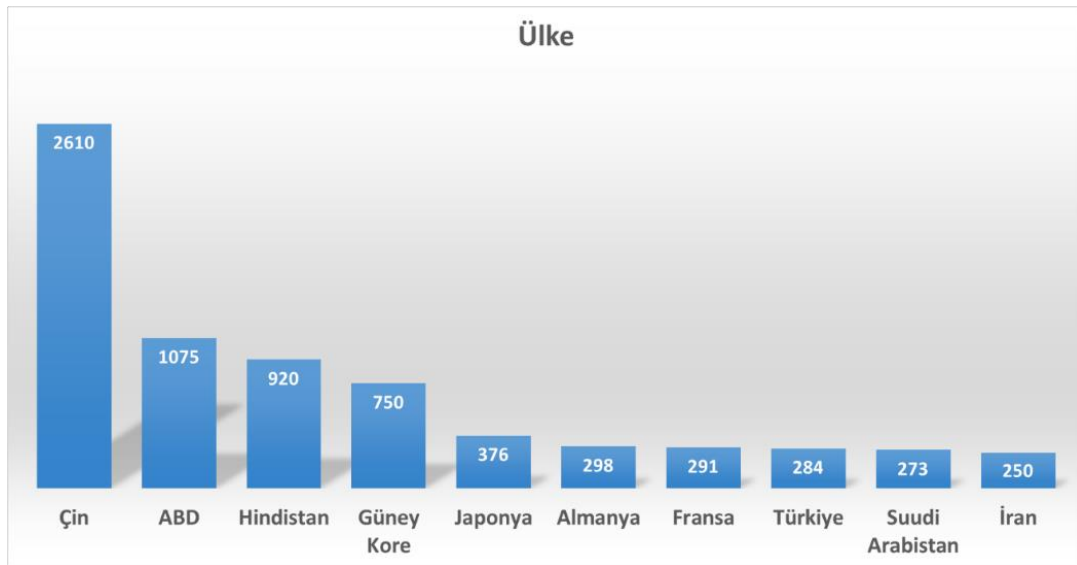


Şekil 6. Yazar listesi

En çok yayın yapan 10 yazarın listesi Şekil 6.'da verilmiştir. İlk üç sırada Çinli yazarlar yer almıştır. Yayın yapılan üniversite adreslerinde de Çin ilk sırada olduğu ortaya çıkmıştır. Yazarların kurumları da incelendiğinde aynı durum ortaya çıkmaktadır (Şekil 7).

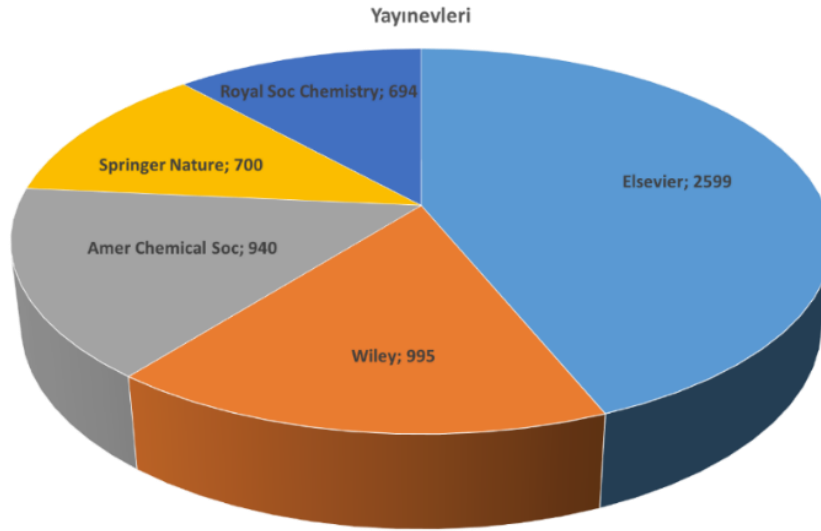


Şekil 7. Yazarların çalıştığı kurum adresleri



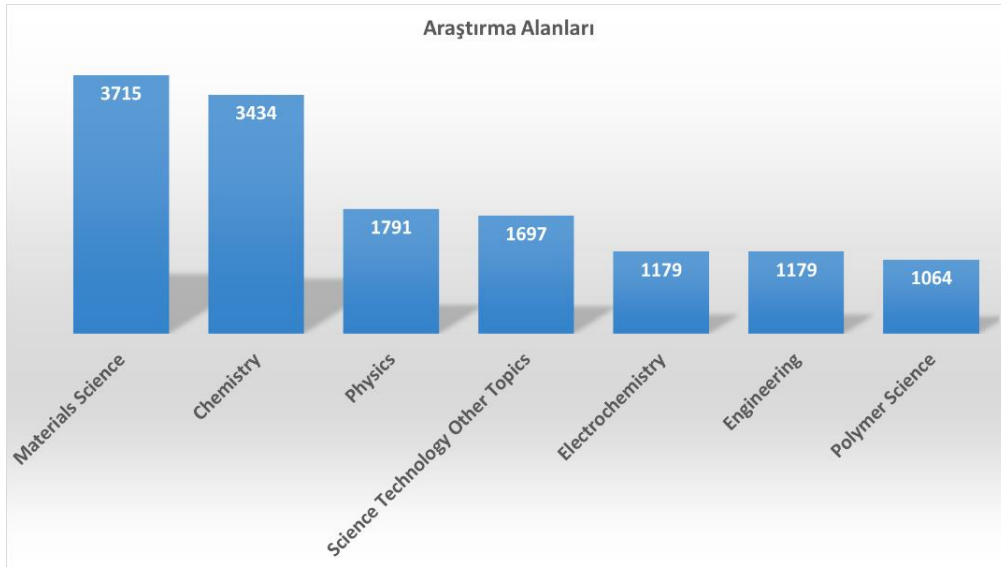
Şekil 8. Yazarların çalıştığı Ülkeler

Yazarların çalıştığı ülkelere bakıldığında yine Çin ön plana çıkmaktadır. Türkiye adresli yayınlar dikkate alındığında, sekizinci sırada yer aldığı görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 9. Yayınevi listesi

Yayınevi listeleri Şekil 9’da verilmiştir. Yayınların çoğu Hollanda merkezli olan Elsevier firmasının dergilerinden çıkarılmıştır.



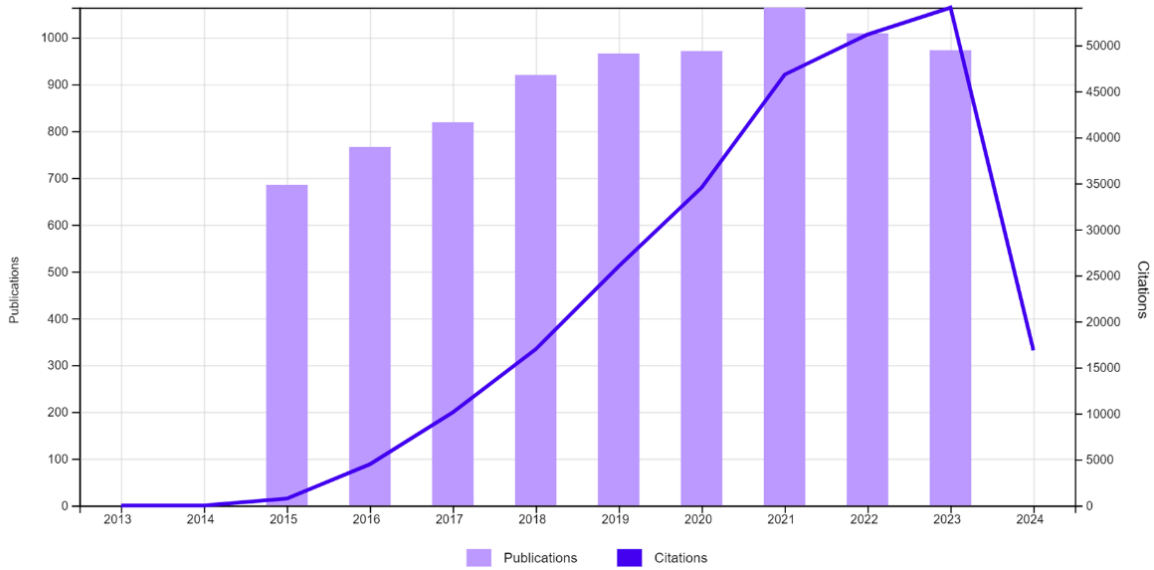
Şekil 10. Araştırma alanları

Araştırma alanları incelendiğinde Materyal Bilimi öne çıkmıştır fakat ülkemizde Polimer Bilimi son yıllarda ayrı bir anabilim dalı olarak görülmeye başlandığı için genel olarak kimyada daha fazla araştırma konusu olduğu söylenebilir (Şekil 10). İletken polimer üretimi çoğunlukla malzeme mühendisleri ve kimyacılar tarafından yapılmaktadır fakat iletkenliğini daha çok fizikçiler çalışmaktadır.

Tablo 1. SKA kapsamında yapılan yayın sayıları

SKA	Yayın Sayısı
03 Sağlık ve Kaliteli Yaşam	2815
11 Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar	2603
07 Erişilebilir ve Temiz Enerji	2187
06 Temiz Su ve Sıhhi Koşullar	520
09 Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı	87
12 Sorumlu Tüketim ve Üretim	69
13 İklim Eylemi	60
01 Yoksulluğa Son	6
02 Açlığa Son	5
14 Sudaki Yaşam	5
15 Karasal Yaşam	5
05 Toplumsal Cinsiyet Eşitliği	3
08 İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme	2
04 Nitelikli Eğitim	1
16 Barış, Adalet ve Güçlü Kurumlar	1

SKA kapsamında kategorize edilmiş yayın sayıları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde son yıllarda Avrupa Birliği ve ülkemizin de ilerleme politikalarında çok değiştiği konular ilk üç sırada yer almıştır.

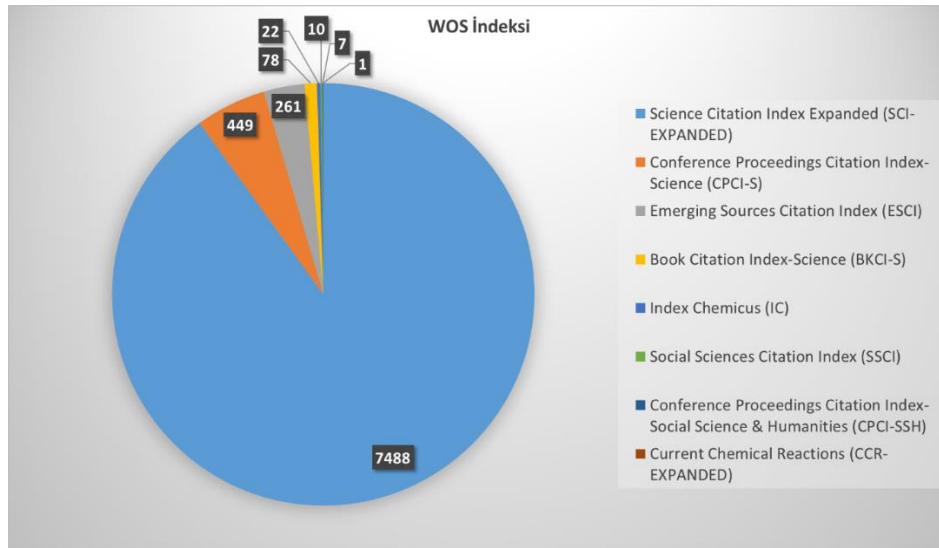
**Şekil 11.** Yıllara göre makale-atıf sayısı

Yıllara göre makalelerin aldığı yayın-atıf oranları incelendiğinde son yıllarda artış gösteren yayınlarla birlikte atıf sayısının da yükseldiği görülmüştür (Şekil 11).

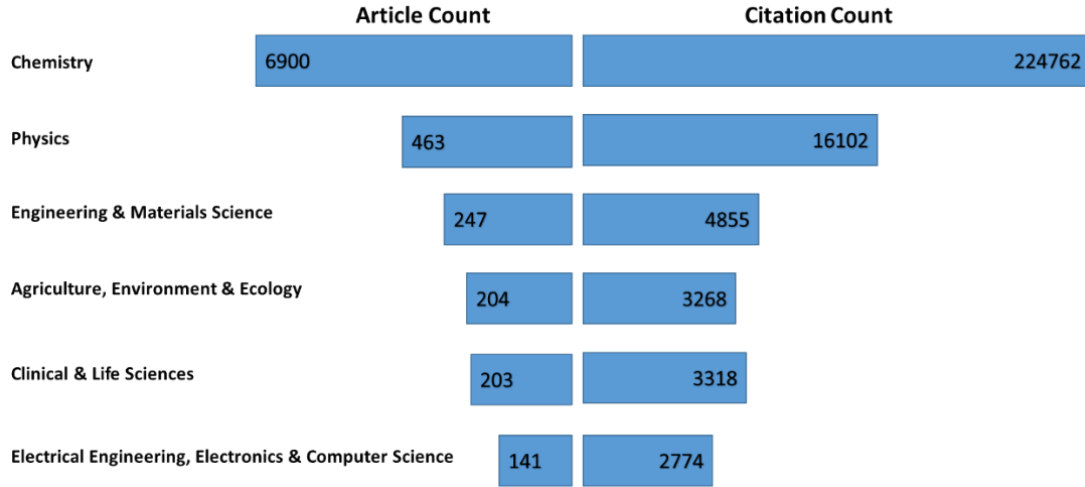
Tablo 2. En çok atıf alan 10 yayın

Yayın İsmi	Dergi	Çeyreklik	Yayın Yılı	Toplam Atıf	Yıllık Ortalama	2021	2022	2023	2024
Graphitic Carbon Nitride (g-C ₃ N ₄)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer To Achieving Sustainability?	CHEMICAL REVIEWS	Q1	2016	5320	591,11	972	855	726	187
The rise of plastic bioelectronics	NATURE	Q1	2016	1225	136,11	214	186	199	56
Designing solid-state electrolytes for safe, energy-dense batteries	NATURE REVIEWS MATERIALS	Q1	2020	1112	222,4	246	304	369	119
Organic electrochemical transistors	NATURE REVIEWS MATERIALS	Q1	2018	1107	158,14	207	236	259	76
A highly stretchable, transparent, and conductive polymer	SCIENCE ADVANCES	Q1	2017	1098	137,25	223	184	183	41
Electronic Skin: Recent Progress and Future Prospects for Skin-Attachable Devices for Health Monitoring, Robotics, and Prosthetics	ADVANCED MATERIALS	Q1	2019	1056	176	277	305	273	88
Polymer electrolytes for lithium polymer batteries	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	Q1	2016	991	110,11	192	152	158	36
Research progress on conducting polymer based supercapacitor electrode materials	NANO ENERGY	Q1	2017	945	118,13	175	170	161	40
Coupled molybdenum carbide and reduced graphene oxide electrocatalysts for efficient hydrogen evolution	NATURE COMMUNICATIONS	Q1	2016	878	97,56	121	93	60	19
Effective Approaches to Improve the Electrical Conductivity of PEDOT:PSS: A Review	ADVANCED ELECTRONIC MATERIALS	Q1	2015	855	85,5	140	140	151	45

En çok atıf alan 10 yayın incelendiğinde derleme makaleleri ve dergi çeyrekliğinin atıf sayısını etkilediği söylenebilir (Tablo 2).

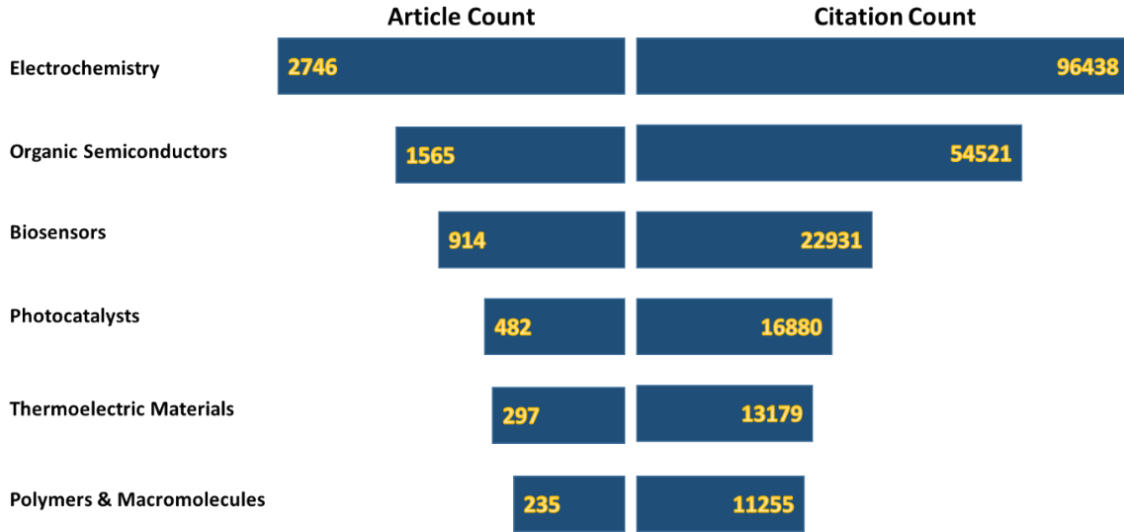
**Şekil 12.** WoS indeksleri

WoS indekslerine göre yayınlar Şekil 12’de verilmiştir. 7488 adet ile en çok SCI-EXPANDED kategorisinde yayın yapılmıştır.



Şekil 13. Makro seviyesinde makale ve atıf sayıları

Makro seviyede makale ve atıf sayıları incelendiğinde Kimya 6900 makale sayısı ve 224762 atıf ile ilk sırada yer almaktadır (Şekil 13).



Şekil 14. Mezo seviyesinde makale ve atıf sayıları

Mezo seviyede makale ve atıf sayıları incelendiğinde Elektrokimya 2746 makale sayısı ve 96438 atıf ile ilk sırada yer almaktadır (Şekil 14).

	Article Count	Citation Count
Supercapacitor	1349	53035
Stretchable Electronics	819	33234
Lithium-Sulfur Batteries	661	22058
Organic Solar Cells	652	19661
Glucose Oxidase	575	14450
Thermoelectric Properties	290	13129

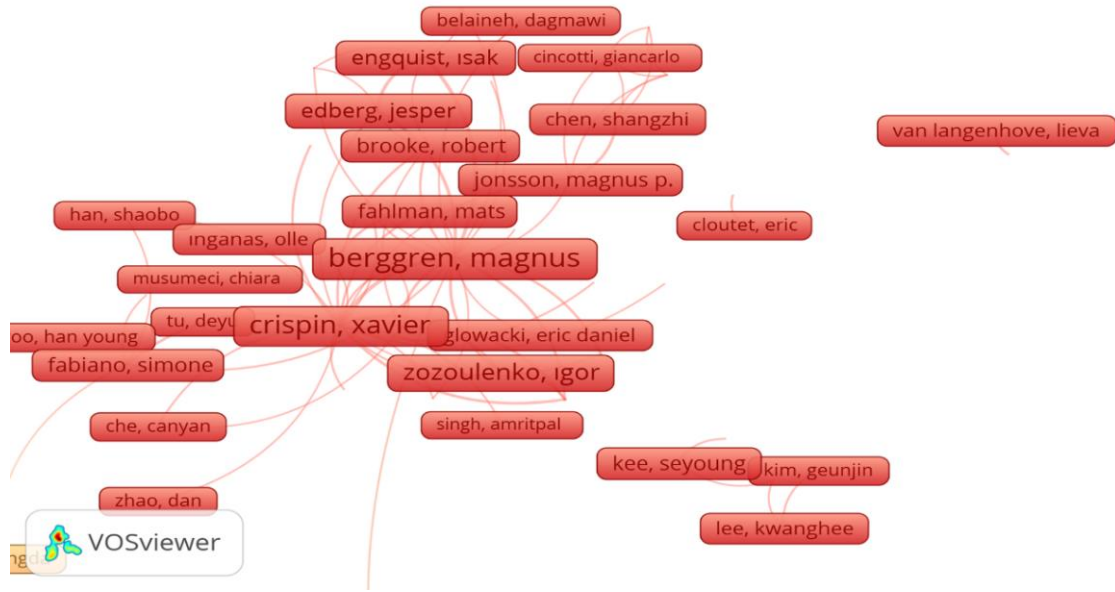
Şekil 15. Mikro seviyesinde makale ve atıf sayıları

Mikro seviyede makale ve atıf sayıları incelendiğinde Süperkapasitör 1349 makale sayısı ve 53035 atıf ile ilk sırada yer almaktadır (Şekil 15).



Şekil 16. Yazarların makale ağları

Yazarların makale ağlarına baktığımızda 31 adet küme ve 813 kişiyle çalıştığı ortaya çıkmıştır. En çok çalışmayı Magnus Berggren'in yaptığı bulunmuştur (Şekil 16).



