



ESKİŞEHİR OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY OF ESKİŞEHİR OSMANGAZI UNIVERSITY

Yıl / Year : 2023

Cilt / Volume : 31

Sayı/ Issue : 4 - Special Issue

e-ISSN : 2630 - 5712





T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

e-ISSN : 2630 - 5712



# ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY  
OF ESKİŞEHİR OSMANGAZİ UNIVERSITY



YIL/YEAR : 2023

CİLT/VOLUME : 31

SAYI/ISSUE : 4  
SPECIAL ISSUE





Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, bilim ve teknolojideki son gelişmeleri aktarmak amacıyla;

- ❖ Bilgisayar Mühendisliği
- ❖ Biyomedikal Mühendisliği
- ❖ Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- ❖ Endüstri Mühendisliği
- ❖ İnşaat Mühendisliği
- ❖ Jeoloji Mühendisliği
- ❖ Kimya Mühendisliği
- ❖ Maden Mühendisliği
- ❖ Makine Mühendisliği
- ❖ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- ❖ Mimarlık
- ❖ Uçak Mühendisliği
- ❖ Yazılım Mühendisliği

dallarında; *kuramsal ve uygulamalı araştırma ile tarama* niteliklerinde makaleler yayımlamayı amaçlayan disiplinler arası ve hakemli bir dergidir. Dergi, belirtilen mühendislik branşlarında hızla gelişen alanlarına ilişkin çalışmaları ulaştırmayı amaçlamaktadır.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi ilk olarak **1986 yılında** "Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi" olarak yayın hayatına başlamıştır. 1993 ve 2005 yıllarında yapılan isim değişiklikleri sonrasında, üniversitemiz adının "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi" olması nedeniyle derginin adı da "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi" (ISSN: 1301-045x) haline gelmiştir.

Dergi yılda 2 sayı olarak yayımlanmış olup 2012 yılı sonunda yayın hayatına ara vermiştir.

2018 yılından itibaren e-Dergi olarak yayın hayatına tekrar başlamıştır.

Dergi hakkında ayrıntılı bilgiler

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

web sayfasında verilmiştir.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi yılda 3 sayı olarak yayımlanmaktadır.

Bu sayılara ek olarak Editörler Kurulu'nun kararıyla, fakültemiz bölümleri tarafında yürütülen bir kongrede sunulan bildiriler "Özel Sayı" olarak yayımlanabilmektedir.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is a multidisciplinary and peer-reviewed journal in engineering. The journal is not limited to a particular aspect of science and engineering, but is instead devoted to a wide range of areas in engineering. The journal aims to publish high quality papers in the areas of:

- ❖ Computer Engineering
- ❖ Biomedical Engineering
- ❖ Electrical-Electronics Engineering
- ❖ Industrial Engineering
- ❖ Civil Engineering
- ❖ Geology Engineering
- ❖ Chemical Engineering
- ❖ Mining Engineering
- ❖ Mechanical Engineering
- ❖ Metallurgical and Materials Engineering
- ❖ Architecture
- ❖ Aeronautical Engineering
- ❖ Software Engineering

This journal publishes original theoretical and empirical research papers as well as review papers and case studies related to these areas of engineering. High quality submissions are welcome from academics, researchers, and practitioners.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University was first launched in 1986. After the name of the journal changed in both 1993 and 2005, consequently, the name is "The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University" (ISSN: 1301-045x). The journal was published as 2 issues per year until the end of 2012, then publication of the journal is suspended between 2012-2017.

It has resumed its publication life as an online journal in 2018.

Additional information for the journal is given at web page :

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is published as 3 issues per year.

In addition to the regular issues, proceedings of the conferences which are organized by our university are published as special issues depending upon the decision of the Editorial Board.



T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ



e-ISSN : 2630 - 5712

Dergi, halen, aşağıda verilen indeksler tarafından taranmaktadır.

The journal is currently indexed in the following databases.



[TR Dizin](#)



[SOBIAD](#)



[EBSCO Host](#)



[Index Copernicus](#)



[DOAJ \(Directory of Open Access Journals\)](#)



[BASE](#)



[WorldCat](#)



# FROM EDITOR

## EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Muammer KAYA

## EDİTÖR YADIMCISI / ASSOCIATE EDITOR

Prof. Dr. Melih İPHAR

## EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Haldun KURAMA

Prof. Dr. Melih İPHAR

Dr. Öğr. Üyesi Esra N. YOLAÇAN

Dr. Öğr. Üyesi Sultan B. ŞENGEL

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ

Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK

Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN

Prof. Dr. Selahattin KADİR

Dr. Öğr. Üyesi Uğur SELENGİL

Prof. Dr. Sabiha KOCA

Prof. Dr. Haydar ARAS

Dr. Öğr. Üyesi Ersu LÖKÇÜ

Doç. Dr. Başak GÜÇYETER

Prof. Dr. Melih KUŞHAN

Dr. Öğr. Üyesi İlker ÖZÇELİK

*For the 100th anniversary of the Turkish Republic, a special review issue was decided to be published by our Faculty and Departments. Our Great Leader, who entrusted our country to Turkish youth, advises that science is our only guide on the path that will carry our country to the next centuries. Since the first years of their establishments, our universities have been continuing their science, technology and cultural activities with the awareness of their responsibilities for the formation of a knowledge-based society.*

*In this context, the chronological historical development and development of Eskişehir Osmangazi University (ESOGÜ) Faculty of Engineering and Architecture from Eskişehir State Engineering and Architecture Academy (EDMMA) are shared with you as a preliminary introduction. 11 papers which deal with the latest developments in the field of engineering, future expectations and activities carried out in the departments were collected.*

### **Establishment of Academy and University**




Eskişehir State Engineering and Architectural Academy (ESEAF/EDMMA) was founded in Eskişehir, Türkiye with Mechanical and Civil Engineering Departments in 1970. There were 160 students in two departments. The first EDMMA graduates took their diplomas in 1974.

Between 1982 and 1993, the name of the University was changed to the Anadolu University (AU). on August 18, 1993, Osmangazi University (OGU) was founded with a law decree. In 2005, the name of the University was changed again to Eskişehir Osmangazi University (ESOGU) with the 5379 numbered law. Table 1 shows the name changes and logos of ESOGU between 1970 and today.

Eskişehir Osmangazi University has a total campus area of 2.9 M m<sup>2</sup>, and 80.000 m<sup>2</sup> of this area is used as a classroom-laboratory-office, 50.000 m<sup>2</sup> of this is used as a social facility-library, and 62.000 m<sup>2</sup> of this is used as health area. ESOGU continues its education, R&D, and health care activities at Meşelik, Bademlik, Çamlık, Ali Numan Kıraç, Sivrihisar, Sarıcakaya, Mahmudiye, Çifteler and Organized Industrial Zone Campuses. ESOGU, a strong and long-established university with 53 years of scientific experience, continues to produce knowledge with 13 Faculties, 1 School, 6 Vocational Schools, 4 Institutes, and 40 Application and Research Centers, and progressing steadily towards modern science.



Table 1. Cornerstones of ESOGU and Name Changes Between 1970 and Today

<p><b>1970-1982</b> Eskisehir State Engineering &amp; Architectural Academy (EDMMA)</p>	<p><b>1982-1993</b> Anadolu University (AU)</p>  <p>ANADOLU ÜNİVERSİTESİ www.anadolu.edu.tr</p>	<p><b>1993-2005</b> Osmangazi University (OGU)</p> 	<p><b>2005-Today</b> Eskisehir Osmangazi University (ESOGU)</p>  <p>www.ogu.edu.tr</p>
---	--	---	---

### Mission of ESOGU

Eskisehir Osmangazi University is committed to being preferred at the national and international level with the aim of excellence in education, transforming the results of scientific studies into benefits and economic products by the demands of society, providing effective and competitive health services, educating entrepreneurs and innovative graduates and researchers.








### Vision of ESOGU

To become a well-known, respected, and research university on a national and international scale, transforming knowledge into value, and pioneering the society.

### University Management

Since 1993, ESOGU had 7 Rectors (Table 2). Two of the precious rectors passed away. Six of the Rectors were from ESOGU, and one was from Ankara University. Prof. Dr. Necat Akdeniz and Prof. Dr. Hasan Gönen were on duty for two periods and the other Rectors were on one period (4 years). Two Rectors were from the Medical Faculty and Engineering and Architectural Faculty. EASF, Law, and Sci. Lit. Faculties had Rectorate duty once. ESOGU has 8 campuses with a 2.8 million m<sup>2</sup> area in Eskisehir. It has 13 Faculties, 6 Vocational Schools, 1 High School, and 40 Research Centers. There are more than 30 thousand students, 4000 administrative staff, and 700 academic personnel.

Table 2. ESOGU Rectors and Vice Rectors Since 1993

Deceased (1927-2010) Prof. Dr. Esat Erenoğlu	Deceased (1937-2023) Prof. Dr. Erdoğan Fıratlı	Prof. Dr. Necat A. Akgün	Prof. Dr. Fazıl Tekin	Prof. Dr. Hasan Gönen	Prof. Dr. Kemal Şenocak	Prof. Dr. Kamil Çolak
Medical/Tıp Faculty	EAF/MMF	Medical Faculty	EASF/İİBF	EAF/MMF	Law/Hukuk Faculty (Ankara U.)	Sci.Lit. Fac./ Fen Ed.
1993-1995	1995-1999	1999-2007	2007-2011	2011-2018	2018-2022	2022-today
						
Vice Rectors Prof. Dr. Fazıl Tekin Prof. Dr. İmdat Kara Prof. Dr. Filiz Akıştı	Prof. Dr. Necat Akgün Prof. Dr. Fazıl Tekin Prof. Dr. Ruhi Aydın	Prof. Dr. Fazıl Tekin Prof. Dr. Atilla Yıldırım Prof. Dr. Macid Yaman	Prof.Dr.Zekeriya Altaç Prof. Dr. Naci Özer Prof. Dr. Sinan Erginel	Prof.Dr. Adnan Konuk Prof.Dr. İlhani Ünlioğlu Prof.Dr. Bahaddin Acet/ Ahmet Çabuk	Prof. Dr. Ali Aslantaş Prof. Dr. Rifat Edizkan Prof. Dr. Kamil Çolak	Prof. Dr. Hakan Demirel Prof. Dr. Ramazan Erdağ Prof. Dr. Kürşat B. Çarman

### International Ranking of ESOGU

In 2021, ESOGU ranked in 8 ranking systems out of 11 international ranking systems (URAP, ARWU, CWUR, LEIDEN, NTU, QS, RUR, SCIMAGO, THE, USNEWS and WEBOMETRIC).

### University Ranking by Academic Performance (URAP) of ESOGU in Türkiye

ESOGU, METU (ODTU) URAP (University Ranking by Academic Performance) ranking between 2014 and

2023 is given in Table 3 along with acting Rectors. Between 2014 and 2018, ESOGU's ranking average was 29.75 out of 132.5 and between 2018 and 2022, ESOGU's average ranking was 21.5 out of 181 Universities. During the 2018 and 2022 periods, ESOGU's academic performance was much better than the 2014 and 2018 periods. According to the URAP ranking, ESOGU's ranking was 1,556 out of 3,000 Universities in the world between 2021 and 2022 (<https://urapcenter.org/Rankings/2021-2022/fields>).

Table 3. ESOGU's METU-URAP Academic Performance Between 2014 and 2022 (<https://newtr.urapcenter.org/>).

YEARS	Rank/Total	Average Rank	Rector
2014-2015	37/127	29.75/132.5	Prof. Dr. Hasan Gönen
2015-2016	35/130		
2016-2017	26/125		
2017-2018	24/148		
2018-2019	21/157	21.50/181	Prof. Dr. Kemal Şenocak
2019-2020	20		
2020-2021	16/203		
2021-2022	29/183		
2022-2023			

### Webometric Ranking of ESOGU in Türkiye and in the World

In 2022, ESOGU's webometric ranking was 31 out of 212 Turkish Universities and 1718 out of 31054 in the World Universities. In 2023, ESOGU's webometric ranking was 28 out of 209 Turkish Universities and 1689 out of 30478 in the World Universities. In 2022, ESOGU was in the 14.6% in Türkiye and 5.5% in the world. In 2023, ESOGU was in the 13.4% in Türkiye and %5.5 in the world.

### Other Rankings Between 2021 and 2023

ESOGU was in the 1000+ rank in the Times Higher Education ranking. ESOGU was at the 1803/2000 Universities according to the CWUR, and at the 1718/2000 Universities according to the USNEWS. ESOGU's ranking was 952 at CWTS Leiden ranking and 691 at SCImago ranking in the World.

### Eskişehir Osmangazi University Rankings - AD Scientific Index 2024

Table 4 shows ESOGU University's ranking in the World, Europe, and Türkiye ([https://www.adscientificindex.com/university/Eski%](https://www.adscientificindex.com/university/Eski%C5%9Fehir+Osmangazi+University/)

[C5%9Fehir+Osmangazi+University/](https://www.adscientificindex.com/university/Eski%C5%9Fehir+Osmangazi+University/)). In all University rankings, ESOGU has a total H index of 2232 in the World, 758 in Europe, and 62 in Türkiye. In the public Universities ranking, ESOGU has a total H index of 1939 in the World, 673 in Europe, and 45 in Türkiye. In all University rankings, ESOGU has a total citation of 1541 in the World, 582 in Europe, and 31 in Türkiye. In the public Universities ranking, ESOGU has a total citation of 1268 in the World, 532 in Europe, and 22 in Türkiye. In all types of institutions ranking, ESOGU has a total H index of 3394 in the World, 1331 in Europe, and 62 in Türkiye.

Table 5 shows the last subject and ranking analysis of ESOGU scientists by adscientific which is based on the Google Scholar data base ([https://www.adscientificindex.com/university/Eski%  
C5%9Fehir+Osmangazi+University/](https://www.adscientificindex.com/university/Eski%C5%9Fehir+Osmangazi+University/)). The total number of scientists in this index from ESOGU is 395. In the World's top 10% of scientists, there are 7; 20% 26; 30% 85; 40% 156; 50% 236; 60% 310; 70% 364; 90% 395; and 100% 395 scientists. 73 scientists (18.4%) are from ESOGU EAF (MMF). One scientist is in the Top 10%, five are in the Top 20%, and 15 are in the Top 30% from ESOGU EAF.

Table 4. Adscientific Ranking of ESOGU in 2024

ESOGU University Ranking According to	# in 17,775 All universities in the World	# in 2,788 All universities in Europe	# in 210 All universities in Türkiye
<a href="#">Total H index</a>	2,232	758	62
<a href="#">Last 6 years H index</a>	1,301	498	23
<a href="#">Total i10 index</a>	1,364	515	24
<a href="#">Last 6 years i10 index</a>	1,346	491	22
<a href="#">Total Citations</a>	1,541	582	31
<a href="#">Last 6 years Citations</a>	1,331	504	26
ESOGU University Ranking According to	# in 9,766 Public Universities in <a href="#">World</a>	# in 2,082 Public Universities in <a href="#">Europe</a>	# in 134 Public Universities in <a href="#">Türkiye</a>
<a href="#">Total H index</a>	1,739	673	45
<a href="#">Last 6 years H index</a>	1,112	463	18
<a href="#">Total i10 index</a>	1,147	478	19
<a href="#">Last 6 years i10 index</a>	1,152	464	19
<a href="#">Total Citations</a>	1,268	532	22
<a href="#">Last 6 years Citations</a>	1,123	467	21
ESOGU University Ranking According to	# in 22,423 all type institutions in <a href="#">World</a>	# in 4,641 all type institutions in <a href="#">Europe</a>	# in 290 all type institutions in <a href="#">Türkiye</a>
<a href="#">Total H index</a>	3,394	1,331	62

Table 5. Subject and Ranking Analysis of ESOGU Scientists.

Subject and ranking analysis of Eskişehir Osmangazi University scientists	Total number of scientists	Agriculture & Forestry	Arts, Design and Architecture	Business & Management	Economics & Econometrics	Education	Engineering & Technology	History, Philosophy, Theology	Law / Law and Legal Studies	Medical and Health Sciences	Natural Sciences	Social Sciences	Others
In World's Top 3% Scientists	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
In World's Top 10% Scientists	7	0	0	0	0	0	1	0	0	4	2	0	0
In World's Top 20% Scientists	26	1	0	0	0	2	5	0	0	11	6	0	1
In World's Top 30% Scientists	85	3	0	0	1	6	15	0	0	42	17	0	1
In World's Top 40% Scientists	156	5	0	2	3	16	28	0	0	72	26	3	1
In World's Top 50% Scientists	236	8	0	3	7	23	38	0	0	113	38	4	2
In World's Top 60% Scientists	310	11	0	6	8	30	55	0	0	139	52	5	4
In World's Top 70% Scientists	364	11	0	10	8	30	67	0	0	147	56	5	30
In World's Top 80% Scientists	390	12	0	10	8	31	71	0	0	148	56	5	49
In World's Top 90% Scientists	395	12	0	10	8	31	73	0	0	149	56	5	51
<b>Total Scientists in Index</b>	<b>395</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>31</b>	<b>73</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>149</b>	<b>56</b>	<b>5</b>	<b>51</b>

## H-Index

Hatice Duran Yıldız from Ankara University (Physics Dept.) has a maximum H index of 230 in Türkiye. She is in the first rank out of 29,200 scientists in Türkiye, 45<sup>th</sup> in the region, and 142<sup>th</sup> in the world ([https://www.adscientificindex.com/?country\\_code=tr](https://www.adscientificindex.com/?country_code=tr)). Hatice Duran Yıldız has a maximum citation of 254,931 in Türkiye. In Engineering&Technology, the maximum H index in the world is 316 (Robert Langer from MIT-Bioengineering). In Engineering&Technology, the maximum H index of 117 is owned by Metin Sarı from Koc University, Robotics. His citation was 45.986 ([https://www.adscientificindex.com/?tit=Engineering+%26+Technology&country\\_code=tr](https://www.adscientificindex.com/?tit=Engineering+%26+Technology&country_code=tr)). Metin Sarı's rank in Türkiye is 19<sup>th</sup>, in the region 1,462<sup>th</sup>, and in the world 4,301<sup>th</sup>. ESOGU's top H index owner İ. Bekir Topçu from Civil Eng. Dept. has an H index of 50 and total

citations of 11.565. He is in the 219<sup>th</sup> rank in Türkiye, 24,386<sup>th</sup> rank in the region, and 69,396<sup>th</sup> rank in the world ([https://www.adscientificindex.com/?s=200&country\\_code=tr](https://www.adscientificindex.com/?s=200&country_code=tr)).

According to the Stanford University Top 100,000 or Top 2% scientists ranking, 2494 scientists are ranked in single recent year data about citations received during calendar year 2022 from Türkiye There are 14 scientists in this data from ESOGU. 8 of the 14 scientists from ESOGU are in the ESOGU-EAF/MMF. Out of 8 ESOGU-EAF scientists, 2 of them are from the Mining Engineering Department, and 1 of them are from Civil, Computer, Mechanical, Elect.&Electro., Aeronautical, and Chemical Engineering Departments (Table 6) (<https://mmf.ogu.edu.tr/Haber/Detay/193/stanford-bilim-insanlari-siralamasi>).



Table 6. Top Scientists in the Top 2% of Their Field in the World from ESOGU (<https://elsevier.digitalcommonsdata.com/datasets/btchxktzyw/6>)

World Ranking	Scientists	Faculty	Department
71942	<b>İ. B. Topçu</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Civil Eng.</b>
72080	<b>Selim Gürgen</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Aeronautical Eng.</b>
72284	<b>Muammer Kaya</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Mining Eng.</b>
72462	<b>Evren Yasa</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Mechanicaln Eng.</b>
72538	Cemal Cingi	Medical	Otorhinolaryngology
72598	<b>İdris Dağ</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Computer Eng.</b>
72703	Bülent Görenek	Medical	Cardiology
72855	<b>Hakan Çevikalp</b>	<b>MMF</b>	<b>Electr.&amp;Electron. Eng</b>
73041	Ener Çağrı Dinleyici	Medical	Çocuk Sağlığı
73217	<b>Hilal Demir Kıvrak</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Chemical Eng.</b>
73228	Alaettin Unsal	Medical	Public Health
73233	G. Kılıç		
73272	<b>Mahmut Yavuz</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Mining Eng.</b>
73295	Nevin Ertuğ Gürbüz	Science	Mat. & Comp.

### Citation

According to the top Universities ranking in Google Scholar profiles in 2022, ESOGU had 260.390 citations and was in 20<sup>th</sup> place in Türkiye. Table 7 shows the top 10 cited scientists from ESOGU based on Google Scholar data. There are two scientists from ESOGU-EAF/MMF ([https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_o rg&hl=tr&org=4995632992154669000&before\\_author =dWca\\_3sUAAAj&astart=0](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_o rg&hl=tr&org=4995632992154669000&before_author =dWca_3sUAAAj&astart=0)).

Citation metrics are widely used and misused. Ioannidis (2023) has created a publicly available database of top-cited scientists that provides standardized information on citations, h-index, co-authorship adjusted h<sub>m</sub>-index, citations to papers in different authorship positions, and a composite indicator (c-score). Separate data are shown for career-long and, separately, for a single recent year impact. Metrics with and without self-citations and the ratio of citations to citing papers are given. Scientists are classified into 22 scientific fields and 174 sub-fields according to the standard Science-Metrix classification. Field- and subfield-specific percentiles are also provided for all scientists with at least 5 papers. Career-long data are updated to end-of-2022 and single recent year data pertain to citations

received during the calendar year 2022. The selection is based on the top 100,000 scientists by c-score (with and without self-citations) or a percentile rank of 2% or above in the sub-field. This version is based on the October 1, 2023 snapshot from Scopus, updated to the end of the citation year 2022. This work uses Scopus data provided by Elsevier through ICSR Lab (<https://www.elsevier.com/icsr/icsrlab>). Calculations were performed using all Scopus author profiles as of October 1, 2023. If an author is not on the list it is simply because the composite indicator value was not high enough to appear on the list (<https://elsevier.digitalcommonsdata.com/datasets/bt chxktzyw/6>).

2494 scientists are ranked in the career-long data from Turkey. There are 13 scientists in the career-long data from ESOGU. 8 of the 13 scientists from ESOGU are in the ESOGU-EAF/MMF. Out of 8 ESOGU-EAF/MMF scientists, 3 of them are from the Mining Engineering Department, 1 of them are from Civil, Metallurgical&Materials, and Elect.&Electro., Aeronautical and Chemical Engineering Departments (<https://mmf.ogu.edu.tr/Haber/Detay /193/stanford-bilim-insanlari-siralamasi>).

Table 7. 10 Top-Cited Scientist at ESOGU According to the Google Scholar

Scientists	Faculty	Citation
Bülent Görenek	Medical	73155
<b>İ. Bekir Topçu</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>11740</b>
Kazım Özdamar	Medical	11687
Cemal Cingi	Medical	11172
Ahmet Bekir	Science	8814
Sibel Tunalı Akar	Science	6730
Tamer Akar	Science	6051
Veysel Yılmaz	Science	5898
Vural Bütün	Science	5857
<b>Evren Yasa</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>5660</b>

Table 8. Top 2% Scientists in the Last Year's Performance ([https://elsevier.digitalcommons\\_data.com/datasets/btchxktzyw/6](https://elsevier.digitalcommons_data.com/datasets/btchxktzyw/6)).

World Ranking	Scientists	Faculty	Department
83893	<b>İ. B. Topçu</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Civil Eng.</b>
84302	Vural Bütün	Science	Chemistry
84502	<b>Mustafa Anık</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Met.&amp;Mater. Eng</b>
<b>84533</b>	<b>Hakan Çevikalp</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Elect.&amp;Electron. Eng.</b>
84576	<b>Selim Gürgen</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Aeronautical Eng.</b>
84585	<b>Sevgi Şensöz</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Chemical Eng.</b>
84608	Sibel Akar Tunalı	Fen Fakültesi	Chemistry
84806	<b>Muammer Kaya</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Mining Eng.</b>
84820	Muhammet İ. Aksu	Ziraat Fak.	Food Eng.
84880	<b>Mahmut Yavuz</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Mining Eng.</b>
84886	<b>Haldun Kurama</b>	<b>Eng.&amp;Arc.</b>	<b>Mining Eng.</b>

### Researchgate

There are 3644 members of ESOGU registered to researchgate.net. Some of the members are academicians, students, and retired academicians.

### Departments of Engineering and Architectural Faculty of ESOGU

Figure 1 shows the founded departments with time at ESOGU. Between 1970 and 1980, there were 6 core engineering departments at the ESEAF. After the Civil and Mechanical Engineering Departments, the Mining and Industrial Engineering Departments were established in 1975. The Electrical & Electronics Engineering Department was founded in 1980. Between 1981 and 1990, there were 5 more departments, four of them were active and one was inactive (Ceramics Engineering). The Architectural Department was

established in 1984 after dividing AU into AU and OGU. The Computer Engineering Department was founded in 1993 and Geological Engineering Department was established in 1994. Metallurgical Engineering Department was founded in 1996 and the name changed in 1996 to Metallurgical & Materials Engineering Department. The Ceramics Engineering Department was established in 1990 and closed in 2011 without starting undergraduate education. After 2017, three more departments were founded. In 2017, the Biomedical Engineering Department; in 2019, the Aeronautical Engineering Department and in 2019, the Software Engineering Department were established. Biomedical and Software Engineering Departments do not have students yet for the Bachelor of Eng. (B. Eng.) degree. 11 departments have B. Eng, M. Eng. and Ph.D. studies at the Faculty.

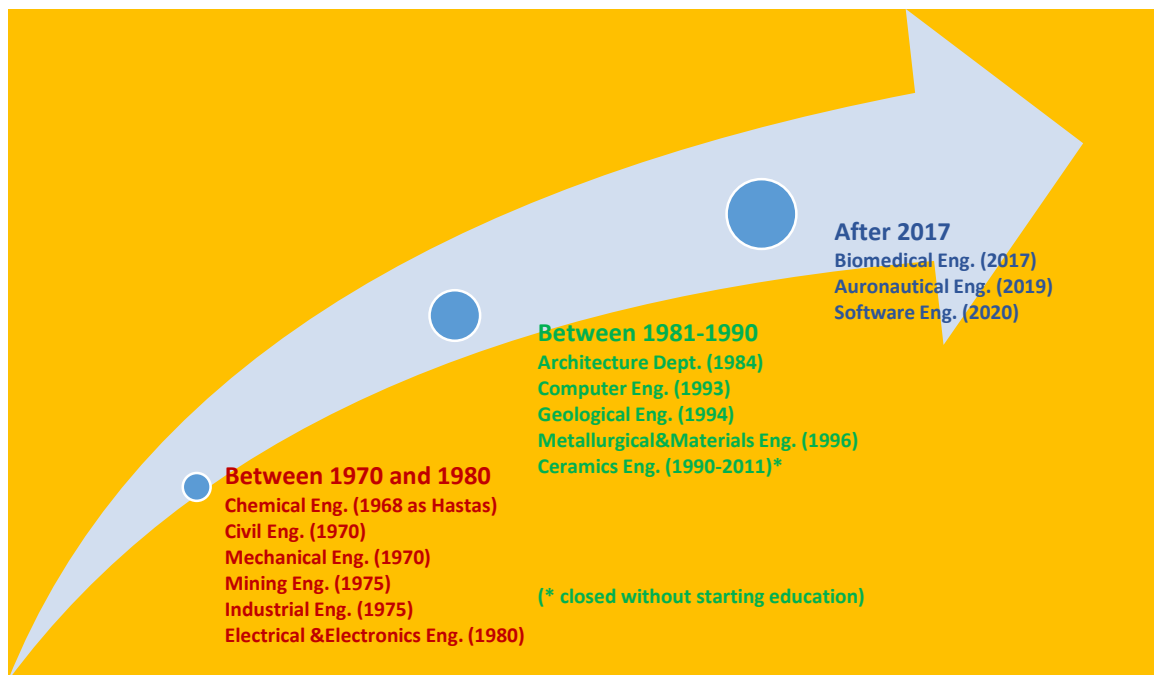


Figure 1. Establishment Dates of Departments at ESOGU EAF/MMF.

## Deans of ESOGU Engineering and Architectural Faculty

So far 11 Deans have been appointed to the ESOGU-EAF, since 1970. Two of the previous Deans passed away. Table 9 shows one woman and ten men Deans worked at the ESOGU-EAF/MMF. Two of the Deans were from

the Chemical, Mining, and Electrical & Electronic Engineering Departments, one from the Mechanical, Civil, and Industrial Engineering Departments, and one from statistical and another one from mathematical background. Deans worked for 1 to 11 year period. The average Dean's work period is 4.82 years.

Table 9. Deans of ESOGU EAF since 1970.



Deceased (-1981) Prof. Dr. Suat Mirza	Deceased (1931-2013) Prof. Dr. Battal Kuşhan	Prof. Dr. Musa Şenel	Prof. Dr. Atalay Barkana	Deceased (1945-2019) Prof. Dr. Ahmet Topçu	Prof. Dr. Ercengiz Yıldırım	Prof. Dr. Adnan Konuk	Prof. Dr. Sevgi Şensöz	Prof. Dr. Emin Kahya	Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu	Prof. Dr. Muammer Kaya
1970	1981	1982	1993	1996	1999	2002	2009	2012	2017	2020
1981	1982	1993	1996	1999	2002	2009	2012	2017	2020	2023
11	1	11	3	3	3	7	3	5	3	3
Statistics	Mechanical	Matematics	Elect.Electronic	Civil	Chemistry	Mining	Chemistry	Industry	Elec.Electronic	Mining

## ESOGU-EAF Night Education and Graduates

Secondary/night education was started at Civil Eng. in 1996; Mining and Industrial Eng. in 1997; Mechanical Eng. in 2001; Electrical and Electronics Eng. in 2003. In 2014, the secondary education in Mining Eng. Department was closed by Turkish Higher Education Council (YOK). In the 2019-2020 education period, the secondary education in Civil; Mechanical, Industrial; and Electrical and Electronics Eng. Departments were closed.