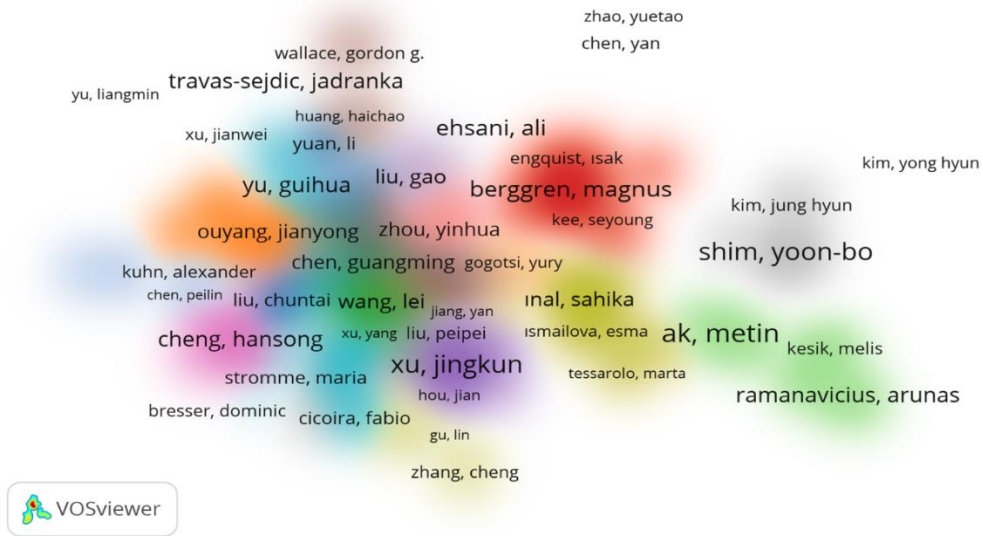
Şekil 17. Magnus Berggren yazar ağı

Biraz daha ayrıntılı yazarların ağlarına bakacak olursak Magnus Berggren'in 59 kişiyle en fazla ağa sahip olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 17).



Şekil 18. Yazarların ortalama atıf sayıları

Yazarların ortalama atıflarına bakacak olursak alanda en çok ağa sahip olan Berggren'in atıf alma da üst sıralarda olduğu görünmektedir (Şekil 18). İletken polimer çalışmak istenirse çalışmalarına bakılacak ilk kişinin de Berggren olacak diyebiliriz.



Şekil 19. Yazarların küme yoğunlukları

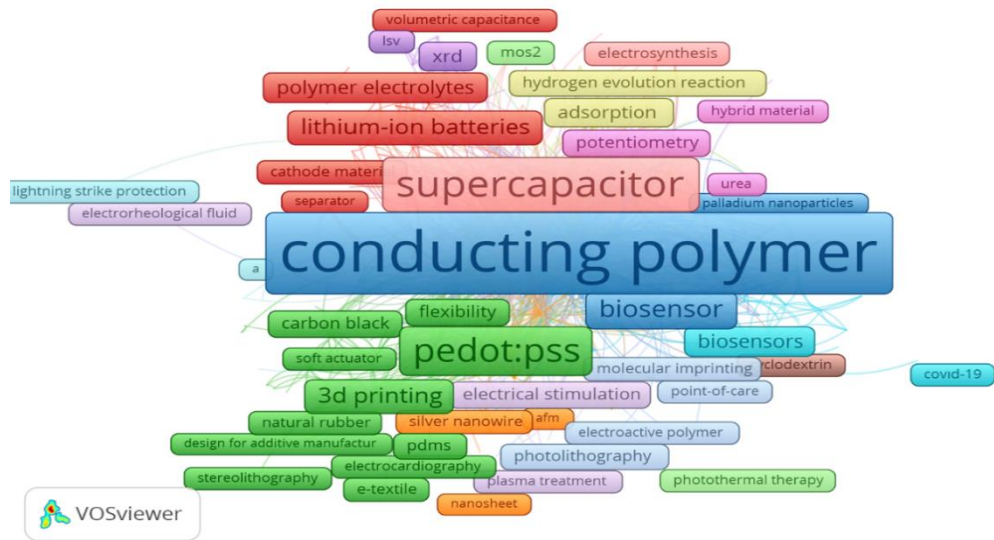
Kümelerin yoğunluk analizine bakıldığında Berggren, Ouyang ve Xu etrafında olduğu görülmektedir (Şekil 19).

Tablo 3. En çok kullanılan anahtar kelimeler

Anahtar Kelime	Görülme Sayısı	Toplam Bağlantı
conducting polymer	881	1957
conductive polymer	468	956
pss	383	943
polyaniline	308	843
pedot	321	843
supercapacitor	337	771
polypyrrole	306	679
conducting polymers	240	509
pedot:pss	151	456
graphene	139	427
supercapacitors	164	415
nanocomposite	126	351
carbon nanotubes	131	340
energy storage	115	306
electrochemistry	108	277
nanocomposites	96	265
biosensor	95	263
electropolymerization	103	253
composite	87	243
conductive polymers	119	242

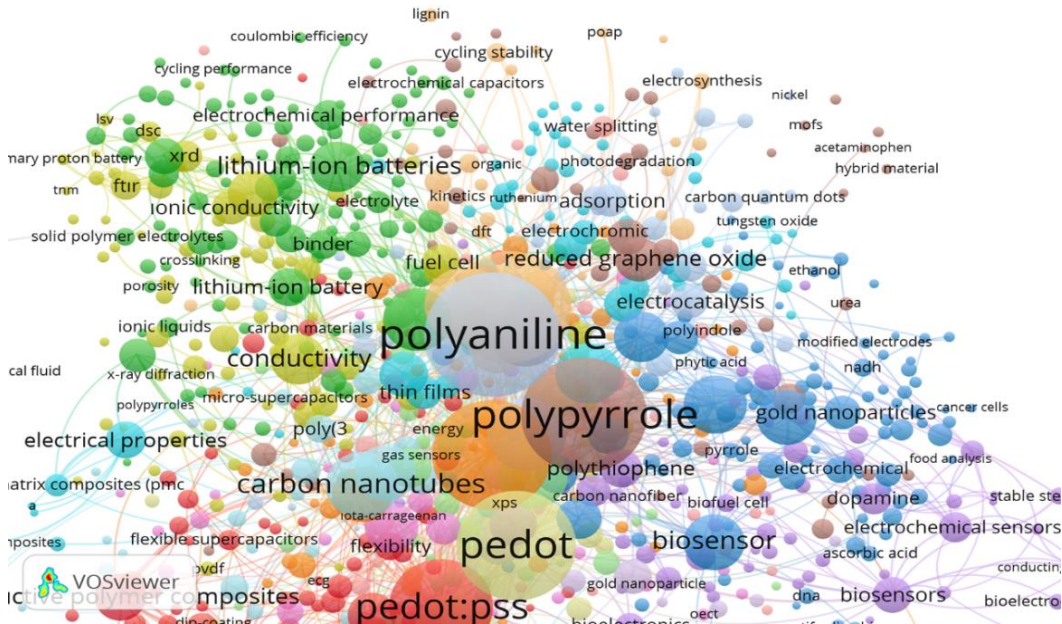
Belirlenen yıllar arasında en çok tercih edilen anahtar kelimelerin listesi Tablo 3’de verilmiştir. Bizde arama kısmına iletken polimerlerin farklı kullanımları olduğu için * koyarak

arama yapmıştık. Tabloya bakıldığında daha çok Conducting şeklinde tercih edildiği görülmektedir.



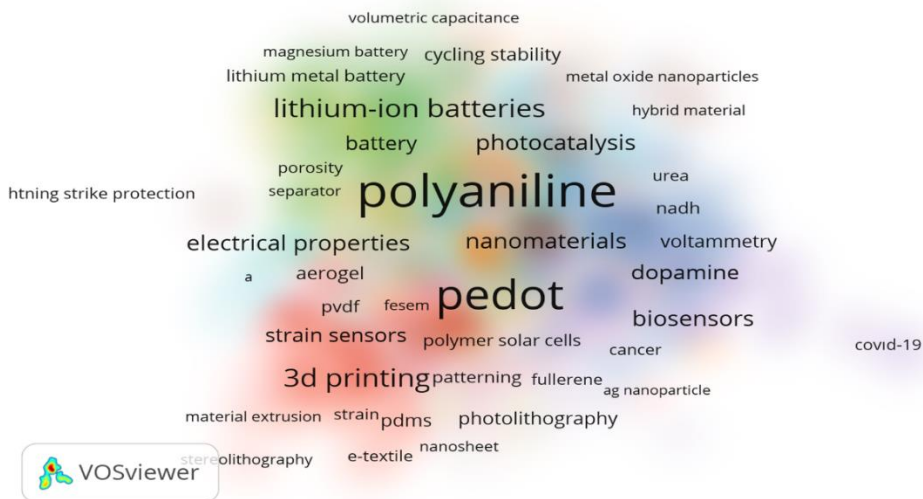
Şekil 20. Anahtar kelimeler

Anahtar kelimelerde 1000 başlık sınırladığımızda 15 küme ortaya çıkmıştır. En az 2 anahtar kelime içermesi seçilmiştir (Şekil 20).



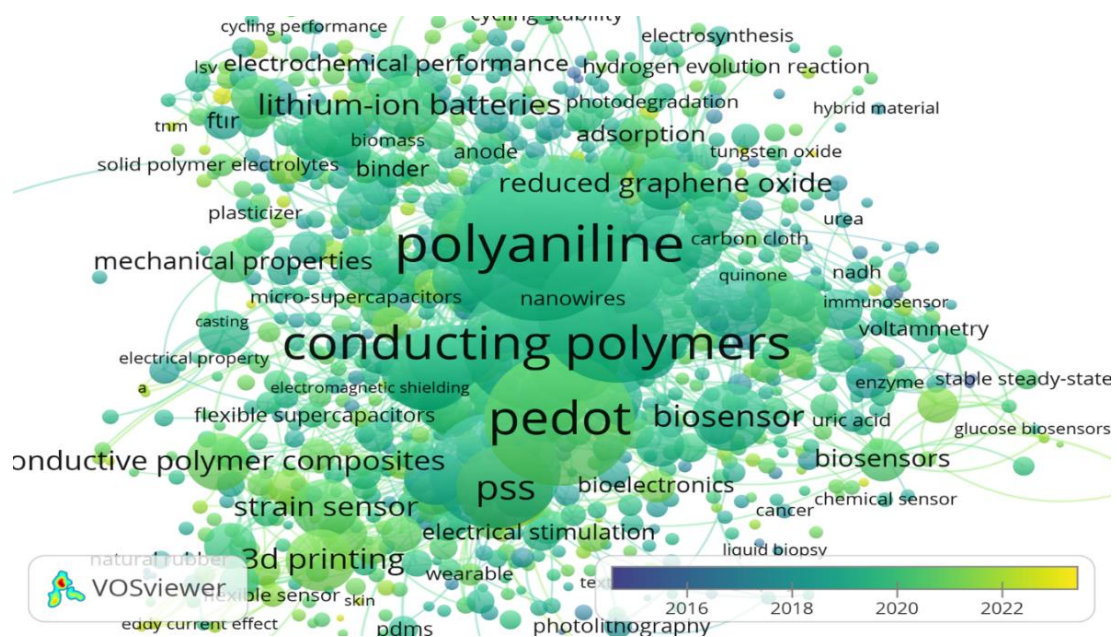
Şekil 21. İletken Polimer Çıkarıldığında Kullanılan Anahtar Kelimeler

Anahtar kelimelerde 17 küme 998 başlık ortaya çıkmıştır. En az 2 anahtar kelime içermesi seçilmiştir. Anahtar kelimeler incelenirken ilk başta arama yaparken kullandığımız iletken polimerleri çıkardığımızda en fazla kullanılan kelime Polianilin ve Polipirol olmuştur (Şekil 21).



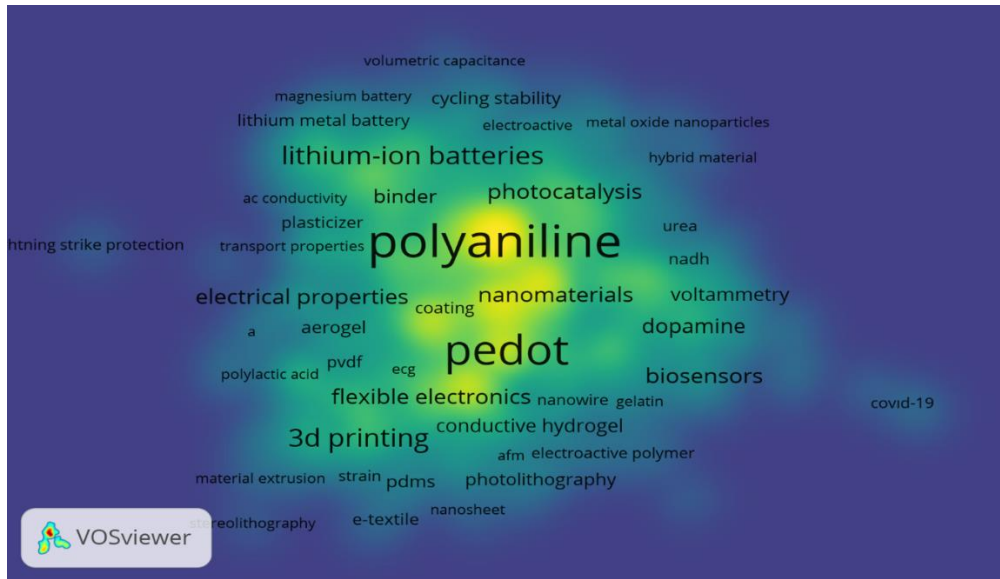
Şekil 22. İletken polimer çıkarıldığında kullanılan anahtar kelimelerin yoğunluğu

Yoğunluk görseline bakıldığında da polianilin ve pedot kelimelerinde yoğunluk gözlenmektedir (Şekil 22).



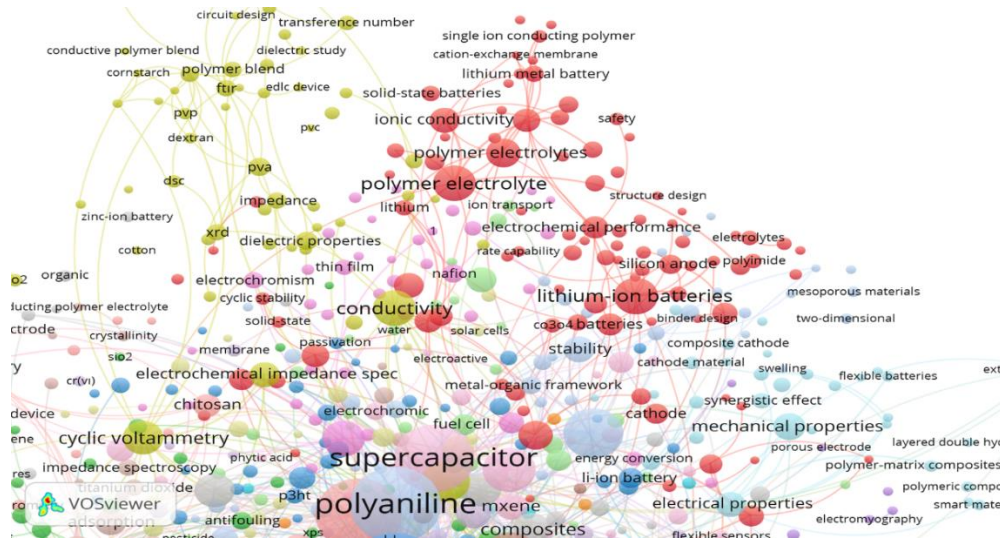
Şekil 23. Yıllara göre kelime seçimleri

Yıllara göre kelime seçimlerine bakıldığında polianilinin 2018-2020 yılları arasında daha çok tercih edildiği söylenebilir (Şekil 23).



Şekil 24. Anahtar kelimelerin yoğunluk grafiği

Yoğunluk görseline baktığımızda polianilin, nanomateryaller, pedot, lityum iyon piller ve esnek elektronik üzerine olduğu görülmektedir. Çalışmalarımızı yaparken veya anahtar kelimeleri seçerken tercihlerimizi bu yönde yapmamızda fayda olabilir.



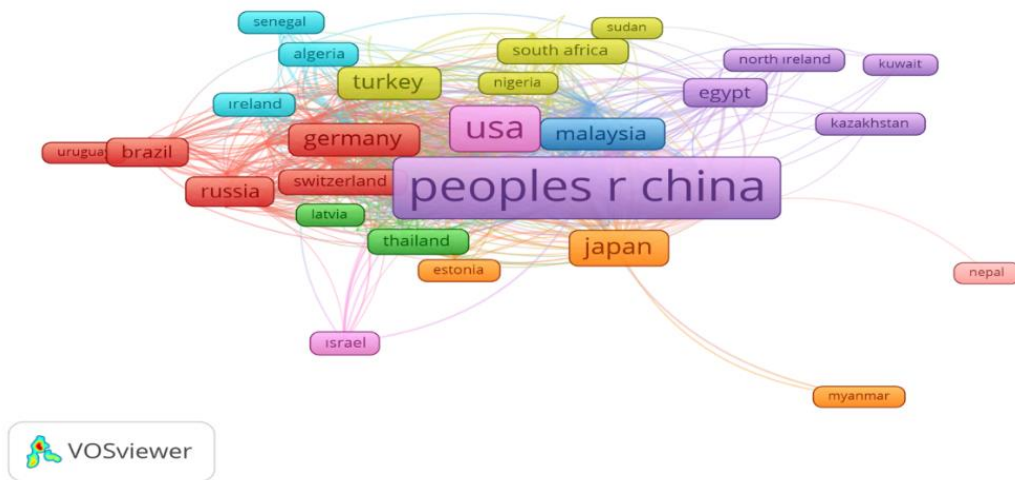
Şekil 25. 2020-2023 yıllarında kullanılan anahtar kelimelerin ağ haritası

2020-2023 yıllarında en çok tercih edilen anahtar kelimelere bakıldığında 24 küme 994 başlık ortaya çıkmıştır. Başlık sayısı en fazla olan kümenin ağ haritasına bakıldığında süper kapasitör, polianilin, CV ve piller yine en çok tercih edilenler arasındadır.

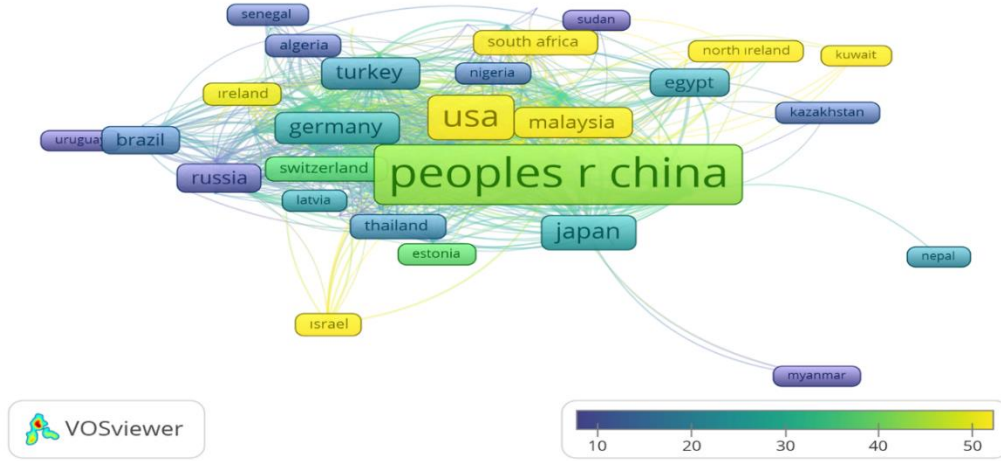
Tablo 4. Yayınların yapıldığı ülkeler

Ülke	Yayınlar	Atıflar	Güçlülük
Çin	2611	108949	858
ABD	1076	65640	718
Hindistan	920	19339	388
Suudi Arabistan	273	9080	382
Güney Kore	750	24811	315
İngiltere	218	9108	310
Fransa	291	9997	293
Almanya	298	7191	287
Avusturalya	211	15129	258
İspanya	187	5804	202
Japonya	375	9203	201
İsveç	201	10230	171
İtalya	178	5052	166
Malezya	202	10506	162
Kanada	191	8230	152
Singapur	156	9043	136
Mısır	115	2594	126
İran	250	6171	109
Tayvan	195	5497	101
Türkiye	284	5815	98

Ülkelerin yayın sayılarına bakıldığında Çin ilk sırada yer almaktadır (Tablo 4). Toplam ağ gücüne bakıldığında Amerika da daha az yayın olmasına rağmen daha güçlü bağlantılara sahip diyebiliriz.

**Şekil 26.** Ülkelerin yayın ağ haritası

Yayın yapılan ülkelerin ağ haritasında Çin'in ağının fazla olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 26).



Şekil 27. Yayınların ortalama atıf sayıları

Yayınların ortalama atıf alma sayılarına bakıldığında Çin 40 civarında atıf alırken, Amerika adresli yayınların daha fazla atıf aldığı söylenebilir (Şekil 27).

TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen bulgular, iletken polimerler üzerine yapılan araştırmaların 2015 yılında Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın (SKA) kabul edilmesinden sonra istikrarlı bir artış gösterdiğini (Şekil 2) ve bu malzemelerin disiplinler arası bir nitelik kazandığını ortaya koymuştur (Şekil 4). Araştırma sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında hem tutarlılıklar hem de özgün farklılıklar göze çarpmaktadır.

Analiz sonucunda en çok çalışılan alanların başında SKA 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji) ve SKA 3 (Sağlık ve Kaliteli Yaşam) hedeflerinin geldiği görülmüştür (Tablo 1). Bu bulgu, polimer güneş pilleri üzerine yapılan bibliyometrik analiz ve iletken polimer sensörleri üzerine yapılmış çalışmalarla örtüşmektedir (Baharın vd. 2024; Prathap 2014). iletken polimerlerin süperkapasitörler ve pillerdeki yoğun kullanımı (Şekil 15), enerji alanındaki (SKA 7) yayınların neden üst sıralarda olduğunu açıklamaktadır. Benzer şekilde, biyosensörler üzerine yapılan yoğun çalışmalar, SKA 3 kapsamındaki sağlık uygulamalarının önemini teyit etmektedir.

İkinci olarak, malzeme bazında yapılan incelemede Polianilin, PEDOT ve Polipirol en çok tercih edilen iletken polimerler olarak öne çıkmıştır (Tablo 3). Srivastava ve Saxena, son 30 yıllık sürdürülebilir mühendislik incelemelerinde yeşil polimer bilimine doğru bir kayış olduğunu belirtmiştir (Srivastava ve Saxena 2025). Bizim çalışmamızda da "nanokompozitler" ve "biyosensörler" gibi terimlerin yoğunluğu (Tablo 3), iletken polimerlerin sadece elektriksel özellikleriyle değil, çevresel ve biyolojik uyumluluklarıyla da (SKA 11 ve SKA 3 kapsamında) ele alındığını göstermektedir.

Üçüncü olarak, bilimsel üretimde Çin'in liderliği, küresel malzeme bilimi literatüründeki genel eğilimle uyumludur (Tablo 4). Ancak toplam atıf ve ağ gücünde ABD'nin etkinliği (Tablo

4), nitelikli ve köklü işbirliklerinin batı merkezli kurumlarda devam ettiğini, Magnus Berggren gibi kilit aktörlerin bu ağlardaki merkezi rolüyle açıklanabilir.

Bu çalışmanın literatüre en özgün katkısı ise, de Sousa gibi genel sürdürülebilir polimer çalışmalarından veya Usta gibi genel iklim değişikliği analizlerinden farklı olarak, spesifik bir malzeme grubu olan "iletken polimerler" doğrudan BM'nin 17 Sürdürülebilir Kalkınma Amacı ile ilişkilendirmesidir (De Sousa 2022; Usta 2023). Literatürde iletken polimerler genellikle teknik performansları (iletkenlik, kapasitans vb.) üzerinden incelenirken, bu çalışma alanın toplumsal ve çevresel hedeflere (SKA) ne derece hizmet ettiğini nicel verilerle kanıtlamaktadır. Özellikle SKA 11 (Sürdürülebilir Şehirler) başlığı altında yapılan çalışmaların yoğunluğu, iletken polimerlerin akıllı şehir teknolojilerindeki potansiyelini göstermesi açısından literatürdeki diğer bibliyometrik çalışmalardan ayrılan önemli bir bulgudur.

Çalışma bulguları ülke bazında incelendiğinde, Türkiye'nin iletken polimerler ve SKA eksenli araştırmalarda dikkate değer bir konuma sahip olduğu görülmektedir. Yayın sayıları baz alındığında (Tablo 4) Çin (2611 yayın) ve ABD (1076 yayın) küresel üretimin lokomotifi konumundayken, Türkiye 284 yayınlı dünya sıralamasında 8. sırada yer alarak Almanya (298), Fransa (291) ve Japonya (375) gibi gelişmiş ekonomilerle benzer bir üretim hacmi sergilemektedir. Bu durum, Türkiye'nin polimer kimyası alanındaki araştırma altyapısının ve akademik üretim kapasitesinin niceliksel olarak dünya standartlarına yakınsadığını göstermektedir.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına yönelik yıllara göre artış bulunmaktadır. Yayın türü olarak makale tercih edilmektedir. Saf bilim dalları yerine disiplinler arası olarak daha fazla çalışılmaktadır. Materyal bilimi ve multidisipliner olan dergiler daha fazla tercih edilmektedir. En çok yayın yapan yazarlar ve ülkelerde Çin ilk sırada yer almaktadır. Yayınevi olarak Elsevier tercih edilmektedir. Araştırma alanlarında materyal bilimi ilk sırada yer alırken onu kimya izlemektedir. SKA kapsamında sırasıyla Sağlık ve Kaliteli Yaşam, Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar ve Erişilebilir ve Temiz Enerji ile ilgili çalışılmaktadır. Son 2 yılda yayın sayısı biraz azalsa da atıf sayısı artmıştır. Derginin impact faktörü yüksek ve Q1 olan dergilerdeki makaleler daha fazla atıf almaktadır. Enerji, piller, fotokatalizör ve sağlık alanındaki makaleler daha fazla atıf almaktadır. WoS indeksi en çok yayının SCI-Expanded olduğu görülmektedir. Makro seviyede Kimya, Mezo seviyesinde Elektrokimya ve Mikro seviyesinde Süperkapasitörler en fazla yayın yapılan ve atıf alan konu başlıkları olmuştur. Yazar ağ haritasına, ortalama atıf ve yoğunluk analizine bakıldığında Magnus Berggren ilk sırada yer almıştır. İletken kavramını belirtmek için daha çok «Conducting» kelimesinin tercih edildiği görülmektedir. İletken polimerden sonra en fazla kullanılan anahtar kelimeler Polianilin, PEDOT, Süperkapasitör ve Polipirol olmuştur. Yoğunluk görselinde polianilin, nanomateryaller, pedot, lityum iyon piller ve esnek elektronik üzerine olduğu görülmektedir. Ülkelerin yayın sayılarına bakıldığında Çin ilk sırada yer almaktadır. Toplam ağ gücüne bakıldığında Amerika da daha az yayın olmasına rağmen daha güçlü bağlantılara sahip diyebiliriz.

Türkiye özelinde yapılan değerlendirmede, ülkemizin iletken polimerler ve SKA ilişkili yayın sıralamasında dünyada 8. sırada yer alması, ulusal bilim politikalarının ve akademik ilginin küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu ilerlediğini göstermektedir. Analizlerde Metin Ak gibi Türk araştırmacıların uluslararası yazar ağlarında görünür olması ve ulusal literatürde sürdürülebilirlik odaklı bibliyometrik çalışmaların (Ata ve Aksu 2023; Usta 2023)

artışı, Türkiye'nin alana aktif katkı sağladığını kanıtlamaktadır. Ancak, yayın sayısındaki bu başarının atıf sayılarına ve etki değerine daha güçlü yansımaları için, ağ analizlerinde güçlü bağlantılara sahip olduğu görülen ABD ve Avrupa merkezli araştırma gruplarıyla uluslararası işbirliklerinin artırılması stratejik bir önem taşımaktadır.

Bu çalışma sadece Web of Science veri tabanı ile sınırlandırılmıştır; gelecek çalışmalarda Scopus ve Google Scholar gibi farklı veri tabanları da sürece dahil edilerek karşılaştırmalı analizler yapılabilir. Ayrıca, bu çalışma genel olarak "iletken polimerler" kapsamaktadır; ileriki araştırmalar "biyobozunur iletken polimerler" veya "giyilebilir teknolojilerde kullanılan polimerler" gibi daha spesifik alt çalışma gruplarının tek bir SKA hedefine (örneğin sadece SKA 3: Sağlık) etkisini derinlemesine inceleyebilir.

KAYNAKLAR

- Alkayal, Nazeeha S. 2025. "Investigation into the synthetic strategies of melamine-based porous polymeric materials: a bibliometric analysis." *Polymers* 17(7): 868.
- Ata, Neşe Salik, and Nesrin Aksu. 2023. "Sürdürülebilir kalkınma konusunda yapılan ulusal alanyazındaki makalelerin bibliyometrik analizi." *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi* 10(4): 618–27.
- Baharin, Siti Nor Atika et al. 2024. "Bibliometric analysis on conducting polymer sensors for ammonia gas detection using scopus database." *Vietnam Journal of Chemistry* 62(3): 399–411.
- Bazan, Jose Manuel Noguera et al. 2025. "Advancements and scientific partnerships in the application of polysaccharides in oral formulations: a bibliometric analysis and review."
- Durmuş, İbrahim, and İlknur Gücüyeter. 2024. "Karbon ayak izi ve yeşil organizasyon kavramlarına yönelik bibliyometrik araştırmalar." *Journal of Agriculture Faculty of Ege University* 61(1): 113–24.
- Mittas, Nikolaos et al. 2023. "Bibliometric research analysis of molecularly imprinted polymers (mips): evidence and research activity dynamics." *Environmental Science and Pollution Research* 30(57): 119903–24.
- Prathap, Gangan. 2014. "A three-dimensional bibliometric evaluation of research in polymer solar cells." *Scientometrics* 101(1): 889–98.
- Şahin, Yaşar, and Baycan Demiral. 2023. "Sürdürülebilirlik, inovasyon ve liderlik kavramlarına bibliyometrik bakış." *Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi* 9(2): 146–60.
- De Sousa, Fabiula Danielli Bastos. 2022. "A simplified bibliometric mapping and analysis about sustainable polymers." *Materials Today: Proceedings* 49: 2025–33.
- Srivastava, K, and A Saxena. 2025. "A bibliometric review of sustainable engineering of last 30 years: emerging circular and green polymer science." *Journal Of Polymer & Composites* 13: S405-S416 WE-Emerging Sources Citation Index (E.
- Tănase, Maria et al. 2024. "Comprehensive bibliometric review on the sustainability and environmental impact of fiber-reinforced polymers." *Fibers* 12(12): 104.
- Usta, Galip. 2023. "Bibliometric analysis of climate crisis and climate change research." *Biological Diversity and Conservation* 16(2): 158–71.

**Çıkar Çatışması**

Yazarlar tarafından çıkar çatışmasının olmadığı rapor edilmiştir.

Fonlama

Herhangi bir fon desteği alınmamıştır.

Not

Çalışma II. Ulusal Nanoteknolojide İletken Polimer Günleri'nde sözlü olarak sunulmuştur.

Etik Bildirim

Çalışma için etik kurul izni gerekmemektedir.

Kohonen Öğrenme Kuralı Yardımıyla Centroid Değerleri Güncelleme

Updating Centroid Values Using Kohonen Learning Rule

Hidayet Takcı

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

ORCID: 0000-0002-4448-4284, htakci@cumhuriyet.edu.tr

Geliş Tarihi: 12 Ekim 2025 - Kabul Tarihi: 4 Kasım 2025

DOI: 10.55205/joctensa.3220241801338

ATIF: Takcı, H., (2025). Kohonen öğrenme kuralı yardımıyla centroid değerleri güncelleme. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (2), 57-67.

ÖZ

Doğal dil işleme alanında öne çıkan görevlerden birisi metin sınıflandırmadır. Metin sınıflandırma için destek vektör makineleri, yapay sinir ağları, naive bayes gibi çok sayıda makine öğrenmesi algoritması kullanılmakta olup onlardan birisi de centroid tabanlı sınıflayıcıdır. Performansı naive bayes sınıflayıcı kadar iyi olan centroid sınıflayıcıların en büyük problemi kullanılan veriye aşırı bağımlılıktır. Bu problemin çözümü için en uygun çözümlerden birisi centroid değerlerinin güncellenmesidir. Centroid tabanlı sınıflayıcılar eğitim verilerinden centroid vektörlerinin elde edilmesi ve bu değerlerin statik olarak kullanılmasına dayalıdır. Statik değerler ile belli bir doğruluğun üzerine çıkmak mümkün olmadığı için centroid değerlerinin güncellenmesine ihtiyaç duyulur. Centroid güncelleme için bugüne kadar birçok yöntem geliştirilmiş olup bu çalışmada yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem; Kohonen öğrenme kuralı yardımıyla centroid değerlerinin dinamik olarak güncellenmesine dayalıdır. Bu yöntemle göre centroid değerleri iteratif olarak güncellenmiştir. ECI CD ROM veri seti üzerinde yapılan deneylerde Kohonen öğrenme kuralının sınıflandırma performansını %0,56 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum Kohonen öğrenme kuralını centroid sınıflayıcıları geliştirmek için bir alternatif haline getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Centroid Sınıflayıcı, Model Misfit, Centroid Güncelleme, Kohonen Öğrenme Kuralı

ABSTRACT

Text classification is one of the most prominent tasks in natural language processing. Numerous machine learning algorithms, such as support vector machines, artificial neural networks, and naive Bayes, are used for text classification, and one of these is the centroid-based classifier. The biggest problem with centroid classifiers, which perform as well as naive Bayes classifiers, is their excessive dependence on the data used. One of the most suitable solutions to this problem is updating the centroid values. Centroid-based classifiers are based on obtaining centroid vectors from training data and using these values statically. Because it is not possible to exceed a certain accuracy with static values, centroid values need to be updated. Many methods have been developed for centroid updating, and this study proposes a new method. The proposed method is based on dynamically updating centroid values using the Kohonen learning rule. According to this method, centroid values are updated iteratively. In experiments conducted on the ECI CD-ROM dataset, the Kohonen learning rule was

* Sorumlu Yazar: htakci@cumhuriyet.edu.tr

observed to increase classification performance by 0.56%. This makes the Kohonen learning rule an alternative for developing centroid classifiers.

Keywords: Centroid Classifier, Model Misfit, Centroid Updating, Kohonen Learning Rule

GİRİŞ

Metinlerin içeriklerine dayalı olarak önceden belirlenmiş kategorilere atanması metin sınıflandırma olarak bilinir. Metin sınıflandırma doğal dil işleme alanının en temel problemlerinden biridir. Bugüne kadar birçok makine öğrenmesi algoritması metin sınıflandırma için kullanılmıştır (Fabrizio, 2002). Destek vektör makineleri (SVM) (Cortes ve Vapnik, 1995; Joachims, 1998), k en yakın komşu (k-NN) (Masand vd., 1992; Yang ve Liu, 1999), yapay sinir ağları (Li ve Park, 2009) ve naif bayes (Lewis ve Ringuette, 1994) bunlardan bazılarıdır. Son dönemde özellikle dönüştürücü tabanlı derin öğrenme modelleri (BERT, RoBERTa, XLNet, DeBERTa) yaygın biçimde kullanılmaktadır. Derin öğrenme modelleri bu alanda yüksek başarılar sağlamasına rağmen hesaplama maliyeti, büyük miktardaki veri ihtiyacı ve yorumlanabilirlik sorunları nedeniyle düşük maliyetli ve klasik yaklaşımlar hala önemini korumaktadır (Li vd., 2020; Wang vd., 2023; Chovanec vd., 2023).

Centroid tabanlı sınıflayıcılar bu kapsamda öne çıkmaktadır. Düşük hesaplama maliyeti ve açıklanabilirliğinin yüksek olması nedeniyle metin sınıflandırmada güçlü seçeneklerden birisidir (Han ve Karypis, 2000). Centroid sınıflayıcılar avantajlarına rağmen performans bakımından SVM sınıflayıcıların gerisindedir. Bunun nedeni; centroid tabanlı sınıflayıcıların eğitim verisine aşırı bağımlılık göstermesi (Tan, 2007) ve statik yapısıdır (Tan, 2008). Centroid değerleri güncellenmediği takdirde verideki dağılımı ve sınıflar arası ayrımları yeterli derecede sunması mümkün olamamaktadır. Bu problemin çözümü için centroid değerlerinin dinamik olarak güncellenmesine ihtiyaç vardır.

Centroid güncelleme için literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde düzgünleştirme ve normalizasyon teknikleri kullanılmış (Lernattee ve Theeramunkong, 2002), bir diğerinde ise sınıfları sunan centroid değerlerinin ayırt edici değerlerle ağırlıklandırılmıştır. Bu kapsamda dragpushing, hypothesis margin ve weight adjustment gibi çeşitli teknikler uygulanmıştır (Guan vd., 2009). Centroid güncelleme çalışmalarında; sınıf içi ve sınıflar arası terim frekansları kullanımının sınıflayıcı performansını artırdığı gözlenmiştir (Tan, 2008; Guan vd., 2009).

Bu çalışmada centroid güncelleme ihtiyacını karşılamak amacıyla Kohonen öğrenme kuralının kullanımı önerilmektedir. Kohonen öğrenme kuralı, benzerlik ve uzaklık ölçümüne dayalı bir öğrenme stratejisidir. Bu yönüyle centroid sınıflayıcıların uzaklık tabanlı yapısıyla yüksek düzeyde uyumluluk göstermektedir. Önerilen çalışmada Kohonen öğrenme kuralı yardımıyla klasik centroid değerleri iteratif olarak güncellenecek ve böylece güncel centroid değerleri elde edilecektir. Kohonen öğrenme kuralı centroid değerlerini veriye uydurma konusunda başarılı olabilecek bir yöntem olarak tercih edilmiştir.

Bu çalışmanın özgün katkısı, Kohonen öğrenme kuralını centroid sınıflayıcıların güncelleme mekanizması ile ilk kez bütünleştirmiş olması ve yöntemi dinamik-iteratif bir yapıya kavuşturmasıdır. Önerilen yöntem ile:

1. Centroid vektörleri klasik yöntemde olduğu gibi statik değil, iteratif biçimde güncellenmektedir,
2. Model doğru sınıflamaları ödüllendirip hatalı sınıflamaları cezalandırarak kendi kendini optimize etmektedir,
3. Yapılan çalışma ile centroid sınıflayıcıların veriye aşırı bağımlılığı (model misfit) problemi azaltılmış ve genelleme yeteneği artırılmıştır.

ECI CD-ROM veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneylerde önerilen yöntemin klasik yaklaşıma göre doğruluğu %98,33'ten %98,89'a yükselttiği ve istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Kohonen öğrenme kuralının centroid sınıflayıcıların performansını iyileştirmede etkili bir alternatif olduğunu göstermektedir

CENTROID TABANLI SINIFLAYICI VE CENTROID GÜNCELLEME

Centroid tabanlı sınıflayıcılar sıklıkla metin sınıflandırma problemlerinde kullanılan vektör uzayı (Salton, 1989) tabanlı sınıflayıcılardır. Sınıflara ait dokümanlar ve sınıfları temsil eden değerler vektörler yardımıyla sunulmakta olup dokümanlar $\vec{d}$ ile sınıflar $\vec{c}$ ile sunulur. Dokümanları sunan doküman vektörleri ve sınıfları sunan centroid vektörleri terim sıklıklarını ya da onların tf-idf ağırlıklarını sunar. Centroid orta değer anlamına gelip kabaca bir sınıfı temsil eden eğitim dokümanlarının ortalamasından elde edilir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan notasyon

Sembol	Açıklama
k	Sınıf sayısı
n	Değişken sayısı
d	Doküman
$\vec{d}$	Ağırlıklandırılmış doküman vektörü
c_i	Sınıf i
$\vec{c}_i$	c_i Sınıfı için centroid vektörü $\vec{c}_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}]$
t_j	terim j
D	Doküman kümesi veya derlem
D_{c_i}	c_i Sınıfına ait dokümanların kümesi
C	Doküman kümesindeki sınıfların kümesi
C_{t_j}	Terim j içeren sınıfların kümesi
D_{c_i, t_j}	c_i sınıfına ait, terim j içeren dokümanların sayısı

Her sınıflandırma algoritması gibi centroid tabanlı sınıflayıcılar da eğitim ve test aşamasından meydana gelmektedir. Algoritmanın eğitim aşamasında sınıfları temsil eden centroid vektörleri elde edilir. Eğitim verisinden centroid vektörü elde etmede sıklıkla kullanılan iki yöntem vardır (Guan vd., 2009). Bunlardan birincisi aritmetik ortalama centroid (AAC) olarak bilinir. Bu yöntemde göre bir sınıf için centroid vektörü, o sınıfta yer alan doküman vektörlerinin aritmetik ortalamasından elde edilir. Bu yöntemde göre $\vec{c}_i$ vektörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\vec{c}_i = \frac{1}{|D_{c_i}|} \sum_{d \in D_{c_i}} \vec{d} \quad (1)$$

İkinci yöntem birikimli geometrik centroid (cumuli geometric centroid - CGC) olarak bilinir. Yöntem, her bir sınıf için o sınıftaki elemanların değeri toplamından bir centroid öğrenir. Bu yönetime göre $\vec{c}_i$ vektörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\vec{c}_i = \sum_{d \in D_{c_i}} \vec{d} \quad (2)$$

Literatürde AAC ve CGC yöntemlerinin değişik varyasyonları bulunmaktadır. Bunlardan birisi de sınıf özellik centroid (CFC) yöntemidir. Bu yöntem diğerlerine nispetle daha karmaşıktır. Yönteme göre her bir i sınıfındaki j terimine ait centroid değeri aşağıdaki formüle uygun olarak hesap edilir:

$$c_{ij} = b^{\frac{|D_{c_i t_j}|}{|D_{c_i}|}} \log \left(\frac{|C|}{|C_{t_j}|} \right) \quad (3)$$

Formülde yer alan b değeri bir sabit olup değeri genellikle 1'den büyüktür. Denklemin ilk parçası sınıf içi terim indeksi olarak ikinci parçası ise sınıflar arası terim indeksi olarak adlandırılır.