Total graduate numbers from both day and night educations of each department are summarized in Table

Table 10. ESOGU-EAF Day and Night Education Statistics and Total Graduate Numbers

Department	Day/1st Education Graduates	Night/2nd Education Graduates	Start Date of Night Education	Closing Date of Night Education	Total Graduates	Yearly Average Graduate
Civil Eng.	3289	2003	1996	2024	5292	99.85
Mechanical Eng.	2919	1778	1996	2024	4697	86.62
Industrial Eng.	2557	1615	1997	2024	4172	86.92
Elect.&Electr. Eng.	2489	950	2004	2024	3439	79.98
Mining Eng.	1806	758	1997	2014	2564	53.42
Chem. Eng.	3679				3679	66.89
Architecture	1501				1501	30.63
Met. Mater. Eng.	1059				<b>1059</b>	<b>39.22</b>
Computer Eng.	959				<b>959</b>	<b>31.97</b>
Geological Eng.	682				<b>682</b>	<b>23.52</b>
<b>TOTAL</b>	<b>20940</b>	<b>7104</b>			<b>28044</b>	<b>599.02</b>

10 (as of 4.10.2023). In 53 years, total undergraduate number was 28044. 75% of the graduates were from day/1<sup>st</sup> education and the rest from night/2<sup>nd</sup> education. So far, 5292 B. Eng. students were graduated from Civil Eng.; 4697 from Mechanical Eng.; 4172 from Industrial Eng.; 3439 from Elect.&Electr. Eng.; 2564 from Mining Eng.; 3679 from Chemical Eng.; 1501 from Architecture; 1059 from Metallurgical and Material Eng., 959 from Computer Eng; and 682 from Geological Eng. Departments. So far ESOGU-EAF/MMF graduated about 600 B. Eng. students yearly.

Table 11 shows the total departmental graduates from School of Natural and Applied Sciences between 1985 and 2023. Mechanical Eng. Dept. graduated 387, Civil Eng. Dept. 370, and Electrical and Electronic

Engineering 256 postgraduate students. In 38 years 2196 postgraduate diplomas were delivered. 16% of these were Ph.D., 73% M. Eng., and 10% without thesis.

Table 11. The Total Departmental Graduate Numbers from the School of Natural and Applied Sciences Between 1985 and 2023.

<b>Jan. 01, 1985- Nov. 01, 2023 GRADUATES FROM SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES</b>				
<b>(ENGINEERING)</b>				
	<b>Ph.D.</b>	<b>M. ENG.</b>	<b>Without THESIS</b>	<b>TOTAL</b>
Mechanical Engineering	70	317		<b>387</b>
Civil Engineering	56	314		<b>370</b>
Electrical and Electronic Engineering	46	201	9	<b>256</b>
Chemical Engineering	41	182		<b>223</b>
Mining Engineering	60	142		<b>202</b>
Industrial Engineering	44	155		<b>199</b>
Geological Engineering	19	62		<b>81</b>
Metallurgical Engineering	9	63	0	<b>72</b>
Computer Engineering	2	50		<b>52</b>
Metallurgical and Material Engineering	12	32		<b>44</b>
Ceramics Engineering	0	2	0	<b>2</b>
Architecture	0	72		<b>72</b>
Railway Systems			16	<b>16</b>
Aeronautic Science and Technologies	0	22		<b>22</b>
Occupational Health and Safety			198	<b>198</b>
<b>TOTAL</b>	<b>359</b>	<b>1614</b>	<b>223</b>	<b>2196</b>

### Developments in Engineering in the World

Top 20 Engineering Developments of the 20<sup>th</sup> Century can be listed as: Electricity, the automobile, the airplane, water supply and distribution, modern electronics, radio and television, agricultural mechanization, computers, the telephone, air conditioning and refrigeration, highways, spacecraft, the internet, imaging technology, household appliances, health technologies, petroleum, and petrochemical technologies, laser and fiber optics, nuclear technologies, high-performance materials (<https://www.thomasnet.com/insights/top-engineering-developments-twentieth-century/>).

Recently emerging technologies in engineering are artificial intelligence (AI), robotics, internet of things (IoT), 5G technology, blockchain technology, 3D modelling, cloud technology, VR/AR, and nanotechnology (<https://bgibhopal.com/blog/emerging-technologies-in-engineering-latest-innovations-and-applications/>).



# CONTENTS

## EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Muammer KAYA

## EDİTÖR YADIMCISI / ASSOCIATE EDITOR

Prof. Dr. Melih İPHAR

## EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Haldun KURAMA

Prof. Dr. Melih İPHAR

Dr. Öğr. Üyesi Esra N. YOLAÇAN

Dr. Öğr. Üyesi Sultan B. ŞENGEL

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ

Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK

Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN

Prof. Dr. Selahattin KADİR

Dr. Öğr. Üyesi Uğur SELENGİL

Prof. Dr. Sabiha KOCA

Prof. Dr. Haydar ARAS

Dr. Öğr. Üyesi Ersu LÖKÇÜ

Doç. Dr. Başak GÜÇYETER

Prof. Dr. Melih KUŞHAN

Dr. Öğr. Üyesi İlker ÖZÇELİK



## Derleme Makaleler / Review Articles

### **Rüzgâra Dayanıklı Yapıların Optimum Tasarımı**

Optimum Design of Wind Resistant Structures

Soner SEZER, Murat HİÇYILMAZ, Hakan ÖZBAŞARAN

### **Smart Materials and Their Advanced Biomedical Applications: HNT And HNT-Polymer Composites**

Akıllı Malzemeler ve İleri Biyomedikal Uygulamaları: HNT Ve HNT-Polimer Kompozitleri

Sultan BUTUN SENDEL, Nilay TUNCA, Hatice DEVECI, Harun BAS, Vural BUTUN

### **Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Mikrobiyal Biyopolimerlere Bakış**

Insight to The Microbial Biopolymers Used in Biomedical Applications

Belma NURAL YAMAN, Benay ÇOLAK, Ahmet ÇABUK

### **Yapı Elemanlarının Yeniden Kullanımı ve Envanter Kısıtlı Yapısal Optimizasyon**

Reuse of Structural Elements And Inventory Constrained Structural Optimization

Soner SEZER, Hakan ÖZBAŞARAN, Murat HİÇYILMAZ

### **Evaluation And Comparison of Construction Technologies For High-Rise Buildings**

Yüksek Katlı Binalar İçin Yapım Teknolojilerinin Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması

Maral FAKHARİ, Hasan ÜNVER

### **Beton Teknolojisindeki Yeni Gelişmeler**

New Developments in Concrete Technology

İlker Bekir TOPÇU, İsmail HOCAOĞLU

### **A Brief Overview to Solid Waste Treatment & Recent Practice of Turkey**

Katı Atık Arıtımına Kısa Bir Bakış ve Türkiye'deki Güncel Uygulamalar

Haldun KURAMA

### **Investigation of Energy - Technology Development in Ultra Fine Grinding**

Ultra İnce Öğütmede Enerji - Teknoloji Gelişiminin İncelenmesi

Yakup UMUCU, Vedat DENİZ, Y. Hakan GÜRSOY

### **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü**

Eskişehir Osmangazi University Electric-Electronics Engineering Department

Osman PARLAKTUNA, Hasan Hüseyin ERKAYA

### **Jeoloji Mühendisliği Güncel Çalışma Alanları**

Current Research Interests in Geological Engineering

Hüseyin SENDİR, Didem YASİN, Volkan KARABACAK

### **Teknolojik Gelişmeler Işığında Endüstri Mühendisliğinin Geleceği**

The Future of Industrial Engineering With Knowledge of Technological Advancements

Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ, MÜJGAN SAĞIR, Şerafettin ALPAY, N. Fırat ÖZKAN, Servet HASGÜL, Aydın SİPAHIOĞLU

**RÜZGÂRA DAYANIKLI YAPILARIN OPTİMUM TASARIMI**Soner SEZER<sup>1</sup>, Murat HİÇYILMAZ<sup>2</sup>, Hakan ÖZBAŞARAN<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. ABD., Eskişehir/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8116-3837><sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4132-4285><sup>3</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1959-5297>

Anahtar Kelimeler	Öz
Rüzgâr Yükleri Optimizasyon Aerodinamik Yapısal Optimizasyon Sönümleyici	<i>Elverişsiz mimari formlar ve gelişen teknoloji ile birlikte artan yapısal donanımlar yapıları rüzgâra karşı daha hassas hale getirmektedir. Bu durum önceleri diğer yüklerle birlikte değerlendirilen rüzgâr etkilerinin artık majör etki olarak kabul edildiği "Rüzgâra Dayanıklı Yapı Tasarımı" (RDYT) alanına olan ilgiyi günden güne arttırmaktadır. RDYT metodolojileri oldukça karmaşık optimizasyon problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada RDYT alanında yapılan optimizasyon çalışmalarının incelenmesi amaçlanmıştır. Literatür incelendiğinde konunun aerodinamik şekil optimizasyonu, rüzgâr etkisi altında yapısal optimizasyon ve sönümleyici sistemler ile rüzgâra dayanıklı optimum tasarım olmak üzere üç alt başlıkta incelenebileceği görülmüştür. Bu bağlamda algoritma tabanlı optimizasyon süreci içeren temel ve güncel çalışmalar tespit edilerek incelemeleri sunulmuştur.</i>

**OPTIMUM DESIGN OF WIND RESISTANT STRUCTURES**

Keywords	Abstract
Wind Loads Optimization Aerodynamic Structural Optimization Damper	<i>Inappropriate architectural forms and increasing structural equipment with developing technology make the buildings more sensitive to the wind. This situation increases the interest in the field of wind resistant structure design (WRSD) which wind effects are considered as the major effects day by day. WRSD methodologies pose highly complex optimization problems. In this study, it is aimed to review the optimization studies in the field of WRSD. When the literature is examined, it has been seen that the subject can be examined under three sub-titles: aerodynamic shape optimization, structural optimization and optimization with the damping systems. In this context, fundamental and current studies that include algorithm-based optimization process are determined and their reviews are presented.</i>

Derleme Makale	Review Article
Başvuru Tarihi : 04.07.2022	Submission Date : 04.07.2022
Kabul Tarihi : 04.04.2023	Accepted Date : 04.04.2023

**1. Giriş**

Nüfusun belirli bölgelerde toplanması, yapı malzemeleri alanındaki teknolojik gelişmeler ve yenilikçi mühendislik tasarım prosedürlerinin neticesinde

yüksek binaların sayısının global ölçekte sürekli arttığı bilinmektedir (Momtaz, Abdollahian ve Farshidianfar, 2017). Yüksek mukavemetli hafif yapı malzemelerinin kullanımının yaygınlaşması, artan bina yükseklikleri,

\* Sorumlu yazar; e-posta: [ozbasaran@ogu.edu.tr](mailto:ozbasaran@ogu.edu.tr)

Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

estetik kaygılar ile sunulan düzensiz yapısal tasarımlar gibi etkilerin bir sonucu olarak yapısal sistemler rüzgâr etkilerine karşı daha duyarlı hale gelmektedir. Öyle ki belirli bir yükseklik aşıldığında, rüzgâr kuvvetlerinin majör yatay etkiyi oluşturduğu düşünülen deprem kuvvetlerinden de daha etkin olduğu bilinmektedir (Huang ve diğ., 2015). Bu durum kullanıcı konforunun düşmesi, yapısal olmayan eleman hasarları ve yapı elemanlarında hasarlara kadar geniş bir risk yelpazesine neden olmaktadır (Folley, 2002). Rüzgâr etkileri sadece yüksek binalar için değil, rüzgâra maruz bölgelerde hizmet vermesi gereken pek çok yapı için çeşitli riskler oluşturmaktadır.

Rüzgâr etkilerinin öneminin artmasıyla birlikte yapısal optimizasyon alanındaki çalışmalar da bu değişimden etkilenmiştir. Daha önceden rüzgâr etkileri diğer yükler ile birlikte değerlendiriliyorken günümüzde "Rüzgâra Dayanıklı Optimum Yapı Tasarımı (RDOYT)" kavramı ile yeni bir boyut kazandırılmıştır. Bu kavram doğrultusunda, rüzgâr etkileri majör yük olarak kabul edilerek optimizasyon prosedürleri yürütülmektedir. Bu çalışmada literatürde bulunan RDOYT konulu

çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. Literatür incelendiğinde RDOYT sürecinin üç ana başlık altında ele alınabileceği görülmüştür. Bu başlıklar Aerodinamik Şekil Optimizasyonu (AŞO), Rüzgâr Etkisi Altında Yapısal Optimizasyon (REAYO) ve Sönümleyici Sistemler ile Rüzgâra Dayanıklı Optimum Tasarım (SSRDOT) olarak belirlenmiştir. AŞO çalışmalarının temel amacı yapıya etkileyen rüzgâr yüklerini minimize etmektir. REAYO uygulamalarında ise optimum yanal rijitlik dağılımı ile ilgili kısıtları sağlayan en ekonomik yapısal sistem aranmaktadır. SSRDOT üzerine yapılan çalışmalarda ise optimum sönümleyici parametreleri ve optimum sönümleyici yerleşimi ile yapıda oluşan rüzgâr kaynaklı tepkilerin azaltılması amaçlanmaktadır.

## 2. Araştırma Metodolojisi ve Bulgular

Literatürdeki rüzgâra dayanıklı optimum yapı tasarımı alanındaki çalışmalara ulaşmak için Scencedirect, Web of Science, Reserchgate, Acedemia ve Google Scholar gibi veri tabanlarından Tablo 1'de sunulan anahtar kelime grupları için taramalar yapılmıştır.

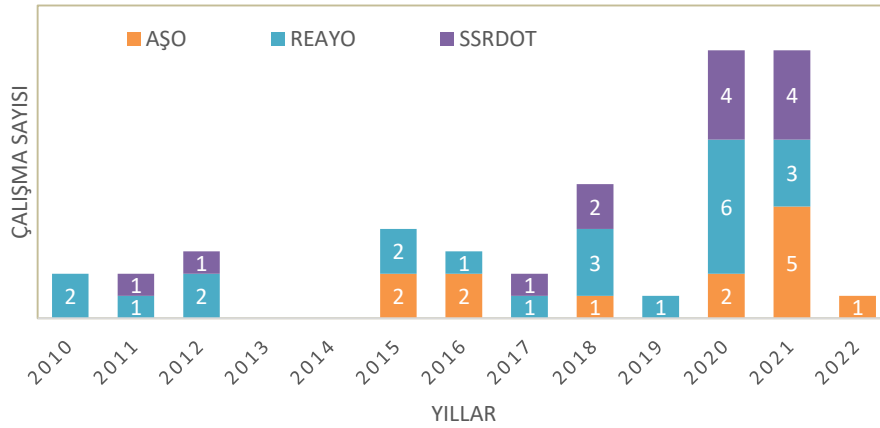
Tablo 1

### Anahtar Kelime Grupları

aerodynamic, optimization, building	wind, optimization, structural control
aerodynamic shape optimization, building	wind, parameter optimization, damping systems
aerodynamic building design, optimum	wind induced response optimization, buildings
aerodynamic, wind load, minimization	wind induced vibration control, optimum
aerodynamic mitigation, building, optimization	wind induced, optimum, building
wind, optimization, building	wind resistant, structural optimization
wind, optimization, structures	wind resistant, optimization, damper
wind, optimization, buildings, damper	wind response mitigation, buildings, optimum
wind, vibration control, structural, optimization	wind resistant design optimization, structure
wind, buildings, damper, optimum	wind effect minimization, buildings

Kaynak taraması neticesinde ulaşılan çalışmalardan yalnızca algoritma tabanlı bir optimizasyon metodolojisi barındıranlar ele alınmıştır. Dolayısıyla deneme-yanılma metodolojilerini takip eden çalışmalar bu incelemenin kapsamının dışındadır. İncelenecek çalışmalar seçilirken, belirli bir stratejinin sunulduğu

temel çalışmalara ve erişilebilen güncel çalışmalara odaklanılmıştır. Bu bağlamda incelenen çalışmaların yıllara ve konulara göre dağılımları Şekil 1'de sunulmuştur. Kaynak taraması yapılırken 2013 ve 2014 yıllarında belirtilen nitelikleri taşıyan herhangi bir çalışmaya ulaşılamamıştır.



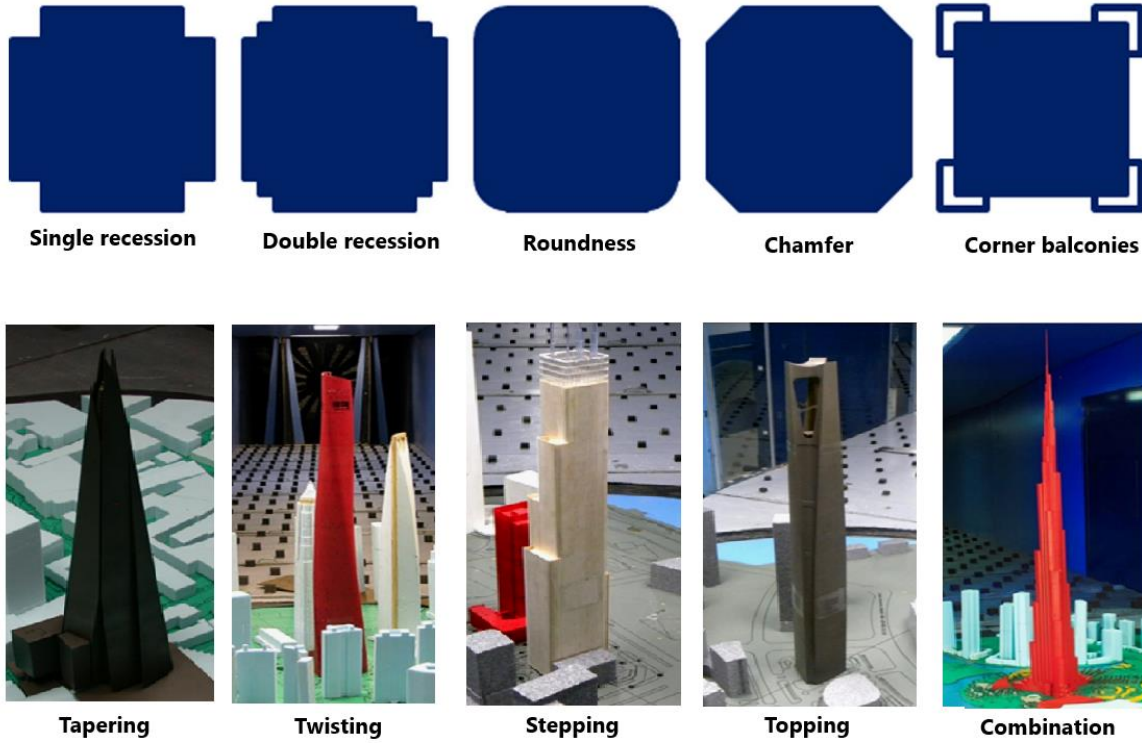
Şekil 1. İncelenen Çalışmaların Yıllara ve Konulara Göre Dağılımları

### 3. Aerodinamik Şekil Optimizasyonu (AŞO)

AŞO havacılık, uzay, otomotiv, enerji ve savunma gibi pek çok sanayi kolu için uygulanan bir metodolojidir. Buradaki temel amaç sistem üzerine gelen rüzgâr etkilerinin minimize edilmesidir. Yöntem yapı sistemleri için de adapte edilerek ön tasarım aşamasında yapıların rüzgârla etkileşiminin azaltılması, cephe sistemlerinin rüzgâr etkilerini minimize edecek şekilde konumlandırılması, akıllı cephe sistemleri ile bina geometrisinin rüzgâr etkilerini azaltacak şekilde anlık olarak değiştirilmesi gibi alt alanlarda çalışmalar yürütülmüştür. Her ne kadar yapı mühendisliğinden çok mimarlık disiplininin alanına girse de rüzgâra dayanıklı optimum yapısal tasarımın ilk halkası olması bakımından oldukça önemlidir zira yapı mühendisliği var olan rüzgâr etkileri altındaki optimum yapısal sistemi bulmayı hedeflerken AŞO var olan rüzgâr etkilerini azaltmayı amaç edinmektedir.

Xie (2014) tarafından yapılan çalışmada, kritik yükün rüzgâra karşı cephede oluştuğu ve bu yükü azaltmak için benimsenebilecek iki temel yaklaşım bulunduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşımlar planda ve düşey doğrultuda şekil değişikliği olarak ifade edilmiştir. Planda değişiklik için köşe optimizasyonu, planın genel olarak revize edilmesi, planda boşluklar açılması gibi yöntemler; düşey doğrultuda değişiklik için ise sivirtme, bükme, kademeleme ve üst katlarda boşluk bırakma gibi yöntemler örnek verilmiştir. Belirtilen yöntemlerin tek başına uygulanması yerine birlikte uygulanması ile verimin artabileceği ifade edilmiştir. Örnek olarak verilen planda ve düşey doğrultuda optimizasyon stratejileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca yükseklik boyunca yapılan değişikliklerin etkilerini incelemek için matematiksel bir tahmin modeli önerilmiştir.





Şekil 2. AŞO için Sunulan Bazı Stratejiler (Xie, 2014)

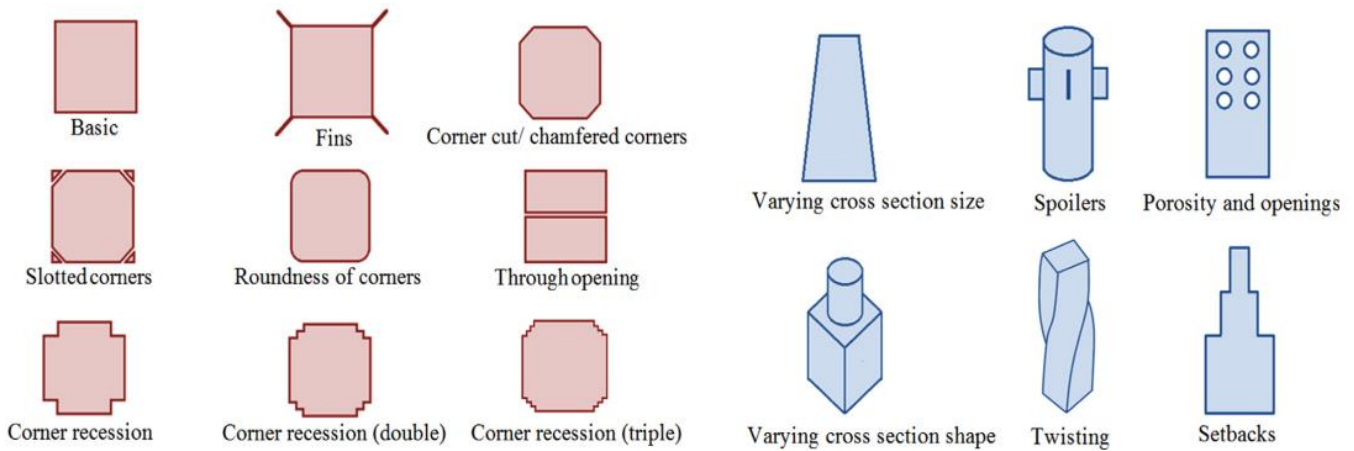
Bernardini, Spence, Wei ve Kareem (2015) tarafından yapılan çalışmada bina türü yapılarda evrimsel algoritmalar ile AŞO yürütülmesi için yenilikçi bir metodoloji sunulmuştur. AŞO problemlerinin pek çok lokal minimumu bulunduğu için gradyan tabanlı algoritmalarla çözümünün global optimuma ulaşılma ihtimalini güçleştirdiği ifade edilmiştir. Bu sebeple çalışmada geliştirilmiş bir genetik algoritma türevi olan NSGA-II tercih edildiği belirtilmiştir. Seçilen algoritmanın global optima yakınsama bakımından daha başarılı sonuçlar sunacağı açıkken, gradyan tabanlı algoritmaların aksine çok daha fazla iterasyon gerektirdiği bildirilmiştir. Çok fazla sayıda analiz gerektiren bu optimizasyon sürecinin mevcut işlem gücü ile gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığı ifade edilmiştir. Buradan hareketle hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla Simple Kriging (Basit Krigleme) yöntemi ile bir vekil model önerilmiş ve kullanılabilirliği araştırılmıştır. Önerilen optimizasyon stratejisinin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla silindirik yüksek bir binanın plan düzleminde AŞO uygulanmıştır. Optimizasyon için ortalama sürüklenme katsayısı ve kaldırma katsayısındaki standart sapma amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, vekil model sayesinde normalde yapılması gereken hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarının sadece %0.75'ine ihtiyaç duyulduğu,

vekil modelin algoritmanın optimumu bulmadaki performansına engel olmamakla birlikte gerçek değerlerden belirli oranda saptığı ve bu sapmaların azaltılması için başka vekil modelleme yöntemleri ile çalışmalar yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

Elshaer, Bitsuamlak ve El Damatty (2015) tarafından yapılan çalışmada binaların köşe şekillerini değiştirmek suretiyle AŞO yapılan bir yöntem sunulmuştur. Rüzgâr etkilerinin ortaya konması için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemine dayanan bir Yapay Sinir Ağı (YSA) eğitilerek vekil model oluşturulmuştur. Optimizasyon için Genetik Algoritma (GA) tercih edilmiştir. Sürüklenme katsayısı amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. İki adet vaka çalışmasının optimizasyonu sunulmuştur. İlk örnekte rüzgâr etkilerinin hesaplanmasında vekil model kullanılmazken ikinci örnekte YSA ile oluşturulan vekil model sürece dahil edilmiştir. Optimize edilen vaka çalışmasının neticesi olarak amaç fonksiyonunda %45'e varan azalmalar tespit edildiği raporlanmıştır. İkinci örnekte ise vekil model sayesinde hesaplama maliyetinin ciddi oranda azaldığı ve benzer sonuçlara ulaşıldığı ifade edilmiştir. Sonuç olarak GA ile köşe optimizasyonunun başarılı bulunduğu, YSA tabanlı vekil modelin hesaplama maliyetini azaltmak için oldukça işlevsel olduğu bildirilmiştir.

Elshaer, Bitsuamlak ve El Damatty (2016) tarafından yapılan çalışmada binaların helisel bükülmesi ve köşe modifikasyonuna dayalı bir AŞO uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulanan metodoloji Elshaer ve diğ. (2015) tarafından sunulan yöntemle dayanmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak rüzgâra karşı cephede oluşan normalize edilmiş moment katsayısı seçilmiştir. Tasarım değişkenleri bina geometrisini karakterize eden parametrelerdir. Sonuç olarak amaç fonksiyonunun kare kesite göre %45 azaldığı; YSA ile sağlanan vekil modelin, optimizasyon algoritması işletilirken hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinin çalıştırılmasına olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı ve hesaplama maliyetini düşürdüğü ifade edilmiştir.

Mooneghi ve Kargarmoakhar (2016) tarafından yapılan çalışmada planda ve düşey doğrultuda bina şekli değiştirilerek ya da basit mimari elemanlar eklenerek rüzgâr etkilerinin azaltılmaya çalışıldığı optimizasyon çalışmaları incelenmiştir. Bu bağlamda alçak ve yüksek binalara uygulanabilecek aerodinamik yöntemler ele alınmıştır. Optimizasyon çalışmaları gradyan tabanlı olanlar ve olmayanlar olarak sınıflandırılarak sunulmuştur. Xie (2014) tarafından yapılan çalışmada sunulan stratejilere benzer şekilde planda ve düşey doğrultu boyunca uygulanabilecek stratejiler derlenerek Şekil 3'te gösterildiği gibi sunulmuştur.



Şekil 3. AŞO Stratejileri (Mooneghi ve Kargarmoakhar, 2016)

Sonuç olarak, binanın şeklindeki değişiklikler ile rüzgâr etkileşiminin büyük ölçüde değişebildiği ve gradyan tabanlı olmayan optimizasyon algoritmalarının gradyan tabanlı algoritmalara göre daha yüksek hesaplama maliyetleri olsa da global optimuma yakınsama ihtimallerinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Gradyan tabanlı olmayan algoritmalar, çok sayıda iterasyon ile sonuca ulaştığından hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniklerinin yüksek maliyetinin ciddi bir zorluğu gündeme getirdiği belirtilmiştir. Bu zorluğun aşılması için vekil modellerin kullanılabilirliği ifade edilmiştir.

Ding ve Kareem (2018) tarafından yapılan çalışmada aerodinamik şekil optimizasyonunda kullanılmak üzere doğruluğu yüksek bir vekil model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Vekil modelleme için hesaplama maliyeti ve doğruluğu düşük bir HAD simülasyonu olan RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ve hesaplama maliyeti ile birlikte doğruluğu da yüksek olan LES (Large Eddy Simulation) yöntemlerinden elde edilen ortak veri kullanılmıştır. Önerilen yöntemde düşük hesaplama maliyetleri ile yüksek doğruluğa ulaşmaya çalışılmıştır. Optimizasyon için gelişmiş bir genetik algoritma türevi

olan NSGA-II kullanılmıştır. Elde edilen vekil model daha önce Bernardini ve diğ. (2015) tarafından optimize edilmiş probleme uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önerilen vekil model yönteminin yüksek doğrulukla başarılı sonuçlar ürettiği bildirilmiştir.

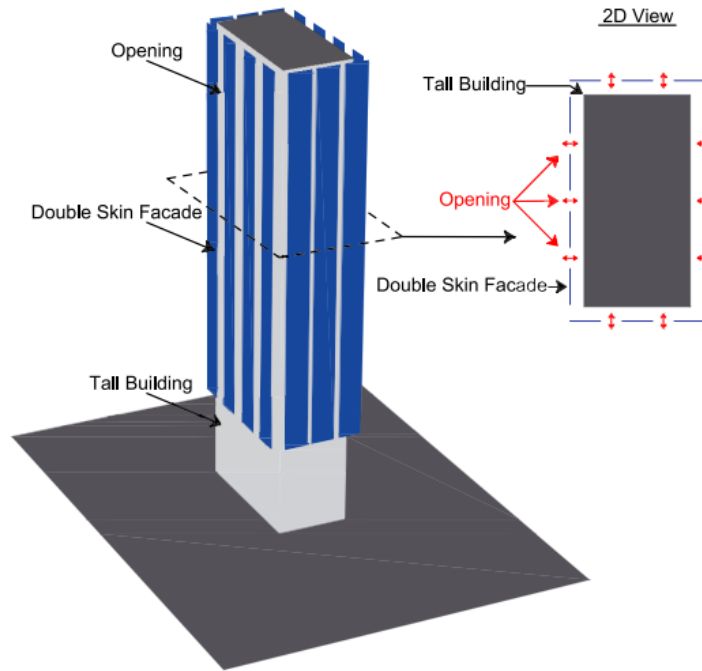
Jaouadi, Abbas, Morgenthal ve Lahmer (2020) tarafından yapılan çalışmada köprü tabliyeleri için AŞO sunulmuştur. Rüzgâr etkileri bir HAD simülasyonu olan girdap parçacık metoduna dayanan Krigleme vekil modeli vasıtasıyla hesaplanmıştır. Optimizasyon için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemi kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri köprü tabliyesinin geometrisini karakterize eden parametrelerdir. İlgili tasarım uzayı Şekil 4'te gösterilmiştir. Amaç fonksiyonları sürüklenme, kaldırma ve moment etkilerine sebep olan üç farklı statik rüzgâr katsayısı olarak belirlenmiştir. İlgili amaç fonksiyonlarının ortalamasının optimize edildiği tek amaç fonksiyonlu basit bir yaklaşım ve amaç fonksiyonlarının aynı anda optimize edildiği daha gelişmiş bir yöntem ile sabit ve farklı rüzgâr hücum açıları için çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak çok amaçlı



Qiu, Yu, San ve Li (2022) tarafından yapılan çalışmada geniş açıklıklı çatı yapıları için AŞO uygulaması sunulmuştur. Rüzgâr etkilerinin belirlenmesi için HAD simülasyonlarına dayalı bir vekil model kullanılmıştır. Vaka çalışması olarak geniş açıklıklı kömür hangarları seçilmiştir. Tasarım değişkenleri yapının geometrisini karakterize eden iki parametreden oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu rüzgâr yönüne bağlı maksimum düşey yer değiştirmedir. Optimizasyon için GA kullanılmıştır. Uygulanan vekil model destekli optimizasyon stratejisinin rüzgâr etkilerini büyük oranda azaltarak başarı sağladığı belirtilmiştir.

AŞO alanındaki yeni yaklaşımlardan birisi de cephe sistemleri ile rüzgâr etkilerinin azaltılmaya

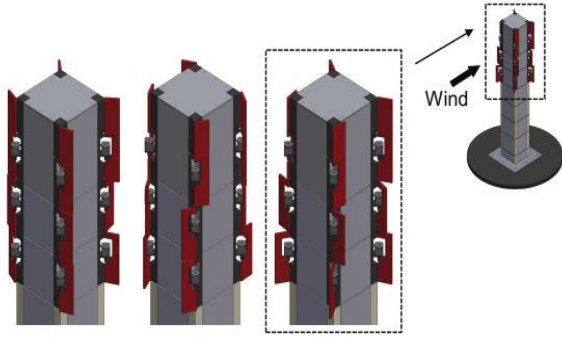
çalışılmasıdır. Bu yaklaşım hem mevcut binalara uygulanabilirliği hem de mimari tasarımlarda majör değişikliklere yol açmadan adapte edilebilir olması ile çeşitli avantajlar sunmaktadır. Jafari ve Alipour (2021) tarafından yapılan çalışmada çift cidarlı cephe sistemlerinin optimum yerleşimi ile AŞO sunulmuştur. Cephe elemanlarından bir kısmı hareketli olarak tasarlanmış, rüzgâr etkileri altında açı değiştirerek aerodinamik etkilere katkı sunmaları hedeflenmiştir. Optimize edilen sistem Şekil 6'da verilmiştir. Optimizasyon için GA kullanılmıştır. Sonuç olarak, önerilen sistemin enerji ve estetik katkılarının yanı sıra rüzgâr yüklerini minimize etmekte de etkili bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 6. Jafari ve Alipour (2021) Tarafından Optimize Edilen Cephe Sistemi

Aktif fiziksel sistemler ile ilgili deneysel bir çalışma da Whiteman ve diğ. (2021) tarafından sunulmuştur. Çalışmada geleneksel rüzgâr tüneli testleri sayısal optimizasyon teknikleri ile entegre edilerek, yüksek binaların rüzgâra dayanıklı tasarımı için AŞO metodolojisi sunulmuştur. Bu bağlamda siber fiziksel sistemlerin gelen rüzgâr etkilerini azaltmaktaki etkinliği incelenmiştir. Rüzgâr tüneline test edilen numune aktif bir kanatçık sistemine sahiptir. Kanatçıklar modelin dört köşesinde bulunurlar ve üç farklı yükseklik seviyesinde birbirinden bağımsız yapıdadırlar. Rüzgâr kaynaklı tepkinin araştırılması için bir dizi ivmeölçer ve lazer yer değiştirme sensörü kullanılmıştır. Bu donanımlar vasıtasıyla her bir aday tasarımın uygunluğunu, kullanıcı konforu ve yapısal dinamik parametreler ile ilgili performans kriterlerine göre değerlendiren bir optimizasyon süreci yürütülmüştür.

Optimizasyon için değiştirilmiş bir PSO algoritması kullanılmıştır. İvme ve yer değiştirme değerlerinin iki farklı rüzgâr açısı için minimize edilmesi amaçlanmıştır. Deney sırasında sensörler ile veri toplanmış, veriler PSO ile değerlendirilerek optimizasyon yapılmış, optimizasyon sonuçları modele uygulanarak canlı, otomatik ve deneysel bir süreç oluşturulmuştur. Önerilen sistem Şekil 7'de gösterilmiştir. Optimizasyon sonuçlarından hareketle yöntemin, numunenin tepkisini (yatay ivmeler ve yer değiştirme) minimize ederek optimum çözümü başarılı bir şekilde elde edebileceği belirtilmiştir.



Şekil 7. Önerilen Siber Fiziksel Sistem (Whitman ve diğ., 2021)

Aktif sistemler ile ilgili bir diğer çalışma da Abdelaziz, Alipour ve Hobeck (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada şekil değiştirebilen cephe sistemleri ile rüzgâra bağlı titreşimin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr etkilerinin binada oluşturduğu tepkilerin simülasyonu için iki boyutlu akışkan-yapı etkileşim modeli kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda GA ile cephenin alabileceği çeşitli şekiller karşısında oluşan rüzgâr yükleri taranarak optimizasyon yapılmıştır. Vekil model işlevi gören iki adet YSA oluşturulmuştur. Bunlardan ilki sistem dinamiklerini tahmin eden bir regresyon modelidir. Bu model sayesinde her bir rüzgâr olayı için simülasyon yapma ihtiyacı ortadan kaldırılarak rüzgârın oluşturacağı etki için bir tahmin sağlanacağı bildirilmiştir. Diğer YSA modelinin ise cephenin farklı rüzgâr koşulları altında hangi konfigürasyonu alacağını hızlı şekilde belirlediği ifade edilmiştir. Bu sayede cephe sisteminin her bir eylemi için GA çalıştırılması ihtiyacının önüne geçilerek hem hesaplama maliyetinin düşürüldüğü hem de daha hızlı aksiyon alındığı belirtilmiştir. Ayrıca sistemin kurulundan sonra da binadaki sensörler vasıtasıyla öğrenme faaliyetlerine devam ettiği bildirilmiştir. Bu sayede sistemin binada yapılacak değişikliklere de uyum sağlayabildiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak önerilen akıllı cephe sisteminin etkinleştirilmesinden sonra rüzgâra bağlı titreşim genliklerinde %94'e varan azalma olduğu rapor edilmiştir.

### 3.1 Tartışma

AŞO alanındaki çalışmalar incelendiğinde, temel zorluğun yapı şeklindeki değişimle birlikte yapıda oluşan rüzgâr etkilerinin hesaplanmasında yaşandığı anlaşılmaktadır. Rüzgâr etkilerinin belirlenmesi için temel yöntem rüzgâr tüneli analizleri iken ilgili

analizlerin optimizasyon süreçlerine entegre edilmesi oldukça güçtür. HAD yöntemlerinin gelişimi ile rüzgâr etkilerinin belirlenmesi sürecinin, AŞO uygulamalarına entegre edilmesinin önündeki en büyük engel aşılmıştır. Burada HAD simülasyonları sanal bir rüzgâr tüneli vazifesi görerek optimizasyon algoritmalarının amaç fonksiyonlarında kullanılabilir hale gelmektedir. Bu kolaylığa rağmen HAD simülasyonlarının hesaplama maliyetlerinin çok yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Daha az hesaplama gücü gerektirmesine karşın lokal ekstremum noktalarında takılma riskleri çok yüksek olan gradyan tabanlı algoritmaların tercih edilmesi de büyük ölçüde hesaplama maliyetinden kaynaklanmaktadır.

Optimizasyon literatürü için oldukça ilkel yöntemler olan gradyan tabanlı algoritmalar her ne kadar denemeyanılma yönteminden daha efektif olsalar da güncel gerekleri karşılamaktan uzaktır. Bu durumun araştırmacıları keşif (exploration) yeteneği daha yüksek olan gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan algoritmalara yönlendirmektedir. İlgili algoritmalar çok daha üstün bir keşif yeteneğine sahip olsalar da optimuma ulaşmak için yaptıkları deneme sayısı ve dolayısıyla hesaplama maliyetleri önemli ölçüde yüksektir. Bu maliyetin üzerine HAD simülasyonlarının hesaplama maliyetleri de eklendiğinde mevcut bilgisayar donanımları ile çözümü oldukça zor problemler ortaya çıkmaktadır. Araştırmacıların bu problemin üstesinden gelmek için vekil modeller kullandığı hatta incelenen çalışmaların bir kısmında temel amacın doğruluğu yüksek, hesaplama maliyeti düşük vekil modeller geliştirmek olduğu görülmüştür.

İncelenen çalışmalarda plan ve düşey doğrultuda şekil modifikasyonları, cephe sistemleri ve siber fiziksel sistemler gibi pek çok farklı yöntemle AŞO süreci yürütüldüğü görülmektedir. Optimizasyon algoritmalarının rüzgâr etkilerini azaltmakta başarılı sonuçlara ulaşarak AŞO'dan beklenen faydayı maksimize ettiği anlaşılmaktadır. Hesaplama maliyetleri gibi temel problemlerin de çözülmesi ile AŞO'nun kullanımının yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

AŞO için kullanılan metasezgisel algoritmalar gradyan tabanlı algoritmalarından daha yenilikçi ve başarılı olsalar da günümüz optimizasyon metodolojisinin gerisinde kalan eski yöntemlerdir. AŞO stratejileri için parametre ayarlamasına ihtiyaç duymayan, modern metasezgisel yöntemlerle yapılacak çalışmalarda gerek hesaplama maliyeti gerekse global optimuma yakınsama bakımından başarımın artabileceği düşünülmektedir. Tablo 2'de bu bölümde incelenen çalışmaların özetleri sunulmuştur.

Tablo 2

## İncelenen AŞO Çalışmaları

Yazar ve Yıl	Amaç	Konu	Vekil Model	Optimizasyon	Amaç Fonksiyonu
Bernardini ve diğ. (2015)	Evrimsel algoritmalar ile AŞO	Plan optimizasyonu	Basit Krigleme	NSGA-II	Sürüklenme katsayısı Kaldırma katsayısı St. Sapması
Elshaer ve diğ. (2015)	Köşe modifikasyonu ile AŞO	Köşe optimizasyonu	YSA	GA	Sürüklenme katsayısı
Elshaer ve diğ. (2016)	Helisel bükülme ile AŞO	Düşey Doğrultu boyunca optimizasyon	YSA	GA	Moment katsayısı
Mooneghi ve Kargarmokhar (2016)	Literatür incelemesi	-	-	-	-
Ding ve Kareem (2018)	Yüksek doğrulukta vekil model elde etmek	Plan optimizasyonu	Yüksek doğruluklu ortak Krigleme	NSGA-II	Sürüklenme katsayısı Kaldırma katsayısı St. Sapması
Jaouadi ve diğ. (2020)	Köprü tabliyeleri için AŞO	Tabliye en kesit optimizasyonu	Krigleme	PSO	Sürüklenme, kaldırma ve moment etkilerine sebep olan olarak üç farklı statik rüzgâr katsayısı
Zhang ve diğ. (2020)	Farklı simülasyon ve algoritmalarla AŞO	Düşey Doğrultu boyunca optimizasyon	-	RBF0pt CMA-ES	Maksimum yer değiştirme
Li ve diğ. (2021)	DPÖ ile AŞO	Plan optimizasyonu	RANS bazlı model	Gradient Descent PSO DPÖ	Sürüklenme katsayısı
Paul ve Dalui (2021)	Planda çıkıntılar ile AŞO	Plan optimizasyonu	Yanıt Yüzey Yöntemi	GA	Yüzey basınç katsayısı
Qiu ve diğ. (2022)	Geniş açıklıklı çatı yapıları için AŞO	Hangar en kesit optimizasyonu	Krigleme	GA	Düşey yer değiştirme
Jafari ve Alipour (2021)	Cephe sistemleri ile AŞO	Optimum cephe konfigürasyonu	-	GA	Sürüklenme katsayısı
Whiteman ve diğ. (2021)	Siber fiziksel sistemler ile AŞO	Optimum kanatçık konfigürasyonu	-	PSO	İvme ve yer değiştirme
Abdelaziz ve diğ. (2021)	Akıllı cephe sistemleri ile AŞO	Optimum cephe konfigürasyonu	YSA	GA	Titreşim genliği

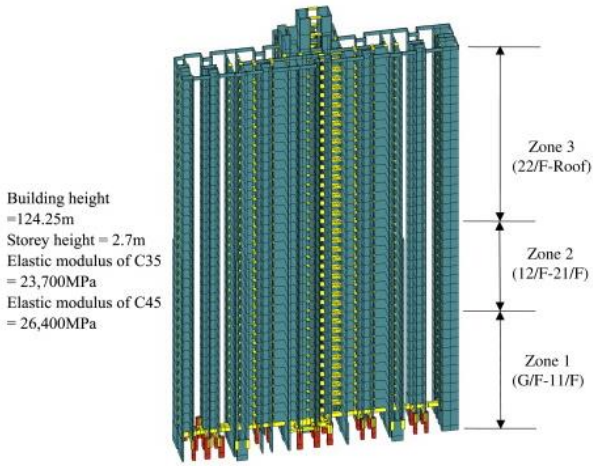
#### 4. Rüzgâr Etkisi Altında Yapısal Optimizasyon (REAYO)

REAYO, AŞO'dan oldukça farklıdır. Öyle ki AŞO için amaç gelen rüzgâr yüklerini minimize etmek iken REAYO'da rüzgâr yükleri genellikle sabit kabul edilerek optimum yapısal tasarım aranmaktadır. Bu bağlamda genellikle kısıtları sağlayan en uygun maliyetli yanal rijitlik dağılımının bulunması hedeflenmektedir.

Chan ve Huang (2010) tarafından yapılan çalışmada performans bazlı rüzgâra dayanıklı yüksek bina optimizasyonu için bir çerçeve sunulmuştur. Optimizasyon için Optimality Criteria (OC) yöntemi tercih edilmiştir. Kısıtlar mukavemet (can güvenliği), ötelenme (hasar), ivme (kullanıcı konforu) olarak ele alınmıştır. Her bir kısıt durumu için performans bazlı yaklaşımın gereği olarak farklı dönüş periyotlu rüzgârlar tercih edilmiştir. Kısıtlar değerlendirilirken çeşitli standartlarından faydalanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak malzeme maliyeti seçilmiştir. Yöntemin etkinliğini gösterme amacıyla 40 katlı bina üzerinde uygulama yapılmıştır. Rüzgâr etkilerini belirlemek için 1:400 ölçekli model üzerinde rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilmiştir. Sunulan yöntemin

yanal rijitliği başarıyla dağıtıp kabul edilebilir bir maliyet optimizasyonu sağladığı raporlanmıştır.

Chan, Huang ve Kwok (2010) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr tüneli analizleriyle elde edilen veriler eşdeğer statik rüzgâr yüklerine (ESRY) çevrilerek optimizasyon sürecine dahil edilmiştir. Yapısal sistemdeki değişen periyot ile birlikte ESRY'ler de güncellenerek her bir iterasyonda uygulanmıştır. Optimizasyon için OC algoritması kullanılmıştır. Sunulan yöntemin etkinliğinin gösterilmesi amacıyla literatürde bulunan 40 katlı binanın optimizasyonu yapılmıştır. İlgili yapı Şekil 8'de sunulmuştur. İlgili bina için rüzgâr yükleri hem Hong-Kong Rüzgâr Yönetmeliği'ne göre hem de rüzgâr tüneli testlerine göre elde edilmiş, iki yöntem arasında ciddi farklar olduğu raporlanmıştır. Sonuç olarak, optimizasyon neticesinde yapının maliyetinin %9.9 azaldığı ve daha rijit bir davranış elde edildiği, rüzgâr kaynaklı burulma etkisinde de önemli ölçüde azalma olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca modern rüzgâr yönetmeliklerinin düzensiz şekilli binalar ve bina çevresindeki nesnelere neden olduğu parazit etkilerini belirlemede yetersiz kaldığı vurgulanmıştır.



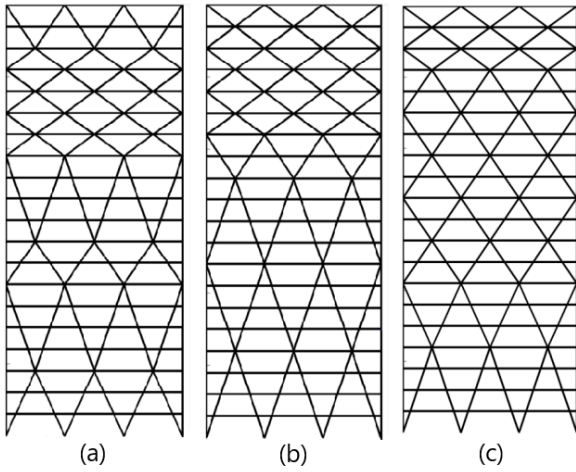
Şekil 8. Chan ve diğ. (2010) Tarafından Optimize Edilen Yapı

Li, Zou, Wu, ve Wang (2011) tarafından yapılan çalışmada dikdörtgen formlu yüksek çelik binaların rüzgâr yükleri etkisinde yanal ötelenme, kullanıcı konforu ve servis verebilirlik gibi kriterler altında minimum maliyetli tasarımı için bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Çözülen problemde AISC profil listelerinden seçilecek profillerin taşıyıcı sistemdeki beş kolon ve beş kiriş grubuna optimal ataması aranmaktadır. Amaç fonksiyonu malzeme maliyetidir. Optimizasyon algoritması olarak genetik algoritmanın daha küçük arama uzaylarında daha performanslı çalıştığı bilinen varyantı olan micro-GA kullanılmıştır. Rüzgâr yükü, rüzgâr tüneli testlerine dayalı ampirik formüllerle elde edilmiştir. Sonuç olarak; ampirik formüller ile hesaplanmış rüzgâr kaynaklı tepkilerin başarılı bulunduğu, geliştirilen entegre optimizasyon tekniğinin ise rüzgâr kaynaklı servis verebilirlik, yanal ötelenme ve kullanıcı konforu gibi tasarım kriterlerini aynı anda karşılayabilmek için kesitleri başarılı bir şekilde güncellediği belirtilmiştir. Sunulan yöntemin yanal rijitlik optimizasyonuna dair başka problemler için de kullanılabilir olduğu bildirilmiştir.

Huang, Chan, ve Lou (2012) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâra dayalı tasarımı için performans odaklı bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Üç farklı tekrarlanma periyodu için farklı performans hedefleri sunulmuştur. Bunlar sık görülen 1 yıllık periyotlu rüzgâr için kullanıcı konforu, nadir görülen 50 yıllık periyotlu rüzgâr için ötelenme kısıtlarının sağlanması ve çok nadir görülen 475 yıllık periyotlu rüzgâr için onarılabılır hasardır. Optimizasyon için OC algoritması tercih edilmiştir. Maliyet amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Sunulan modelin etkinliğini açıklamak amacıyla 60 katlı dikdörtgen plana sahip kompozit bir yapının optimizasyonu yapılmıştır. Binanın çelik çerçevesi için

AISC profil listesinden optimum profillerin seçilmesi amaçlanmıştır. Binaya etkiyen rüzgâr yüklerinin tespiti amacıyla 1:400 ölçekli model üzerinde rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Sonuç olarak; önerilen yöntemin performans tasarım kısıtlarını sağlamada başarılı olduğu, yüksek bina tasarımı için yanal rijitlik dağılımını maliyet ekseninde başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği bildirilmiştir.

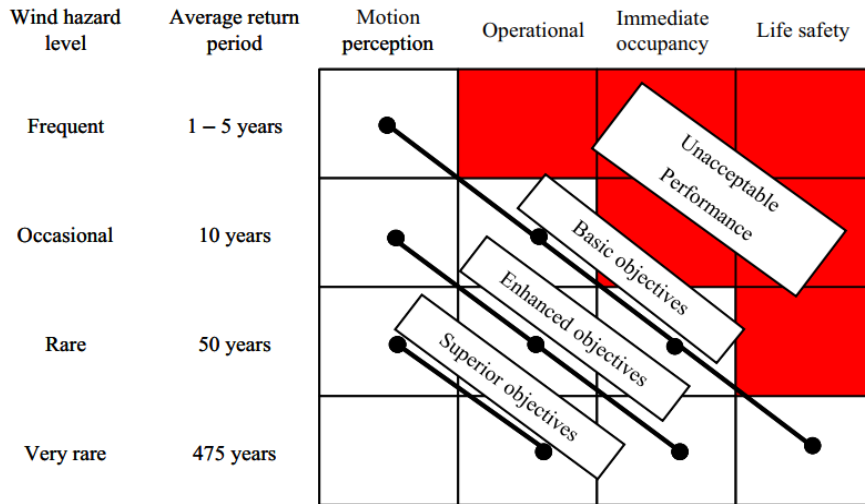
Shahrouzi, Meshkat-Dini ve Azizi (2015) tarafından yapılan çalışmada PSO, HSA (Harmony Search Algorithm) ve MBO (Mine Blast Optimization) ile yüksek çelik binaların rüzgâr etkisi altındaki optimum tasarımı araştırılmıştır. Çalışmada iki adet problem sunulmuştur. Birinci problemde İran Ulusal Bina Yönetmeliği'nden elde edilmiş gerilme ve ötelenme kısıtları ve rüzgâr yükleri altında boyut optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon için 10, 20 ve 30 katlı aynı planına sahip örnek binalar rijit ve esnek diyafram kabulleri için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Farklı senaryolar altında çok sayıda optimizasyon gerçekleştirilmesinin sebebi yüksek binalarda rüzgâra bağlı optimizasyonun duyarlı olduğu parametrelerin incelenmesi adına veri elde etmektir. İkinci problemde ise 20 katlı bir binada diagridler (binayı dıştan saran çapraz ızgara sistem) için geometri ve boyut optimizasyonu yapılmıştır. Bina için yükler literatürle benzer şekilde seçilmiştir. Kiriş, kolon ve diyagonal elemanlar için 10 adet simetrik gruplama yapılmıştır. Sonuç olarak; ilk problem incelendiğinde esnek döşemeli sistemin rijit döşemeli sisteme göre daha fazla malzeme talebinin olduğu, yüksek binalar için ötelenme kısıtı etkinken daha az yüksek binalar için gerilme limitlerinin kritik olduğu, MBO algoritmasının diğer algoritmalara oranla daha düşük ağırlıklar bulurken hesaplama maliyetinin ise diğerlerinden yüksek olduğu belirtilmiştir. İkinci problem incelendiğinde ise yüksek yer değiştirmeyi telefi etmek amacıyla diyagonal modüllerin boyutlarının çatı seviyesine yaklaştıkça algoritmalarca azaltıldığı belirtilmiştir. PSO global aramadaki yeteneği sayesinde diğer algoritmalarından daha başarılı sonuçlar üretirken MBO rijitliği diagrid elemanların yüksekliği boyunca yeniden dağıtarak daha az kritik olan üst katlara iletmede daha başarılı bulunmuştur. Hesaplama maliyeti bakımından ise en başarısız algoritma olduğu raporlanmıştır. İkinci probleme ait optimizasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Diagridler İçin Optimum Tasarım Sonuçları a) PSO, b) HSA, c) MBO (Shahrouzi ve diğ., 2015)

Huang ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâra bağlı performans tasarımı için bir optimizasyon metodolojisi geliştirilmiştir. Yüksek binaların 475 yıllık geri dönüş periyodu olan rüzgâr tehlikeleri gibi çok nadir olaylar karşısındaki lineer olmayan davranışının değerlendirilmesi amacıyla lineer olmayan itme analizi önerilmiştir. Çalışmada yüksek binalar için dört seviyeli bir rüzgâr mühendisliği tasarım çerçevesi sunulmuştur. Performans bazlı deprem analizlerine benzer şekilde hareket algılama, operasyonel (kullanıma devam etme), hemen kullanım ve can güvenliği olmak üzere dört performans hedefi

vardır. İlgili performans hedefleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Hareket algılama hedefi için kullanıcı binanın hafif hareketlerini muhtemelen algılayacak ancak rahatsız olmayacaktır. Operasyonel hedef için orta seviyeli rüzgâr olayları için güvenlik veya yaralanma tehdidi oluşmaması beklenir. Hemen kullanım hedefi için ise yapısal olmayan elemanlardaki bazı hasarlara müsaade edilse de yapısal elemanlar için hasar istenmez. Can güvenliği performans seviyesinde çok nadir görülen rüzgâr yükleri altında yapısal hasarlar oluşabileceği kabul edilip yanıl rijitlik kaybı da hesaplara dahil edilir. Önerilen metodoloji daha sonra detaylandırılarak Huang (2017) tarafından sunulmuştur. Rüzgâr kaynaklı kuvvetlerin belirlenmesi için rüzgâr tüneli testleri yapılarak ortaya çıkan etkilerin eşdeğer statik rüzgâr yüklerine dönüşümü sağlanmıştır. Optimizasyon için hesaplama maliyetinin düşük olması sebebiyle OC yöntemi tercih edilmiştir. Uygulanan yöntem gradyan bilgisiyyle çalıştığı için iyi bir başlangıç noktası seçimi gerektiği aksi takdirde kötü sonuçlar alınabileceği ve bu durumun ciddi bir dezavantaj yaratabileceği vurgulanmıştır. Optimizasyon sürecinde çift fazlı bir prosedür izlenmiş olup önce elastik analiz daha sonra plastik analiz gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodolojinin kabiliyetlerini gösterebilmek için 40 katlı 122 metre yüksekliğinde bir binanın optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemin rüzgâr uyarılarına maruz binaların mühendislik tasarımını ele alabilen güçlü bir bilgisayar destekli araç olduğu belirtilmiştir.



Şekil 10. Huang ve diğ. (2015) Tarafından Sunulan Performans Bazlı Tasarım

Li ve Li (2016) tarafından yapılan çalışmada öncelikle rüzgâr etkisi altındaki yüksek binaların optimum tasarımı için bir metodoloji önerilmiş olup daha sonra ilgili metodoloji düzensiz forma sahip binalar üzerinde

uygulanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam ağırlık, tasarım değişkenleri olarak yapısal elemanların kesitlerinin karakterize ettiği parametreler, kısıtlar olarak ise rüzgâr kaynaklı tepkiler olan görelî kat

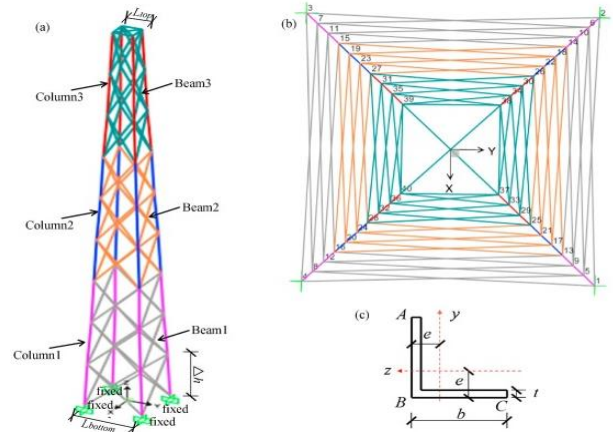


ötelemeleri ve son kat ivmesi seçilmiştir. Kısıtların limitleri Çin Yapısal Tasarım Yönetmeliği'ndeki (JGJ3-2010) sınırlar vasıtası ile oluşturulmuştur. Optimizasyon için OC yönteminin öz yinlemeli bir algoritma ile birleştirildiği bir metodoloji önerilmiştir. Rüzgâr yüklerinin belirlenebilmesi ve çıkan sonuçların doğrulanması için rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Sunulan yöntemin kabiliyetlerini göstermek için 60 katlı L formlu bir bina üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak; ele alınan L formlu binanın toplam ağırlığının %18.1 azaltıldığı, buradan hareketle maliyetlerin büyük ölçüde düşürüldüğü; mod frekans değerlerinin %10 ila %15 arasında yükseldiği (yapının rijiteleştiği), rüzgâr kaynaklı ivmelerin azaldığı, tasarım optimizasyonundan sonra ESRV'lerin önemli ölçüde azaldığı ve bunlardan hareketle önerilen optimizasyon yönteminin rüzgâra dayanıklı yapı tasarımı için başarılı ve kullanılabilir bulunduğunu ifade edilmiştir.