Centroid sınıflayıcı ile sınıflandırma veya sınıfı bilinmeyen dokümanların sınıfın tespit edilmesi benzerlik tabanlıdır. Sınıfı bilinmeyen bir doküman centroid sınıflayıcıya sunulduğunda, dokümanın sınıfını bulmak için doküman ile sınıflara ait centroid vektörleri arasındaki benzerliklere bakılır. Doküman sınıflandırmada sıklıkla kullanılan kosinüs (cosine) benzerliği centroid sınıflayıcı algoritmasında da kullanılmaktadır. Bir test dokümanı (x) ile bir c_i sınıfı arasındaki benzerlik şöyle bulunur:

$$\text{sim}(x, c_i) = \frac{\vec{x} \cdot \vec{c}_i}{\|\vec{x}\| \cdot \|\vec{c}_i\|}, \text{ for } i = 1, \dots, k \quad (4)$$

Test dokümanı ile bütün sınıflar arasındaki benzerlikler bulunduktan sonra dokümanın sınıfı için maksimum benzerliği veren sınıf aranır. Maksimum benzerliği veren centroid vektörünün sınıfı dokümanın sınıfı olarak atanır.

$$\arg \max_i \text{sim}(x, c_i)$$

KOHONEN ÖĞRENME KURALI İLE CENTROID DEĞERLERİ GÜNCELLEME

Centroid tabanlı sınıflayıcılarda centroid değeri bir kere hesaplanır ve hesaplanan değer ile sınıflandırma işlemi yapılır. Dolayısıyla hesap edilen centroid değerleri statiktir. Mevcut uygulamadaki statik yapıyı dinamik hale getirmek sınıflayıcının başarısını artırma potansiyeline sahiptir. Centroid sınıflayıcının doğru sınıflandırma yaptığı yerde ödüllendirilmesi, hatalı sınıflandırma yaptığı yerde ise cezalandırılması çözüm olarak planlanmıştır. Sınıf değerlerinin dinamik olarak yeniden hesap edilmesi ve bu işlemin yinelemeli olarak sürdürülmesi yapay

sinir ağlarındaki öğrenme kuralları ile ilişkilidir. Yapay sinir ağlarında eğer bir ağ yeteri kadar iyi sonuçlar vermiyorsa, ağın öğrenim kuralına uygun olarak ağ yeniden eğitilir ve hata oranı düşürülmeye çalışılır. YSA için birçok öğrenim kuralı bulunmasına rağmen gerek centroid sınıflayıcıya benzerlikleri gerekse kendi kendine öğrenmesi dolayısıyla kohonen öğrenme kuralı bu çalışmada tercih edilmiştir.

Kohonen öğrenme kuralının uygulandığı özellikle LVQ sınıflayıcılar centroid tabanlı sınıflayıcılar gibi benzerlik / uzaklık tabanlı sınıflayıcılardır. Bu nedenle kohonen öğrenme kuralının benzerlik / uzaklık tabanlı yöntemlere entegrasyonunun başarı şansı yüksek olacaktır.

Kohonen Öğrenme Kuralı

Kohonen öğrenme kuralı Tuevo Kohonen (1984) tarafından ortaya konmuştur. Temel felsefesi; kohonen tabakasında yer alan işlem elemanlarının birbiriyle yarışması ilkesine dayanır. Yarışma; girdi vektörü $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ile işlem elemanlarına ait referans vektörleri $w_j = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj})$ arasındaki öklid uzaklıklarının bulunmasına dayanır. Hangi referans vektörü girdi vektörüne daha yakınsa referans vektörü yarışmayı kazanır ve girdi vektörü yarışmayı kazanan referans vektörü ile ilgili sınıfa atanır (Öztemel, 2003).

Kohonen öğrenme kuralı algoritmik olarak ifade edilecek olursa;

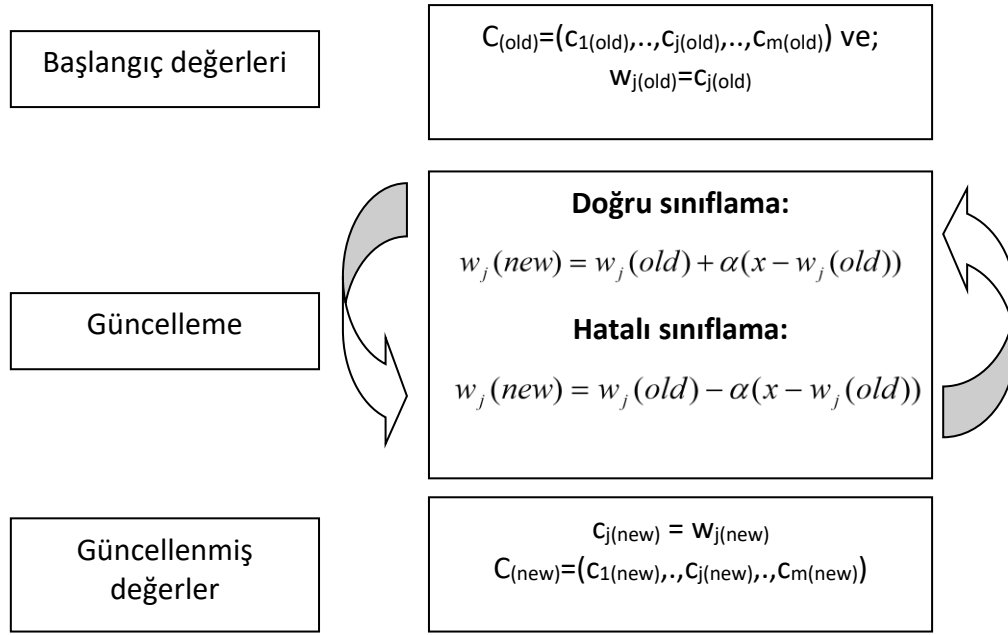
1. Girdi katmanı ile kohonen katmanı arasındaki bağlantılara ait ağırlıklara başlangıç değerleri verilir. (çalışmamızda klasik centroid yöntemi ile elde edilen değerler başlangıç ağırlıkları olarak kullanılacaktır)
2. Öğrenme kuralının durma şartı gerçekleşmediği müddetçe 3 ile 7 arasındaki işlemler yerine getirilir
3. Eğitim setinden bir örnek (x) öğrenme kuralına sunulur ve 4 ve 5. adımlar bu veri üzerinde uygulanır.
4. Öğrenme kuralına sunulan örnek ve referans vektörleri arasındaki uzaklıklar

$$Dist(j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ij})^2} \text{ formülü ile bulunur ve bunlardan minimum uzaklığı}$$

(Dist(j)) veren j değerini elde edilir.

5. Eğer bulunan j değeri olması gereken değer ise $w_j(new) = w_j(old) + \alpha(x - w_j(old))$ şeklinde aksi takdirde $w_j(new) = w_j(old) - \alpha(x - w_j(old))$ şeklinde ağırlık değeri güncellenir.
6. Öğrenim oranı α değeri azaltılır.
7. Durma şartına göre kontrol işlemi uygulanır ve eğer durma şartı gerçekleşir ise öğrenme işlemi son bulur. Durma şartı: hatanın belli bir değer altına düşmesi, belli sayıda yineleme veya öğrenme oranının 0 değerine ulaşması olabilir.

Kohonen öğrenme kuralının felsefesi; doğru sınıflandırmayı veren ağırlıkların artırılması, hatalı sınıflandırmayı veren ağırlıkların azaltılmasıdır. Ağırlık artırma ve azaltma için kullanılan öğrenim oranı değeri zamanla sıfır değerine kadar düşürülür. Centroid vektörlerinin güncellemesi için kohonen öğrenme kuralından faydalanırken önerilen sistemin yinelemeli yapısı aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 1. Kohonen öğrenme kuralı yardımıyla centroid güncelleme şeması

İşlemin başlangıcında klasik centroid bulma yöntemlerinden birine göre centroid değerleri elde edilerek centroid vektörlerine sunulur. $C_{(old)} = (c_{1(old)}, \dots, c_{j(old)}, \dots, c_{m(old)})$ bu değerlere güncellenmemiş anlamında $C_{(old)}$ adı verilmiştir. Klasik centroid değerleri kohonen ağındaki giriş vektörleri ile referans vektörleri arasındaki ağırlık vektörlerine atanarak kohonen ağına ilk değerleri $w_{j(old)} = c_{j(old)}$ şeklinde elde edilir. Bu atamaların ardından yinelemeli olarak kohonen öğrenim kuralı na göre değerler güncellenir ve güncellenen bu değerler bu sefer; $c_{j(new)} = w_{j(new)}$ ve $C_{(new)} = (c_{1(new)}, \dots, c_{j(new)}, \dots, c_{m(new)})$ şeklinde atanır. Bu atamanın ardından sınıflandırma performansı ölçülür ve en baştaki performans ile karşılaştırılır. Bu işlem durma şartına kadar devam eder.

DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZ

Önerimiz, ECI CD ROM verileri üzerinde, dile dayalı metin sınıflandırma problemi üzerinde test edilmiştir. Toplam dokuz adet dil ile yapılan çalışmada her bir dile ait ortalama 100 K eğitim ve 100 K test verisi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan diller şunlardır: İngilizce (eng), Fransızca (fre), Almanca (ger), Hollandaca (dut), İtalyanca (ita), Portekizce (por), Türkçe(tur), İspanyolca (spa), İsveççe (swe). Eğitim verileri; her biri 60 adet özellik değeri içeren, centroid vektörlerinin ilk değerlerinin elde edilmesi ve akabinde kohonen öğrenme kuralı ile ağırlıkların güncellenmesinde kullanılmıştır. Test verileri ise centroid değerlerinin sınıflandırma başarısını elde etmede kullanılmış ve bu veriler her biri 100 byte uzunluğunda doküman parçaları olarak işleme alınmıştır. Sınıflandırma işleminde test verilerinin ne kadarının doğru sınıfa atanıp atanmadığına göre sınıflandırma başarısı elde edilmiş olup performans parametresi olarak doğru tanıma bilgisi kullanılmıştır.

Deneysel çalışmanın başında referans amaçlı olarak önce centroid değeri ile elde edilen sınıflandırma sonucu elde edilmiş ardından kohonen öğrenme kuralı ile elde edilen centroid

değerlerinin sınıflandırma sonuçları bulunmuş ve bunlar referans sınıflandırma başarıları ile karşılaştırılmıştır.

Referans amaçlı olarak kullanılan centroid değerleri; Takcı ve Soğukpınar (2004) tarafından daha önceki bir çalışmada elde edilen yöntemle göre hesap edilmiş ve aşağıdaki sınıflandırma sonucu elde edilmiştir. Gerek ilk deneyde gerekse diğer deneylerde; her biri 100 byte uzunluğundaki dokümanlara ait 100'er adet doküman ile deneyler yapılmıştır.

Tablo 2. Güncellenmemiş centroid vektörü ile elde edilen sonuçlar

	eng	fre	ger	dut	ita	por	tur	spa	swe
eng	99	0	0	1	0	0	0	0	0
fre	0	97	0	1	0	0	0	2	0
ger	0	0	100	0	0	0	0	0	0
dut	4	0	0	96	0	0	0	0	0
ita	0	1	0	0	98	0	0	1	0
por	0	0	0	0	0	96	0	4	0
tur	0	0	0	0	0	0	100	0	0
spa	0	0	0	0	1	0	0	99	0
swe	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Tablo 2 değerlerine bakıldığında bazı dillerin yüzde yüz oranında doğru tanıma başarısı verirken diğer bazılarının %96, %97 gibi daha düşük değerler verdiği görülür. Bizim amacımız başarılı tanımları bozmadan diğerlerinin başarısını artırmaktır. Bunun için aşamalı olarak kohonen algoritması uygulanacak ve her adımın sonunda sonuçlar karşılaştırılarak en iyi değerler bulunmaya çalışılacaktır. Kohonen öğrenme kuralı parametrelerinden biri olan öğrenim oranı 0,20 değeri ile başlatılacak ve her adımda bu değer 0,05 azaltılarak en son 0.05 değerine kadar düşürülecektir. Öğrenim oranı için 0,05 değeri son değerdir, çünkü bir sonraki aşamada öğrenim oranı 0 olacak ve güncelleme işlemi zaten son bulacaktır.

Referans centroid değerleri ile elde edilen doğru sınıflandırma oranı % 98,33 olarak elde edilmiştir. Amacımız bu doğru tanıma oranını daha yüksek bir değere taşımaktır. Kohonen öğrenme kuralı yardımıyla sınıflandırma hatasına sebep olan centroid değerleri artırılacak ve doğru sınıflandırmaya sebep olan centroid değerleri ise düşürülecektir. Öğrenim oranı 0,20 ile elde edilen sınıflandırma doğrulukları Tablo 3'de sunulduğu gibidir:

Tablo 3. Öğrenim oranı=0,20 ile güncellenmiş centroid vektörü ile elde edilen sonuçlar

	eng	fre	ger	dut	ita	por	tur	spa	swe
eng	99	0	0	1	0	0	0	0	0
fre	0	98	0	1	0	0	0	1	0
ger	0	0	100	0	0	0	0	0	0
dut	3	0	0	97	0	0	0	0	0
ita	0	1	0	0	99	0	0	0	0
por	0	0	0	1	0	98	0	1	0
tur	0	0	0	0	0	0	100	0	0
spa	0	0	0	0	4	1	0	95	0
swe	0	0	0	0	0	0	0	0	100

İlk güncelleme sonucuna göre sistemin doğruluk oranı %98,44 değerine yükselmiştir. Yukarıdaki tablo verilerine dayalı olarak ve öğrenim oranı 0,15 için sınıflandırma algoritması çalıştırılmış ve Tablo 4'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 4. Öğrenim oranı=0,15 ile elde edilmiş centroid vektörü ile elde edilen sonuçlar

	eng	fre	ger	dut	ita	por	tur	spa	swe
eng	99	0	0	1	0	0	0	0	0
fre	0	97	0	1	0	0	0	2	0
ger	0	0	100	0	0	0	0	0	0
dut	3	0	0	97	0	0	0	0	0
ita	0	1	0	0	97	0	0	2	0
por	0	0	0	0	0	96	0	4	0
tur	0	0	0	0	0	0	100	0	0
spa	0	0	0	0	0	0	0	100	0
swe	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Bazı diller için sınıflandırma doğruluğu artarken diğer bazılarının sınıflandırma değeri düşmüş ve doğruluk oranı açısından bir önceki gibi %98,44 değeri elde edilmiştir. Çalışmaya devam edilmiş ve bu sefer 0,10 öğrenim oranına göre deney yapılmıştır. 0,10 öğrenim oranıyla elde edilen sınıflandırma doğrulukları Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5. Öğrenim oranı=0,10 ile elde edilen centroid vektörü ile elde edilen sonuçlar

	eng	fre	ger	dut	ita	por	tur	spa	swe
eng	99	0	0	1	0	0	0	0	0
fre	0	98	0	1	0	0	0	1	0
ger	0	0	100	0	0	0	0	0	0
dut	3	0	0	97	0	0	0	0	0
ita	0	0	0	0	100	0	0	0	0
por	0	0	0	0	0	98	0	2	0
tur	0	0	0	0	0	0	100	0	0
spa	0	0	0	0	2	0	0	98	0
swe	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Öğrenim oranı 0,10 için doğruluk oranı %98,89 olmuştur. Bu değer şu ana kadar elde edilmiş en yüksek değerdir. En son 0,05 öğrenim oranı için sonuçlar alınmış ve bu sonuçların %98,89 değerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Kohonen algoritması ile yapılan güncelleme çalışması için en yüksek değer %98,89 olarak elde edilmiştir.

Tablo 6. Öğrenme oranı ile ilişkili performans değerleri

Öğrenme oranı	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F1
Yok	98,33	98,4	98,3	98,3
0,20	98,40	98,5	98,4	98,4
0,15	98,40	98,3	98,4	98,3
0,10	98,89	99,0	98,9	98,9

Tablo 6 değerlerine göre güncelleme yapılmayan centroid vektörleri ile elde edilen sınıflandırma doğruluğu %98,33 iken bu değer kohonen yöntemi ile güncelleme sonrası %98,89 olmuştur. Ayrıca kesinlik değeri %98,4'den %99,0'a, duyarlılık değeri %98,3'den %98,9'a ve F1 değeri %98,3'den %98,9'a çıkmıştır. Doğruluk için %0,56 birimlik artış elde edilmiştir. Diğer performans metrikleri için de artış elde edildiği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar istatistiksel anlamlılık açısından da analiz edilmiştir. Bunun için Paired t-testi kullanılmıştır. Paired t-testi için hipotezler şöyledir:

- H_0 (Null): Tablo 2 ve Tablo 5 değerleri arasında anlamlı fark yoktur.
- H_1 (Alternatif): Tablo 5 performansı anlamlı biçimde daha iyidir.

İki tablo arasındaki ortalama doğruluk farkı 0,56 ve standart sapma 0,88 ile $n=9$ iken elde edilen t değeri 1,91 ve buna karşılık gelen p değeri yaklaşık olarak 0,045 olmuştur. Elde edilen p değeri 0,05 değerinden küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı (sınırdaki) bir fark olduğu tespit edilmiştir. Tablo 5 özellikle İtalyanca ve Portekizce sınıflarındaki hata oranını azaltarak toplam doğruluğu artırmıştır.

SONUÇ

Yapay sinir ağları makine öğrenmesi alanına ve sınıflandırma problemlerine oldukça önemli katkılar sunmuştur. Tek başına oldukça iyi sonuçlar veren yapay sinir ağları bu çalışmada başka bir sınıflayıcının iyileştirilmesi amacı ile kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarında öne çıkan Kohonen öğrenme kuralı bu çalışmada centroid değerlerinin iteratif olarak güncellenmesinde kullanılmıştır. Centroid sınıflayıcılar etkili ve kolay geliştirilebilir fakat statik yapıya sahip sınıflayıcılardır. Kohonen öğrenimi sayesinde centroid sınıflayıcı zenginleştirilmiş, dinamik hale getirilmiş ve sınıflama başarısı artırılmıştır.

Bu çalışmada 0,20 öğrenim oranı ile başlayan güncelleme çalışmaları 0,05 birimlik adımlarla 0,05 öğrenim oranına kadar devam etmiş ve klasik centroid ile elde edilen %98,33 değeri %98,89 değerine çıkmıştır. Kohonen öğreniminin sağladığı kazanç %0,56 gibi önemli bir değerdir. Öğrenim oranı 0,20 yerine 0,50 gibi bir değerden başlatılıp her bir adımda 0,05 birim yerine 0,01 birim gibi bir ilerleme yapılarak daha iyi sonuçlar alınabilir.