Fu ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada rüzgâra dayanıklı yapısal optimizasyonda kullanıcı konforunu da dikkate alan bir tasarım prosedürü önerilmiştir. Literatürde daha önceden de kullanıcı konforu ile ilgili yapılmış çalışmalara rastlamak mümkündür. Bu çalışma kullanıcı konforunun, binanın kat ivmelerinin tepe değerleri ile alakalı olduğu ve rüzgâr hızının tekrarlanma periyodu ile ilişkisi olmadığı fikriyle öne çıkmaktadır. Buradan hareketle yüksek binaların rüzgâra dayalı optimizasyonu ivme kısıtları açısından değerlendirmektedir. Bu bağlamda kullanıcı konforu odaklı olarak en büyük modal yatay ivmeyi hesaba katan yeni bir prosedür sunulmaktadır. Modal ivmenin güvenilirlik bazlı tasarımda tercih edildiği çalışmalarda kriter olarak ivme tepkilerinin değerleri kullanılmaktadır. Bu durumun farklı ülkeler için farklı kısıtlamaları da beraberinde getirerek evrensel olarak kullanılamayacak bir metodolojiyi ortaya çıkardığı, modal ivmelerin yarattığı tepki ivmeleri yerine kullanıcı konforu açısından değerlendiriliyor olmasının evrensel bir metodoloji oluşturulmasına katkı sağlayacağı ifade edilmiştir. Rüzgâr yükü belirlenirken meteorolojik kayıtlar kullanılmıştır. İlgili kayıtlar Gumbel dağılım modeli ile analiz edilip 10 ve 50 yıllık periyotlar için hangi yönün kritik olduğu ve bu yönden gelebilecek uç rüzgâr hızının ne kadar olduğuna dair tahminde bulunulmuştur. Oluşturulan yöntem CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) tarafından sunulan 60 katlı yüksek bina için uygulanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam ağırlık, tasarım değişkenleri olarak 6 gruba ayrılmış kolon ve kiriş kesit boyutları, kısıtlar olarak yer değiştirme, görelî kat ötelenmesi ve frekans, yapısal tasarım yönetmeliği olarak Çin Yapısal Tasarım Yönetmeliği (JGJ3-2010) optimizasyon algoritması olarak ise OC algoritması tercih edilmiştir. Sonuç olarak, yapının güvenliği sağlanırken toplam ağırlığın ciddi oranda azaldığı bildirilmiştir. Bu çalışma Athanasiou, Stathopoulos ve Tirca (2020) tarafından bazı hususlarda eleştirilmiştir.

Kullanıcı konforu kısıtlarının yönetmeliklerce zorunlu kılınan dayanım kısıtlarını devre dışı bırakmadığı dolayısıyla sunulan yöntemin evrenselliğinden bahsedilemeyeceği, çalışmada yapılan bazı kabullerin açıkça belirtilmediği, bazı tasarım değişkenlerinin alt sınırlarda sonuç verdiği ve bu durumun irdelenmediği ve önerilen yöntemin sistem özelinde olabileceği ifade edilmiştir.

Fu ve diğ. (2018b) tarafından yapılan çalışmada kafes sistemlerin hafif ve ince; ayrıca yüksek esneklik ve düşük sönümlenme oranına sahip oldukları için rüzgâr yüklerine karşı hassas olduklarının altı çizilmiştir. Çalışmanın ana motivasyonu buradan hareketle kafes sistemlere etkiyen rüzgâr yükünü minimize edecek otomatik bir optimizasyon akışı ortaya koymaktır. Kafes sistemlerin tasarımını otomatikleştiren pek çok çalışma yapıyorken literatürde dinamik rüzgâr hareketleri altında doğrusal olmayan kafesler için bir optimizasyon sürecine rastlanmadığı ifade edilmiştir. Optimizasyon için OC yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde kısıt olarak; eşdeğer statik rüzgâr yükleri altındaki düğüm yer değiştirmeleri, eleman gerilmeleri ve doğrusal olmayan kritik yük faktörü seçilmiştir. Çalışmada önerilen otomatik optimizasyon tekniğinin etkinliğini göstermek için üç boyutlu bir sistemin optimizasyonu da sunulmuştur. Optimize edilecek sistem Şekil 11'de gösterilmiştir. Sonuç olarak; en etkin kısıtın yatay yer değiştirme olduğu, yatay yer değiştirmenin ön tasarım olarak sınırlandırıldığı durumlarda doğrusal olmayan kritik yük faktörünün en etkin parametreye dönüştüğü belirtilmiştir. Doğrusal olmayan geometrik yapının malzeme ihtiyacını arttırdığı kaydedilmiştir.



Şekil 11. Fu ve diğ. (2018b) Tarafından Optimize Edilen Sistem

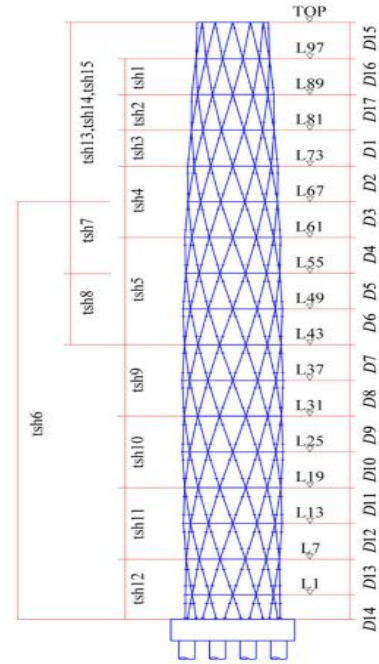
Fu, Wu, Xu, Wu ve Pi (2018c) tarafından yapılan çalışmada yüksek binalar için rüzgâra dayanıklı tasarımda bir yöntem olarak kullanılan frekans kısıtlı yaklaşıma dair bazı geliştirmeler önerilmiştir. Literatürde frekans kısıtlama fonksiyonları elde edilirken problemin matematiksel olarak modellendiği

ve OC metoduna göre çözüldüğü belirtilmiştir. Bu modelleme yapılırken gerinim enerjisi yönteminin kullanıldığı ifade edilerek bunun bazı dezavantajlarından bahsedilmiştir. Çalışmada bu problemlere çözüm olarak gerinim enerjisi yöntemi yerine bir özdeğer yaklaşımı, langrange çarpanlarını hesaplamak için ise Gauss-Seidel yöntemi yerine ikinci derece programlama yaklaşımı önerilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin yüksek binalar için rüzgâra dayanıklı yapısal optimizasyon için daha etkili olduğu ve iterasyonların daha hızlı ve istikrarlı ilerlediği ifade edilmiştir.

Li, Duan, Li, Li ve Huang (2020) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâr etkilerine karşı optimum tasarımı ele alınmıştır. Rüzgâr yükleri Çin Bina Yük Yönetmeliği'ndeki (GB50009-2012) girdiler kullanılarak eşdeğer statik rüzgâr yükleri yöntemi ile bulunmuştur. Optimizasyon algoritması için gelişmiş GA tercih edilmiştir. MATLAB dili ile programlanan optimizasyon algoritması ile ANSYS sonlu elemanlar çözücüsü ortak çalıştırılmıştır. Yöntemi test etmek amacıyla CAARC tarafından sunulan 60 katlı dikdörtgen formu betonarme bir yüksek bina üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Sonuç olarak; önerilen metodolojinin binanın yanal rijitliğini yeniden dağıtarak maksimum ötelenme, görelî ötelenme ve maksimum ivme gibi kısıtları sağladığı belirtilmiştir.

Xu ve Zhao (2020) tarafından yapılan çalışmada karmaşık yapısal sisteme sahip çok yüksek binalarda rüzgâra dayanıklı tasarım için bir optimizasyon süreci önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkilerinin görülmesi için mevcut bir bina olan Guangzhou West Tower üzerinde analizler yapılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak toplam malzeme maliyeti seçilmiş olup kısıtlar yanal ötelenme ve ivmedir. Sofistike bir yapı olan Guangzhou West Tower için tam anlamıyla bir optimizasyon yapılmamış, sistem basitleştirilerek ele alınmıştır. Optimize edilen yapının modeli Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu bağlamda optimize edilmek için yalnızca sistemdeki beton dolgulu çelik tüpler ve perde duvarlar seçilmiştir. Çelik tüplerin geometrisini ifade eden çap ve çelik cidarın çapa oranı değerleri ile perde duvarları karakterize eden kalınlık değerlerinden oluşan toplamda 49 adet tasarım değişkeni bulunmaktadır. Optimizasyon için MATLAB ortamındaki fmincon araç kutusu kullanılmıştır. Çeşitli optimizasyon algoritmalarına sahip olan bu araç kutusundan büyük ölçekli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinde başarılı bulunan NITRO (Nonlinear Interior Point Trust Region Optimizer) algoritması tercih edilmiştir. Optimizasyon sonucunda toplam malzeme maliyetinin %20.56 oranında azaltıldığı; yer değiştirme tepkisi, görelî kat ötelenmesi ve ivme tepkisi gibi rüzgâra bağlı büyüklüklerin düştüğü belirtilmiştir. Belirli katlarda görelî kat ötelenmesi değerlerinin sınıra oldukça yakın bulunduğu belirtilmiştir.

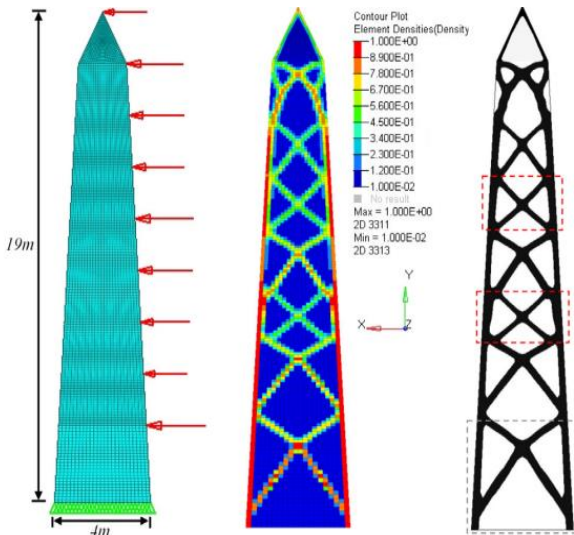
olup buradan hareketle incelenen bina için baskın faktörün görelî kat ötelenmesi olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 12. Xu ve Zhao (2020) Tarafından Optimize Edilen Yapısal Sistem

Kim, Tse, Chen ve Park (2020) tarafından yapılan çalışmada bağlantılı yüksek binaların (BYB) rüzgâr etkileri altında minimum yer değiştirme ve minimum ivme tepkisi için optimum bağlantı özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada binalar arasındaki boşluk mesafesinin değişken olduğu iki binalı tipik bir BYB sistemi ele alınmıştır. Rüzgâr yükü bileşenlerinin belirlenmesi için rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Optimizasyon için GA kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak yer değiştirme ve ivme tepkileri, tasarım değişkenleri olarak ise bağlantı yapısını karakterize edecek bazı oranlar (bağlantı/bina kütle oranı, bağlantının yüksekliği/toplam yükseklik, bağlantının eksenel rijitliği/bağlanan binaların eşdeğer rijitliği ve bağlantının eğilme rijitliği/bağlanan binaların eşdeğer burulma rijitliği) seçilmiştir. Sonuç olarak; bağlantı ek kütesinin yer değiştirme yanıtını artırma eğilimindeyken ivme tepkisini azalttığı, bağlantı yüksekliğinin bina yüksekliğine oranı arttıkça ivme tepkisi azalırken yer değiştirme tepkisinin arttığı, bağlantı rijitliğinin genel olarak her iki parametreyi de azalttığı ancak genel olarak rijitliğe olan duyarlılığın düşük olduğu, rüzgâr kaynaklı tepkilerin iki bina arasındaki boşluk oranına göre değiştiği ve bu etkinin karmaşık olduğu bildirilmiştir. Ayrıca çalışmanın sonuçlarının BYB tasarımı için pratik tavsiyeler içerdiği ve gelecek araştırmalar için rehberlik edebileceği belirtilmiştir.

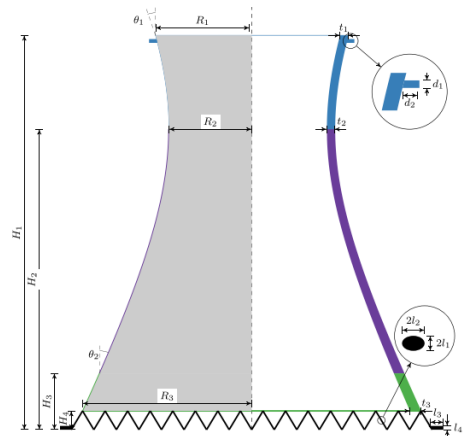
Tsavdaridis, Nicolaou, Mistry ve Efthymiou (2020) tarafından yapılan çalışmada kafes tipi telekomünikasyon kule yapıları için rüzgâr ve kar yükleri altında topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Telekomünikasyon kulelerinin hafif, uzun ve esnek yapılar olduğu ve genellikle yüksek irtifalı sahalarda hizmet verdikleri, bu nedenle rüzgâr kuvvetlerinin tasarımlarında kritik olduğu vurgulanmıştır. Topoloji optimizasyonu için oluşturulan tasarım alanları (konik, kısmen konik ve düz) Yunanistan'da kullanılan bir telekomünikasyon kulesinin dış hatlarını baz almaktadır. Optimizasyon için SIMP (Solid Isotropic Material with Penalisation) algoritmasını kullanan Altair OptiStruct 2016 paket programı tercih edilmiştir. Yükler ve sınır koşulları oluşturulurken Avrupa yönetmeliklerinden (BS EN 1991-1-4, DIN 4131, BS EN 1993-3-1, DIN 1991, Eurocode-3) faydalanılmıştır. Statik rüzgâr yükü belirlenirken analizi yapılacak kulenin Birleşik Krallık'ta meydana gelebilecek en kritik rüzgâr yüküne maruz kalacağı varsayılmıştır. Rüzgâr yükleri referans kule üzerinden hesaplanıp tüm tasarımlar için sabit kabul edilmiştir. Topolojiyi netleştirmek adına yükler analizler sırasında büyütülmüştür. Kısıt olarak kulelerin taban köşelerinin sabit olduğu ve bir takım simetri koşulları olduğu varsayılmıştır. Elde edilen model başlangıçtaki referans kule ile modal analiz yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak daha az malzeme kullanılarak çok daha rijit bir sisteme ulaşıldığı raporlanmıştır. Daha estetik, daha ekonomik ve daha güvenli bir telekomünikasyon kulesi elde edildiği bildirilmiştir. Yapılan optimizasyon Şekil 13'te özetlenmektedir.



Şekil 13. Tsavdaridis ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Sistem

Zhao ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada soğutma kulelerinin rüzgâra bağlı optimum tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Rüzgâr yükünü belirlemek amacıyla 1:200 ölçeğinde modeller kullanılmıştır.

Kulelerin birbiri ile etkileşimini de sürece dahil etmek amacıyla altı adet kule için farklı yerleşimleri için de rüzgâr tüneli analizleri yapılmıştır. Grup halinde bulunmalarının koruma etkisine neden olup gelen yükü azaltabildiği ya da hunileme etkisiyle yükü arttırabildiği bildirilmiştir. Rüzgâr tüneli testleri ile elde edilen basınç katsayılarının özellikle tek konumlandırılmış kule için Çin Soğutma Kulesi Tasarım Yönetmeliği ile örtüştüğü belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu toplam malzeme maliyeti olarak seçilmiştir. Yükseklikler ve çaplar termal mühendisliğin gereklerini karşılamak için değiştirilemediğinden dolayı kabuk kalınlığı ve taban halkasını karakterize eden 13 adet tasarım değişkeni seçilmiştir. Optimizasyon probleminin genel yapısı Şekil 14'de gösterildiği gibidir. Kısıtlar termal mühendislik kısıtlamaları ve ilgili yönetmeliğin gereklerini sağlayacak şekilde seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak ızgara araması ile birleştirilmiş gradyan tabanlı bir metodoloji kullanılmıştır. Sonuç olarak soğutma kulesi yerleşiminin bazı etkileri sunularak bu etkilerden korunmak için birtakım önerilerde bulunulmuş, yapısal optimizasyon ile hem güvenlik hem de ekonomik verimlilik sağlanabileceğinin altı çizilmiştir.



Şekil 14. Zhao ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Soğutma Kulesi

Xu, Lin, Fu ve Sun (2021) tarafından yapılan çalışmada yüksek binalara gelen rüzgâr etkilerini belirlemede sıklıkla kullanılmasına rağmen optimizasyon süreçlerinde yeterince dikkate alınmadığı ifade edilen HFFB (High-Frequency Force Balance) rüzgâr tüneli analizleri ile optimizasyon süreci yürütülmüştür. Testler CAARC tarafından sunulan binanın 1:300'lük bir modeli aracılığı ile yapılmıştır. Sunulan metodoloji sayesinde tüm kısıtlar tek tip bir frekans kısıtına dönüştürerek hesaplama maliyetinin oldukça düşürülebileceği ileri sürülmüştür. Amaç fonksiyonu olarak toplam malzeme maliyeti, tasarım değişkenleri olarak ise beş grupta ifade edilen kiriş ve kolon boyutları seçilmiştir. Üst kat yer değiştirmesi, ivme ve katlar arası

yanal kayma kısıtlamalarının limitleri için üç adet frekans hesaplanmış olup bunların en büyüğü dolayısıyla en kritik olanı tek kısıtmış gibi optimizasyon sürecine dahil edilmiştir. Bu kabul ile yapılan optimizasyon ve konvansiyonel optimizasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki fark %0.7 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çalışmada önerilen kısıtları tek bir frekans parametresi ile ifade etmeye yönelik metodolojinin kabul edilebilir bir kayıpla başarılı çalıştığı ve gelecekteki analizler için de kullanılabilir olduğu ve yapısal maliyetin temel rüzgâr basıncındaki artışla üstel olarak arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca rüzgâra dayanıklı yapı tasarımının en önemli parametresi temel rüzgâr basıncıyken yönetmeliklerde çok geniş bölgeler için aynı basıncın kullanıldığı ve bunun gerçekçi olmadığı belirtilmiştir.

Spence ve Giofrè (2012) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr iklimi etkileri ve aerodinamiğin yönsel özelliklerini de içeren bir optimizasyon çerçevesi önerilmiştir. Rüzgâr etkileri altında tasarım için popülerleşmeye başlayan performans odaklı yaklaşıma bazı eleştiriler getirilmiştir. İlgili yöntemin deprem mühendisliğinde gösterdiği başarıdan dolayı rüzgâr mühendisliğine adapte edilmeye çalışıldığı ancak doğrudan rüzgâr mühendisliğine uygulanmasının türbülans, bağımsız akış ve girdap kopması gibi etkiler yüzünden imkânsız olduğu belirtilmiştir. Bu durumun yol açtığı belirsizliklerin en iyi ihtimalle optimizasyonun amacını engelleyebileceği, daha da kötü bir senaryoda güvensiz binalara neden olabileceği ileri sürülmüştür. Çalışmada önerilen optimizasyon modeli deterministik olmayıp bazı olasılıksal parametreler içermektedir. Amaç fonksiyonu olarak yapı ağırlığı, tasarım değişkenleri olarak da AISC profil listelerinden uygun elemanları seçtirecek ayrık uzay değişkenleri tanımlanmıştır. Çalışmanın sonucunda yaygın yöntemler kullanılarak yapılan optimizasyonlar ile rüzgâr iklimi ve aerodinamiğin olasılıksal olarak etkilediği yaklaşım arasında kesit elemanları bazında %30'lara varabilen farkların oluşabileceği belirtilmiştir. Gomez, Spencer ve Carrion (2021) tarafından da deterministik yöntemlere benzer eleştiriler getirilerek yüksek binaların yapısal sistemlerinin stokastik rüzgâr yükleri altında topoloji optimizasyonu için metodoloji sunulmuştur. Optimizasyon için gradyan tabanlı bir algoritma tercih edilmiştir. Rüzgâr yüklerinin stokastik olarak modellendiği bir diğer optimizasyon çalışması da Subgranon ve Spence (2021) tarafından yapılmıştır. Modifiye edilmiş bir GA türevi kullanılarak az katlı bir bina ve yüksek bir bina için vaka çalışmaları sunulmuştur.

Deng, Fu, Zheng, Wu ve Pi (2019) tarafından yapılan çalışmada performansa dayalı rüzgâra dayanıklı yapı optimizasyonu için bir tasarım çerçevesi sunulmuştur. Yerel meteoroloji istasyonlarından elde edilen rüzgâr hızı ve rüzgâr yönüne ilişkin veriler ile rüzgâr tüneli

testlerinden elde edilen rüzgâr yükleri esas alınmıştır. Rüzgâr etkisindeki yüksek binaların performansının araştırılması için rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, doğal frekans ve sönüm oranının olasılıksal dağılımından faydalanılmıştır. Optimizasyon için OC algoritması tercih edilmiş olup sunulan yöntemin yeteneklerini gösterebilmek için CAARC tarafından sunulan 60 katlı binanın optimizasyonu yapılmıştır. Yapısal elemanların kesit boyutları tasarım değişkenlerini oluştururken amaç fonksiyonu için toplam yapı ağırlığı seçilmiştir. Girdi parametrelerinde olasılıksal ve rastgele ifadeler bulunduğu için rüzgâr kaynaklı tepkide de bir miktar rastlantısallık bulunmaktadır. Dolayısıyla kısıtlar için deterministik tanımlamalar yapılmamış, onun yerine başarısızlık olasılıkları dikkate alınmıştır. Sayısal örneğin çözümünde sadece yer değiştirme kısıtları ile %44.4, ivme ve yer değiştirme kısıtları ile %42.8 ağırlık azaltıldığı raporlanmıştır. Sonuç olarak, tanımlanan rastlantısal parametrelerin gerçeği yakınsamak konusunda daha makul olduğu ve önerilen yöntemin rüzgâra dayanıklı tasarımda pratik olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

#### 4.1 Tartışma

Rüzgâra bağlı yapısal optimizasyon çalışmaları incelendiğinde, optimizasyon kısmının herhangi bir yük altında yapılan optimizasyon çalışmaları ile paralel ilerlediği görülmüştür. Çalışmalardaki temel farklılığı rüzgâr yükünün nasıl belirleneceği ve değerlendirileceği konusundaki görüş farklılıkları oluşturmaktadır. Bu bağlamda deprem mühendisliği için benimsenmiş performans odaklı tasarımın uyarlamasına ilişkin pek çok çalışma bulunduğu gözlenmiştir. Performans odaklı yaklaşım için belirlenecek hedeflerde de çeşitli görüşler bulunmaktadır. Bunun aksine performans odaklı tasarımın rüzgârın doğasından kaynaklanan bazı etkiler nedeniyle uygulanamaz olduğunu savunan, rüzgâr yüklerinin ve etkilerinin stokastik olarak modellenmesi gerektiğini ifade eden karşıt bir görüş de bulunmaktadır.

Rüzgâr yüklerinin belirlenmesi için AŞO'daki gibi vekil modelleme ihtiyacının bulunmadığı görülmüştür. Bu durum rüzgâra bağlı yapısal optimizasyon çalışmalarında yapı şeklinin genellikle korunarak yalnızca taşıyıcı sistem üzerinde değişikliklere gidilmesinden kaynaklanmaktadır. Buradan hareketle, REAYO çalışmalarının AŞO'ya göre, rüzgâr yüklerinin belirlenmesi bakımından, hesaplama maliyetinin düşük olduğu söylenebilir. Bu durum araştırmacılara, HAD simülasyonları ya da HAD simülasyonları ile oluşturulmuş vekil modellere ihtiyaç duymaksızın rüzgâr tüneli analizlerini de yaygın olarak kullanabilecekleri geniş bir çalışma alanı sağlamıştır. Bazı çalışmalarda rüzgâr tüneli analizleri ile bazı rüzgâr yükü yönetmeliklerinin de kıyaslandığı görülmüştür.

Kimi çalışmalarda rüzgâr yükü yönetmelikleri ile rüzgâr tüneli analizleri neticesinde elde edilen yükler birbirine oldukça yakın bulunurken (Zhao ve diğ., 2020) kimi çalışmalarda ise modern rüzgâr yükü yönetmeliklerinin güncel gerekleri sağlamadığı noktasında ciddi eleştirilerde bulunulmuştur (Xu ve diğ., 2021).

Kullanılan optimizasyon algoritmaları incelendiğinde, yerel ekstremum noktalarında takılma olasılıklarının görece yüksek olmasına rağmen gradyan tabanlı

algoritmaların yaygın olarak tercih edildiği, gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan görece modern algoritmalar ise GA, PSO ve HSA gibi algoritmaların az sayıda çalışmada kullanıldığı gözlenmiştir. REAYO problemlerinin AŞO gibi yüksek hesaplama maliyetli HAD simülasyonlarına ihtiyaç duymadığı için metasezgisel algoritmalar ile de rahatlıkla ele alınabileceği, modern yöntemlerin kullanımı ile başarımın da artırılabilirliği düşünülmektedir. Bu bölümde incelenen çalışmalar Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3

## İncelenen REAYO Çalışmaları

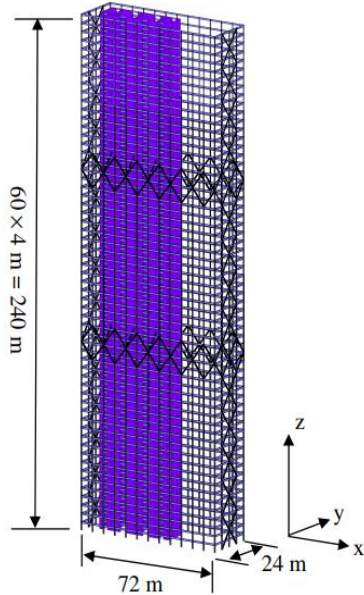
Yazar ve Yıl	Amaç	Uygulama	Rüzgâr Yükü	Optimizasyon	Amaç Değeri
Chan ve Huang (2010)	Yüksek binaların RDOYT için performans bazı tasarım çerçevesi sunmak	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	OC	Maliyet
Chan ve diğ. (2010)	Yüksek binaların eşdeğer statik rüzgâr yükleri altında yanal rijitlik dağılımı optimizasyonu	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	OC	Maliyet
Li ve diğ. (2011)	Mikro GA kullanarak rüzgâr kaynaklı tepki analizi ve minimum maliyet optimizasyonu	30 katlı bina	Ampirik formül	Micro-GA	Maliyet
Huang ve diğ. (2012)	Yüksek binalarda performansına dayalı RDOYT	60 katlı CAARC binası	İstatistiksel yöntemler	OC	Maliyet
Spence ve Giofrè (2012)	Olasılıksal etkilerle RDOYT	74 katlı bina	Rüzgâr tüneli ve Stokastik yöntem	OC	Ağırlık
Shahrouzi ve diğ. (2015)	Yüksek çelik binaların yerçekimi ve rüzgâr yükleri etkisinde ağırlık minimizasyonu	10, 20 ve 30 katlı çelik binalar	İran Rüzgâr Yükü Yönetmeliği	PSO HSA MBO	Ağırlık
Huang ve diğ. (2015)	Elastik ötesi davranışları ile birlikte performans odaklı optimum tasarım	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	Augmented OC	Maliyet
Huang (2017)	Rüzgâr etkisi altında performans bazı optimum tasarım	40 katlı bina	Rüzgâr tüneli	Augmented OC	Maliyet
Li ve Li (2016)	Düzensiz forma sahip yüksek binalarda rüzgâr etkileri altında optimizasyonu	60 katlı L formulu bina	Rüzgâr tüneli	Özyinelemeli OC	Ağırlık
Fu ve diğ. (2018a)	Kullanıcı konforunu da dikkate alacak bir RDOYT yöntemi sunmak	60 katlı CAARC binası	İstatistiksel yöntem	OC	Ağırlık
Fu ve diğ. (2018b)	Doğrusal ve doğrusal olmayan kafes yapıların rüzgâra dayanıklı optimizasyonunu	Kule tipi kafes sistem	Literatürden	OC	Ağırlık
Fu ve diğ. (2018c)	Rüzgâr etkisi altındaki yüksek binaların frekans kısıtlı optimizasyonu	60 katlı CAARC binası	Rüzgâr tüneli	Modifiye OC	Ağırlık
Deng ve diğ. (2019)	Stokastik parametreler ile elde edilen rüzgâr etkileri ile performans bazı optimizasyon	60 katlı CAARC binası	Meteorolojik veriler ve rüzgâr tüneli	OC	Ağırlık
Athanasios ve diğ. (2020)	Fu ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmaya eleştirir	-	-	-	-
Li ve diğ. (2020)	Yüksek binaların rüzgâr etkisi altında ağırlık minimizasyonu	60 katlı CAARC binası	Eşdeğer statik rüzgâr yükü	GA	Ağırlık
Xu ve Zhao (2020)	Sofistike yapısal sistemler için rüzgâr altında optimum tasarım	Guangzhou West Tower	Rüzgâr tüneli ve Çin Bina Yük Yönetmeliği (GB50009-2012)	NITRO	Maliyet
Kim ve diğ. (2020)	Bağlantılı yüksek binalar için rüzgâra dayanıklı optimum tasarım	Dikdörtgen kesitli bağlantılı yüksek bina	Rüzgâr tüneli	GA	Yer değiştirme ve ivme
Tsavdaridis ve diğ. (2020)	Kafes tipi telekomünikasyon direkleri için rüzgâr ve kar yükü altında optimum tasarım	Telekomünikasyon kulesi	Avrupa yönetmelikleri (BS EN 1991-1-4, DIN 4131, BS EN 1993-3-1, DIN 1991)	SIMP	Ağırlık
Zhao ve diğ. (2020)	Soğutma kulelerinin rüzgâra bağlı optimum tasarımı	Soğutma kulesi	Rüzgâr tüneli	Izgara arama + gradyan tabanlı algoritma	Maliyet
Xu ve diğ. (2021)	HFFB deneylerine dayalı olarak yüksek binaların yapısal optimizasyonunu	46 katlı basitleştirilmiş CAARC binası	Rüzgâr tüneli	MATLAB fmincon	Malzeme maliyeti
Gomez ve diğ. (2021)	Stokastik rüzgâr yükleri ile topoloji optimizasyonu	76 katlı bina	Stokastik yöntem	SIMP	Muhtelif
Subgranon ve Spence (2021)	Stokastik simülasyon tabanlı optimizasyon yaklaşımı geliştirmek	2 ve 37 katlı binalar	Stokastik yöntem	Modifiye GA	Malzeme hacmi

## 5. Sönümleyici Sistemler ile Rüzgâra Dayanıklı Optimum Tasarım (SSRDOT)

Sönümleyici sistemler, özellikle deprem etkileri gibi kritik yükler karşısında gelen enerjiyi soğurarak yapı davranışını doğrusallaştırma noktasında ciddi katkılar sundukları için yaygın olarak tercih edilirler. Bu nedenle rüzgâra dayanıklı yapı tasarımı için de umut verici

çözümler olarak düşünülmektedirler. Bazı çalışmalarda sönümleyici sistemler de REAYO başlığının altında değerlendirilirken bu çalışmada ayrı bir başlıkta incelenmeleri uygun görülmüştür. Bunun nedeni SSRDOT yöntemlerinin gerek optimizasyon hedeflerini oluşturan amaç fonksiyonları gerekse kısıtlamalar bakımından REAYO ile önemli farklılıklar içermesidir.

Huang, Tse, Chan ve Lou (2011) tarafından yapılan çalışmada rüzgâra dayanıklı binaların tasarımı için yapısal optimizasyon ve vibrasyon kontrol sistemlerinin birlikte kullanımı entegre edilmeye çalışılmıştır. Sönümleyici olarak STMD (Smart Tuned Mass Damper) tercih edilmiştir. Amaç fonksiyonunda malzeme maliyetinin yanına sönümleyici sistemlerin kurulum ve işletme maliyetleri de dâhil edilmiştir. Kısıt olarak eleman gerilmeleri, göreceli kat ötelenmeleri ve ivme değerleri seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak OC algoritması tercih edilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için 60 katlı dikdörtgen planlı ve 240m yüksekliğe sahip bir bina üzerinde uygulama yapılmıştır. Rüzgâr etkilerinin anlaşılması amacıyla binanın 1:400 ölçekli modeli üzerinde rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır. Yapısal optimizasyon, titreşim kontrolü ve ikisinin birlikte kullanıldığı entegre yöntem için üç farklı analiz yapılmıştır. Yapısal optimizasyon ve titreşim kontrolü kısıtlarının ayrı ayrı sağlanması için bina maliyeti %10 civarında artarken entegre yöntemde %3.6 artış olduğu raporlanmıştır. Buradan hareketle entegre yöntemin daha umut verici olduğu bildirilmiştir. Optimizasyon problemine ilişkin bir görsel Şekil 15'te sunulmuştur. Ayrıca, pasif titreşim kontrol sistemlerinin belirli bir koşul için tasarlandıkları, yapısal dinamik özelliklerindeki bazı belirsizlikler ve rastgele uyarım ile devreye girmeleri nedeni ile optimizasyonu için çok fazla seçenek olmadığı, aktif sistemlerin ise maliyetlerinin fazla olduğu vurgulanarak yarı aktif titreşim kontrol sistemlerinin optimizasyon çalışmaları için daha elverişli olduğu belirtilmiştir.

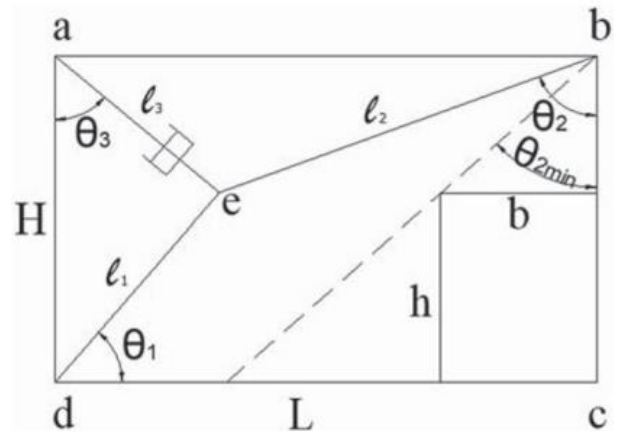


Şekil 15. Huang ve diğ. (2011) Tarafından Optimize Edilen Sistem

Venanzi, Ubertini ve Materazzi (2012) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr kaynaklı titreşimlere maruz

yüksek binalar için hibrit kontrol sistemlerinin parametreleri optimize edilmiştir. Sistem aktif ayarlı kütle sönümleyicilerden oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak eğilme ve burulma kaynaklı tepkiler seçilmiştir. Rüzgâr yükünü temsil eden fonksiyonlar rüzgâr tüneli analizleri vasıtasıyla elde edilmiştir. Aktif sisteme yapıda bulunan ivmeölçerler ile geri beslemeler yapılmıştır. Aşamalı bir optimizasyon süreci yürütülerek öncelikle sönümleyici sayısı ve konumları ele alınmış ardından ivmeölçerlerin optimum konumları bulunmuştur. 60 katlı yüksek bir binaya uygulanan vaka çalışması neticesinde önerilen tasarım prosedürünün sistemin optimal davranışını elde etmekte başarılı olduğu ifade edilmiştir.

Zhao, Guo, Ma ve Ding (2020) tarafından yapılan çalışmada yüksek binaların rüzgâra dayanıklı optimum tasarımı için mafsallı sönümleyici sistemlerinin kullanımı incelenmiştir. SQP (Sequential Quadratic Programming) ve çok dereceli kısıtlı optimizasyon yöntemlerinin entegrasyonu ile elde edilen yöntem kullanılmıştır. Sönümleyici yerleşimi, sayısı ve sönüm oranı optimize edilerek rüzgâra dayanıklı bir sistem oluşturulması amaçlanmıştır. Sönümleyici parametrelerine ilişkin optimizasyon çerçevesi Şekil 16'da sunulmuştur. Çalışmada sıralı bir optimizasyon metodolojisi izlenmiştir. İlk olarak sönümleyici sayısı, bağlantı şekli ve sönümleyici niteliklerine ilişkin parametreler optimize edilmiş ardından taşıyıcı sistem optimizasyonu yapılmıştır. Kısıt olarak yanıl ötelenme kullanılmıştır. Maliyet analizinin neticesinde incelenen yapı için %2 ilave sönüm oranı sağlayan sistem optimal olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak; optimal sönümleyici dağılımı ile rüzgâra dayanıklı bina tasarımı için oldukça başarılı sonuçlara ulaşıldığı, optimize edilmiş sönümleyicilerle sağlanan ilave sönüm oranı ile yapı davranışının iyileştirildiği bununla birlikte toplam maliyetin de azaldığı belirtilmiştir.



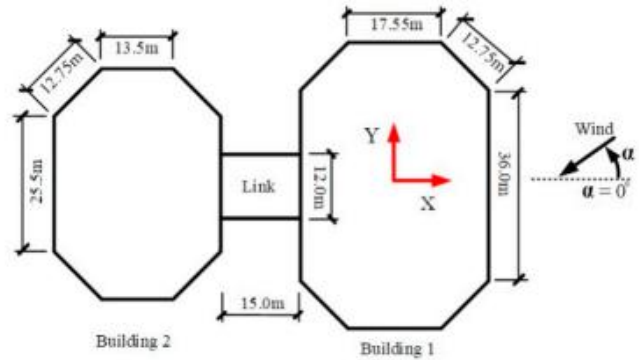
Şekil 16. Zhao ve diğ. (2020) Tarafından Optimize Edilen Sönümleyici Parametreleri

Kaveh, Javadi ve Moghanni (2020) tarafından yapılan çalışmada pasif ve ayarlı kütle sönümleyicilerin

optimum parametre ayarlamaları, yeni bir metasezgisel algoritma olan Kaotik Optimizasyon Algoritması (KOA) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çözülen iki optimizasyon probleminden birisi rüzgâr yükleri altındaki yapının ayarlı kütle sönümleyiciler ile optimum tasarımıdır. Çözülen 76 katlı yapı ve rüzgâr etkilerinin hesaplandığı ampirik formül literatürdeki bir karşılaştırma probleminden elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak katlar arasındaki maksimum ortalama karekök yer değiştirme seçilmiştir. Sonuç olarak öteleme ve ivmelerde önemli ölçüde azalma olduğu, önerilen metodolojinin yüksek binaların tasarımı için uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Zhu, Lei, Wang, Tiwari ve Hazra (2020) tarafından yapılan çalışmada bağlantılı yüksek binaların (BYB) rüzgâr karşısındaki davranışlarının iyileştirilmesi için optimum durağanlaştırıcı ayarlı kütle sönümleyici (Tuned Mass Damper Inerter - TDMI) parametreleri araştırılmıştır. Rüzgâr yüklerinin belirlenmesi için rüzgâr tüneli analizleri yapılmıştır. Oluşturulan model

ve plan görünümü Şekil 17'de sunulmuştur. Optimizasyon problemi gelişmiş bir genetik algoritma türü olan NSGA-II ile çözülmüştür. Çok amaçlı bir optimizasyon süreci yürütülerek bağlantılı iki yapıdaki en büyük ivmelerin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile konvansiyonel ayarlı kütle sönümleyicili (TMD) bina ve sönümleyici içermeyen binanın davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak parametreleri optimize edilmiş TMDI sistemin üçte bir ağırlığına rağmen TMD sistemden ve sönümleyicisiz binadan daha başarılı bulunduğu raporlanmıştır. Aynı yapısal sistem Wang, Tian, Qiao, Tiwari ve Wang (2021) tarafından yeni bir pasif kontrol sistemi olan durağanlaştırıcı ayarlı sıvı kolon sönümleyici (Tuned Liquid Column Damper Inerter) ile de optimize edilmiştir. İvmelerin ve bağlantılı binalardan birisinin yer değiştirmelerinin standart sapmaları amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Optimizasyon için MATLAB araç kutusundan çok amaç fonksiyonlu GA kullanılmıştır. Optimize edilmiş sistemin yapı davranışını ciddi oranda iyileştirdiği ifade edilmiştir.



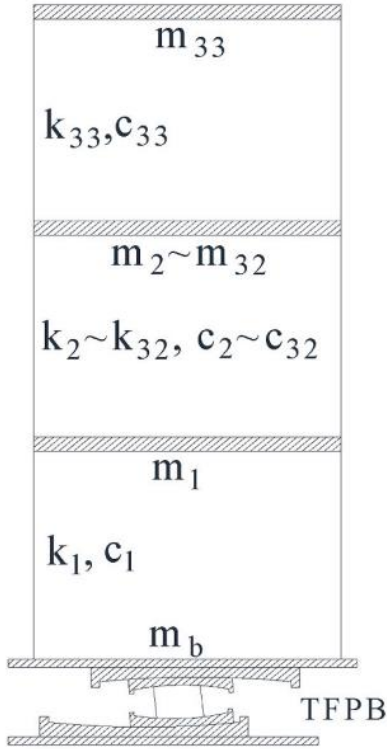
Şekil 17. Zhu ve diğ. (2020) ve Wang ve diğ. (2021) Tarafından Optimize Edilen BYB Modeli

Suthar ve Jangid (2021) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr etkisi altındaki yapıların titreşim kontrolü için ayarlı sıvı çalkantı sönümleyicilerinin (Tuned Liquid Sloshing Damper - TLSD) parametreleri optimize edilmiştir. Optimize edilen yapı ve rüzgâr yükleri literatürden elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak üst kat pik ivmesi seçilmiştir. Optimizasyon MATLAB'ın fmincon araç kutusu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen TLSD optimizasyon prosedürünün yüksek binaların rüzgâr etkilerine dayanıklı tasarımında

oldukça faydalı bulunduğu, TLSD'lerin pratik tasarımı için de kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Xu, Becker ve Guo (2021) tarafından yapılan çalışmada bir taban yalıtım elemanı olan üçlü sürtünmeli sarkaç sistemlerin parametrelerinin rüzgâr ve deprem yüklerine karşı optimize edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle deprem ve rüzgâr yükleri için ayrı optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonlar neticesinde deprem etkisi için elde edilecek optimum taban yalıtımının rüzgâr etkisi için elde edilecek sistemle çeliştiği ifade edilmiştir. Daha rijit sistemler

rüzgâr etkisi altında başarıyla daha esnek sistemlerin deprem etkisi altında daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Buradan hareketle rüzgâr etkilerinin üstesinden gelebilecek en esnek sistem parametreleri bir genetik algoritma türevi olan NSGA-II ile araştırılmıştır. Optimize edilen yapı Şekil 18’de sunulmuştur. İvme ve ötelenmeler amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Rüzgâr yükleri Çin Rüzgâra Dayanıklı Tasarım Yönetmeliği (JTG/T D-60-01-2004) ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, rüzgâr etkilerine dayanan etkili bir sismik izolasyon sistemine ulaşıldığı raporlanmıştır.



Şekil 18. Xu ve diğ. (2021) Tarafından Optimize Edilen Yapısal Sistem

Sönümleyici sistemler ile rüzgâra dayanıklı optimum tasarım konusunda açık deniz rüzgâr türbini yapıları üzerinde önemli sayıda çalışma olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr kapasitesi bakımından avantajlı olduğu için açık denizlere konumlandırılan rüzgâr türbinleri aynı etki altında oluşan yapısal tepkiler karşısında da dayanıklı olmak zorundadır. Her ne kadar daha çok makine mühendisliğinin çalışma alanında bulunsun da konunun bu inceleme çalışması kapsamında da kısaca ele alınması uygun görülmüştür. He, Hu ve Zhang (2017) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyicilerin parametre optimizasyonları GA ile gerçekleştirilmiştir. Jin ve diğ. (2018) tarafından yapılan benzer bir çalışmada yüzen rüzgâr türbini yapıları için Yapay Balık Sürüşü Algoritması (YBSA) ile ayarlı kütle sönümleyicisi optimizasyonu sunulmuştur. Alkmim, Fabro ve de

Morais (2018) tarafından yapılan çalışmada stokastik rüzgâr yükleri altındaki rüzgâr türbinlerinde, ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerin parametreleri Genelleştirilmiş Patern Arama Algoritması (GPAA) ile optimize edilmiştir. Park, Glade ve Lackner (2020) tarafından yapılan çalışmada rüzgâr tribünleri için NSGA-II ile ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerin parametre optimizasyonları yapılmıştır. Liu, Wang, Hua, Zhu ve Zhu (2021) tarafından yapılan çalışmada ayarlı kütle sönümleyiciler ile rüzgâr türbinlerinin optimum tasarımı sunulmuştur. Çalışmada GPU teknolojisi sayesinde hesaplama maliyeti düşürülmüş makine öğrenmesi teknikleri ve GA kullanılmıştır.

### 5.1 Tartışma

SSRDOT alanındaki çalışmalar incelendiğinde, optimizasyon metodolojilerinin sönümleyicilerden beklenen faydayı maksimize etmek noktasında ciddi katkılar sağladığı anlaşılmıştır. Çalışmaların büyük ölçüde deprem etkisi altındaki optimizasyon çalışmaları ile paralel şekilde yürütüldüğü; tasarım değişkenlerinin benzer şekilde sönümleyici sayısı, yerleşimi ve parametreleri üzerinden; yapı tepkilerini minimize edecek şekilde temellendirildiği görülmüştür.

REAYO çalışmaları ile SSRDOT arasında amaç fonksiyonlarının belirlenmesi açısından dikkat çekici farklar olduğu gözlenmiştir. Yapısal optimizasyon çalışmaları daha çok yapının maliyetinin ya da ağırlığının azaltılması ile ilgilenirken, sönümleyici sistemler ile yapılan optimizasyon çalışmalarında amaç fonksiyonlarının genellikle doğrudan rüzgâr kaynaklı yapısal tepkiler olarak seçildiği görülmüştür. Sönümleyici sistemlerle yapı davranışını doğrusallaştırma hedefi için optimum sistem araştırılırken, “yer değiştirme standart sapmaları” ya da “maksimum ortalama karekök yer değiştirme” gibi oldukça farklı amaç fonksiyonlarının seçilmesi dikkat çekici bulunmuştur. Yapısal optimizasyon ve sönümleyici optimizasyonunun entegre şekilde ele alındığı az sayıda çalışmada ise iki optimizasyon sürecinin maliyet ekseninde birleştirilerek değerlendirildiği görülmüştür.

Tercih edilen optimizasyon yöntemleri incelendiğinde, AŞO ve REAYO alanındaki çalışmaların aksine gradyan tabanlı algoritmaların çok az sayıda çalışmada kullanıldığı, daha yenilikçi ve global optimuma yakınsama konusunda daha başarılı bulunan ve gradyan bilgisine ihtiyaç duymayan popülasyon tabanlı metasegisel algoritmaların yaygın olarak tercih edildiği görülmüştür. Bu bağlamda SSRDOT çalışmalarının AŞO ve REAYO’ya kıyasla optimizasyon metodolojisi bakımından daha ileride olduğu ifade edilebilir. Bu bölümde incelenen çalışmalar Tablo 4’te özetlenmiştir.



Tablo 4

## İncelenen SSRDOT Çalışmaları

Yazar ve Yıl	Amaç	Uygulama	Cihaz	Rüzgâr Yükü	Optimizasyon	Amaç Değeri
Huang ve diğ. (2011)	Rüzgâra dayanıklı yapısal tasarım (RDYT) için yapısal optimizasyon ve vibrasyon kontrol sistemlerinin birlikte kullanımı	60 katlı bina	Akıllı ayarlı kütle sönümleyici	Rüzgâr tüneli	OC	Maliyet
Venanzi ve diğ. (2012)	Hibrit kontrol sistemleri ile RDYT için bir optimizasyon prosedürü sunmak	60 katlı bina	Aktif ayarlı kütle sönümleyici	Rüzgâr tüneli	GA	Eğilme ve burulma kaynaklı tepkiler
He ve diğ. (2017)	Rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyici parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı kütle sönümleyici	Simülasyon	GA	Yorulma etkisi
Jin ve diğ. (2018)	Rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyici parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı kütle sönümleyici	Simülasyon	YBSA	Yer değiştirmedeki standart sapma
Alkım ve diğ. (2018)	Stokastik rüzgâr yükleri altında rüzgâr türbinlerinin ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerinin parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı sıvı kolon sönümleyici	Stokastik	GPAA	Ortalama karekök tepki
Park ve diğ. (2020)	Rüzgâr türbinlerinin ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerinin parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı sıvı kolon sönümleyici	Simülasyon	NSGA-II	Taban eğilme momentlerinin farklı yönler için eşdeğerleri
Zhao ve diğ. (2020)	Yüksek binaların deprem ve RDYT için sönümleyici sayısı, yerleşimi ve parametre optimizasyonu	70 katlı bina	Mafsallı sönümleyici (Toggle-Brace)	Rüzgâr tüneli	SQC	Maliyet
Kaveh ve diğ. (2020)	Pasif ve ayarlı kütle sönümleyici parametrelerinin yeni bir optimizasyon algoritması ile ayarlanması	Literatürdeki 76 katlı bina	Pasif ve ayarlı kütle sönümleyiciler	Ampirik formül	KOA	Katlar arasındaki maksimum ortalama karekök yer değiştirme
Zhu ve diğ. (2020)	Bağlantılı yüksek binaların rüzgâr davranışının optimum durağanlaştırıcı kütle sönümleyicilerle iyileştirilmesi	59 ve 55 katlı bağlantılı yüksek binalar	Durağanlaştırıcı ayarlı kütle sönümleyici	Rüzgâr tüneli	NSGA-II	Pik ivme
Liu ve diğ. (2021)	Rüzgâr türbinleri için ayarlı kütle sönümleyici parametre optimizasyonu	Rüzgâr türbini	Ayarlı kütle sönümleyici	Geçek rüzgâr dağılımları	GA ve Makine öğrenmesi	Eşdeğer yorulma yükü
Wang ve diğ. (2021)	Bağlantılı yüksek binaların rüzgâr davranışının optimum durağanlaştırıcı ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerle iyileştirilmesi	59 ve 55 katlı bağlantılı yüksek binalar	Durağanlaştırıcı ayarlı sıvı kolon sönümleyici	Rüzgâr tüneli	MATLAB gamultiobj	Pik ivme ve yer değiştirme standart sapması
Suthar ve Jangid (2021)	RDYT için titreşim kontrolünde ayarlı sıvı çalkantı sönümleyicileri için parametre optimizasyonu	Literatürdeki 76 katlı yüksek bina	Ayarlı sıvı çalkantı sönümleyicilerinin	Literatürden	MATLAB fmincon	Pik ivme
Xu ve diğ. (2021)	Üçlü sürtümlü sarkaç sistemlerin optimum tasarımı ile hem depreme hem de rüzgâra dayanıklı tasarım	33 katlı bina	Üçlü sürtümlü sarkaç	Çin Rüzgâra Dayanıklı Tasarım Yönetmeliği (JTG/T D60-01-2004)	NSGA-II	İvme ve yer değiştirme

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada literatürde bulunan rüzgâr etkileri altında optimum yapı tasarımı konulu çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. Kaynak taraması neticesinde konunun aerodinamik şekil optimizasyonu, rüzgâr etkisi altında yapısal optimizasyon ve sönümleyici sistemler ile rüzgâra dayanıklı optimum tasarım adı altında üç ana başlıkta incelenmesi uygun görülmüştür. Yapılan incelemeler neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Rüzgâr etkileri altında yapı tasarımı süreçlerinin karmaşık ve elle çözümü oldukça zor optimizasyon problemleri ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Öyle ki çözümü için özellikle HAD simülasyonlarına ihtiyaç duyulan bazı problemler için modern bilgisayarların sunduğu hesaplama gücünün dahi yetersiz kaldığı açıktır. Buradan hareketle pratikte yaygın olarak kullanılan deneme-yanılma gibi yöntemlerle optimuma yaklaşmanın oldukça güç olduğu görülmüştür. Bu bağlamda güncel optimizasyon metodolojilerinin, rüzgâra dayanıklı yapı tasarımı alanında kullanılan

stratejilerin başarımlarını maksimize etmek için alternatifsiz yaklaşımlar olduğu anlaşılmaktadır.

- Literatürdeki çalışmalarda; rüzgâr etkileri altında optimum yapı tasarımının, belirtilen alt başlıklar için münferit olarak ele alındığı görülmüştür. Faydanın maksimize edilebilmesi adına sürecin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bunun için AŞO, REAYO ve SSRDOT metodolojilerinin entegre bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu bağlamda mimarlık, yapı mühendisliği, rüzgâr mühendisliği ve optimizasyon gibi alanların çok disiplinli çalışmalarına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.

- Rüzgâr yüklerinin belirlenmesinde rüzgâr tüneli analizleri, istatistiksel yöntemler, vekil modelleme, rüzgâr yükü yönetmelikleri, stokastik yöntemler gibi pek çok farklı metodolojinin kullanıldığı görülmektedir. Optimizasyonun temel girdisinin belirlenmesindeki çeşitlilik sonuçlar üzerinde de ciddi etkiler doğurmaktadır. Öyle ki uygulanan bazı yöntemlerin güvensiz olabileceği, bunlarla belirlenen rüzgâr yükleri

ile yürütülen optimizasyonların sonuçlarının da “emniyetsiz” tasarımlara neden olabileceği gibi eleştiriler bulunmaktadır. Bu bağlamda optimizasyon algoritmalarına kolayca entegre edilebilir, hesaplama maliyeti düşük, doğruluğu yüksek ve güvenilir yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışmanın birinci yazarı YÖK 100/2000 projesi kapsamında doktora bursuyla desteklenmektedir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Yazar1, Literatür araştırması, makalenin yazımı, düzeltmelerin yapılması ve yayına hazırlık; Yazar2, Araştırma sürecinin takibi, yönlendirilmesi, kontrolü, sonuçların değerlendirilmesi ve yayına hazırlık; Yazar3, Araştırma sürecinin takibi, yönlendirilmesi, kontrolü, sonuçların değerlendirilmesi, inceleme ve düzeltme konularında katkı sağlamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Abdelaziz, K. M., Alipour, A., & Hobeck, J. D. (2021). A smart façade system controller for optimized wind-induced vibration mitigation in tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 212, 104601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104601>
- Academia. Erişim Adresi: [www.academia.edu](http://www.academia.edu), ET: 10.12.2021
- Alkım, M. H., Fabro, A. T., & de Moraes, M. V. (2018). Optimization of a tuned liquid column damper subject to an arbitrary stochastic wind. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 511. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1471-3>
- Athanasiou, A., Stathopoulos, T., & Tirca, L. (2020). Discussion of “Performance-Based Wind-Resistant Optimization Design for Tall Building Structures” by Ting Deng, Jiyang Fu, Qingxing Zheng, Jiurong Wu, and Yonglin Pi. *Journal of Structural Engineering*, 146(8), 07020009. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002754](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002754)

- Bernardini, E., Spence, S. M., Wei, D., & Kareem, A. (2015). Aerodynamic shape optimization of civil structures: A CFD-enabled Kriging-based approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 154-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.011>
- Chan, C. M., & Huang, M. F. (2010). *Optimal wind resistant performance-based design of tall buildings*. Paper presented at the Structures Congress 2010: 19th Analysis and Computation Specialty Conference, Orlando, Florida.
- Chan, C. M., Huang, M. F., & Kwok, K. C. (2010). Integrated wind load analysis and stiffness optimization of tall buildings with 3D modes. *Engineering Structures*, 32(5), 1252-1261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.001>
- Deng, T., Fu, J., Zheng, Q., Wu, J., & Pi, Y. (2019). Performance-based wind-resistant optimization design for tall building structures. *Journal of Structural Engineering*, 145(10), 04019103. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002383](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002383)
- Ding, F., & Kareem, A. (2018). A multi-fidelity shape optimization via surrogate modeling for civil structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 178, 49-56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.022>
- Elshaer, A., Bitsuamlak, G. T., & El Damatty, A. (2016). *Aerodynamic shape optimization of tall buildings using twisting and corner modifications*. Paper presented at the 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Boston, Massachusetts.
- Elshaer, A., Bitsuamlak, G., & El Damatty, A. (2015). *Aerodynamic shape optimization for corners of tall buildings using CFD*. Paper presented at the 14th International conference on wind engineering, Porto Alegre, Brazil.
- Foley, C.M. (2002). *Recent advances in optimal structural design: Optimized performance-based design for buildings*. Washington, DC: ASCE.
- Fu, J. Y., Wu, B. G., Wu, J. R., Deng, T., Pi, Y. L., & Xie, Z. N. (2018b). Wind resistant size optimization of geometrically nonlinear lattice structures using a modified optimality criterion method. *Engineering Structures*, 173, 573-588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.017>
- Fu, J. Y., Wu, B. G., Xu, A., Wu, J. R., & Pi, Y. L. (2018c). A new method for frequency constrained structural optimization of tall buildings under wind loads. *The Structural Design of Tall and Special*