Bu çalışmada Kohonen öğrenme kuralı kullanılarak centroid tabanlı sınıflayıcıların dinamik biçimde güncellenmesi önerilmiş ve yöntem ECI CD-ROM veri seti üzerinde başarılı sonuçlar vermiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı dil veya konu alanlarına ait veri setleri üzerinde yöntemin genellenebilirliği test edilebilir. Ayrıca öğrenim oranının adaptif olarak belirlenmesi, durma koşullarının otomatik optimize edilmesi ve diğer rekabetçi öğrenme kurallarının (örneğin Oja veya Hebbian öğrenme) entegrasyonu, performansın daha da iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Kohonen destekli centroid güncelleme yaklaşımı, yalnızca metin sınıflandırma değil, görüntü veya ses tanıma gibi diğer örüntü tanıma alanlarına da uygulanabilir. Gelecekte bu yöntemin derin öğrenme mimarileriyle hibrit biçimde kullanılması ve GPU destekli ortamlarda hızlandırılmış sürümlerinin geliştirilmesi de önemli araştırma yönleri arasında değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Chovanec, P., et al. (2023). A survey of text classification with transformers: How wide? How large? How long? How accurate? How expensive? arXiv preprint arXiv:2311.14758.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297.
- Fabrizio, S. (2002). Machine learning in automated text categorization. *ACM Computing Surveys*, 34(1), 1–47.
- Guan, H., Zhou, J., & Guo, M. (2009). A class-feature-centroid classifier for text categorization. In *Proceedings of the WWW Conference* (pp. 1–10). Madrid, Spain.
- Han, E.-H., & Karypis, G. (2000). Centroid-based document classification: Analysis and experimental results. In *Principles of Data Mining and Knowledge Discovery* (pp. 424–431).
- Joachims, T. (1998). Text categorization with support vector machines: Learning with many relevant features. In C. N. Dellec & C. Rouveirol (Eds.), *Proceedings of the 10th European Conference on Machine Learning (ECML-98)* (pp. 137–142). Springer-Verlag.
- Kohonen, T. (1984). *Self-organization and associative memory*. Springer-Verlag.
- Lertnattee, V., & Theeramunkong, T. (2002). Combining homogeneous classifiers for centroid-based text classification. In *Proceedings of ISCC* (pp. 1034–1039).
- Lewis, D., & Ringuette, M. (1994). Comparison of two learning algorithms for text categorization. In *Proceedings of the 3rd Annual Symposium on Document Analysis and Information Retrieval*.
- Li, C. H., & Park, S. C. (2009). Combination of modified BPNN algorithms and an efficient feature selection method for text categorization. *Information Processing and Management*, 45(3), 329–340.
- Li, Q., Peng, H., Li, J., Xia, C., Yang, R., Sun, L., & Yu, P. (2020). A survey on text classification: From shallow to deep learning. arXiv preprint arXiv:2008.00364.
- Masand, B., Linoff, G., & Waltz, D. (1992). Classifying news stories using memory-based reasoning. In *Proceedings of the 15th ACM International Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR-92)* (pp. 59–65). ACM.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay sinir ağları*. Papatya Yayıncılık.
- Salton, G. (1989). *Automatic text processing: The transformation, analysis, and retrieval of information by computer*. Addison-Wesley.
- Takçı, H., & Soğukpınar, İ. (2004). Centroid-based language identification using letter feature set. In *Proceedings of CicLing* (pp. 635–645). Springer-Verlag.
- Tan, S. (2007). Large margin drag-pushing strategy for centroid text categorization. *Expert Systems with Applications*, 33(1), 215–220.
- Tan, S. (2008). An improved centroid classifier for text categorization. *Expert Systems with Applications*, 35(1–2), 279–285.
- Wang, K., Ding, Y., & Han, S. C. (2023). Graph neural networks for text classification: A survey. arXiv preprint arXiv:2304.11534.

Yang, Y., & Liu, X. (1999). A re-examination of text categorization methods. In Proceedings of the 22nd Annual International SIGIR Conference (pp. 42–49). Berkeley, CA.

Yazar Katkıları

Çalışmanın tamamı, kavramsal tasarım, veri toplama, analiz ve yazım aşaması dâhil olmak üzere yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yayınla ilgili herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Fonlama

Bu çalışma için herhangi bir fon desteği alınmamıştır.

Not

Makale için eklenecek not bulunmamaktadır.

Etik Bildirim

Bu çalışma için etik kurul izni gerekmemektedir.

Doğal Afetlerin Çelik Yapılarda Aşamalı Göçme Mekanizmasına Etkisi: Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Örneği

Effect of Natural Disasters on Progressive Collapse in Steel Structures: Cold-Formed Steel Example

Saffet Kılıçer¹, Yaren Can²

1) Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye
ORCID: 0000-0002-5445-0352, kilicer@artvin.edu.tr

2) Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksekokulu, Acil Durum ve Afet Yönetimi Programı, Artvin, Türkiye
ORCID: 0009-0008-8895-9705, 242035037@ogrenci.artvin.edu.tr

Geliş Tarihi: 20 Ekim 2025 - **Kabul Tarihi:** 1 Ara 2025

DOI: 10.55205/joctensa.3220241807092

ATIF: Kılıçer, S., Can, Y., (2025). Doğal afetlerin çelik yapılarda aşamalı göçme mekanizmasına etkisi: Soğuk şekillendirilmiş çelik örneği. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 68-91.

ÖZ

Doğal afetler sonucu kritik yapılarda taşıyıcı duvarların ani kaybı, aşamalı göçmeyi tetikleyebilmektedir. Bu çalışmada, üç katlı soğuk şekillendirilmiş çelik (SŞÇ) bir yapının duvar kaybı senaryoları altındaki davranışı, UFC 4-023-03'e göre Alternatif Yol Yöntemi (AYY) ve doğrusal statik analiz kullanılarak incelenmiştir. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan S350GD+Z profilleri esas alınmış; iç taşıyıcı duvarın, uzun kenardaki dış duvarların ve alt kat dış duvarlarının ani olarak sistemden çıkarıldığı üç senaryo değerlendirilmiştir. Analizler, en kritik durumun zemin kattaki iç taşıyıcı duvarın kaybı olduğunu, ancak bu durumda dahi perde duvarlar ve çekme elemanları sayesinde yüklerin alternatif yollardan yeniden dağıtılabildiğini göstermektedir. Talep/kapasite oranları genel olarak UFC'de öngörülen sınır değerlerin altında kalmakta, kritik elemanlarda ise bu sınırlara yaklaşıldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, örnek SŞÇ yapının incelenen senaryolarda göçme sınırına ulaşmadığını, ancak özellikle kamu, askeri ve sağlık yapıları gibi hassas kullanım amaçlı SŞÇ binalarda aşamalı göçme kontrollerinin tasarım sürecine sistematik biçimde entegre edilmesi ve gerekli görülen bölgelerde yerel güçlendirmelerin planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Soğuk Şekillendirilmiş Çelik, Doğal Afet, Aşamalı Göçme, UFC 4-023-03.

ABSTRACT

Sudden loss of load-bearing walls in critical facilities due to natural hazards may trigger progressive collapse. This study investigates the progressive collapse resistance of a three-storey Cold-Formed Steel (CFS) building by employing the Alternate Path (AP) method with Linear Static Analysis in accordance with UFC 4-023-03. The structure is designed using S350GD+Z sections commonly used in Türkiye, and three wall-removal scenarios are considered: removal of an interior load-bearing wall, of the exterior walls along the long side, and of the lower-storey exterior walls. The analyses indicate that the most critical case is the removal of the interior wall at the ground floor; however, even in this case, shear walls and

* Sorumlu Yazar: kilicer@artvin.edu.tr

tie elements are able to redistribute the loads through alternative paths. The demand-to-capacity ratios remain within the limits prescribed by UFC, while some critical elements approach these limits. Overall, the example CFS building does not reach a collapse state under the examined scenarios, but the results underline the importance of explicitly incorporating progressive collapse checks into the design process of CFS buildings used for public, military and healthcare purposes, and of implementing local strengthening where necessary.

Keywords: Cold-Formed Steel, Natural Disaster, Progressive Collapse, UFC 4-023-03.

GİRİŞ

İnşaat mühendisliği, üst yapı ve çevresel projelerin tasarımı, inşası, bakımı ve denetlenmesi ile ilgilenen bir mühendislik dalıdır. Yapı mühendisleri, köprüler, yollar, barajlar, binalar, havaalanları, tüneller ve diğer yapı projelerinin planlamasında ve uygulanmasında önemli bir rol oynarlar. Ayrıca doğal afetlere dayanıklı yapıların tasarımı, çevresel etki değerlendirmeleri ve sürdürülebilir mühendislik uygulamaları gibi konularla da ilgilenirler.

Mühendisler, karmaşık ve çok yönlü projelerin yönetilmesi sürecinde çeşitli zorluklarla karşılaşır. Bu zorluklar arasında beklenmedik yükler, yetersiz malzeme kalitesi, iş gücü ve güvenlik sorunları öne çıkar. Ayrıca, mühendislerin doğal afetlere dayanıklı yapılar tasarlama gerekliliği, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik baskısı da önemli sorunlar arasında yer alır. Geoteknik zorluklar, yani zemin yapısının belirsizliği, özellikle büyük projelerde risk oluşturur. Hızlı kentleşme ve artan nüfus baskısı da karmaşık mühendislik problemlerine yol açabilir. Tüm bu sorunlar, inşaat mühendislerinin ve tasarım mühendislerinin çok disiplinli bir yaklaşım sergileyerek yenilikçi çözümler üretmesini gerektirir.

Mühendisler, 1968 yılına gelindiğinde Londra’da Ronan Point apartmanında meydana gelen göçmeyle birlikte yeni bir zorlukla karşılaştılar. Bina da meydana gelen doğalgaz patlaması neticesinde yapının bazı duvarları çökmeye başlayarak zincirleme çöküş mekanizması başlatmıştır. Zemin kata kadar ilerleyen bu çöküş, yapının yeterli dayanıma sahip olmaması ve duvarın çöküşünden sonra yükün yeniden dağıtımı için alternatif bir yük yolu tanımlayamamasından kaynaklanmıştır. Ronan Point apartmanında meydana gelen çöküş, mühendisler yapıların aşamalı göçme direncini belirleyebilme ve yük paylaşımı konusunu hatırlatmıştır. Daha sonraki yıllarda sırasıyla 1971 yılında Boston, Massachusetts’de işçilik hatası nedeniyle, 2012 yılında Khobar Towers, yine aynı yıl Rusya’da bir bina, 2017’de Ankara’da bir lojman kısmı ve tümünden göçmeye uğramışlardır. Bu örnekler çoğaltılsa da akıbetleri aynı olmuştur. 17 Ocak 2017’de Ankara’nın Çankaya ilçesinde Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü’ne ait binada doğalgaz sızıntısı nedeniyle meydana gelen patlama sonrası yapıda meydana gelen hasar Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Tapu Kadastro Lojmanları-Ankara (IHA, 2017)

11 Eylül 2001 tarihinde, Amerika Birleşik Devletleri'ne ait iki tarifeli yolcu uçağı terör saldırısı amacıyla kaçırılmıştır. Amerikan Havayolları'na ait ilk uçak, saat 08.46'da saatte 708 km hızla Dünya Ticaret Merkezi'nin (DTM) kuzey kulesinin kuzey cephesine, 94 ile 98. katlar arasına çarpmıştır (Şekil 2). Bu olaydan 16 dakika sonra, United Airlines'a ait ikinci bir uçak DTM'nin güney kulesinin güney cephesine çarpmıştır. Her iki çarpışma da ciddi yapısal hasarlara neden olmuş ve şiddetli yangınların başlamasına yol açmıştır. Güney kule (DTM 2), çarpışmadan yaklaşık 56 dakika sonra çökmüştür. Kuzey kule (DTM 1) ise çarpışmadan sonra 1 saat 43 dakika boyunca ayakta kalmaya devam etmiştir.



Şekil 2. DTM 1 Kuzey cephesi uçak etki alanı (FEMA, 2002)

İkiz Kulelerin çökmesi, 3000'den fazla kişinin hayatını kaybetmesine ve çevredeki birçok binada ciddi hasar oluşmasına yol açmıştır (Dusenberry vd., 2004). Dünya Ticaret Merkezi

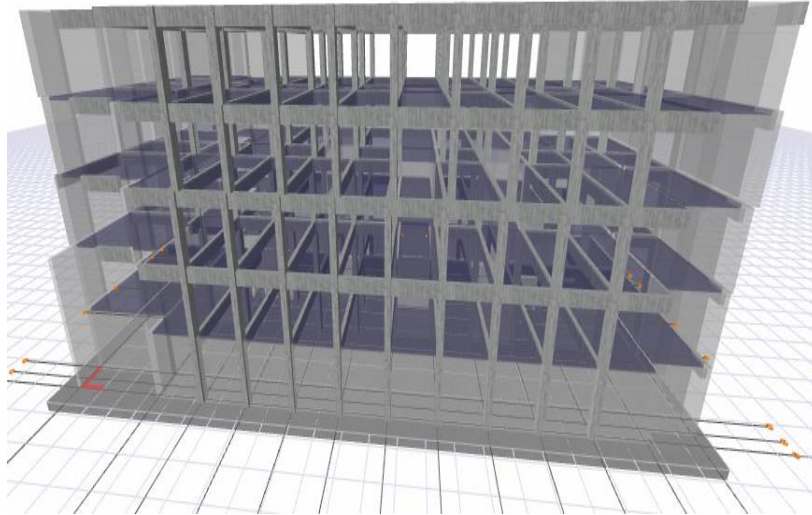
kulelerinin terör saldırısı sonucu çökmesinden sonra, aşamalı göçme konusuna olan ilgi en üst düzeye ulaşmıştır.

25 Ocak 1971’de, Boston, Massachusetts’te bulunan 2000 Commonwealth Bulvarı’ndaki 16 katlı bir apartmanın üçte ikisi inşa edilirken çökmüştür. Çatıda meydana gelen bir arıza, bodruma kadar ilerleyen bir göçmeye yol açmış ve bu olay sonucunda dört işçi hayatını kaybetmiştir. Ancak göçmenin yavaş bir şekilde gerçekleşmesi, diğer işçilerin hayatta kalmasına olanak tanımıştır. King ve Delatte (2004), Boston yetkilileri tarafından 1971 yılında hazırlanan raporu incelemiş ve iki benzer olayla karşılaştırarak raporu genişletmişlerdir. 25 Haziran 1996’da, ABD Hava Kuvvetleri Komutanlığı’na ait Khobar Towers’a (Dhahran, Suudi Arabistan) yapılan terör saldırısında, yaklaşık 2268 kg patlayıcı maddeyle yüklü bir tanker kullanılmıştır. Ayrıca, 2012’de Rusya’da 9 katlı bir binada bölgesel bir çökme sonucu 10 kişi hayatını kaybetmiş; 2014 yılında Sibiry’a’daki bir askeri yapının yenilenmesi sırasında işçilik hatalarından kaynaklanan göçme sonucu 23 Rus askeri yaşamını yitirmiştir (Euronews, 2016). Ülkemizde ise 17 Ocak 2017’de, Ankara’nın Çankaya ilçesinde bulunan Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü’ne ait binada doğalgaz sıkışması nedeniyle meydana gelen patlamada, binanın köşe kolonları taşıma gücünü kaybederek hasar görmüş ve bu durum bölgesel bir göçmeye yol açmıştır (IHA, 2017). 15 Temmuz 2016’daki darbe girişimi sırasında ise Türkiye Büyük Millet Meclisi’ne (TBMM) yapılan bombalı saldırıda, kolonlar arasındaki mesafelerin dar olması nedeniyle yapı aşamalı göçme direncini koruyarak kısmi bir çökme bile yaşanmamıştır (Huffpost, 2016). Günümüzde ise halen çeşitli nedenlere bağlı olarak aşamalı göçme vakaları meydana gelmektedir. Bu olaylar şimdi olduğu gibi gelecekte de meydana gelmeye ve yapılara zarar vererek bölgesel ya da tümünden göçmesine neden olmaya devam edecektir.

Aşamalı göçme kavramı, 1960’lı yıllarda dikkatleri üzerine çekmeye başlamış olsa da 2000’li yıllara kadar hem yönetmeliklerin oluşturulması hem de bilimsel araştırmalar açısından belirgin bir gelişim yaşanmamıştır. Ancak, 11 Eylül 2001’de Boeing 767 jetlerinin Dünya Ticaret Merkezleri ve Pentagon’a düzenlediği terör saldırıları, yapı davranışına dair araştırmaların artmasına yol açmıştır. Bu dramatik olay sonrasında, ülkeler kendi yönetmeliklerini geliştirme konusunda daha hızlı adımlar atmaya başlamıştır. Leyendecker ve Ellingwood (1977), çeşitli rehberlerden yararlanarak aşamalı göçmeyi önlemeye yönelik üç yöntem ortaya koymuşlardır. Bunlardan ilki, yapı sistemini etkileyebilecek olağandışı yüklemeleri engellemeyi amaçlayan olay kontrol yöntemidir. İkinci yöntem, yapının en az dayanım ve süneklik düzeyine sahip olacak şekilde tasarlanmasını esas alan dolaylı tasarım yöntemidir. Son olarak ise, yapısal elemanların beklenmeyen yüklemelere karşı yeterli dayanıklılıkta olması ya da yapı bir elemanını kaybettiğinde taşıma kapasitesini koruyacak şekilde tasarlanması anlamına gelen direkt tasarım yöntemini önermişlerdir. Casciati ve Faravell (1984), sismik etkiler altındaki yapısal sistemlerin aşamalı göçmeye karşı gösterdiği direnci incelemişlerdir. Taşıyıcı sistemin herhangi bir bölümünde oluşabilecek eleman kaybı sonrasında, önceden tanımlanmış ve oluşması muhtemel büyük yer değiştirmelere ilişkin sınır değerler belirleyerek, analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme ile bu sınırların aşıp aşılmadığını değerlendirmişler ve buna bağlı olarak göçmenin, yani başarısızlığın meydana gelip gelmediğini araştırmışlardır. Kılıçer (2013), zeminin üst yapıya olan etkisini araştırarak daha sonra yapılacak zemin-aşamalı göçme çalışmaları için temel oluşturmuştur. Malla ve Nalluri (1995), dinamik etkiler altındaki uzay kafes sistemlerde taşıyıcı bir elemanın kaybının sistem üzerindeki etkisini belirlemek

amacıyla, iki farklı eleman kaybı durumunu dikkate alan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu durumlardan ilki, bir elemanın aniden gevrek kırılarak taşıma kapasitesini yitirmesi, diğeri ise zaman içinde burkulma ya da kopma sonucu yük taşıyamaz hale gelmesidir. Üç boyutlu bir çatı kafes sistemini analiz ederek, elde ettikleri sonuçları sistemin dinamik etkiler altındaki deformasyon ve gerilme davranışı açısından değerlendirmişlerdir. Hinman (1998), sivil yapılara yönelik terörist saldırıların artış göstermesi üzerine, çevresel patlamalara karşı dayanıklı sivil yapılar için bir tasarım yaklaşımı önermiştir. İncelediği başlıklar arasında tehdit senaryoları, alınabilecek önlemler, silahların etkileri, analiz yöntemleri ve uygulanan optimizasyon teknikleri yer almaktadır. Astaneh-Asl vd., (1998), tipik çelik profillerden oluşan bir çerçeve yapının, bir kolonun kaldırılması durumunda aşamalı göçmeye karşı gösterdiği dayanımı incelemişlerdir. Çalışmalarında laboratuvar ortamında inşa edilen yaklaşık 18 m×6 m boyutlarında tek katlı bir çelik yapı kullanılmıştır. Geniş başlıklı profilleri kolon ve kiriş olarak kullandıkları deneyde, orta kolonu sistemden çıkararak yükün kalan kolonlara nasıl aktarıldığını analiz etmişlerdir. Ayrıca, kaldırılan kolon çevresinde oluşan gerilme birikimleri nedeniyle ilk çatlakların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Mlakar vd., (2003), 2001 yılında gerçekleşen Pentagon ve ikiz kule saldırıları sonrası, gelecekteki tasarım ve araştırma ihtiyaçlarına yönelik olarak aşamalı göçmenin önlenmesine dair önerilerde bulundukları bir çalışma ortaya koymuşlardır. Araştırmaları sonucunda, zemin seviyesindeki kolonlarda ciddi bir hasar tespit etmemişlerdir. Uçakların çarptığı katların üzerindeki kısımların hemen göçmediğini fark etmişlerdir. Bunun nedenleri arasında, kirişli çerçeve sisteminin yükü yeniden dağıtabilme özelliği, kolonlar arasındaki kısa mesafeler, kirişlerin alt kısmında bulunan takviyeler, tasarım sürecinde belirlenen yüksek yük değerleri, spiral donatılı kolonların dayanım kapasitesi ve dış cephe duvarlarının çift işlevli yapısı ile binanın ayakta kalma süresini uzatması yer almaktadır. Yazarlar ayrıca, kolonların aşırı deformasyonlarının taşıma kapasitesine olan etkisi ve yapıların yüksek etkilere karşı dayanıklılığı gibi konuların araştırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Izzuddin vd., (2008), çok katlı yapılarda aşamalı göçmeye karşı direnci etkileyen unsurları incelemişlerdir. Çelik taşıyıcılı ve kompozit sistemli çok katlı binalar için aşamalı göçme değerlendirmesine yönelik yeni bir yaklaşımın uygulanmasını ayrıntılı olarak ele almış, bu yapıların dayanıklılığı ile mevcut tasarım kurallarının yeterliliği konusunda çeşitli öneriler sunmuşlardır. Khandelwal vd., (2009), sismik tasarım kriterlerine uygun olarak projelendirilmiş çelik çerçeveli yapıların aşamalı göçmeye karşı dayanımını incelemişlerdir. Bu kapsamda Alternatif Yol yöntemi kullanılarak, 10 katlı bir çelik çaprazlı yapı analiz edilmiştir. Çalışmada çapraz sistemler hem eş merkezli hem de dış merkezli olarak iki farklı biçimde ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, dış merkezli yerleştirilen çapraz sistemin daha az hasar aldığı belirlenmiştir. Song ve Sezen (2013), mevcut bir çelik yapının aşamalı göçme potansiyelini, doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerini kullanarak hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Birinci katta yer alan dört kolonun sistemden çıkarılmasıyla birlikte yüklerin nasıl yeniden dağıldığını gözlemlemiş, ayrıca deneysel bulgularla sayısal analiz sonuçlarının ne derece örtüştüğünü değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, aşamalı göçme analizlerinde doğrusal statik yöntemin daha büyük yer değiştirmelere yol açtığını ve üç boyutlu modellerin, iki boyutlu modellere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Elsayed vd., (2016), Mısır deprem yönetmeliğini temel alarak, 7 katlı betonarme bir ofis binasının aşamalı göçmeye karşı dayanımını artırmaya yönelik deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Kolonu çıkarılan

kirişlerin alt bölgelerine yapılan takviyelerle düşey yer değiştirmeyi sınırlandırarak yapının daha az zarar görmesini hedeflemişlerdir. Kiriş boyunca farklı noktalara ve değişen uzunluklarda uygulanan bu takviyeler sonucunda, yapının enerji yutma kapasitesinin arttığı, yüklerin yeniden dağıtılabildiği ve düşey deplasmanın kontrol altına alınabildiği sonucuna ulaşmışlardır. Ozgan vd. (2023a), farklı proje örneği ile zeminin aşamalı göçme etkisindeki üst yapıya olan etkisini araştırmışlardır. Ozgan vd. (2023b), bir okul binasını yapı zemin etkileşimini dikkate alarak aşamalı göçme analizine tabi tutmuşlardır (Şekil 3). Geliştirilmiş Vlasov yöntemini dikkate aldıkları çalışmalarında zeminin aşamalı göçme analizlerinde üst yapıya etkisini araştırmışlardır.