- Buildings*, 27(18), e1549. doi: <https://doi.org/10.1002/tal.1549>
- Fu, J., Zheng, Q., Huang, Y., Wu, J., Pi, Y., & Liu, Q. (2018a). Design optimization on high-rise buildings considering occupant comfort reliability and joint distribution of wind speed and direction. *Engineering Structures*, 156, 460-471. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.041>
- Gomez, F., Spencer Jr, B. F., & Carrion, J. (2021). Topology optimization of buildings subjected to stochastic wind loads. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 64, 103127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2021.103127>
- Google Scholar. Erişim Adresi: scholar.google.com, ET: 10.12.2021
- He, E. M., Hu, Y. Q., & Zhang, Y. (2017). Optimization design of tuned mass damper for vibration suppression of a barge-type offshore floating wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(1), 302-315. doi: <https://doi.org/10.1177/1475090216642466>
- Huang, M. (2017). *High-rise buildings under multi-hazard environment: Performance-based design optimization of wind-excited tall buildings*. Singapore: Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1744-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1744-5_7)
- Huang, M. F., Chan, C. M., & Lou, W. J. (2012). Optimal performance-based design of wind sensitive tall buildings considering uncertainties. *Computers & Structures*, 98, 7-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.012>
- Huang, M. F., Li, Q., Chan, C. M., Lou, W. J., Kwok, K. C., & Li, G. (2015). Performance-based design optimization of tall concrete framed structures subject to wind excitations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 70-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.005>
- Huang, M. F., Tse, K. T., Chan, C. M., & Lou, W. J. (2011). Integrated structural optimization and vibration control for improving wind-induced dynamic performance of tall buildings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11(06), 1139-1161. doi: <https://doi.org/10.1142/S021945541100452X>
- Jafari, M., & Alipour, A. (2021). Aerodynamic shape optimization of rectangular and elliptical double-skin façades to mitigate wind-induced effects on tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 213, 104586. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104586>
- Jaouadi, Z., Abbas, T., Morgenthal, G., & Lahmer, T. (2020). Single and multi-objective shape optimization of streamlined bridge decks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61(4), 1495-1514. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02431-3>
- Jin, X., Xie, S., He, J., Lin, Y., Wang, Y., & Wang, N. (2018). Optimization of tuned mass damper parameters for floating wind turbines by using the artificial fish swarm algorithm. *Ocean Engineering*, 167, 130-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.031>
- Kaveh, A., Javadi, S. M., & Moghanni, R. M. (2020). Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm. *Structures*, 28, 2704-2713. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.002>
- Kim, B., Tse, K. T., Chen, Z., & Park, H. S. (2020). Multi-objective optimization of a structural link for a linked tall building system. *Journal of Building Engineering*, 31, 101382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101382>
- Li, Q. S., Zou, X. K., Wu, J. R., & Wang, Q. (2011). Integrated wind-induced response analysis and design optimization of tall steel buildings using Micro-GA. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(8), 951-971. doi: <https://doi.org/10.1002/tal.569>
- Li, S., Snaiki, R., & Wu, T. (2021). A knowledge-enhanced deep reinforcement learning-based shape optimizer for aerodynamic mitigation of wind-sensitive structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(6), 733-746. doi: <https://doi.org/10.1111/mice.12655>
- Li, Y., & Li, Q. S. (2016). Wind-induced response based optimal design of irregular shaped tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 155, 197-207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.06.001>
- Li, Y., Duan, R. B., Li, Q. S., Li, Y. G., & Huang, X. (2020). Wind-resistant optimal design of tall buildings based on improved genetic algorithm. *Structures*, 27, 2182-2191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.036>
- Liu, Z., Wang, Y., Hua, X., Zhu, H., & Zhu, Z. (2021). Optimization of wind turbine TMD under real wind distribution countering wake effects using GPU acceleration and machine learning technologies. *Journal of Wind Engineering and*

- Industrial Aerodynamics*, 208, 104436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104436>
- Momtaz, A.A., Abdollahian, M.A., & Farshidianfar, A. (2017). Study of wind-induced vibrations in tall buildings with tuned mass dampers taking into account vortices effects. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 9(4), 385–395. doi: <https://doi.org/10.1007/s40091-017-0174-9>
- Mooneghi, M. A., & Kargarmoakhar, R. (2016). Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings. *Journal Of Building Engineering*, 6, 225-235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.01.009>
- Park, S., Glade, M., & Lackner, M. A. (2020). Multi-objective optimization of orthogonal TLCs for reducing fatigue and extreme loads of a floating offshore wind turbine. *Engineering Structures*, 209, 110260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110260>
- Paul, R., & Dalui, S. (2021). Shape optimization to reduce wind pressure on the surfaces of a rectangular building with horizontal limbs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 134-149. doi: <https://doi.org/10.3311/PPci.16888>
- Qiu, Y., Yu, R., San, B., & Li, J. (2022). Aerodynamic shape optimization of large-span coal sheds for wind-induced effect mitigation using surrogate models. *Engineering Structures*, 253, 113818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113818>
- Researchgate. Erişim Adresi: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), ET: 10.12.2021
- ScienceDirect. Erişim Adresi: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), ET: 10.12.2021
- Shahrouzi, M., Meshkat-Dini, A., & Azizi, A. (2015). Optimal wind resistant design of tall buildings utilizing mine blast algorithm. *International Journal Of Optimization in Civil Engineering*, 5(2), 137-150. Erişim Adresi: <http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-204-en.html>
- Spence, S. M.J., & Giofrè, M. (2012). Large scale reliability-based design optimization of wind excited tall buildings. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 28, 206-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2011.08.001>
- Subgranon, A., & Spence, S. M. (2021). Performance-based Bi-objective optimization of structural systems subject to stochastic wind excitation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 160, 107893. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107893>
- Suthar, S. J., & Jangid, R. S. (2021). Design of tuned liquid sloshing dampers using nonlinear constraint optimization for across-wind response control of benchmark tall building. *Structures*, 33, 2675-2688. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.059>
- Tsavdaridis, K. D., Nicolaou, A., Mistry, A. D., & Efthymiou, E. (2020). Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. *Structures*, 27, 2379-2399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.010>
- Venanzi, I., Ubertini, F., & Materazzi, A. L. (2012). Optimal design of an array of active tuned mass dampers for wind-exposed high-rise buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6), 903-917. doi: <https://doi.org/10.1002/stc.1502>
- Wang, Q., Tian, H., Qiao, H., Tiwari, N. D., & Wang, Q. (2021). Wind-induced vibration control and parametric optimization of connected high-rise buildings with tuned liquid-column-damper-inerter. *Engineering Structures*, 226, 111352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111352>
- Web of Science. Erişim Adresi: [www.webofscience.com](http://www.webofscience.com), ET: 10.12.2021
- Whiteman, M. L., Fernández-Cabán, P. L., Phillips, B. M., Masters, F. J., Davis, J. R., & Bridge, J. A. (2021). Cyber-physical aerodynamic shape optimization of a tall building in a wind tunnel using an active fin system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104835>
- Xie, J. (2014). Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 130, 88-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.04.004>
- Xu, A., & Zhao, R. H. (2020). Wind-resistant structural optimization of a supertall building with complex structural system. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62(6), 3493-3506. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02652-x>
- Xu, A., Lin, H., Fu, J., & Sun, W. (2021). Wind-resistant structural optimization of supertall buildings based on high-frequency force balance wind tunnel experiment. *Engineering Structures*, 248, 113247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113247>

- Xu, Y., Becker, T. C., & Guo, T. (2021). Design optimization of triple friction pendulums for high-rise buildings considering both seismic and wind loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142, 106568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106568>
- Zhang, R., Waibel, C., & Wortmann, T. (2020). Aerodynamic shape optimization for high-rise conceptual design-integrating and validating parametric design, (fast) fluid dynamics, structural analysis and optimization. *Design and Computation of Urban and Local Systems*, 1, 37-45. doi: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.1.037>
- Zhao, L., Cui, W., Zhan, Y., Wang, Z., Liang, Y., & Ge, Y. (2020). Optimal structural design searching algorithm for cooling towers based on typical adverse wind load patterns. *Thin-Walled Structures*, 151, 106740. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106740>
- Zhao, X., Guo, J., Ma, H., & Ding, K. (2020). Integrated optimal wind-resistant design of super-tall structures with toggle-brace damper systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(16), e1799. doi: <https://doi.org/10.1002/tal.1799>
- Zhu, Z., Lei, W., Wang, Q., Tiwari, N., & Hazra, B. (2020). Study on wind-induced vibration control of linked high-rise buildings by using TMDI. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 104306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104306>

## SMART MATERIALS AND THEIR ADVANCED BIOMEDICAL APPLICATIONS: HNT AND HNT-POLYMER COMPOSITES

Sultan BUTUN SENDEL<sup>1\*</sup>, Nilay TUNCA<sup>2</sup>, Hatice DEVECİ<sup>3</sup>, Harun BAS<sup>3</sup>, Vural BUTUN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Biomedical Engineering, Eskisehir, Turkey

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7036-2224>

<sup>2</sup>Ege University, Biomedical Technologies Department, Izmir, Turkey

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-4314-6096>

<sup>3</sup>Eskisehir Osmangazi University, Polymer Science and Technology Department, Eskisehir, Turkey

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-7386-2213>

<sup>3</sup>Eskisehir Osmangazi University, Polymer Science and Technology Department, Eskisehir, Turkey

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-6783-4964>

<sup>4</sup>Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Science, Department of Chemistry, Eskisehir, Turkey

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-4542-5080>

### Keywords

Halloysite nanotube  
HNTs  
Clay  
HNT-polymer composite,  
Biomedical applications

### Abstract

The aluminosilicate clay minerals ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ ) known to exist in nature are called halloysite nanotubes (HNTs). HNTs, which are found in layered, spherical, flat and other forms, can be obtained naturally as well as synthetically. HNTs with an outer diameter of 50 nm and a length ranging from 500 to 1000 nm have a hollow and nanotube-shaped structure. It has natural deposits in Brazil, Turkey, New Zealand, China, the United States, Korea, Japan, and France, and it is a low-cost material that can be obtained through ore purification. Thanks to their high surface area, large pore volume, rheological properties, high interactions, and high binding capacities with biopolymers, HNTs are used in a wide range of areas. For example, HNTs have become a frequently used material in environmental applications such as wastewater treatment and removal of organic contaminants and dyes. It is also used in the production of nanoelectronics and nanocomposites, catalytic studies, flame retardants in make-up materials, forensic sciences and biomedical fields. The specific properties of HNT used in the biomedical field lead to numerous applications. In this review, it is aimed to present the advantages of HNTs for use in drug delivery systems, immune therapy, anti-infection applications, cancer therapy, bioimaging, biosensing applications, tissue engineering applications, implants and hygiene-cosmetics materials.

## AKILLI MALZEMELER VE İLERİ BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI: HNT VE HNT-POLİMER KOMPOZİTLERİ

### Anahtar Kelimeler

Halloysit nanotüp  
HNT'ler  
Kil  
HNT-polimer kompozit  
Biyomedikal uygulamalar

### Öz

Doğada var olduğu bilinen alüminosilikat kil minerallerine ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ ) halloysit nanotüpler (HNT'ler) olarak adlandırılır. Katmanlı, küresel, yassı ve diğer formlarda bulunan HNT'ler sentetik olarak elde edilebildiği gibi doğal olarak da elde edilebilmektedir. Dış çapı 50 nm ve uzunluğu 500 ile 1000 nm arasında değişen HNT'ler içi boş ve nanotüp şeklinde bir yapıya sahiptir. Brezilya, Türkiye, Yeni Zelanda, Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Kore, Japonya ve Fransa'da doğal yatakları bulunan ve cevher saflaştırma yoluyla elde edilebilen düşük maliyetli bir malzemedir. HNT'ler, yüksek yüzey alanları, büyük gözenek hacimleri, reolojik özellikleri, yüksek etkileşimleri

\* Sorumlu yazar; e-posta: [sultanbutun.sengel@ogu.edu.tr](mailto:sultanbutun.sengel@ogu.edu.tr)



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ve biyopolimerlerle yüksek bağlanma kapasiteleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılırlar. Örneğin, HNT'ler atık su arıtımı ve organik kirleticilerin ve boyaların uzaklaştırılması gibi çevresel uygulamalarda da sıklıkla kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Ayrıca nanoelektronik ve nanokompozitlerin üretiminde, katalitik çalışmalarda, makyaj malzemelerinde alev geciktiricilerde, adli bilimlerde ve biyomedikal alanlarda da kullanılmaktadır. Biyomedikal alanda kullanılan HNT'nin kendine özgü özellikleri çok sayıda uygulama için alternatif bir malzemedir. Bu derlemede, HNT'lerin ilaç taşıyıcı sistemler, immün terapi, anti-enfeksiyon uygulamaları, kanser tedavisi, biyogörüntüleme, biyoalgılama uygulamaları, doku mühendisliği uygulamaları, implantlar ve hijyen-kozmetik malzemelerinde kullanım avantajlarının ortaya konulması amaçlanmaktadır.

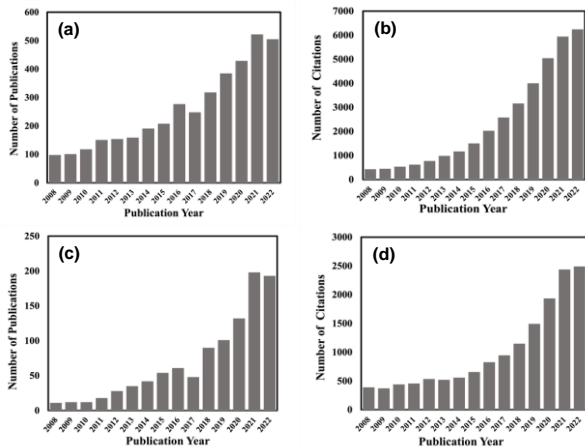
Derleme Makale		Review Article	
Başvuru Tarihi	: 15.11.2022	Submission Date	: 15.11.2022
Kabul Tarihi	: 22.08.2023	Accepted Date	: 22.08.2023

## 1. Introduction

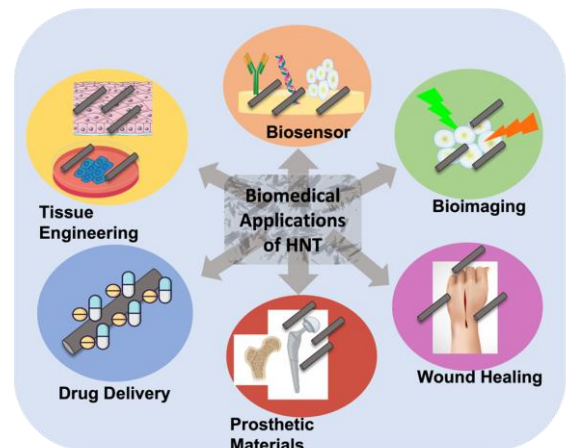
In the modern world, studies on protecting or improving human health have gained momentum with the development of technology. Depending on this rapid development, it is expected to produce new and superior materials in the biomedical field. In recent years, studies of many researchers around the world in the biomedical field have contributed to the development of new products. Scientists have benefited from materials that exist both in nature and subsequently produced for use in biomedical applications. One of these materials is halloysite nanotubes called HNT.

Various studies have been carried out on HNTs, which were named as Halloysite for the first time by M. Berthier, since the 1940s. In the Scopus database, it has been determined that the publications related to HNTs and their studies in the biomedical field have increased in the last 15 years, and the diagram of the increasing number of studies and the number of citations of the publications is presented in Figure 1. Based on this research, when studies in both academic and industrial fields are examined, it is predicted that the use of HNTs in different fields will increase in the future.

HNTs are clay materials obtained from aluminosilicate kaolin layers commonly found in nature. Nanomaterials attract the attention of researchers thanks to their prominent features such as being cheap and biocompatible, and having good thermal and mechanical properties. Halloysite clay minerals are used as corrosion inhibitor in implants, bioimaging, drug delivery, biosensor, tissue engineering, cancer diagnosis/treatment applications, etc. used in nanomedicine and biomedicine applications (Figure 2).

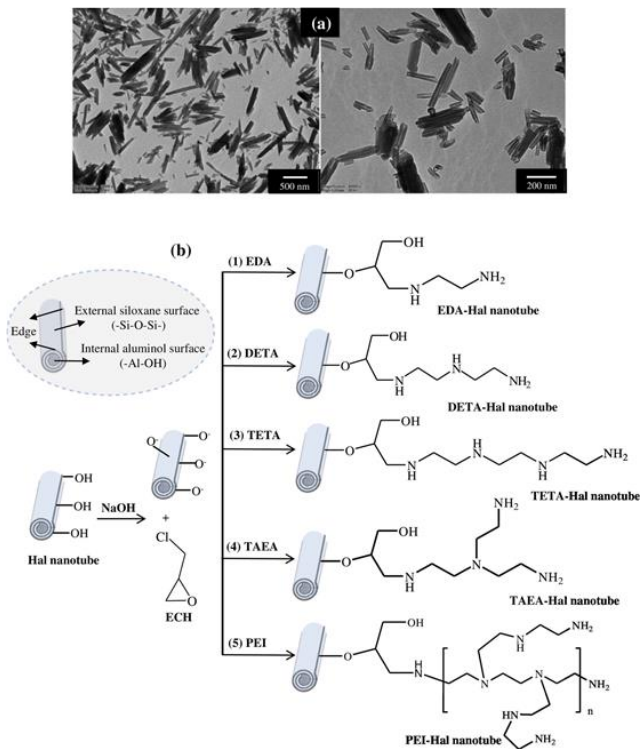


**Figure 1.** Schematic representation of the increase in the number of halloysite-related publications in the Scopus database from 2008-2022 (a), and the number of citations in the studies on HNT in the last 15 years (b), publications on the use of HNT, including the biomedical field, between 2008 -2022, according to the Scopus database (c), number of citations in the publications about HNT in the biomedical field in the last 15 years (d).



**Figure 2.** Biomedical applications of HNTs.

Halloysite is a clay mineral with the chemical formula  $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$  and composed of layered silicates (Prishchenko et al., 2018; Guimaraes et al., 2010; Yah et al., 2012). Halloysite is a bilayer aluminosilicate chemically like kaolin and has a predominantly hollow luminal structure (Danyliuk et al., 2020). The approximate dimensions of the material consisting of these multi-walled tubes can be as follows; length: 200 nm-1.5  $\mu m$ , inner diameter: 10-30 nm, outer diameter: 50 nm. (Guimaraes et al., 2010). The hydrophilic voids of halloysite nanotubes are larger in HNTs compared to carbon nanotubes. These voids can be filled with chemicals and smaller nanoparticles. In addition, halloysites have the advantageous property that one of their surfaces is negative and one is positive, allowing the charged surfaces to be selectively modified. (Glotov et al., 2019; Wei et al., 2014). The empty lumen that HNTs have in their structure allows different molecules to be loaded. The modification procedure can be determined for the selected application. Sahiner and Sengel (2017) benefited from the chemically modifiable properties of the HNT surface in their work. The TEM images of the studies using amine-based modification agents and the schematic representation of the modification step are given in Figure 3.

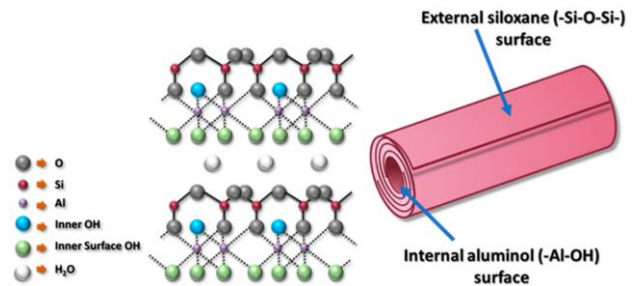


**Figure 3.** (a) TEM images of bare Hal nanotube at different magnifications, and (b) schematic representation of Hal nanotube modification with amine based modifying agents: (1) EDA-Hal nanotube, (2) DETA-Hal nanotube, (3) TETA-Hal nanotube, (4) TAEA-Hal nanotube, (5) PEI-Hal nanotube. (Adapted with permission from Sahiner and Sengel, 2017, Copyright (2017) Elsevier)

HNTs are very suitable for use in biomedical applications with their high biocompatibility (Biddeci et al., 2022; Kushwaha et al., 2021; Satish et al., 2019; Cheng et al., 2020).

## 2. Halloysite Nanotubes

Materials such as carbon, graphite, silica are among the nanofilling materials. Nano fillers improve the properties of materials. Halloysite nanotubes is one of these materials. Raw halloysite is obtained from altered rocks, saprolites and soil, in short from nature. Halloysite deposits are available in many different countries. In this way, HNTs are cost-effective materials. While some may be light red, most are white in color. In addition, halloysites are generally tubular in nature. Halloysite mineral is named after Omaliusd Halloy who discovered it for the first time. Halloysite nanotubes were defined by M. Berthier in 1826 as a hydrated polymorph of kaolinite type, dioctahedral 1:1 clay mineral. Although halloysite is chemically similar to kaolinite, the interlayers of HNTs are separated by a single water molecule layer. The molecular formula of halloysite is  $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ . When  $n=2$  in the formula, halloysite is in hydrated form and is called as "hallosite-(10 Å)". The structure of HNTs is presented schematically in Figure 4.



**Figure 4.** Schematic representation of the crystal structure of HNTs (Kamal et al., 2019).

If  $n=0$ , that is its anhydrous structure, halloysite is called as "halloysite-(7 Å)" (Yuan, et al., 2015). The specific surface area of HNTs is between 22.1 and 81.6  $m^2 \cdot g^{-1}$ , lumen area is between 10.7% and 39%, pore area is 14-46.8%, average pore size is between 79.7-100.2 Å (Liu et al., 2014; Fizir et al., 2018). HNTs consist of a positively charged tubule lumen and a negatively charged outer shell. The fact that the tubule lumen and the outer shell have different functional groups facilitates modification. This provides an advantage for different applications such as drug release applications.

## 3. Biomedical application of HNT and polymer composites

### 3.1. Delivery System

In controlled drug release systems, the release occurs via a carrier. The carrier can be implanted in the patient's body or given by injection. Some factors can affect and slow the rate of drug release. Clay-polymer



composites, hydrogel composites, etc. are some of the structures that can slow drug release. Halloysite nanotubes are natural minerals that can play a role in controlled drug release.

Shi *et al.* (2011) investigated a new gene delivery system. They functionalized HNTs with  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane [APTES] for intracellular delivery and then used anionic antisense oligodeoxynucleotides [ASODNs] f-HNTs in the drug delivery system as a therapeutic gene. They formed f-HNT-ASODN complexes by binding to their surfaces. The cytotoxic effect of this complex on tumour cells was investigated. They observed that the obtained complex had low cytotoxicity and that its antitumor activity could be increased. Thus, they concluded that the HNTs studied in this study could serve as good carriers for gene therapy and biological delivery systems.

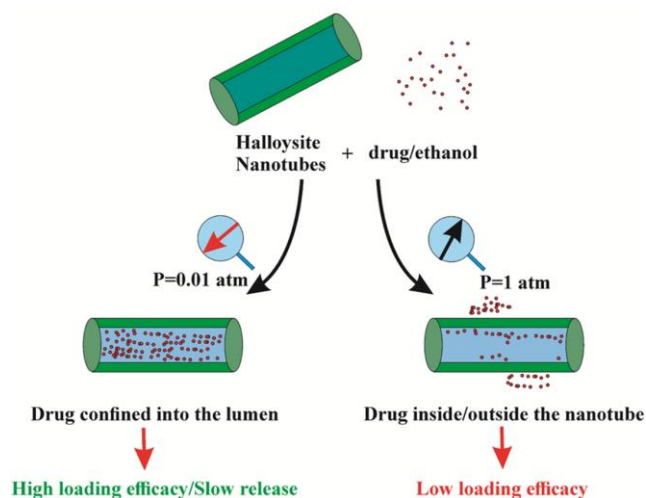
In another study reported by Long *et al.* (2017), HNTs were designed as a non-viral gene vector for gene therapy study and shortened to about 200 nm to increase the effect of endocytosis. Then, polyethyleneimine (PEI) grafting was performed to bind pDNA-tagged green fluorescent protein (GFP). PEI-g-HNTs showed low cytotoxic effect and high transfection efficiency and emerged as a promising study in applications such as gene therapy against some diseases.

De Kruif *et al.* (2016), designed the Nanoparticles-in-Microsphere Oral System (NiMOS) for protein delivery. Accordingly, BSA, selected as the model protein, was loaded into the magnified HNTs and the loaded HNTs were placed in microgels by the prilling method. This synthesized new structure revealed that even after *in vitro* digestion of the model drug, it did not undergo much enzymatic degradation and was preserved at a rate of 82%. Thus, this new approach has been a promising development for the delivery of proteins and macromolecules.

HNTs are the material used in drug delivery systems to penetrate the cell membrane of drugs and increase their solubility in the biological environment. This study as reported by Massaro *et al.* (2022) is the first example of the use of an HNT-based nanocarrier labelled with halochromic oxazine molecules. The reason for the use of HNT-based nanocarriers here is to ensure the delivery of a single-stranded peptide nucleic acid tetramer (PNATs) into the cell line. It was observed that despite the covalent binding of PNA to the outer surface of HNTs, its binding with different active species remained intact. In addition, covalent binding of PNA provided an oscillation in an acidic medium.

Long *et al.* (2018) synthesised polyamidomine-grafted halloysite nanotubes (PAMAM-g-HNTs) to be used to reduce the expression of the vascular endothelial growth factor (VEGF) gene in breast cancer cells through intracellular delivery of siRNA and gene

therapy. The cytotoxic effect of PAMAM-g-HNTs was examined against HUVEC (84.7%) and MCF-7 cells (82.3%) and showed good cytocompatibility even at high concentrations. The efficacy of PAMAM-g-HNTs/siVEGFs in the treatment of cancer was tested in 4T1-carrying mice and found to have higher anti-cancer activity. Lisuzzo *et al.* (2021), provided the loading of drug molecules dissolved in ethanol to halloysite nanotubes by using ethanol as a solvent. In the study, drug loading performance and release kinetics were investigated depending on the pressure conditions (Figure 5). The work of Lisuzzo *et al.* provides a guide for the development of halloysite nanotube-based carriers with tunable drug delivery.



**Figure 5.** Schematic representation of the effect of different loading conditions on the properties of drug-loaded halloysite nanotube carriers (Lisuzzo *et al.*, 2021).

The synthesis of chitosan-coated nanocomposites for long-term drug delivery was recently published by Paul *et al.* (2022). According to this study, HNTs were loaded with diclofenac sodium and then a chitosan nanocomposite was prepared. The biocompatibility of the prepared HNT/diclofenac loaded chitosan composite was tested with human endothelial cells, and it was found that it showed more than 80% viability. According to this result, the usability of the synthesized HNT-based nanocomposites in wound healing and drug delivery systems has been demonstrated.

Halloysite is one of the clay minerals with the maximum efficiency in nano drug carriers. Therefore, Barmen *et al.* (2020) used norfloxacin as a model drug and used HNT to evaluate the antibacterial effect of this drug. In addition, *in-vitro* release studies were carried out by embedding chitosan into the norfloxacin-loaded HNTs to prepare bio-nanocomposite films. Accordingly, norfloxacin-loaded HNTs were found to be effective against gram-positive and gram-negative bacteria. In vitro drug release from FN (chitosan alone) and F4 (halloysite-loaded chitosan) samples were recorded at

6 hours as 41% and 31%, respectively, and it was shown that halloysite-loaded chitosan had a more sustained effect on drug release. The biocompatibility of halloysite/chitosan nanocomposites and their stability in the aqueous environment, as well as their usability in biomedical applications including drug delivery and wound healing, resulted to this study.

Saleh *et al.* (2021) used HNT as a drug carrier to penetrate the rat-brain microvascular endothelial cell membrane and deliver cargo. HNTs were labelled with rhodamine B isothiocyanate (RITC) followed by prolonged drug release using ionomycin. Accordingly, ionomycin effectively released its charges *in vitro* over a long period of time. The penetration of HNTs was tested with a blood-brain barrier model using endothelial and astrocyte cells, and it was observed that HNTs were able to cross this model barrier. Thus, it has been shown that HNTs can potentially be used in drug delivery systems.

In another study, Arshad *et al.* (2022) aimed to reduce the coagulation time by applying chitosan (CHT) and microcomposites (MC) together with HNTs. Accordingly, percent loading and percent release were investigated to confirm the sustained releases of ciprofloxacin-loaded CHT/HNTs MCs. A total of 75% penetration of ciprofloxacin into the rat intestinal membrane was observed within 3 hours. Bleeding disorders in LGIB have been controlled with another similar antibacterial agent, such as ciprofloxacin, to assist in the development of drug carriers.

Successful preparation of cross-linked cellulose/HNT composite hydrogels were reported by Huang *et al.* (2017). These composite hydrogels were loaded with curcumin, which is used as a model drug, and its effect on cancer cells was examined. They reported a good inhibition effect on MCF-7 cells. In addition, its cytotoxicities in both MC3T3-E1 and MCF-7 cells were investigated, and it was observed that it exhibited good biocompatibility in both cells. As a result, the HNT-based hydrogels have emerged as a promising development in applications such as drug delivery systems.

Kurczewska *et al.* (2018) aimed to improve drug delivery capacity of HNTs by functionalization with polyamidoamine (Hal-PAMAM) dendrimers and 3-aminopropyltrimethoxysilane (Hal-APTS). In their study, in which chlorogenic acid, ibuprofen, and salicylic acid were used as model drugs, drug release and the effect of the synthesised material on living organisms were investigated. The release rate of chlorogenic and salicylic acid with Hal-PAMAM was observed to be quite slow but had no effect on ibuprofen release. They stated that Hal-PAMAM is a suitable material for use in biomedical applications such as the transport of drugs with small molecular sizes, since it does not have a negative effect on living organisms.

Cheng *et al.* (2020) synthesised a halloysite-based hydrogel by adding a fluorescent derivative carrying

two arylboronic acid groups and used this material to create a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-sensitive drug delivery system that produces fluorescein. Drug-loaded HNTs (DHNTs) have been characterized, and it has been proven that the drug is loaded into the nanotube cavity. In the study, it was seen that the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration affected the release, and the release was done completely and quickly with the increase in the concentration. In addition, it has also been shown that fluorescence intensity and oscillation were directly proportional each other.

Another study based on HNT as drug delivery system was reported by Hamedi and Koosha (2020). First, they loaded anthocyanins extract from black carrots to HNT. The release of anthocyanins from HNT *in vitro* was investigated by the pH-differential method and it was shown that the best mathematical model was the Korsmeyer-Peppas model. In addition, when the activities of anthocyanin-loaded HNTs against cancer cells such as MCF-7 and HT-29, the proliferation of cells was largely inhibited. Since the release of anthocyanin from HNTs is pH sensitive, it has been predicted that this system can act as a good drug carrier for inflamed tissues and cancer cells and can be used in blood sugar control.