Şekil 3. Okul binası üç boyutlu İdeCAD modeli

Kılıçer (2025a), Rusya-Ukrayna savaşında kullanılan askeri drone ve İHA'ların aşamalı göçmeye olan etkisini incelemiştir. Ergüçlü (2013), örnek bir çelik yapı üzerinde aşamalı göçme işlem adımlarını göstererek proje mühendisleri ve kullanıcılar için rehber niteliğinde çalışma yayımlamıştır. Tayfur (2023), aşamalı göçme analizlerinde optimum boyutlandırma yaparak yeni bir yazılım önermiştir. Kılıçer (2025b), bir betonarme binanın artımsal yerel dayanım (ELR) yöntemi kullanılarak aşamalı göçme davranışı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar UFC 4-023-03 ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) hükümleri temelinde karşılaştırılmıştır. Çalışma, iki düzenlemenin göçme sınırları, eleman dayanım gereksinimleri ve yerel güçlendirme ihtiyaçları açısından farklı güvenlik seviyeleri tanımladığını, dolayısıyla tasarımcının hangi kritere göre hareket ettiğine bağlı olarak yapı performansının anlamlı biçimde değişebileceğini göstermektedir.

Bu araştırma, farklı afet senaryoları altında yapı elemanlarında meydana gelen hasar türlerini ve bu hasarların sıklığını detaylı olarak incelemektedir. Çalışma kapsamında, soğuk şekillendirilmiş çelikten (SŞÇ) inşa edilen örnek bir yapıda, farklı taşıyıcı duvarların ani şekilde sistemden çıkarıldığı senaryolar üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler, UFC 4-023-03 rehberi doğrultusunda belirlenen Alternatif Yol Yöntemi kullanılarak yapılmış; her bir senaryoda yüklerin yeniden dağılımı ve yapının gösterdiği tepkiler değerlendirilmiştir. Kuvvet kontrollü ve deformasyon kontrollü elemanlar ayrı ayrı incelenmiş, yapı elemanlarının dayanım sınırları, yük artış katsayıları ve kesme kuvvetleri üzerinden test edilmiştir. Elde edilen

veriler doğrultusunda, yapının belirli bölgelerinde meydana gelebilecek hasarların tüm yapıya yayılmasını önlemeye yönelik yapısal çözüm önerileri sunulmuştur. Araştırmanın bulguları, yapıların maruz kaldıkları farklı yükleme ve darbe senaryolarına göre değişen yapısal bozulmalar sergilediğini ortaya koymaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Aşamalı göçme kavramı, savaş alanlarında ve beklenmedik yüklemelere maruz kalan yapılarda her zaman var olmasına rağmen, 2000’li yıllardan itibaren literatürde daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Bu çalışma kapsamında, yapısal sistemlerin doğal afetler sonucu taşıyıcı duvar kaybı yaşaması halinde gösterdiği tepkiler incelenmiştir. SŞÇ yapının duvar senaryolarına göre ihtiyaç duyabileceği ek materyallerin tespiti için aşağıdaki metotlar ve materyaller kullanılmıştır.

Doğal Afetler

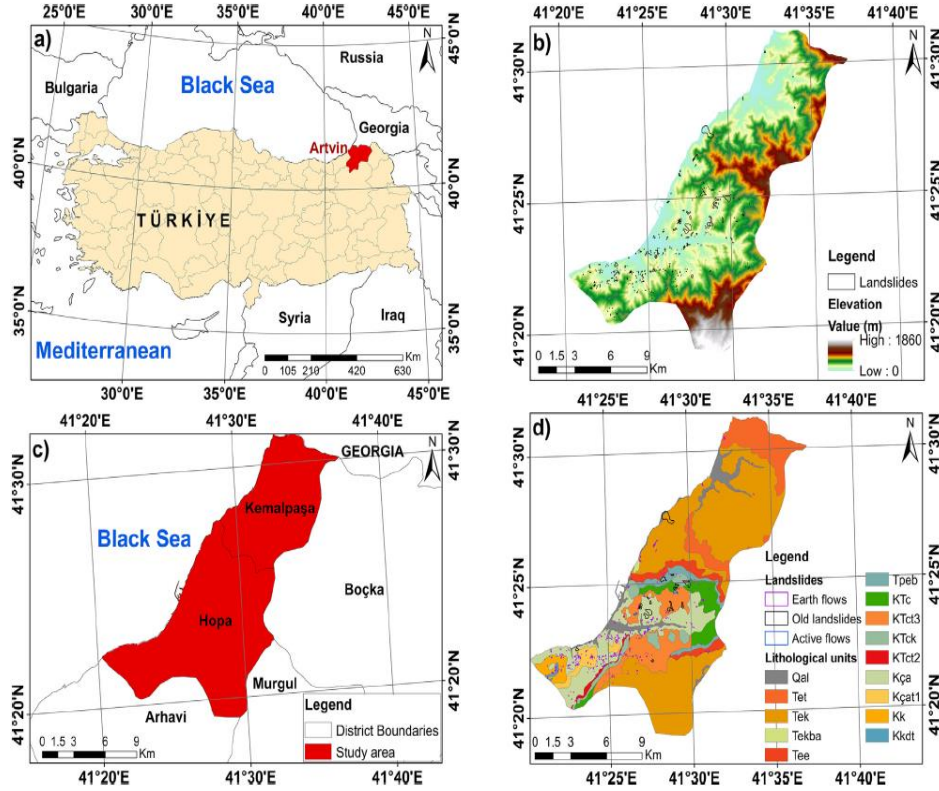
Yapıların, özellikle hangar tipi atölyelerin, ani duvar yıkımına maruz kalmasına neden olan bazı doğal afetler, yüksek enerjiyle kısa sürede yapılara büyük hasar oluşturma potansiyeline sahiptir. Belirli afet türleri, yapı elemanlarında, özellikle de taşıyıcı elemanlarda ya da taşıyıcı duvarlarında aniden yıkılmasıyla sistemden eksilebilir. Yapılarda ani duvar yıkımları genellikle; deprem, heyelan, fırtına, hortum, kasırga, çığ ve volkanik patlamalar nedeniyle olabilmektedir.

Tüm bu doğal afetler yapıların duvarlarının bir anda yıkılmasına neden olabilecek en kritik doğal afetler arasında yer almaktadır. Bu tür afetlerin ortak özelliği, etkilerini genellikle aniden göstermeleri ve yapı sisteminin herhangi bir uyarı vermeden şok etkisiyle çökmeye başlamasına yol açmalarıdır. Depremler levhaların birbirlerine uyguladıkları gerilmeler ve çekme hareketleri kaynaklı dinamik yükler nedeniyle temelden çatıya kadar tüm yapıyı sismik dalgalarla etkileyerek, özellikle taşıyıcı olmayan duvarların bir anda devrilmesine ya da taşıyıcı elemanlarla birlikte çökmesine neden olabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Depremde ağır hasar alan ve duvarı yıkılan bir yapının görüntüsü (güneydoğu ekspres, 2023)

Heyelan olaylarında ise, yamaçtan kayan ya da kopan büyük toprak kütleleri, binanın dış duvarlarına yanal bir darbe uygulayarak duvarların ani çökmesine neden olabilmektedir. Bu doğa olayları gerek kıyı kesiminde gerekse de kıyından uzaklaştıkça benzer şekilde meydana gelmektedir. Akinci ve Ozalp (2023)'e göre Artvin ili örnek bir heyelan duyarlılık haritası Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. (a) Türkiye'de Artvin'in konumu, (b) Çalışma alanının yükselti haritası, (c) Artvin'in ilçeleri ve çalışma alanı, (d) Çalışma alanının litoloji haritası

Hortum, kasırga ya da fırtına gibi güçlü atmosferik olaylar ise, rüzgâr basıncının etkisiyle özellikle hafif malzemeden yapılmış ya da yeterli bağlantıya sahip olmayan duvarları yerinden kolayca sökebilmektedir. Tüm bunlara benzer şekilde, çığ olaylarında yüksek hızla ve giderek hızlanarak hareket eden kar kütleleri, yapının özellikle yamaç tarafındaki duvarlarında ani göçmelere yol açabilir. Amerika Birleşik Devletleri 2025 yılı Mayıs ayında meydana gelen ve oldukça büyük ekonomik zararlara yol açan hortumun yarattığı etki Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Hortum sonrası yapıda meydana gelen hasarlar (Reuters, 2025)

Volkanik patlamalarda ise hem patlamayla fırlayan taş ve lavlar hem de akıntılar duvarlara çarparak kimi zaman anlık kimi zamanda yavaş olarak yıkım meydana getirebilir. Bu afet türleri, taşıyıcı sistem tasarımında olağan dışı-beklenmedik yükler olarak değerlendirilmekte ve geleneksel yükler dışında olduğundan çoğu zaman yapıların projelendirilme sürecinde ihmal edilmektedir. Bu nedenle, ani ve beklenmeyen bir yükleme senaryosunda yapı elemanları özellikle aşamalı göçmeye neden olacak şekilde davranabilmekte, hatta sistemde bölgesel yıkımlardan tümünden göçmeye giden zincirleme çöküş mekanizması gözlemlenebilmektedir. Aşamalı göçme kavramının literatürde ilk kez dikkat çektiği Ronan Point, Alfred P. Murrah ve Dünya Ticaret Merkezi gibi örnekler, doğrudan patlama ya da darbe etkisiyle başlayan lokal hasarın yapının tamamına yayılabildiğini göstermektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, yukarıda sıralanan afet türleri, yalnızca anlık hasara neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda yapının genel stabilitesini de tehdit ederek aşamalı göçme sürecini tetikleyebilir. Bu nedenle, özellikle kamu yapıları, sağlık tesisleri ve askeri binalar gibi kritik öneme sahip yapılar, bu tür afet senaryolarına karşı dayanıklılık gösterecek şekilde tasarlanmalı; duvar sistemleri başta olmak üzere tüm taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlar beklenmedik yüklere karşı UFC rehberi dikkate alınarak analizlere tabi tutulmalıdır.

Yönetmelikler

Yürürlükteki yapı yönetmeliklerinin temel amacı, yapıların geleneksel tasarım yükleri altında hizmet ömürleri boyunca güvenli şekilde işlevlerini sürdürebilmesini sağlamaktır. Ancak bu yönetmelikler, şok dalgaları ya da terör kaynaklı olağandışı yüklemeleri genellikle kapsamaz. Özellikle son yıllarda yaşanan terör saldırıları ve savaşlar sonrası yapıların aşamalı göçmeye karşı dayanıklılığı ön plana çıkmış ve yönetmeliklerde bu doğrultuda revizyonlara gidilmiştir.

Ronan Point Olayı ve Birleşik Krallık Yaklaşımı: 1968’de Londra’daki Ronan Point apartmanında meydana gelen yerel bir patlama sonucu yaşanan aşamalı göçme olayı, bu konunun yapı yönetmeliklerine dâhil edilmesini başlatan ilk önemli gelişme olmuştur. İngiltere, bu olaydan sonra ODPM-The Building Regulations yönetmeliğinin A3-5. bölümünde

"Orantısız Göçme" başlığı altında hükümler geliştirmiştir. Başlangıçta yalnızca 5 kat ve üzeri yapılar için geçerli olan bu düzenleme zamanla tüm binalara uygulanabilir hale getirilmiştir. 1999'daki çalışmalarda yapılar, risk faktörü ve kullanım amacı doğrultusunda sınıflandırılmış; kolonlar sistematik olarak kaldırılarak yapının dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Ancak bu kriterlerin ilerleyen yıllarda yetersiz olduğu görülmüştür.

Kanada ve NBCC: Kanada, 1975 tarihli NBCC- National Building Code of Canada yönetmeliği ile aşamalı göçmeye karşı tasarım kriterlerini tanımlamıştır. Ancak 1980 sonrası NRCC- Associate Committee on the National Building Code revizyonları ile bu konuya verilen önem azalmış ve rehber niteliğindeki açıklamalar kaldırılmıştır. 1995 versiyonunda yalnızca tüm yük senaryolarına karşı dayanım vurgulanmıştır. Vlassis (2007) ve Ellingwood (2006), yapısal bütünlüğün sağlanması ve olağandışı yükleme olasılıklarının yılda 4 defadan fazla dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Ancak bu konularla ilgili net yük kombinasyonları yönetmelikte bulunmamaktadır.

Avrupa ve Eurocode 1: Eurocode 1 (2006), bina sınıflarına göre orantısız göçmeye karşı yöntemler önermiştir. İki katın her birinde kat alanının %15'inden veya 100 m²'den fazlasının zarar görmesi durumunda yapı, aşamalı göçmeye karşı zayıf kabul edilmektedir. Bu sınırlar şematik olarak da yönetmelikte gösterilmiştir.

ABD: ABD'de 1970'li yıllardan itibaren aşamalı göçme, ANSI (1972), BOCA (1972), SBCCI (1994) gibi kodlarda yer almaya başlamıştır. ASCE 7-16 standardı, patlama ve araç çarpması gibi etkiler altında yapıların dayanım ve stabilitesinin kontrol edilmesini önermektedir. ABD'de en kapsamlı rehberler GSA (2003) ve özellikle UFC 4-023-03 (2016) rehberleridir. GSA, statik ve dinamik analiz yöntemleri sunar; doğrusal statik analiz sadece 10 kat ve altındaki yapılar için uygundur. UFC 4-023-03 ise tüm yapı tipleri için hem mevcut hem de yeni yapılarda kullanılabilen örnekli analiz yöntemleri sunmaktadır. Rehber, yapıları risk seviyelerine göre sınıflandırmakta ve doğrudan (direct) ya da dolaylı (indirect) tasarım yaklaşımlarını önermektedir. Düşük-orta riskli yapılar için dolaylı yöntem, yüksek riskli yapılar için doğrudan analiz önerilmektedir. UFC 4-023-03 ayrıca, yapıların planı, yüksekliği, kullanım amacı, insan yoğunluğu, yangın kaçış yolları, bodrumlar ve tesisat alanları gibi detaylara özel kriterler belirlemektedir. Bu kapsamda, yaygın olan yapıya sonradan kat ekleme durumları da göz önünde bulundurulmuştur. Rehber, aşamalı göçmenin yayılmasını önlemek için taşıyıcı sistemin süreklilik ve devamlılık özelliklerine sahip olmasını öngörmektedir. UFC 4-023-03 rehberi, diğer UFC serileri (UFC 4-010-01, 2018; UFC 4-010-02, 2012; UFC 4-020-01, 2008) ile birlikte çalışır; bu seriler antiterörizm, güvenlik mühendisliği ve yapı planlama gibi konularda birbirini tamamlar. Özellikle kamu, askeri, turizm ve ticaret gibi stratejik yapılarda bu rehberlerin uygulanması, ülke güvenliği ve prestij açısından kritik önem taşır.

SŞÇ için Alternatif Yol Metodu

UFC 4-023-03 dokümanı dikkate alındığında bu çalışmada incelenen Cold-Formed Steel (CFS) örneğinde, yapı sisteminin aşamalı göçmeye karşı dayanımını değerlendirmek için Alternatif Yol yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz, özellikle yerel bir taşıyıcı elemanın, örneğin bir duvar ya da kolonun, ani olarak sistemden çıkarılması durumunda, yapının geriye kalan kısmının kendi başına ayakta kalıp kalamayacağını incelemeye yöneliktir. Bu yöntem,

doğrudan tasarım yaklaşımı kapsamında değerlendirilir ve yapının alternatif yük taşıma yolları geliştirip geliştiremediğini ve yüklerin sisteme yeniden dağıtılıp dağıtılamadığını da test eder.

SŞÇ örneğinde, yapı iki katlı ve taşıyıcı sistemi SŞÇ'ten oluşan duvar panelleri ile tanımlanmıştır. Yapı, Risk Kategorisi II kapsamında yer almakta ve bu kategori için UFC'de sunulan iki çözüm yolu vardır. Bunlardan biri olan ve bilimsel çalışmalarda daha çok kullanılan Alternatif Yol yöntemi seçilmiştir. Bu seçimle, yapıdaki bazı düşey taşıyıcı elemanlar zahiri olarak "kaldırılmış" yani yok sayılmış ve ardından sistemin bu eksikliği nasıl tolere ettiği incelenmiştir.

Alternatif Yol metodu yöntemi kapsamında incelemek örnek modellerde kılavuz tasarım mühendislerine üç farklı senaryo önermektedir. Bunlar;

- (1) iç taşıyıcı duvarın kaldırılması,
- (2) uzun kenarda yer alan dış duvarların kaldırılması ve
- (3) alt katlardaki dış duvarların kaldırılması şeklindedir.

Her ne kadar kılavuz 3 farklı senaryo önerse de projelere göre tasarım mühendisine daha fazla ya da az senaryo inceleme kararını bırakmıştır. Bu senaryolar için yapının yükleme kombinasyonlarında UFC yönetmeliğinin kullanıcılara önerdiği düşey ölü ve hareketli yükler deformasyon ve kuvvete göre dikkate alınmıştır (Eşitlik 1-2).

$$G_{LD} = \Omega_{LD} [1.2 D + (0.5 L \text{ ya da } 0.2 S)] \quad (1)$$

$$G_{LF} = \Omega_{LF} [1.2 D + (0.5 L \text{ ya da } 0.2 S)] \quad (2)$$

G_{LF} , Doğrusal Statik analizde kuvvet-kontrollü etkilerin hesabında kullanılan artırılmış düşey yüklerini ifade eder; D, cephe yükleri dâhil sabit yükü (lb/ft² veya kN/m²), L, hareketli yük indirimi dâhil hareketli yükü (lb/ft² veya kN/m²) ve S, kar yükünü (lb/ft² veya kN/m²) temsil eder. Ω_{LF} , Doğrusal Statik analizde kuvvet-kontrollü etkileri hesaplarken kullanılan yük artırma katsayısıdır ve çerçevesi ya da taşıyıcı duvarlı sistemlere uygun değer seçilmelidir. G_{LD} ifadesi, anlam ve kullanım bakımından G_{LF} ifadesine benzerlik gösterir.

Kaldırılan taşıyıcı elemanın neden olacağı yük yeniden dağıtılarak çevresindeki elemanlara uygulanmıştır. Burada önemli bir nokta, kaldırılan elemanın üstündeki yüklerin kalan elemanlar arasında yeniden doğru ve gerçekçi paylaştırılmasıdır. Bu noktada UFC'nin belirttiği şekilde yük artırma faktörleri (Load Increase Factor) kullanılmaktadır. Örneğin doğrusal statik analiz (Linear Static Procedure) kullanıldığı takdirde, bu faktör genellikle 2.0 olarak hesaplamalarda kullanılmaktadır.

Analiz sonucunda, yapıdaki elemanların karşılaştığı zorlamalar değerlendirilmiştir. Elemanlar UFC'nin önerdiği şekilde iki ana sınıfa ayrılmıştır:

- kuvvet kontrollü elemanlar ve
- deformasyon kontrollü elemanlar.

Kuvvet kontrollü elemanlar için maksimum izin verilen gerilme değerleri, deformasyon kontrollü elemanlar için ise şekil değiştirme (moment kapasitesi, dönme gibi) sınırları esas alınmıştır. Bu sınırların aşıp aşılmadığına göre sistemin yeterli olup olmadığına karar verilmiştir.

Tüm birincil ve ikincil elemanlar ile bileşenlerdeki kuvvet-kontrollü etkiler için (Eşitlik 3):

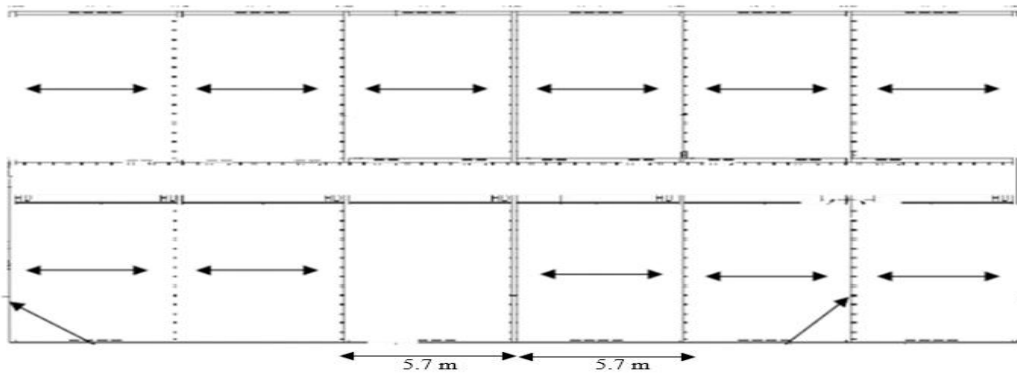
$$\Phi Q_{CL} \geq Q_{UF} \quad (3)$$

Tasarımda, Q_{UF} doğrusal olmayan statik modelden elde edilen kuvvet-kontrollü etkidir. Q_{CL} , bir eleman ya da bileşenin alt sınır dayanımıdır. Φ , ilgili malzeme tasarım standardında tanımlanan dayanım azaltma katsayısıdır. Q_{CL} (alt sınır dayanım) değeri, ASCE 41'in 9–12. bölümlerinde belirtilen yöntemler izlenerek, tasarım yükleme durumunda bileşen üzerindeki birlikte etkileyen tüm yük ve etkiler dikkate alınarak belirlenmelidir. Her bir etki için, ilgili malzeme tasarım standartlarında belirtilen uygun direnç (güvenlik) katsayısı kullanılmalıdır. Analizler, Eşitlik 1–3 ve UFC'de yer alan diğer eşitlikler kullanılarak tamamlanır.

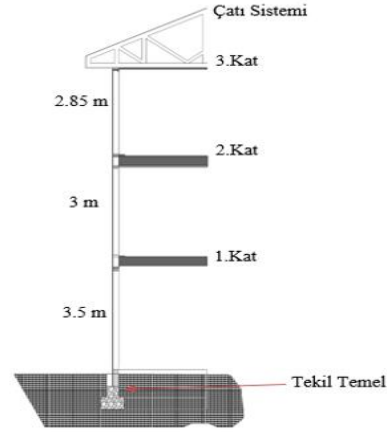
BULGULAR

SŞÇ taşıyıcı duvar yapısı örneği, SŞÇ yapıların UFC 4-023-03 rehberi, aşamalı göçme analizlerinden Alternatif Yol metodu analiziyle çözülmüştür. Yapının 100 kişiden az bir kapasiteye sahip olduğu varsayılmakta ve UFC 3-301-01 (2008) dikkate alınarak \3\ Risk Kategorisi /3/ II olarak sınıflandırılmaktadır. Risk Kategorisi II, insan yaşamı açısından orta düzeyde risk taşıyan ve kamu güvenliği açısından kritik olmayan yapıları kapsar. Bu kategoriye giren yapılar genellikle konutlar, küçük ofis binaları, küçük çaplı ticari yapılar (örneğin mağazalar ve dükkânlar), küçük sanayi tesisleri ve kamuya açık ancak sınırlı kapasiteye sahip toplanma alanlarıdır (UFC 3-301-01, 2008). Ayrıca, 300 kişiden az kapasiteli ibadet yerleri, 250 kişiden az toplanma kapasitesine sahip salonlar ve kritik olmayan küçük okullar da bu kategoriye dâhildir. Bu yapılar, toplumun genel işleyişi üzerinde sınırlı etkiye sahiptir ve olağan yapısal güvenlik önlemleriyle tasarlanırlar. Bu tip yapılar üzerinde aşamalı göçme analizlerini göstermek hem daha iyi anlaşılır hem de tasarım mühendisi tarafından analizler daha kolay tekrar edilebilir.

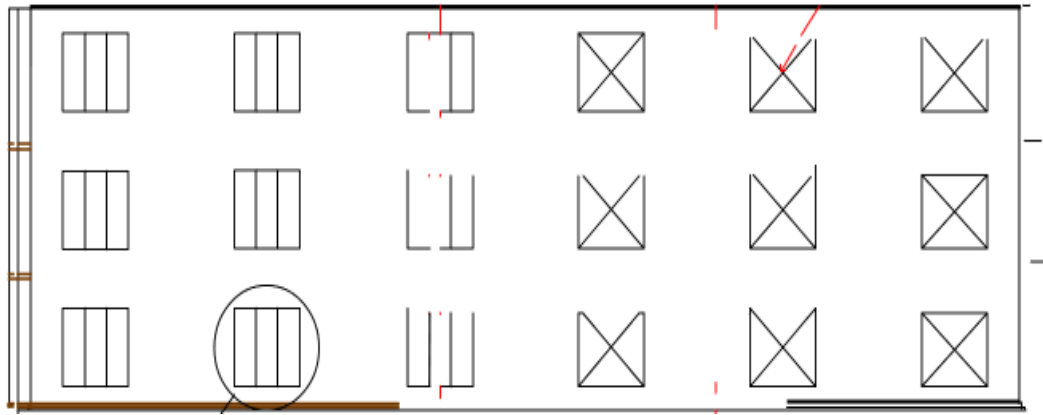
Bu örnek, ABD'deki yapısal mühendislik firmaları tarafından yaygın olarak kullanılan araçlar ve teknikler kullanılarak hazırlanmıştır. Soğuk şekillendirilmiş tasarım için bu örnek, esas olarak el ile yapılan analizlere ve Uluslararası Yapı Kodu'nda (International Building Code, 2021) yayımlanan standart tasarım tablolarına dayanmaktadır. \3\ Risk Kategorisi /3/ II Seçenek 2: Alternatif Yol yöntemi, aşamalı göçmeye karşı direnci değerlendirmek için UFC Tablo 2-2'den seçilmiştir (UFC 4-023-03, 2016). Projede incelenen örnek yapıya ait planın görünüşü Şekil 7'de, duvar kesiti ise Şekil 8'de, dış duvar cephe görünüşü Şekil 9'da ve yapının kesit görünüşü Şekil 10'da verilmektedir.



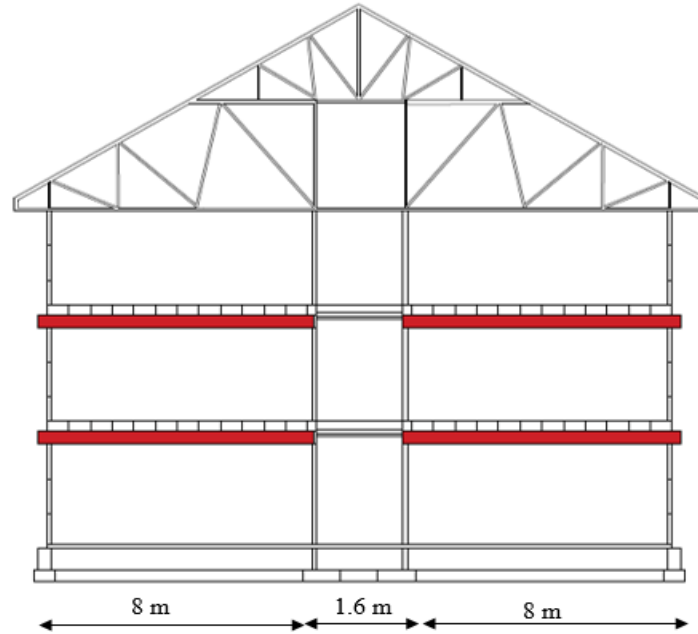
Şekil 7. Soğuk şekillendirilmiş yapı planı



Şekil 8. Soğuk şekillendirilmiş yapı duvar kesiti

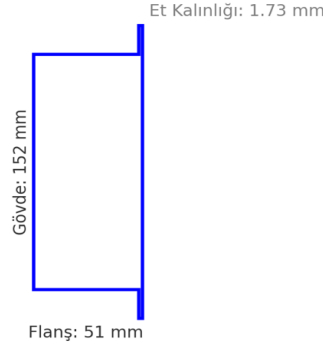


Şekil 9. Soğuk şekillendirilmiş yapı duvar kesiti cephe görünüşü



Şekil 10. Soğuk şekillendirilmiş yapı duvar kesiti görünüşü

Duvar yapısı; iç duvarlar ve dış uç duvarlarda her iki yüzeyde 1,1 cm kalınlığında OSB kaplama bulunan, bloklanmış ve 61 cm aralıklarla yerleştirilmiş 600S200-68 Gr50 çelik dikmelerden oluşur. Dış uzun yön duvarlarında ise yalnızca dış yüzeyde 1,1 cm kalınlığında OSB kaplama bulunmakta olup, bu duvarlarda bloklanmış ve 61 cm aralıklarla yerleştirilmiş 600S200-54 Gr50 dikmeler kullanılmaktadır. Tüm duvar uçlarında ise birlikte dikilmiş (2) adet 600S200-68 Gr50 dikme yer almaktadır. 600S200-68 Gr50 dikmenin görünüşü Figure 11’de verilmektedir.



Şekil 11. 600S200-68 Gr50 dikme görünüşü

Döşeme yapısı, geçmeli döşeme sistemi ile birlikte kullanılan toplam 15,2 cm derinliğinde hafif betondan oluşmaktadır. Çatı yapısı, mühendislik hesaplı makaslar ve 1,27 cm kalınlığında kontrplak kaplama ile tasarlanmıştır. Tüm sistemlerde Türkiye’de yaygın olarak kullanılan TS EN 10346 standardına uygun S350GD+Z sınıfı soğuk şekillendirilmiş galvanizli çelik malzeme tercih edilmiştir. Yükler ise AP yöntemine göre döşemelerde sabit yük, beton dolgulu döşeme, mekanik-elektrik tesisatı ve tavan dâhil olmak üzere yaklaşık 3.00 kN/m²; hareketli yük ise 2.00 kN/m² olarak alınmıştır. Çatı için sabit yük, çatı kaplaması ve alt yüzey tavan dâhil yaklaşık 1.20 kN/m², hareketli yük 1.00 kN/m², kar yükü ise ASCE 7-05 standartlarına göre 0.35 kN/m² dikkate alınmıştır. Duvarlar için sabit yük, pencere altları ve başlıklar dâhil yaklaşık 0.34 kN/m² olarak belirlenmiştir.

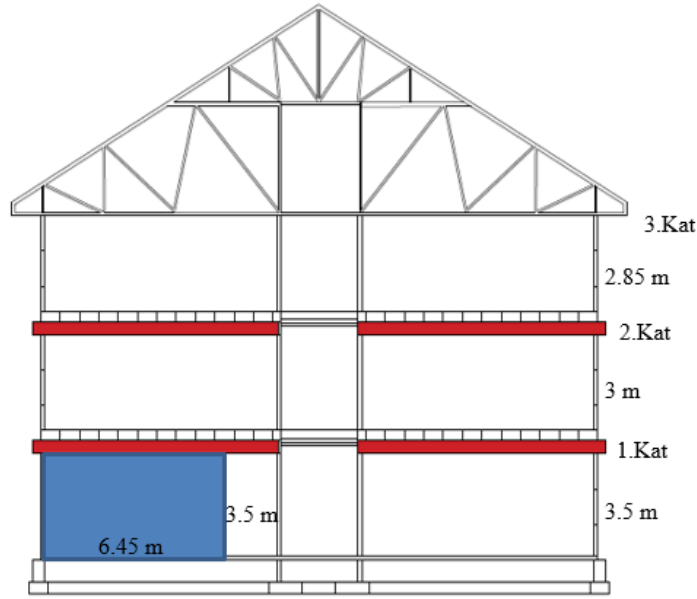
Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI, 1999) tarafından yayınlanan SŞÇ Yapısal Elemanların Tasarımı için Kuzey Amerika Spesifikasyonu ve 2006 tarihli Uluslararası Bina Kodu (ICC, 2006) esas alınarak, tasarım uyumluluğu UFC 4-023-03 standardına göre sağlanmakta ve bu kapsamda LRFD (Yük ve Dayanım Faktörü Tasarımı) yaklaşımı dikkate alınmıştır. Tüm bu yönetmelikler dikkate alınarak duvarların kaldırılması durumunda, kalan taşıyıcı duvarlar kesme duvar elemanları olarak kullanılacak ve doğrusal statik AP analiz yöntemi uygulanacaktır. Bu kapsamda zemin katta iç taşıyıcı duvarın (Şekil 12) kaldırılması tercih edilmiştir. Bu yapı için yapılacak AP analizinde, ahşap kesme duvar sistemleri ve birincil bağlantılar deformasyon kontrollü elemanlar olarak kabul edilecek, bağlantı gövdeleri ise gerektiğinde kuvvet kontrollü elemanlar olarak kontrol edilecektir. Ayrıca analize ilişkin genel varsayımlar şunlardır (UFC 4-023-03, 2016):

- Duvar kaldırma senaryosu sırasında iç veya dış duvarlara herhangi bir rüzgâr ya da iç basınç etkisi uygulanmaz. Mühendislik hesaplı çatı makaslarının alternatif yol (AP) kapasitesine katkısı, tasarım aşamasında belirli özelliklerdeki belirsizlikler nedeniyle dikkate alınmaz. Ancak, tasarımcının tercihinine bağlı olarak, AP gerekliliklerini içeren uygun performans

şartnamelerinin sözleşme belgelerine dâhil edilmesi koşuluyla bu elemanlar analize dâhil edilebilir.

•ASCE 41-13 standardına göre, ahşap ve hafif metal taşıyıcı bileşenlerle ilişkili yapısal davranışlar genellikle deformasyon kontrollü kabul edilir ve bu durumda çoğunlukla beklenen dayanım değerleri esas alınır. Ayrıca, çivi, vida, cıvata, kesme halkası ve benzeri bağlantı elemanlarıyla ahşap veya metal bileşenleri birbirine bağlayan bağlantı sistemlerine gelen talepler deformasyon kontrollü; bağlantı gövdelerine ve bağlantı donanımının gövdelerine gelen talepler ise kuvvet kontrollü eylemler olarak değerlendirilir.

Zemin Katta İç Taşıyıcı Duvarın Kaldırılmasına Yönelik AP Analizi;



Şekil 12. Zemin katta iç taşıyıcı duvarın kaldırılması senaryosu

Zemin kat iç taşıyıcı duvarından uzunluğu 6.45 (2H) olan bir duvar parçası çıkarılmıştır. Burada H, 2. kat döşeme seviyesi ile 3. kattaki 15 cm kalınlığındaki döşemenin altı arasındaki mesafe olarak tanımlanır ve bu mesafe yaklaşık 3,5 metredir. Şekil 12’de yapı kesiti üzerinde görülmektedir.

Geriye kalan yapı, 2. ve 3. katlardan gelen döşeme ve duvar yüklerini taşıyan bir perde duvar elemanı oluşturur. Üstteki perde duvarlar, her katın döşemesi tarafından bölünmektedir. İkinci kattan üçüncü kata kadar olan duvarın toplam yüksekliği yaklaşık sırasıyla 3.5 metre ve 3 metre, üçüncü kattan çatıya kadar olan kısmın yüksekliği ise yaklaşık 2.85 metredir. Bu duvarların üst ve alt kısımlarında sınır elemanları olarak galvanizli U150/50/1.5 çelik profiller kullanılacaktır. Ayrıca yapıda herhangi bir düzensizlik bulunmadığından, doğrusal statik AP analizinin yapılmasına UFC tarafından izin verilmektedir. Yüklemeler;

$$\text{Katlarda ölü yük hesabı: } 3 \text{ kN/m}^2 \times 5.7 \text{ m} = 17.1 \text{ kN/m}$$

$$\text{Duvarlarda ölü yük hesabı: } 0.34 \text{ kN/m}^2 \times 3 \text{ m} = 1.02 \text{ kN/m}$$

IBC 2006 1607.9.2’ye göre hareketli yüklerin azaltma katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Alan} = 5.7 \times 7.90 \times 2 = 90.06 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{azaltım katsayısı}} = 0.861 \times (A - 13.94) = \% 65.54 \text{ Mutlak üst sınırı } \%60 \text{ olduğundan } R_{\text{max}};$$

60% ya da $23.1(1 + 62/40) = \% 58.9$ olarak hesaplanır.

Her kat için AP kontrolünde kullanılan hareketli yük:

$$2 \text{ kN/m}^2 \times 5.7 \text{ m} \times (1 - 0.589) = 4.69 \text{ kN/m}^2$$

Deformasyona göre kontrol edilen elemanlar için Doğrusal Statik AP Yük Durumu:

$$G_{LD} = \Omega_{LD} [1.2D + 0.5 L]$$

$$h = 6.45/2 = 3.23 \text{ m}$$

$$b = 2.5 \text{ m}$$

$$h/b = 3.23/2.5 = 1.29 < 2.0$$

$$m = 3.8$$

Vidalama bağlantıları için $m = 1.8$ dikkate alınır.

$$\Omega_{LD} = 2.0 \times m = 3.6 \text{ (UFC Tablo 3-4)}$$

Ölü yükler döşeme yükleriyle beraber 5.7 metre duvar genişliği ile çarpılarak aşağıdaki eşitlikte kullanılmıştır.

$$G_{LD} = 3.6 \times [1.2 \times (17.10) + 0.5 \times (11.4)] = 94.4 \text{ kN/m her kat seviyesi için}$$

Kesme kuvveti kontrolü;

$$Q_{UD} = 94.4 \times 6.45/2 / 2.5 = 121.77 \text{ kN/m}$$

Şekil değiştirme kontrollü davranışlar için taşıma kapasitesi kontrolleri:

Duvardaki kesme kuvveti:

$$\text{Duvarın kesme dayanımı } \phi Q_{CE} = 1.5 \times (\phi_{vs})$$

burada ϕ_{vs} = IBC'den alınan LRFD yöntemine göre duvarın kesme dayanımıdır.

Beklenen dayanım için 1.5 katsayısı ASCE 41-13 12.4.9.2'den alınmıştır ancak 3-2.11.7.1 Bölümünün, ASCE 41-13'ün ϕ (phi) faktörünü 1.0 olarak kullandığı durumun aksine, malzemeye özgü ϕ faktörünün dahil edilmesini gerektirdiğine dikkat edilmelidir (UFC 4-023-03, 2016).

$$\phi Q_{CE} = 1.5 (\phi_{vs}) = 1.5 (0.55 \times 20.60 \times 2) = 34 \text{ kN/m}$$

UFC 3-13 kontrolü;

$$\phi m Q_{CE} \geq Q_{UD}$$

$$34 (3.8) = 129.2 > 121.77$$

Kuvvet Kontrolü;

$$\Omega_{LD} = 2.0 \text{ (UFC Tablo 3-4)}$$

$$G_{LF} = 2.0 \times (1.2 \times (17.10) + 0.5 \times (11.4)) = 52.44 \text{ kN/m her kat seviyesi için}$$

$Q_{UF} = 52.44 \times 6.45 \times 6.45 / 8 = 272.7$ kNm ile her bir duvar üzerindeki moment hesaplanır.

$$Q_{UF} = M/h = 272.7 / 2.5 = 107.99 \text{ kN}$$

ASCE 41 bu konuda bir miktar belirsiz olsa da, çekme elemanlarındaki kuvvetlerin kuvvet kontrollü işlemler olarak değerlendirilmesi uygundur; çünkü ASCE 41 Tablo 12-3, "Eksenel Basınca Maruz Çerçeve Elemanları"nı kuvvet kontrollü olarak tanımlar. Hem çekme hem de basınç elemanlarını kuvvet kontrollü olarak değerlendirmek koruyucu (emniyetli) bir yaklaşım olacaktır (UFC 4-023-03, 2016).

Her bir çekme ve ray elemanı her iki doğrultuda tamamen desteklenecektir.

UFC yönetmeliğin de 600T200-54 malzeme kullanıldıysa da Türkiye'de karşılığı S350GD+Z olarak belirlenmiştir.

$F_y \approx 350$ MPa, $F_u = 450$ MPa olarak dikkate alınmıştır.