A multitasking drug delivery system was designed by Dramou *et al.* (2018) Folic acid-chitosan oligosaccharide/magnetic HNTs (FA-COS/MHNTs) were successfully prepared for intracellular uptake of anticancer drug carriers. Camptothecin (CPT) was loaded into the lumens of FA-COS/MHNTs to examine their release profiles at different pHs. While 83% of CPT release occurred at pH 5 in 24 hours, much less release was observed at pH 6.8 and 7.4 even after 48 hours. In addition, the high cytotoxic effect of CPT-loaded nanocarriers demonstrated an extraordinary usefulness in killing cancer cells. Thus, this synthesized nanocarrier has opened a new door for the delivery of tumour-targeted medicines and various biological applications.

Li *et al.* (2016) developed an innovative nanocomposite with HNTs for ibuprofen drug release. APTES modification was carried out to improve the performance of the material.

A novel HNT-based pH-sensitive drug carrier for the release of an anti-cancer drug, doxorubicin (DOX) was reported by Hemmatpour *et al.* (2022). HNTs were coated with polydopamine and then grafted with poly(N,N-dimethylaminoethyl methacrylate) brushes onto the HNT-PDA surface *via* electron transfer in atom transfer radical polymerization. It has been shown that synthesised modified HNTs cause a pH-sensitive release and the drug loading capacity is increased approximately twice ( $185 \pm 15 \text{ mg.g}^{-1}$ ) compared to previous studies. It has also been observed that faster release occurs at pH 5.5 than at pH 7. It was thought that if the biocompatibility of the synthesized carrier could

be proven, it would be a good candidate for the transport of toxic drug molecules to acidic sites.

### 3.2. Immune Therapy and Anti-infection

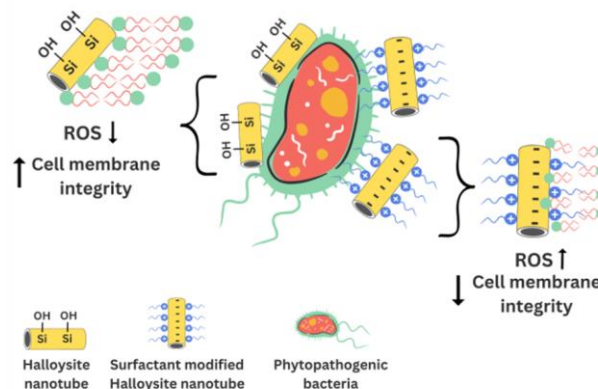
Shu *et al.* (2017a) reported antibacterial nanocomposites via preparation by incorporating Ag and ZnO nanoparticles into HNTs. The antimicrobial activities of gram-negative *E. coli* and Ag-ZnO/HNTs were tested and they observed high activity and stability. These results showed that the synthesized nano-composite is a promising candidate for use in antibacterial domains.

In another study by Shu *et al.* (2017b), A homogeneous co-precipitation method of CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles in the ethanol system was used. With this method, a modified and antibacterial CeO<sub>2</sub>-ZnO/HNTs nanocomposite was obtained on the HNT surface. The antibacterial effects of ZnO, ZnO/HNT and CeO<sub>2</sub>-ZnO/HNT nanocomposites were investigated with *E. coli* and CeO<sub>2</sub>-ZnO/HNT nanocomposites showed the best activity with 8% cell viability. Based on this result, it has been predicted that the nanocomposites could be used as a disinfectant to prevent bacterial growth and spread. In another study, Zhang *et al.* (2013). AgNPs/HNTs were synthesized using AgNPs with antibacterial activity and HNTs with highly advantageous properties. They tested the antibacterial activities of AgNP/HNTs using gram-negative and gram-positive bacteria. When the results were evaluated, they observed that the growth of *E. coli* and *S. aureus* bacteria was largely inhibited. They reported that the synthesized AgNP/HNTs could be used in the field of biomedicine.

Majumder *et al.* (2022) used different methodology to locate AgNP in HNTs. They grafted silver nanoparticles onto halloysite nanotubes after modifying with tannic acid, and a new nanocomposite (GH-TA-Ag-NT) was synthesized. The bacterial activity of the nanocomposite was tested with *E. coli* ATCC 25922, *S. aureus* ATCC 25923 and *Salmonella enterica serovar Typhimurium* bacteria and showed very good antibacterial properties. In addition, when the effect of nanocomposite in curing gastrointestinal infection was examined, it was observed that *Salmonella* colonisation was significantly reduced within 24 hours. It has been observed that this biocompatible, economical, and safe nanocomposite synthesised is effective against antimicrobial resistant bacteria and could be a new alternative source for the overuse of antibiotics.

Usage of surfactants in the modification of HNTs was reported by Abhinayaa *et al.* (2019). They obtained modified-HNTs (SM-HNT) using surfactants such as cetyl trimethylammonium bromide (CTAB), sodium dodecyl sulphate (SDS), and Tween 80 and tested them against phytopathogenic bacteria. SM-HNTs were found to be quite effective in killing *A. tumefaciens*, *X. oryzae*, and *R. Solanacearum* bacteria. Among these modified-

HNTs, CTAB-HNTs has been determined to be more effective in disrupting cell membrane integrity, suppressing growth and inhibiting biofilm formation due to its physico-chemical properties. Consequently, SM-HNTs have been shown to be a new nanomaterial that can be used to selectively control plant pathogenic bacteria. Figure 6 shows a schematic representation of the phytopathogen killing efficiency of intact Hal nanotubes and surfactant modified Hal nanotubes (SM-Hal nanotubes).



**Figure 6.** Schematic representation of the phytopathogen killing efficiency of intact Hal nanotubes and surfactant modified Hal nanotubes (SM-Hal nanotubes).

A new and viable method by designing carvacrol-loaded HNTs as an antimicrobial agent and water-based polyurethane nanocomposite coatings was demonstrated by Hendessi *et al.* (2016). The release and antimicrobial activities of carvacrol-loaded HNTs were investigated, and it was shown that carvacrol was effectively released for one week and inhibited the growth of pathogenic microorganisms. With the prepared carvacrol-HNT/PU nanocomposite films, the effect on *A. hydrophila* bacteria was investigated, and a decrease in the number of bacteria was observed. In addition, nanocomposite films have been shown to inhibit bacteria for two days. As a result, it has been predicted that prepared nanocomposites may weaken or prevent bacterial infections.

Fakhrullina *et al.* (2019) have studied halloysite-based nanocaps that are functionalized with antimicrobial effect. Accordingly, curcumin was loaded onto HNTs by the vacuum loading method and then coated with dextrin to obtain HNT's+Curc/DX nanocontainers. The antimicrobial effects of the synthesised nanocaps were investigated in vitro and it was observed that they effectively suppressed the growth of *S. marcescens* cells, while *E. coli* bacteria were not affected. In addition, the synthesised nanocaps successfully suppressed the infection in *C. elegans* nematodes infected with *S. marcescens* and extended the life expectancy of worms infected with pathogenic bacteria. According to these

results, it is thought that new applications can be found in the treatment of dysbiosis by suppressing unwanted microflora.

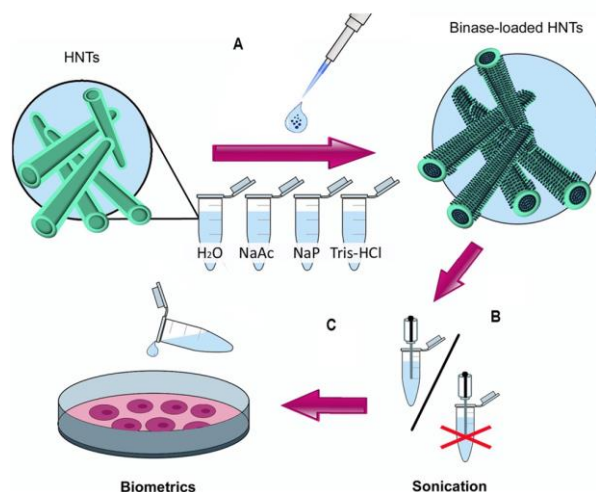
### 3.3. Cancer Therapy

Guryanov *et al.* (2020) reported a promising nanoformulation that can be used in the anticancer treatment of Prodigiosin, which is effective against various cancer cells. The effect of prodigiosin-loaded HNTs on malignant and non-malignant cells was investigated. They concluded that p-HNTs showed selective cytotoxic and genotoxic activity. By inhibiting the proliferative activity of Caco-2 and HCT116 cells, P-HNTs disrupted the F-actin structure and changed the cell morphology. As a result, the synthesised p-HNTs created an anticancer effect, and it was assumed that this effect would be effective in the treatment of living tissues *in vivo*.

Successful synthesis of HNT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites was carried out by Abhinayaa *et al.* (2018). Bacterial interactions of nanocomposites and their effects on cancerous and non-cancerous cells have been studied by various tests. HNT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was found to be less toxic to bacteria and biocompatible with non-cancerous cells. Additionally, it caused a cytotoxic effect on cancerous cells. As a result, the synthesised nanocomposite has been demonstrated to be a biocompatible nanomaterial with low toxicity to bacteria and high toxicity to cancer cells.

Liu *et al.* (2019) developed HNT nanoclusters (HNT's/siRNA complex) to efficiently deliver siRNA to target receptor-interacting protein kinase 4 (RIPK4) for the treatment of bladder cancer. HNT/siRNA complex has been shown to inhibit tumour growth and progression in cancer cells *in vivo* and *in vitro* and has no toxic effects on non-cancerous cells.

Tan *et al.* (2021) loaded HNTs with type II photosensitive indocyanine green (ICG) and labeled with Fluorescent isothiocyanate (FITC) for phototherapy. The HNTs-FITC-ICGs were then surrounded by a red blood cell membrane (RBCM). With the combination of these structures, the HNTs-FITC-ICG-RBCM nanocarrier was synthesized. We conjugated anti-EpCAM with streptavidin (SA) to HNTs-FITC-ICG-RBCM to improve specific recruitment of cancer cells. HNTs-FITC-ICG-RBCM-SA-EpCAM was designed for tumor targeting in breast cancer treatment. The photothermal and antitumor effects of the designed versatile nanoparticle were investigated. It has been reported that it exhibits anticancer activity in the presence of laser light and is highly effective in targeting cancer cells. Khodzhaeva *et al.* (2017) investigated the effect of binase with selective cytotoxicity against cancer cells immobilized on HNTs for antitumor therapy. Experimental work of immobilization of binase on HNTs is schematized in Figure 7.



**Figure 7.** Immobilization of binase on HNTs and schematic representation of cell work (Khodzhaeva *et al.*, 2017).

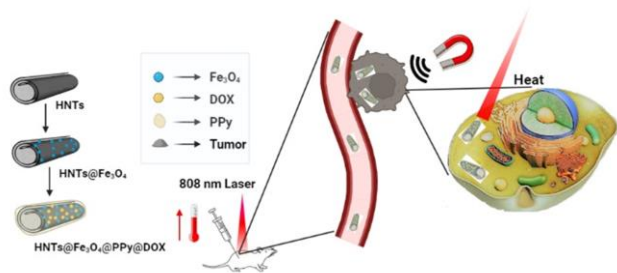
They reported that the Binaz-HNT composite has the potential to be used in clinical applications.

### 3.4. Bioimaging and Biosensing

The convenience of specific surface modifications of HNTs is utilized in various studies such as increasing drug release activities, anticancer activities and tumor targeting. In recent years, interest in HNTs in bioimaging studies has been increasing (Kurczewska *et al.*, 2018; Mo *et al.*, 2020).

Biosensors are the systems that perform analysis for the detection of a specific analyte. This analysis takes place by selective biochemical molecular recognition. In general, the system works as the recognition of the material to be analyzed, then the conversion of this analysis into a signal and the detection of the resulting signal (Kerman *et al.*, 2003). HNTs are promising materials as electrocatalysts due to their low cost, non-toxicity, compatibility with modification and thermal stability (Kokulnathan *et al.*, 2022). In addition, siloxane groups, aluminol groups and other reactive groups in the structures of HNTs are effective in the immobilization of biological species. Therefore, the use of HNTs in electrochemical sensors is advantageous. (Tully *et al.*, 2016). HNTs are materials that have been widely used in biosensor studies in recent years.

Luo *et al.* (2020) have developed multifunctional nanoparticles for imaging and treatment in breast cancer by forming Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles fixed on the outer surfaces of HNTs, and composites made of doxorubicin loaded into nanotubes. A schematic illustration of the use of the HNT@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PPy@DOX complex in cancer therapy is given in Figure 8. As a result of *in vitro* experiments, it has been determined that this nanocomposite is a fast, effective, and biocompatible option for both bioimaging and clinical targeting therapy for breast cancer.



**Figure 8.** Schematic diagram showing HNT@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PPy@DOX expression and its use in cancer therapy.

Fluorescent gold nanoclusters (AuNCs) with an average diameter of  $2.7 \pm 1.0$  nm, stabilized with 11-mercaptodecanoic acid, on aminosilane-modified halloysite nanotubes has been successfully prepared by Gorbachevskii *et al.* (2021). As a result of *in vitro* studies, it was concluded that the synthesized composite material showed good uptake by cells. The material was found to cause no significant toxic effect and no visible membrane damage in the concentration range of 25–50  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ . This concentration-dependent mechanism of toxicity concludes that it is an effective material for using halloysite-stabilized AuNCs for halloysite visualization in biological objects, bioimaging, and cancer therapy.

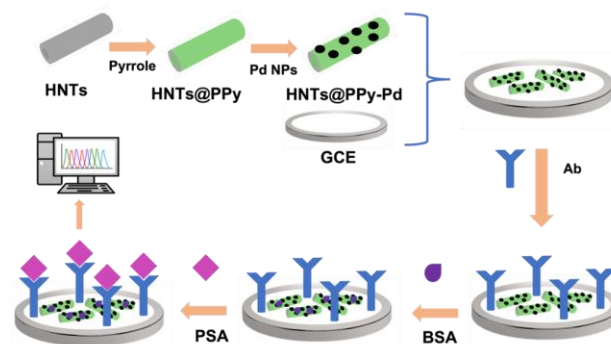
Stavitskaya *et al.* (2018) performed a stabilized study on HNTs to investigate the fluorescence and cytotoxicity of cadmium sulfide (CdS) quantum dots (QD). In this study, they synthesized 6–8 nm CdS and Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>S nanoparticles inside and outside the HNTs using a ligand-assisted method. They tested the synthesized composites on human skin fibroblasts and prostate cancer cells. At the end of the study, they reported that in human cell cultures, HNT-QD composites were internalized by living cells and showed intense and stable fluorescence with pronounced nanotube light scattering. As a result of fluorescence and cytotoxicity experiments, they reported that cadmium-zinc sulfide QD azine grafted on HNT is the most promising materials for bioimaging.

A laccase-halloysite nanotube and imidazolium zwitterionic surfactant-based biosensor for the determination of dopamine was developed by Decarli *et al.* (2022). Dopamine detection has been effectively studied using a modified electrode that offers the synergistic effect of laccase immobilized on HNT and a surfactant. It is concluded that this combination has remarkable sensitivity, wide linear range, selectivity and detection limit values. It was concluded that this biosensor, which was produced by showing a successful result in the determination of dopamine in the analysis made with real samples, is an efficient approach.

Sen *et al.* (2022) developed a magnetic halloysite nanotube-based SERS biosensor with Au@Ag core-shell

nanotags for the specific detection of bisphenol A. A wide linear range of 0.001–100  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ , an  $R^2$  value of 0.9944, and a detection limit of 0.75  $\text{pg}\cdot\text{mL}^{-1}$  were obtained. It was found that the prepared SERS aptasensor developed quite good Raman signal and exhibited SERS sensitivity. The developed magnetic halloysite nanotube-based aptasensor offers a wide variety of applications in the food safety and environmental health sectors.

An electrochemical immunosensor designed by Li *et al.* (2017) for the prostate-specific antigen (PSA) detection. In this work, cost-effective and biocompatible HNTs, conductive polypyrrole and electrocatalytic palladium were used. Modified glassy carbon electrodes (GCE) were prepared with nanocomposite of HNT, polypyrrole and palladium nanoparticles (HNTs@PPy-Pd). A schematic representation of the preparation of the immunosensor is presented in the Figure 9.



**Figure 9.** Schematic illustration of the preparation of HNTs@PPy-Pd nanocomposite modified GCE electrodes.

They reported that the immunosensor they developed showed a wide linear range (0.0001 to 25  $\text{ng}/\text{mL}$ ) and a low detection limit (0.03  $\text{pg}/\text{mL}$ ) for PSA detection.

### 3.5. Regenerative medicine

Tissue engineering is a multidisciplinary field in which sciences such as biology, pharmacy, medicine, engineering, and chemistry are used together to produce biomimetic composites. The main purpose in tissue engineering is to restore the tissue's function by repairing, protecting, or improving the tissue (Nekounam *et al.*, 2021). Developing an effective scaffold for tissue repair is an important part of the process, and therefore, developing scaffolds that can mimic the functional and structural nature of damaged tissue has been an area of much research in recent years (Mabrouk *et al.*, 2020). In the manufacturing phase of scaffolds developed for tissue engineering applications, natural polymers can be encountered, as well as synthetic polymers. While natural polymers have disadvantages such as weak mechanical properties, synthetic polymers have disadvantages such as cytotoxicity. It has been observed that successful results are obtained when the positive properties of both

polymer groups are used in combination and the process is optimized (Gu *et al.*, 2016).

Many patients receive medical treatment for orthopedic problems and more than 2 million bone graft operations are performed annually. Halloysites are attractive materials for applications in bone tissues, implants and scaffolds (Campana *et al.*, 2014). Contamination and infection are quite common in cases where bone defects caused by disease or trauma occur. This can seriously impair the normal function of bone tissues in the defects. Eventually, there are cases that lead to implant failure. Therefore, the control of infection is a very important and even vital factor in the success of bone regeneration (Wei *et al.*, 2019).

Autograft and autotransplantation are traditional methods used in surgery for the treatment of damaged tissues. However, these methods are too limited for both bone and damaged tissue reconstructions due to high cost, organ failure, risks of immunological rejection, and postoperative complications. Ou and co-workers (2020), designed a hybrid antibacterial hydrogel for bone regeneration. This study developed a strategy combining antibacterial and osteoimmunomodulatory activities with nanosilver particles, HNTs and GelMA (Ou *et al.*, 2020).

HNT is also used in dental applications. HNT is often combined with resin dental composites (RDC) and used as a filler in dental treatments. HNT affects the biological and bioactivity properties, microhardness, bending strength and maximum polymerization rates of the materials it is included in (Gkouma *et al.*, 2021).

Skin wounds pose a significant problem with approximately 300 million chronic and 100 million traumatic wound patients worldwide. Although the treatments applied for acute and regional wounds are effective, there are some difficulties in the long-term care and treatment of large-area chronic wounds and burns (Das and Baker, 2016).

Various ways are sought to prevent deaths due to blood loss caused by injuries. For this purpose, Li *et al.* (2021) designed hydrogels for use in wound treatments. In the study, they synthesized the hydrogels using chitosan (CS) and oxidized dextran (ODEX). They aimed to improve their performance by adding HNT to hydrogels. They reported that while hydrogels can be injected, they can also form gel in situ by a Schiff base reaction between CS (amino groups) and ODEX (aldehyde groups). As a result of their experiments, they observed that the HNT-doped hydrogels effectively stopped the bleeding. Most importantly, they reported that the hemostatic capacity of hydrogels increased thanks to HNTs.

The effect and speed of kaolinite group clay minerals on wound healing are known. These materials, which have high hemostatic activity, are frequently used in wound

treatments (Long *et al.*, 2018). With this knowledge, HNT has become a very popular material in wound healing studies.

It can be said that by making the actively used and known biocompatibility materials more functional with additives such as nano-scale inorganic materials, filling materials or halloysite, it can be said that the existing tissue damage repair methods will be an alternative approach to all known problems and obstacles to be overcome. HNTs are among the most frequently used materials in regenerative medicine applications such as tissue engineering, bone regeneration, dental treatments, wound healing and the like. Some case studies using HNT in these areas are listed below.

Schmitt *et al.* (2015) prepared plasticized starch-based nanocomposite foams by melt extrusion using water as the blowing agent. They found that the addition of halloysite nanotubes to the plasticized starch matrix promoted cell nucleation and reduced cell size. They concluded that HNTs act not only as a nucleating agent but also as a barrier to limit cell growth leading to macroporosity in the material. As a result of the study, porous nanocomposites based on plasticized starch with a mixture of glycerol and sorbitol and containing 6% halloysite by weight, produced at a molding temperature of 117°C, have high porosity, macroporosity supporting the formation of cellular and extracellular components of bone and blood vessels, and adequate mechanical properties. They concluded that it would be very useful for bone substitutes or bone cement applications thanks to its important properties such as strength.

Khan *et al.* (2019) synthesized CTS/n-HAP/HNT (CHH I-III) nanocomposites. It was concluded that the mechanical properties of the membranes improved at 7.5% (w/w) HNT loading to the produced composite. In the second part of the study, low amounts of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (NPs) and TiO<sub>2</sub> nanotubes (NTs) were added to the CTS/n-HAP/HNT nanocomposite. The effect of TiO<sub>2</sub>s on antibacterial activity and osteoconductivity was investigated. The CHH-TiT membrane was tested for growth studies of *S. aureus* and *E. coli*. The results showed that the CHH-TiT membrane was successful in inhibiting growth within 16 hours. They concluded that there is a potential to use CHH-TiT (7.5% HNT and 0.2% TiO<sub>2</sub> NT) membranes as a template for guided bone tissue regeneration.

To overcome the limitations of the CS/GP hydrogel, Vasheghani-Farahani *et al.* (2021) an injectable nanocomposite (NC) chitosan hydrogel containing modified HNT nanotubes (mHNTs) was synthesized. The synthesized hydrogels were aimed to be used for bone tissue engineering applications. mHNTs/CS/GP NC hydrogels were prepared as heat sensitive and injectable. Modification of HNTs with chitosan has been found to increase capture efficiency and loading

capacity by reducing the initial burst release of Icarin from nanotubes. It was concluded that the NC chitosan hydrogel containing the produced IC@mHNTs is a suitable candidate for bone tissue engineering applications.

Kumar and Han (2021) synthesized polyacrylamide (PAM)/polyvinyl alcohol (PVA) (PMPV) based hydrogel by free in situ radical polymerization method. They added bioactive glass and halloysite nanotubes (HNT) to the hydrogels they synthesized to improve their mechanical properties and biomineralization. BGs provide enhanced cell affinity and bone-binding ability for the hydrogel system. HNTs improve their mechanical performance. It has been observed that the porosity decreases slightly with the addition of BG and HNTs to PMPV hydrogels, which have a porous structure. It has been determined that PMPV/BG@HNT hydrogels show higher mechanical strength when compared to other hydrogels. Cell growth studies of hydrogels showed cell growth between 3 and 14 days.

De Silva *et al.* (2018) reported fabrication of HNT-doped alginate-based nanofiber scaffolds by electrospinning technique. It is intended to be a material that mimics the natural extracellular matrix (ECM) structure useful for tissue regeneration. The HNT alginate-based matrix is loaded with an antiseptic drug, Cephalexin (CEF). Thanks to the structure of HNT that allows drug loading, it has been determined that CEF easily accumulates in the lumen cavity and outer walls. It is noted that the total loading capacity is 30% by weight. It was observed that the addition of HNT increased the tensile strength 3 times and the elastic modulus 2 times. It was also found that CEF loaded HNT-doped alginate-based scaffolds showed superior antimicrobial properties against *S. aureus*, *S. epidermidis*, *P. aeruginosa* and *E. coli*. It was concluded that the developed alginate-based electrospun scaffolds with superior mechanical properties and antimicrobial activity are a candidate material to be used as artificial ECM scaffolds for tissue engineering applications.

The preparation of mechanically strong and biocompatible cryogel composites based on hyaluronic acid (HA) and HNT in various compositions and their applications as scaffolds for different cell growth media has been studied by Suner *et al.* (2019). Superporous HA: HNT cryogel composites were prepared under cryogenic condition in different HA: HNT weight ratios such as 1:0, 1:0.5, 1:1 and 1:2. It was determined that with the increase of HNT content in the composite structure, the mechanical and thermal stability increased in parallel. Bare HA and HA: HNTs cryogel composites were found to be non-hemolytic materials in the range of hemolysis rates of 0.63% to 1.39%. It was also found to be slightly hemostatic when in contact with human blood, with blood coagulation indices of 14.5–17.3, respectively. HA: HNTs cryogel composites have been determined to be as promising materials as

tissue engineering scaffolds with their macroporous structures, high thermal and mechanical stability, good blood compatibility.

Barot *et al.* (2020a) have conducted a study for the physicochemical and biological evaluation of immobilized HNT-based resin composite silver nanoparticles for dental applications. In this context, they concluded that the mechanical properties of HNT/Ag added (1-5% by weight) dental resin composites were significantly improved thanks to HNT. It was observed that the addition of HNT/Ag more by mass (7.5-10% wt) did not cause any improvement in the mechanical properties of the dental resin. Finally, the corresponding HNT/Ag-based dental resin composites did not show significant cytotoxicity against NIH-3T3 cell lines. It has also been found that HNT/Ag added to the resin matrix provides additional microbial protection to the dental composite. Therefore, the use of HNT/Ag as a filler with antimicrobial properties is highly advantageous for the development of robust dental composites.

### 3.6. Prosthetic materials

Prostheses are biomaterials used to heal, fix or replace damaged joints and bones. The need for orthopedic biomaterials has been increasing over the years. Implants can be produced from ceramic, polymer, metal or composite materials. The most important issues in the production of prosthetic materials are; it is not allergic or carcinogenic, does not cause toxic effects and is biocompatible. Halloysite nanotubes are suitable for use in coatings of prosthetic materials. In addition, HNTs can be used as prosthetic materials together with polymeric materials. The combination of HNTs and polymeric materials provides some advantages: 1) improving the durability of the prosthetic material coating, 2) no need to carry out the sintering process, 3) accelerating the transmission of active ions.

There has been great attention to design functional and advanced prosthetic materials. Acrylic materials, which are widely used in dentistry, are preferred in dental prostheses. Currently, there are carbon nanotube doped acrylic dental prostheses. However, these dental prostheses have very low mechanical strength. Also, carbon nanotubes are more expensive compared to HNTs. Gawdzinska *et al.* (2019), developed a composite nanofill material with silane-linked aluminum trihydrate (ATH-sil) and gelatin-modified HNT in 2019. In the study, it was observed that HNT was well dispersed in the gelatin polymer matrix. When composite prostheses containing HNT were evaluated, it was reported that their mechanical properties improved and they showed better mechanical strength (Gawdzinska *et al.*, 2019).

Some implants are used for short-term treatment, while others need to be used for much longer. In long-term implants, it is desirable that the material used should

not cause any toxic effects. For this reason, one of the most important features that should be in implants for materials scientists is biocompatibility. By considering the biocompatibility requirement in implants, chitosan and HNT composite coating were applied on titanium substrate as studied by Molaei *et al.* (2016). With this study, they aimed to improve the corrosion resistance of the titanium substrate. It has been reported that chitosan/HNT film offers better apatite-inducing performance thanks to HNTs. One of the metals frequently used as implant material is titanium alloys (Ti-6Al-4V). Titanium implants release V and Al ions into the human body. This is undesirable for bone tissue. To overcome this situation, Chozhanathmisra *et al.* (2022) used a biocomposite coating consisting of HNT, alginate (ALG), hydroxyapatite (HAp), and polyvinylalcohol (PVA) on titanium implants. They noted that HNT-PVA-ALG-HAp coating improved osteoconductive and mechanical properties. In another study, HNT, modified hydroxyapatite (MHA), poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) coating was applied on titanium to prevent bacterial infections caused by titanium implants. In the study, HNT-PEDOT-MHA coating provided good corrosion resistance and better biocompatibility for the titanium material (Chozhanathmisra *et al.*, 2018).

Thanks to the rapid development of technology, 3D printing technique has entered many different fields. By using 3D printing technique, Sa and co-workers (2019) worked on 3D antibacterial dental composite resins. Ag-containing HNTs were used to impart antibacterial properties to stereolithography resins. HNTs also improved the mechanical properties of the resins. It has been determined that Ag-HNT 3D composite material, which has antibacterial properties and does not cause toxic effects, has a potential for use in dentistry. In another study, a three-dimensional bioactive scaffold consisting of polydioxanone (PDS) and HNTs was prepared by electrospinning. An increase in fiber diameters was observed with the inclusion of HNTs in scaffolds designed for regenerative endodontics (Bottino *et al.*, 2015).

Azmi *et al.* (2017) synthesized PVA and HNT based hydrogels. PVA-HNT hydrogels formed by incorporating HNT into PVA hydrogels were kept in body fluid for one week. As a result of this experiment, it has been reported that PVA-HNT hydrogels are suitable for artificial cartilage material. If hydroxyapatite (HA) is desired to be used for bone replacement, it should be considered that it is not suitable for use alone because it is both fragile and does not show antibacterial properties. For this reason, Chozhanathmisra *et al.* (2016) benefited from the positive effects of strontium ( $\text{Sr}^{2+}$ ) metal ion on bone formation and the antibacterial property of  $\text{Sm}^{2+}$  metal ion in their studies. Sr, Sm substituted HA (M-HA)/zinc (Zn)-HNT coating was applied on titanium alloy for use in orthopedic applications. It was stated that

implant materials with good corrosion resistance were obtained with M-HA /Zn-HNT coating. Hasan and Ali (2018), in their study, they investigated the effects of adding HNT to the acrylic coating material used in prostheses. They tested the change with HNT added in the concentration range of 0.5% and 1.5% by weight. They reported that there was no difference in the thermal and surface properties of the coating material at both concentrations. However, they found that the mechanical strength was improved with the addition of HNTs. Vankatesh and co-workers (2019) have worked to develop 3D-printed implant materials. In this study, they strengthened poly lactic acid (PLA) which they used as the basic polymer, with biocompatible HNT. They reported that the material showed good mechanical properties thanks to HNTs. Molaei and Yousefpour (2019) investigated the potential for the use of chitosan-based nanocomposites in orthopedic applications. In their research, they worked with bioactive glass which helps bone repair, hydroxyapatite which has similar properties to bone structure and HNTs, which provide resistance to biomaterials. As a result, they noted that biodegradation is facilitated by HNTs.