Çekme Akması;

$$\phi_t = 0.9$$

$$T_n = A_g \times F_y$$

$$A_g = 364.96 \text{ mm}^2$$

$$F_y = 350 \text{ MPa}$$

$$\phi_t \times T_n = 0.9 \times 364.96 \text{ mm}^2 \times 350 \text{ MPa} = 114.14 \text{ kN}$$

Çekme Kopması;

$$\phi_t = 0.75$$

$$T_n = A_n \times F_u$$

$$A_n = 364.96 \text{ mm}^2 - 3 \times 4.76 \text{ mm} \times 1.37 \text{ mm} = 345.39 \text{ mm}^2$$

$$\phi_t T_n = 0.75 \times 345.16 \text{ mm}^2 \times 450 \text{ MPa} = 116.49 \text{ kN}$$

Basınç;

$$\phi_t = 0.85$$

$$P_n = A_g \times F_y$$

$$A_g = 0.5653$$

$$\phi_t T_n = 0.85 \times 364.86 \text{ mm}^2 \times 350 \text{ MPa} = 108.55 \text{ kN}$$

$$\phi Q_{CL} = 108.55 \text{ kN (1 adet S350GD+Z için)} > Q_{UF} = 107.99 \text{ kN}$$

Kaldırılan duvar parçasının her iki kenarında, yukarıdaki duvarda oluşan kayma kuvveti, aşağıdaki taşıyıcı duvarların dikmelerine aktarılmalıdır. Duvar dikmelerindeki basınç kuvveti kontrollü olarak kabul edilmelidir (UFC 4-023-03, 2016).

$$G_{LF} = 52.44 \text{ kN/m her kat seviyesi için}$$

$$2 \text{ kat seviyesi için} = 104.88 \text{ kN/m}$$

Tipik dikmeler S350GD+Z olup, 610 mm aralıklarla yerleştirilmiştir ve düzlem içi yönünde derecelendirilmiş kaplama ve orta yükseklikteki blokaj ile desteklenmiştir. Bu dikmelerin davranışı düzlem dışı burkulma ile kontrol edilecektir (UFC 4-023-03, 2016).

Alt kat dikme boyu = 3.23 metre

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından yayımlanan SŞÇ Taşıyıcı Elemanların Tasarımı İçin Kuzey Amerika Standardına göre;

- $\phi_c = 0.85$ (Basınç güvenlik katsayısı)
- $\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e}$ (Basınç burkulma oranı)
- $F_e = \pi^2 \times E / (KL/r)^2$ (Burkulma gerilmesi)
- $F_y = 350$ MPa (Malzeme akma dayanımı)
- $E \approx 199.95$ GPa
- $KL_x \approx 3.2329$ m
- $r_x \approx 0.05885$ m
- $A_e \approx 0.0004245$ m²
- $KL/r_x = 54.92$
- $F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2 = \pi^2 \times 29000 / (54.92)^2 = 654.5$ MPa
- $\lambda_c = \sqrt{50/94.9} = 0.726$

$$\lambda_c = 1.5 \text{ için } F_n = (0.658(\lambda_c)^2) F_y$$

$$F_n = 0.658(0.726)^2 \times 344.74 \text{ MPa} \approx 187.7 \text{ MPa}$$

$\phi_c P_n = 0.85 \times 187.7 \text{ MPa} \times 0.0004245 \text{ m}^2 = 67.7 \text{ kN}$ /çivi olarak her bir çivinin taşıma kapasite hesaplanır.

$Q_{UF} = 107.99 / 67.7 \text{ kN} = 2$ adet olsa da aynı düzlem boyunca iki çivinin yan yana çakılması yapısal açıdan önerilmez çünkü bu durum hem taşıyıcı sistemin stabilitesini azaltır hem de burkulma ve dönme gibi istenmeyen davranışlara yol açabilir. Çiviler, özellikle uzun ve ince kesitli elemanlar olduğunda, eksenel yük altında burkulmaya karşı oldukça hassastır. Aynı düzlemde yakın mesafede yerleştirilen iki çivi, yük altında asimetrik şekilde davranabilir ve bu da çivilerin dönmesine veya birbirini etkilemesine neden olarak taşıma kapasitelerinin düşmesine yol açar. Ayrıca, bu tür yerleşim yükün eşit dağılımını engelleyerek yapıda lokal zorlanmalar oluşturabilir. Uygulamada, bağlantı elemanlarının yerleştirilmesi, montaj kolaylığı ve etkin yük transferi açısından çivilerin belirli aralıklarla, farklı düzlemlerde veya arka arkaya yerleştirilmesi tercih edilir. Böylece her bir çivi yükü daha bağımsız taşır, sistem daha dengeli çalışır ve burkulma ya da dönme riski azaltılır. Bu nedenle en az 3 adet olacak şekilde yerleştirilmelidir. Yaklaşık 2.44 m duvar boyunca en az 3 adet çivi bulunmalıdır. Kaldırılacak duvar bölümü dış duvar kenarında ya da iç taşıyıcı duvarlara yakın konumlandırılabilmesi için, dış veya iç uzun doğrultulu taşıyıcı duvarlarda en az 5 adet çivi mevcut olmalıdır. İç uzun doğrultulu duvarlarda minimum 6 çivi bulunduğundan, çivilerin basınç dayanımı yeterlidir. Taşıyıcı yükler, betonarme döşeme sistemi aracılığıyla birden fazla çiviye dağıtılacak şekilde

aktarılabılır. Kompozit döşeme sistemi üzerine yerleştirilen 10 cm'lik hafif beton tabakasından oluşmakta olup, kısa doğrultudaki taşıyıcı duvarlar tarafından desteklenmek üzere yaklaşık 5.7 metrelik açıklığı geçmelidir. Taşıyıcı bir duvarın kaldırılması döşemenin desteğini kaybetmesine neden olacağından, bu durumda olası çökme riskine karşı döşemenin yukarıdaki duvara bağlantısı sağlanmalıdır. Zemin kirişleri, yukarıdaki duvara monte edilmiş S350GD+Z tipi çelik çivilere germe bağlantısı ile asılacak ve bu bağlantı, güverteye civatalanmış dişli bir germe çubuğu ile birlikte, çekme kuvvetlerine karşı güverte malzemesinden ayrılmayı önleyecek bir pul içerecektir. Her döşeme plakası bağlantısı birden fazla bağlantı elemanından oluşacağından, sistem kuvvet kontrollü olarak değerlendirilecektir.

Kat yükleri;

$$\text{Ölü yük: } 3 \text{ kN/m}^2 \times 5.7 \times 0.6 = 10.26 \text{ kN}$$

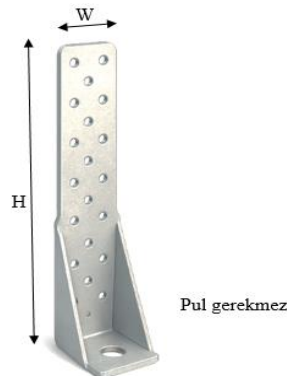
$$\text{Hareketli yük: } 2 \text{ kN/m}^2 \times 5.7 \times 0.6 = 6.84 \text{ kN}$$

UFC Tablo 3-4'e göre $\Omega_{LD} = 2.0$, $m\Omega_{LF} = 2.0$ olarak dikkate alınır.

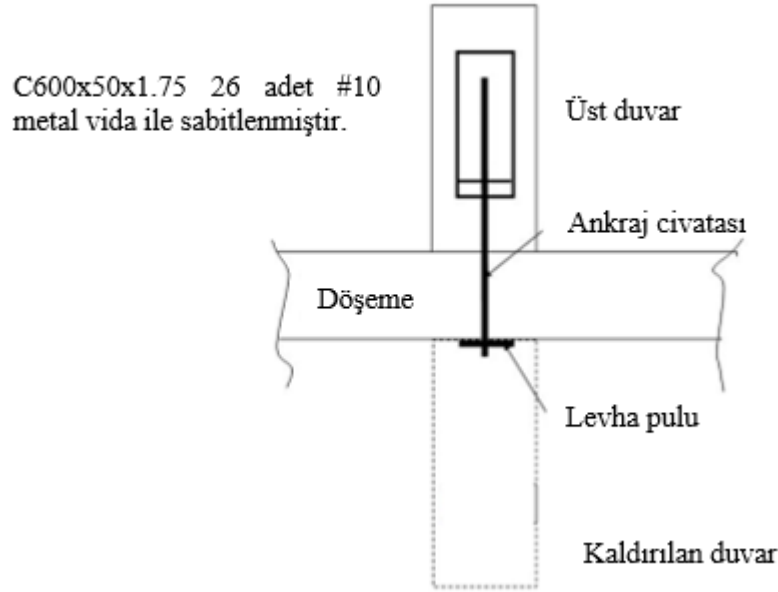
$$G_{LF} = 2.0 \times (1.2 \times (10.26) + 0.5 \times (6.84)) = 31.46 \text{ kN}$$

Germe bağlantısının kapasitesi yaklaşık 31.46 kN'den büyük olmalıdır. Bu doğrultuda, yukarıdaki duvar çivisine 26 adet M5 (#10) vida ile sabitlenen bir adet Simpson HTT5 bağlantı elemanı sağlanmalıdır. Bu bağlantının test edilmiş kapasitesi yaklaşık 28.94 kN (UFC 4-023-03, 2016) olup, gerekli kapasitenin altında kalmaktadır. Ancak, askı elemanının (hanger) nominal çekme kapasitesi yaklaşık 51.53 kN'dur. Bu kapasite, 0.6'lık dayanım katsayısı ile birlikte değerlendirildiğinde yeterli dayanım sağlar. Kullanılan S350GD+Z tipi çelik çivi, bu germe bağlantısını taşıyabilecek yeterli dayanım ve kesit kalınlığına sahiptir. Döşeme sisteminin yukarıdaki duvara nasıl bağlandığını gösteren detay için Şekil 13'de ve destek elemanı ise Şekil 14'de verilmektedir.

Döşeme sisteminde civatanın yüzeyi yırtarak geçmesini önlemek amacıyla bir pul kullanılmalıdır. Pulun tam oturmadığı sac döşemenin boşluklu bölgelerinde, bu pulun altına şerbet dolgusu yapılması gerekecektir. Ayrıca, döşeme doğrultusunda yerleştirilen tipik donatının, taşıyıcı duvar desteklerinin ötesine devam etmesi sağlanmalı ve her iç taşıyıcı duvar üzerinde, germe bağlantıları arasındaki yatay kuvvetleri eşit biçimde dağıtmak amacıyla enine donatılar yerleştirilmelidir (UFC 4-023-03, 2016).



Şekil 13. Destek eleman görünüşü



Şekil 14. Zemin kat destek sistemi

İkinci kat üzerindeki bir duvar parçasının kaldırılması, önceki bölümlerde yapılan analizlerle benzer sonuçlar verecektir; zira taşınan yük, kat başına kalan duvar yüksekliği ile yaklaşık orantılıdır. Benzer şekilde, kısa kenar boyunca yer alan bir dış taşıyıcı duvarın kaldırılması da, iç duvarın kaldırılması ile tutarlı sonuçlar üretecektir; çünkü dış duvarın taşıdığı döşeme alanı, iç duvara göre yaklaşık olarak yarı yarıya daha azdır ve bu nedenle sağlanan taşıma kapasitesi benzer düzeyde olacaktır.

SONUÇ

Bu çalışma, SŞÇ yapılar da doğal afetler sonrası oluşabilecek aşamalı göçme riskini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Yapının farklı taşıyıcı duvar senaryolarında gösterdiği yapısal davranış, UFC 4-023-03 standardına uygun olarak Alternatif Yük Yolu (AP) yöntemiyle analiz edilmiştir. Üç ayrı senaryoda iç ve dış duvarların sistemden aniden çıkarılması simüle edilmiş ve yapı elemanlarının deformasyon ve kuvvet kontrolü açısından dayanımları değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, özellikle iç taşıyıcı duvarların kaldırılması durumunda yüklerin çevredeki duvarlara yeniden etkin şekilde dağıtılmasının yapı bütünlüğü açısından kritik olduğunu göstermiştir. Kuvvet kontrollü ve deformasyon kontrollü elemanların dayanım sınırları belirlenmiş, özellikle bağlantı elemanlarının (çivi, vida, civata gibi) sayısı ve yerleşim şekli, sistemin çökmeden ayakta kalıp kalamayacağını doğrudan etkilemiştir. Ayrıca, döşeme ile duvarlar arasındaki bağlantı detaylarının da yapısal güvenlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.

Kılıçer (2025a) tarafından Belgorod bölgesinde savaş koşullarında farklı silah sistemlerinin yapılar da oluşturduğu hasar türleri ve aşamalı göçme riskine ilişkin saha bulguları ile bu çalışmanın analitik sonuçları karşılaştırılmıştır. Kılıçer'in çalışmasında İHA ve benzeri silah sistemlerinin neden olduğu hasarların yüzeysel, orta, ağır ve total göçme gibi kategoriler altında sınıflandırıldığı, bu çalışmada ise benzer göçme zincirinin SŞÇ yapılar da taşıyıcı duvar

kaybı senaryoları üzerinden, eleman düzeyinde talep/kapasite kontrolleri ile nicel olarak ortaya konduğu ifade edilmiştir. Böylece, Kılıçer (2025)'te gözlenen hasar türlerinin, bizim çalışmamızda önerilen detaylandırma ve yerel güçlendirme önlemleriyle nasıl sınırlandırılabilceği tartışılarak, çalışmamızın literatürdeki konumu daha net bir şekilde gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında, Türkiye'de yaygın kullanılan S350GD+Z tipi SŞÇ profillerin, UFC kriterleri altında yapılan analizlerde yeterli performans gösterdiği görülmüştür. Ancak bazı durumlarda güvenlik sınırına oldukça yakın değerlere ulaşıldığı için, özellikle kritik yapı türlerinde ek güçlendirme önlemlerinin alınması gerektiği anlaşılmıştır.

Bu araştırma, Türkiye'de yaygın olarak göz ardı edilen aşamalı göçme analizlerinin önemine dikkat çekmekte ve mühendislik tasarım sürecinde bu tür analizlerin standart hale getirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, yapı sistemlerinin sadece geleneksel yükler değil, aynı zamanda doğal afetler, terör saldırıları gibi beklenmedik ve ani yüklere karşı da dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, çalışma hem mühendisler için pratik bir rehber sunmakta hem de Türkiye'deki yapısal güvenlik anlayışına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)*. Resmî Gazete, 30364 (Mükerrer), 18 Mart.
- Akinci, H., & Yavuz Ozalp, A. (2025). Investigating the effects of different data classification methods on landslide susceptibility mapping. *Advances in Space Research*, 75(10), 3427–3450. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.020>
- Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü [AISI]. (1999). *Soğuk şekillendirilmiş çelik yapılar tasarım kılavuzu*. Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü.
- ANSI. (1972). *Safety code for the use, care, and protection of abrasive wheels (ANSI B7.1–1972)*. American National Standards Institute.
- Astaneh-Asl, A., Jones, B., Zhao, Y., & Hwa, R. (2002). *Progressive collapse resistance of steel building floors* (Report No. UCB/CEE-STEEL). University of California, Berkeley.
- BOCA. (1972). *The BOCA basic building code accumulative supplement 1972: Containing approved changes for the basic building code*. Building Officials & Code Administrators International.
- Casciati, F., & Faravelli, L. (1984). Progressive failure for seismic reliability analysis. *Engineering Structures*, 6(2), 97–103.
- Department of Defense. (2018). *UFC 3-301-01: Structural engineering*. United States Department of Defense. <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-301-01>
- Dusenberry, D., Cagley, J., & Aquino, W. (2004). *Multihazard Mitigation Council national workshop on best practices guidelines for the mitigation of progressive collapse of buildings*. National Institute of Building Sciences.

- Ellingwood, B. R. (2006). Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 315–323.
- Elsayed, W. M., Moaty, M. A. N. A., & Issa, M. E. (2016). Effect of reinforcing steel debonding on RC frame performance in resisting progressive collapse. *HBRC Journal*, 12, 242–254.
- Ergüçlü, E. (2013). *Yapısal çelik tasarımında yeni bir zorluk: Aşamalı göçme* [Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- European Committee for Standardization. (2006). *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-7: General actions – Accidental actions (EN 1991-1-7)*. European Committee for Standardization.
- Euronews. (2016, February 16). Rusya'da doğalgaz patlaması: En az 7 ölü. *Euronews*. <https://tr.euronews.com/2016/02/16/rusya-da-dogalgaz-patlama-si-en-az-7-olu>
- Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2002). *World Trade Center building performance study: Data collection, preliminary observations, and recommendations* (T. McAllister, Ed., 2nd ed.). Federal Insurance and Mitigation Administration.
- Güneydoğu Ekspres. (2023, Ağustos 30). Depremde duvarları yıkılan iş yerinde kömür satmaya devam ediyor. *Güneydoğu Ekspres*. <https://www.guneydoguekspres.com/depremde-duvarlari-yikilan-is-yerinde-komur-satmaya-devam-ediyor>
- Hinman, E. (1998). *Approach for designing civilian structures against terrorist attack*. American Concrete Institute.
- HuffPost. (2016, July 16). Chilling photos show aftermath of destruction from failed coup in Turkey. *HuffPost*. https://www.huffpost.com/entry/turkey-coup-aftermath-photos_n_578a4955e4b08608d334c90c
- ICC (Uluslararası Kod Konseyi). (2006). *Uluslararası bina kodu (International Building Code)*. Uluslararası Kod Konseyi.
- İhlas Haber Ajansı (İHA). (2024, November 11). Doğalgaz patlaması. *İhlas Haber Ajansı*. <http://www.ihb.com.tr/haber-ankaradaki-dogalgaz-patlama-si-guvenlik-kamerasinda-617848/>
- International Code Council. (2021). *International Building Code*. International Code Council. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021P2>
- Izzuddin, B. A., Vlassis, A. G., Elghazouli, A. Y., & Nethercot, D. A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: Simplified assessment framework. *Engineering Structures*, 30(5), 1308–1326.
- Khandelwal, K., El-Tawil, S., & Sadek, F. (2009). Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 699–708.
- Kılıçer, S. (2013). *Yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. Trabzon, Türkiye.
- Kılıçer, S. (2025a). The impact of weapon systems on structural damage and progressive collapse: A case study of Belgorod Oblast. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(1), 215–234. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1511907>

- Kılıçer, S. (2025b). Progressive collapse analysis of a reinforced concrete structure using the Enhanced Local Resistance (ELR) method: A comparison of UFC 4-023-03 and the Turkish Earthquake Code (TEC 2018). *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 11(2), 513–525. <https://doi.org/10.21324/dacd.1656403>
- King, S., & Delatte, N. J. (2004). Collapse of 2000 Commonwealth Avenue: Punching shear case study. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 18(1), 54–61. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2004\)18:1\(54\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2004)18:1(54))
- Leyendecker, E. V., & Ellingwood, B. R. (1977). *Design to reduce the risk of progressive collapse* (Building Science Series). National Bureau of Standards.
- Malla, R. B., & Nalluri, B. B. (1995). Dynamic effects of member failure on response of truss type space structure. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 32(3), 545–551.
- Mlakar, P. F., Dusenberry, D. O., Harris, J. F., Haynes, G., Phan, L. T., & Sozen, M. A. (2003). Findings and recommendations from Pentagon crash. In *Forensic engineering: Proceedings of the third congress* (pp. 43–45). American Society of Civil Engineers.
- Ozgan, K., Kılıçer, S., & Daloglu, A. T. (2023a). Soil–structure interaction effect on the resistance of a steel frame against progressive collapse using linear static and nonlinear dynamic procedures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 37(1), 04022070. <https://doi.org/10.1061/JPCFEV.CFENG-4181>.
- Ozgan, K., Kılıçer, S., & Daloglu, A. T. (2023b). Evaluation of progressive collapse potential of a RC school building considering soil–structure interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24, 1199–1213. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00562-5>
- Reuters. (2025, May 19). Along the path of destruction after rare tornado strikes city of St. Louis [Fotoğraf]. *Reuters*. <https://www.reuters.com/pictures/along-path-destruction-after-rare-tornado-strikes-city-st-louis-2025-05-19>
- SBCCI (Southern Building Code Congress International). (1994). *Standard building code*. Southern Building Code Congress International.
- Song, B. I., & Sezen, H. (2013). Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering Structures*, 56, 664–672.
- Tayfur, B. (2023). *Çelik yapıların aşamalı göçme etkisinde optimum boyutlandırılması* [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- UFC 4-010-01. (2018). *DoD minimum antiterrorism standards for buildings*. U.S. Department of Defense.
- UFC 4-010-02. (2012). *DoD minimum antiterrorism standoff distances for buildings (FOUO)*. U.S. Department of Defense.
- UFC 4-020-01. (2008). *DoD security engineering facilities planning manual*. U.S. Department of Defense.
- UFC 4-023-03. (2016). *Design of buildings to resist progressive collapse*. U.S. Department of Defense.
- U.S. General Services Administration. (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*. U.S. General Services Administration (GSA).

Vlassis, A. G. (2007). *Progressive collapse assessment of tall buildings* [Doctoral thesis, University of London].

Yazar Katkıları

Bu çalışmadaki tüm bölümler 1. ve 2. yazarlar tarafından hazırlanmıştır. Konu 1. yazar tarafından belirlenmiş, metin 2. yazar tarafından gözden geçirilip düzeltilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından çıkar çatışmasının olmadığı rapor edilmiştir.

Fonlama

Bu çalışmada sunulan araştırma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri kapsamında elde edilen çıktılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Etik Bildirim

Çalışma için etik kurul izni gerekmemektedir.



CİHANNÜMA
**TEKNOLOJİ, FEN
ve MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ**
AKADEMİ DERGİSİ