Recent studies show that the need for orthopedic implants increases every year (Ji *et al.*, 2017). Ji and his team (2017) contributed to the field of orthopedic biomaterials by working on gelatin and HNT added composite biomaterials. In their studies, ibuprofen, an analgesic, antipyretic and anti-inflammatory drug for the treatment of bone diseases, was loaded onto HNTs. It has been observed that the mechanical performances of gelatin matrices are improved by adding HNT. They also reported that the HNT-doped gelatin system shows a better drug release profile compared to the gelatin scaffold alone. In another study, polycaprolactone-polyethylene glycol-polycaprolactone/gelatin (PCEC/gel) three-dimensional hydrogel scaffolds were prepared. Nanohydroxyapatite, HNT and iron oxide nanoparticles ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) are included in the structure. The results showed that the PCEC/gel/HNT scaffold is biocompatible and has good mechanical properties. It has been reported to be suitable materials for use in bone treatment applications (Same *et al.*, 2022). In order to prevent infections caused by implants, a study was carried out using 3D polylactic acid (PLA), chitosan oligosaccharide lactate (COS) zinc halloysite-silver nanoparticles (ZnHNTs-Ag). In the study, the antibacterial property of the COS-ZnHNTs-Ag coating was tested (Humayun, *et al.*, 2022).

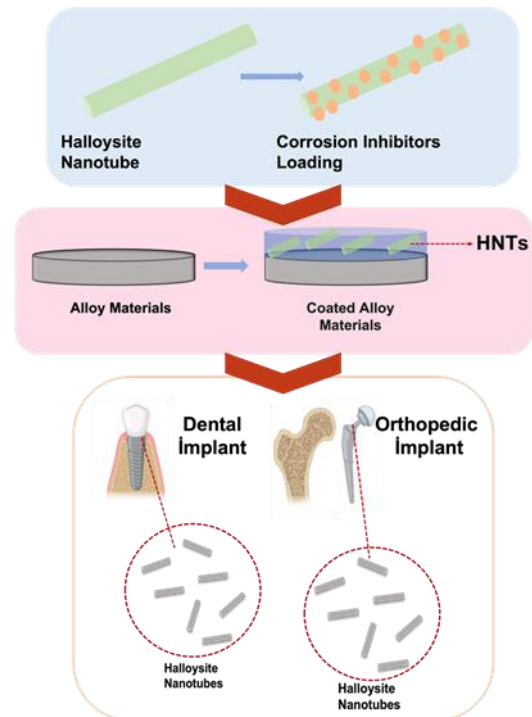
Tappa *et al.* (2014) worked on calcium phosphate cements (CPCs) to contribute to dental and orthopedic practice studies. CPCs were prepared in composite form with HNT and antibiotic additives. It was found that CPC-HNT composites showed both more effective drug release mechanism and good mechanical properties. In a different study, research was conducted on the



improvement of dental resins after HNT supplementation. It was concluded that HNTs improve the mechanical properties of dental composites (Chen *et al.*, 2012). Torres *et al.* (2020) conducted a study aiming to show the behavior of hydroxyapatite and HNTs in different polymers. For this purpose, they worked with polyester poly ( $\epsilon$ -caprolactone) (PCL), poly (lactic acid) (PLA) acrylate poly (2-hydroxyethyl methacrylate) (PHEMA), poly (ethyl methacrylate) (PEMA) polymers, which are widely used in the biomedical field. With this study, they aimed to prepare a new biomaterial for prostheses and at the end of the study they found faster degradation and improvement in mechanical properties. HNT-doped hydrogels were synthesized to improve the Young's modulus of gellan gum-based composite hydrogels for cartilage repair (Banifacio *et al.* 2018). Classical hydrogels show a compressive modulus of 10 to 60 kPa while HNT-doped hydrogels have been noted to show a modulus of compression from 116 to 143 kPa. In another study, a different method was presented to develop new dental restoration materials. In this study, it was aimed to prepare advanced dental biomaterials with chitosan and HNTs. When the results of the study were evaluated, it was found that HNTs strengthened the composites (Cho *et al.*, 2020).

Abdollahi Boraei *et al.* (2021) designed a nanocomposite scaffold with gelatin-hallosite nanotubes (HNTs). In their study, they combined the advantageous properties of both gelatin and HNTs. They determined that the bone regeneration ability increased thanks to the nanocomposite scaffolds loaded with strontium ranelate. They found that the addition of HNTs to the nanocomposite structure improved the porosity and mechanical properties. Wei *et al.* (2012) conducted a study on PMMA bone cement doped with gentamicin loaded hallosite nanotubes. They searched for the most appropriate HNT ratio. They observed that the mechanical properties of the composite structure were improved by the HNT addition of PMMA bone cement.

Mathi *et al.* (2020) presented an approach for orthopedic implant applications combining hydroxyapatite (HAP) with polyhydroxybutyrate (PHB) and hallosite nanotubes (HNT). With their work, they showed that the mechanical strength, easy accessibility, low cost and low toxicity of HNT are useful materials for bone implant. Xia *et al.* (2022) developed hallosite (HNT)/phytic acid (PA) coating material sensitive to pH stimuli. In their study, silk-HNT/PA coatings were used to improve the corrosion resistance and osteogenesis of Mg alloy osteoimplants. At the end of the study, they observed that HNT effectively increased the self-healing effect. The production of HNT added composite materials used in implant coatings is shown schematically in the Figure 10.



**Figure 10.** Schematic representation of the production process of HNT added surface coating materials used in implant materials.

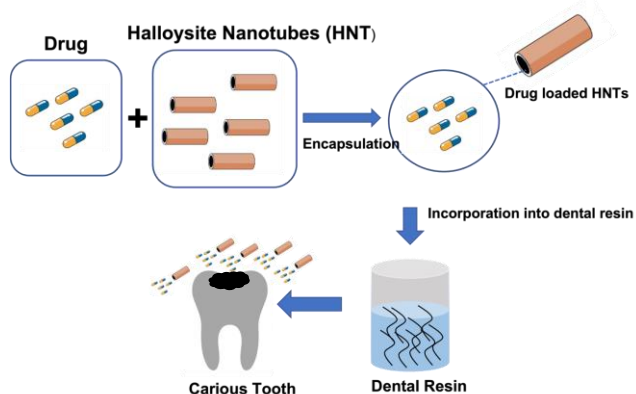
Toxicity of prosthetic materials requires frequency of treatment and this reduces the quality of life of patients. In addition, biomaterials can undergo deformation during daily activities. Looking at the studies in the literature, it is seen that the use of HNTs gives biomaterials superior properties such as hardness and durability.

### 3.7. Hygiene and Cosmetic Materials

It has become popular for developing products. With the acceleration of studies in nanotechnology, various researches are carried out for new cosmetic formulations. Natural hallosite nanotubes have also taken their place in cosmetic formulations thanks to their prominent features. The inclusion of HNTs in cosmetic products improves the performance of the products. It can improve the textures of cosmetic formulations, extends shelf life and increases their effectiveness.

The expectation of new products for hair care, preventing hair loss or strengthening hair is increasing. HNT-added formulations are also beneficial for hair products. For example, Cavallaro *et al.* (2020) have designed a HNT and keratin based UV protective hair product for use in hair treatment. Through HNTs, HNT/keratin was immobilized on hair cuticles. The results showed that the keratin/HNT dispersion has a hair protection capacity of 50-60%. In another study, HNT was loaded into hair dyes and drugs to create a new hair care formulation by taking advantage of the long stay of HNTs on the hair surface. Lawson (2-hydroxy-

1,4-naphthoquinone), a dye type, was loaded onto HNTs. In this way, it has been observed that the hair dye maintains its effect up to six washes. This method has been tested on animals and effective results have been obtained (Panchal *et al.*, 2018). Bertolino *et al.* (2017) characterized HNTs in the presence of different biopolymers for medical and cosmetic applications. They investigated the surface and thermodynamic properties of HNTs in aqueous solutions of biopolymers such as chitosan, pectin and hydroxypropyl cellulose. Modified HNTs have shown potential for use in stimuli-sensitive release systems. Degrazia *et al.* (2018) conducted experiments on an orthodontic adhesive. For the experiment, they tested the antibacterial activity and bioactivity of orthodontic adhesives containing triclosan-loaded HNT (TCN-HNT). At the end of the study, it was noted that the bonding properties of TCN-HNT orthodontic adhesives increased and they showed effective antibacterial properties. Chlorhexidine (CHX) loaded HNTs were used in a study to investigate dental resin composites (Figure 11). It has been reported that CHX-HNTs, which were determined to be suitable as filling materials, showed high mechanical strength and very good antibacterial activity (Barot *et al.*, 2020b).



**Figure 11.** Schematic illustration of preparation of experimental dental resin composite containing HNT/CHX.

Wu *et al.* (2017) conducted a study on cotton textiles, which are also used as medical products. In this study, antibacterial composite was studied by loading HNTs with chlorhexidine gluconate (CG). The prepared HNT/CG composite was coated on a cotton fabric, and its antibacterial properties were investigated by the drug release zone and inhibition zone test. They reported that the drug-loaded HNT composite showed high bacterial inhibition activity, according to the study performed on *S. aureus*, *E. coli* and *P. Aeruginosa*. After one week, it was observed that the HNT/CG composite showed effective antibacterial properties. Koosha *et al.* (2019) developed HNT-enhanced chitosan/PVA nanofibers for skin tissue regeneration. The tensile strength of nanofibers increased by 2.4 and 3.5 times

with HNT added to nanofibers at 3% and 5% ratios, respectively.

#### 4. Future Perspectives

The possibilities that nature offers to people are so many that it can be said that they are innumerable. Halloysite nanotubes are one of these natural resources. It is used in scientific studies in different fields with its unique properties. HNT has also been the focus of attention in studies on human health, thanks to its features such as being biocompatible, abundant in nature, low cost and non-toxic effects. For example, it has been observed that the inner lumen in the structures of HNTs facilitates drug release by allowing a certain amount of drug and drug load. They can also be used as nanoplatforms to increase the immobilization efficiency of enzymes and nucleic acids with HNTs. In addition, when the studies are examined, it is concluded that they are suitable and very advantageous materials for biosensors, bioimaging and tissue engineering applications. Therefore, in the future, HNTs can be included more frequently in studies in the biomedical field, and more research can be done in this area. Most importantly, halloysite nanotubes can have different origins as they are natural materials. This means that they may have different toxicological profiles. When we look at the literature, it is seen that studies on the toxic effect of HNTs are at the initial stage. Therefore, in the future, the toxic effect of HNTs can be investigated in more detail by increasing the number of studies on the time-dependent use of HNTs on human health, and work can be started to purify the material.

#### 4. Conclusion

Halloysite nanotubes, which are tubular in nanometer size, have been involved in many studies. In this review article, studies that prove halloysite nanotubes to be a versatile material for biomedical applications are presented. As a result of the studies, it has been understood that HNTs can be used safely in different biomedical applications. HNTs increased the mechanical strength of implant materials. It has created an affordable, easily accessible alternative for loading and releasing drugs in drug delivery applications. Halloysite nanotubes also improve the immobilization performance of biomolecules in biosensors. Thus, more sensitive, more selective and more reproducible results are obtained. HNTs have a structure that allows many different active ingredients to coexist. In this way, it is also advantageous to use in cosmetic products that can provide a healthy-looking skin. In conclusion, in this review study, we have seen that halloysite nanotubes are successfully used as versatile materials in biomedical studies. We think that the studies that have accelerated and increased over the years will increase even more in the coming years and that HNTs will appear in new techniques and materials.

### Author Contributions

In this study; Sultan BUTUN SENDEL, editing, checking, writing, uploading the article, Nilay TUNCA, literature research, figure design Hatice DEVECI, literature research, figure design, Harun BAS, literature research, figure design, Vural BUTUN reviewing, editing, consulting the article contributed.

### Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

### References

- Abdollahi Boraei, S. B., Nourmohammadi, J., Bakhshandeh, B., Dehghan, M. M., Gholami, H., Calle Hernández, D., ... & Ferrari, B. (2021). Enhanced osteogenesis of gelatin-halloysite nanocomposite scaffold mediated by loading strontium ranelate. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 70(6), 392-402. doi:<https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1725754>
- Abhinayaa, R., Jeevitha, G., Mangalaraj, D., Ponpandian, N., & Meena, P. (2019). Toxic influence of pristine and surfactant modified halloysite nanotubes on phytopathogenic bacteria. *Applied Clay Science*, 174, 57-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.03.022>
- Abhinayaa, R., Jeevitha, G., Mangalaraj, D., Ponpandian, N., Vidhya, K., & Angayarkanni, J. (2018). Cytotoxic consequences of Halloysite nanotube/iron oxide nanocomposite and iron oxide nanoparticles upon interaction with bacterial, non-cancerous and cancerous cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 169, 395-403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.05.040>
- Arshad, M. S., Qaiser, M., Mahmood, K., Shoaib, M. H., Ameer, N., Ramzan, N., ... & Abbas, G. (2022). Chitosan/halloysite nanotubes microcomposites: A double header approach for sustained release of ciprofloxacin and its hemostatic effects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212, 314-323. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.138>
- Azmi, S., Razak, S. I. A., Abdul Kadir, M. R., Iqbal, N., Hassan, R., Nayan, N. H. M., ... & Shaharuddin, S. (2017). Reinforcement of poly (vinyl alcohol) hydrogel with halloysite nanotubes as potential biomedical materials. *Soft Materials*, 15(1), 45-54. doi:<https://doi.org/10.1080/1539445X.2016.1242500>
- Barman, M., Mahmood, S., Augustine, R., Hasan, A., Thomas, S., & Ghosal, K. (2020). Natural halloysite nanotubes/chitosan based bio-nanocomposite for delivering norfloxacin, an anti-microbial agent in sustained release manner. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1849-1861. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.060>
- Barot, T., Rawtani, D., & Kulkarni, P. (2020a). Physicochemical and biological assessment of silver nanoparticles immobilized Halloysite nanotubes-based resin composite for dental applications. *Heliyon*, 6(3), e03601 doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03601>
- Barot, T., Rawtani, D., & Kulkarni, P. (2020b). Development of chlorhexidine loaded halloysite nanotube based experimental resin composite with enhanced physico-mechanical and biological properties for dental applications. *Journal of Composites Science*, 4(2), 81. doi:<https://doi.org/10.3390/jcs4020081>
- Bertolino, V., Cavallaro, G., Lazzara, G., Milioto, S., & Parisi, F. (2017). Biopolymer-targeted adsorption onto halloysite nanotubes in aqueous media. *Langmuir*, 33(13), 3317-3323. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00600>
- Biddeci, G., Spinelli, G., Colomba, P., & Di Blasi, F. (2022). Nanomaterials: A Review about Halloysite Nanotubes, Properties, and Application in the Biological Field. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11518. doi:<https://doi.org/10.3390/ijms231911518>
- Bonifacio, M. A., Cometa, S., Cochis, A., Gentile, P., Ferreira, A. M., Azzimonti, B., ... & De Giglio, E. (2018). Antibacterial effectiveness meets improved mechanical properties: Manuka honey/gellan gum composite hydrogels for cartilage repair. *Carbohydrate Polymers*, 198, 462-472. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.115>
- Bottino, M. C., Yassen, G. H., Platt, J. A., Labban, N., Windsor, L. J., Spolnik, K. J., & Bressiani, A. H. (2015). A novel three-dimensional scaffold for regenerative endodontics: materials and biological characterizations. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 9(11), E116-E123. doi:<https://doi.org/10.1002/term.1712>
- Campana, V., Milano, G. I. U. S. E. P. P. E., Pagano, E., Barba, M., Cicione, C., Salonna, G., ... & Logroscino, G. (2014). Bone substitutes in orthopaedic surgery: from basic science to clinical practice. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 25(10), 2445-2461. doi:<https://doi.org/10.1007/s10856-014-5240-2>
- Cavallaro, G., Milioto, S., Konnova, S., Fakhrullina, G., Akhatova, F., Lazzara, G., ... & Lvov, Y. (2020). Halloysite/keratin nanocomposite for human hair photoprotection coating. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(21), 24348-24362. doi:<https://doi.org/10.1021/acsami.0c05252>

- Chen, Q., Zhao, Y., Wu, W., Xu, T., & Fong, H. (2012). Fabrication and evaluation of Bis-GMA/TEGDMA dental resins/composites containing halloysite nanotubes. *Dental Materials*, 28(10), 1071-1079. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.002>
- Cheng, C., Gao, Y., Song, W., Zhao, Q., Zhang, H., & Zhang, H. (2020). Halloysite nanotube-based H2O2-responsive drug delivery system with a turn on effect on fluorescence for real-time monitoring. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122474>
- Cheng, C., Song, W., Zhao, Q., & Zhang, H. (2020). Halloysite nanotubes in polymer science: Purification, characterization, modification and applications. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 323-344. doi: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0024>
- Cho, K., Yasir, M., Jung, M., Willcox, M. D., Stenzel, M. H., Rajan, G., ... & Prusty, B. G. (2020). Hybrid engineered dental composites by multiscale reinforcements with chitosan-integrated halloysite nanotubes and S-glass fibers. *Composites Part B: Engineering*, 202, 108448. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108448>
- Chozhanathmisra, M. A. N. I. C. K. A. M., Govindaraj, D. H. A. R. M. A. N., Karthikeyan, P. A. L. A. N. I. S. A. M. Y., & Rajavel, R. A. N. G. A. P. P. A. N. (2018). Antibacterial efficacy of halloysite nanotube minerals substituted hydroxyapatite composite on titanium alloy using electrodeposition method. *Asian Journal of Chemistry*, 30(10), 2264-2268. doi: <https://doi.org/10.14233/ajchem.2018.21423>
- Chozhanathmisra, M., Murugesan, L., Murugesan, A., Palanisamy, G., & Rajavel, R. (2022). Enhancement on physical, chemical, and biological properties of HNT-PVA-ALG-HAp biocomposite coating on implant substrate for biomedical application. *Ceramics International*, 48(12), 16868-16876. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.241>
- Chozhanathmisra, M., Ramya, S., Kavitha, L., & Gopi, D. (2016). Development of zinc-halloysite nanotube/minerals substituted hydroxyapatite bilayer coatings on titanium alloy for orthopedic applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 511, 357-365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.10.018>
- Danyiuk, N., Tomaszewska, J., & Tatarчук, T. (2020). Halloysite nanotubes and halloysite-based composites for environmental and biomedical applications. *Journal of Molecular Liquids*, 309, 113077. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113077>
- Das, S., & Baker, A. B. (2016). Biomaterials and nanotherapeutics for enhancing skin wound healing. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4, 82. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00082>
- De Kruif, J. K., Ledergerber, G., Garofalo, C., Fasler-Kan, E., & Kuentz, M. (2016). On prilled nanotubes-in-microgel oral systems for protein delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 101, 90-102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.01.014>
- De Silva, R. T., Dissanayake, R. K., Mantilaka, M. P. G., Wijesinghe, W. S. L., Kaleel, S. S., Premachandra, T. N., ... & de Silva, K. N. (2018). Drug-loaded halloysite nanotube-reinforced electrospun alginate-based nanofibrous scaffolds with sustained antimicrobial protection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(40), 33913-33922. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b11013>
- Decarli, N. O., Zapp, E., de Souza, B. S., Santana, E. R., Winiarski, J. P., & Vieira, I. C. (2022). Biosensor based on laccase-halloysite nanotube and imidazolium zwitterionic surfactant for dopamine determination. *Biochemical Engineering Journal*, 186, 108565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108565>
- Degrazia, F. W., Genari, B., Leitune, V. C. B., Arthur, R. A., Luxan, S. A., Samuel, S. M. W., ... & Sauro, S. (2018). Polymerisation, antibacterial and bioactivity properties of experimental orthodontic adhesives containing triclosan-loaded halloysite nanotubes. *Journal of Dentistry*, 69, 77-82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.11.002>
- Dramou, P., Fizir, M., Taleb, A., Itatahine, A., Dahiru, N. S., Mehdi, Y. A., ... & He, H. (2018). Folic acid-conjugated chitosan oligosaccharide-magnetic halloysite nanotubes as a delivery system for camptothecin. *Carbohydrate Polymers*, 197, 117-127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.071>
- Fakhrullina, G., Khakimova, E., Akhatova, F., Lazzara, G., Parisi, F., & Fakhrullin, R. (2019). Selective antimicrobial effects of curcumin@ halloysite nanoformulation: a *Caenorhabditis elegans* study. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(26), 23050-23064. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b07499>
- Feitosa, S., Carreiro, A. F., Martins, V. M., Platt, J. A., & Duarte, S. (2021). Effect of a chlorhexidine-encapsulated nanotube modified pit-and-fissure sealant on oral biofilm. *Dental Materials Journal*, 40(3), 758-765. doi: <https://doi.org/10.4012/dmj.2020-241>
- Fizir, M., Dramou, P., Dahiru, N. S., Ruya, W., Huang, T., & He, H. (2018). Halloysite nanotubes in analytical sciences and in drug delivery: A review.

- Microchimica Acta*, 185(8), 1-33. doi: <https://doi.org/10.1007/s00604-018-2908-1>
- Gawdzinska, K., Paszkiewicz, S., Piesowicz, E., Bryll, K., Irska, I., Lapis, A., ... & Slaczka, W. (2019). Preparation and characterization of hybrid nanocomposites for dental applications. *Applied Sciences*, 9(7), 1381. doi: <https://doi.org/10.3390/app9071381>
- Gkouma, E., Gianni, E., Avgoustakis, K., & Papoulis, D. (2021). Applications of halloysite in tissue engineering. *Applied Clay Science*, 214, 106291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106291>
- Glotov, A., Stavitskaya, A., Novikov, A., Semenov, A., Ivanov, E., Gushchin, P., ... & Lvov, Y. (2019). Halloysite Based Core-Shell Nanosystems: Synthesis and Application. In *Nanomaterials from Clay Minerals*, 203-256. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-0814533-3.00004-1>.
- Goda, E. S., Gab-Allah, M. A., Singu, B. S., & Yoon, K. R. (2019). Halloysite nanotubes based electrochemical sensors: A review. *Microchemical Journal*, 147, 1083-1096. doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.04.011>
- Gorbachevskii, M. V., Stavitskaya, A. V., Novikov, A. A., Fakhrullin, R. F., Rozhina, E. V., Naumenko, E. A., & Vinokurov, V. A. (2021). Fluorescent gold nanoclusters stabilized on halloysite nanotubes: In vitro study on cytotoxicity. *Applied Clay Science*, 207, 106106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106106>
- Gu, B. K., Choi, D. J., Park, S. J., Kim, M. S., Kang, C. M., & Kim, C. H. (2016). 3-dimensional bioprinting for tissue engineering applications. *Biomaterials Research*, 20(1), 1-8. doi: <https://doi.org/10.1186/s40824-016-0058-2>
- Guimaraes, L., Enyashin, A. N., Seifert, G., & Duarte, H. A. (2010). Structural, electronic, and mechanical properties of single-walled halloysite nanotube models. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(26), 11358-11363. doi: <https://doi.org/10.1021/jp100902e>
- Guryanov, I., Naumenko, E., Akhatova, F., Lazzara, G., Cavallaro, G., Nigamatzyanova, L., & Fakhrullin, R. (2020). Selective cytotoxic activity of prodigiosin@ halloysite nanoformulation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 424. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00424>
- Hamedi, S., & Koosha, M. (2020). Designing a pH-responsive drug delivery system for the release of black-carrot anthocyanins loaded in halloysite nanotubes for cancer treatment. *Applied Clay Science*, 197, 105770. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105770>
- Hasan, W. Y., & Ali, M. M. (2018). Evaluation of thermal conductivity and some other properties of heat cured denture soft liner reinforced by halloysite nanotubes. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 11(3), 1491-1500. doi: <https://dx.doi.org/10.13005/bpj/1516>
- Hemmatpour, H., Haddadi-Asl, V., Khanipour, F., Stuart, M. C., Lu, L., Pei, Y., ... & Rudolf, P. (2022). Mussel-inspired grafting pH-responsive brushes onto halloysite nanotubes for controlled release of doxorubicin. *European Polymer Journal*, 180, 111583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111583>
- Hendessi, S., Sevinis, E. B., Unal, S., Cebeci, F. C., Menciloglu, Y. Z., & Unal, H. (2016). Antibacterial sustained-release coatings from halloysite nanotubes/waterborne polyurethanes. *Progress in Organic Coatings*, 101, 253-261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.09.005>
- Huang, B., Liu, M., & Zhou, C. (2017). Cellulose-halloysite nanotube composite hydrogels for curcumin delivery. *Cellulose*, 24(7), 2861-2875. doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1316-8>
- Humayun, A., Luo, Y., Elumalai, A., & Mills, D. K. (2022). 3D printed antimicrobial PLA constructs functionalised with zinc-coated halloysite nanotubes-Ag-chitosan oligosaccharide lactate. *Materials Technology*, 37(1), 28-35. doi: <https://doi.org/10.1080/10667857.2020.1806188>
- Ji, L., Qiao, W., Zhang, Y., Wu, H., Miao, S., Cheng, Z., ... & Zhu, A. (2017). A gelatin composite scaffold strengthened by drug-loaded halloysite nanotubes. *Materials Science and Engineering: C*, 78, 362-369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.070>
- Kamal, N., Kochkodan, V., Zekri, A., & Ahzi, S. (2019). Polysulfone membranes embedded with halloysites nanotubes: Preparation and properties. *Membranes*, 10(1), 2. doi: <https://doi.org/10.3390/membranes10010002>
- Kazemi-Aghdam, F., Jahed, V., Dehghan-Niri, M., Ganji, F., & Vasheghani-Farahani, E. (2021). Injectable chitosan hydrogel embedding modified halloysite nanotubes for bone tissue engineering. *Carbohydrate Polymers*, 269, 118311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118311>
- Kerman, K., Kobayashi, M., & Tamiya, E. (2003). Recent trends in electrochemical DNA biosensor technology. *Measurement Science and Technology*, 15(2), R1. doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/2/R01>
- Khan, S., Kumar, V., Roy, P., & Kundu, P. P. (2019). TiO 2 doped chitosan/hydroxyapatite/halloysite nanotube membranes with enhanced mechanical properties and osteoblast-like cell response for

- application in bone tissue engineering. *RSC Advances*, 9(68), 39768-39779. doi: <https://doi.org/10.1039/c9ra08366a>
- Khodzhaeva, V., Makeeva, A., Ulyanova, V., Zelenikhin, P., Evtugyn, V., Hardt, M., ... & Ilinskaya, O. (2017). Binase immobilized on halloysite nanotubes exerts enhanced cytotoxicity toward human colon adenocarcinoma cells. *Frontiers in Pharmacology*, 8, 631. doi: <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00>
- Kokulnathan, T., Chen, T. W., Chen, S. M., Ahmed, F., Hasan, P. M. Z., Bilgrami, A. L., & Kumar, S. (2022). A robust combination of dysprosium vanadate/halloysite nanotubes: the electrochemical system for dimetridazole detection. *Materials Today Chemistry*, 24, 100890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.100890>
- Koosha, M., Raoufi, M., & Moravvej, H. (2019). One-pot reactive electrospinning of chitosan/PVA hydrogel nanofibers reinforced by halloysite nanotubes with enhanced fibroblast cell attachment for skin tissue regeneration. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 179, 270-279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.03.054>
- Kumar, A., & Han, S. S. (2021). Enhanced mechanical, biomineralization, and cellular response of nanocomposite hydrogels by bioactive glass and halloysite nanotubes for bone tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 128, 112236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112236>
- Kurczewska, J., Cegłowski, M., Messyas, B., & Schroeder, G. (2018). Dendrimer-functionalized halloysite nanotubes for effective drug delivery. *Applied Clay Science*, 153, 134-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.019>
- Kushwaha, S. K. S., Kushwaha, N., Pandey, P., & Fatma, B. (2021). Halloysite nanotubes for nanomedicine: Prospects, challenges and applications. *BioNanoScience*, 11(1), 200-208. doi: <https://doi.org/10.1007/s12668-020-00801-6>
- Liu, M., Jia, Z., Jia, D., & Zhou, C. (2014). Recent advance in research on halloysite nanotubes-polymer nanocomposite. *Progress in Polymer Science*, 39(8), 1498-1525. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.04.004>
- Liu, J., Zhang, Y., Zeng, Q., Zeng, H., Liu, X., Wu, P., ... & Cao, K. (2019). Delivery of RIPK4 small interfering RNA for bladder cancer therapy using natural halloysite nanotubes. *Science Advances*, 5(9), eaaw6499. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw6499>
- Li, H., Zhu, X., Xu, J., Peng, W., Zhong, S., & Wang, Y. (2016). The combination of adsorption by functionalized halloysite nanotubes and encapsulation by polyelectrolyte coatings for sustained drug delivery. *RSC Advances*, 6(59), 54463-54470. doi: <https://doi.org/10.1039/C6RA09599B>
- Li, Y., Khan, M. S., Tian, L., Liu, L., Hu, L., Fan, D., ... & Wei, Q. (2017). An ultrasensitive electrochemical immunosensor for the detection of prostate-specific antigen based on conductivity nanocomposite with halloysite nanotubes. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409(12), 3245-3251. doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0266-1>
- Li, Z., Li, B., Li, X., Lin, Z., Chen, L., Chen, H., ... & Zhang, Y. (2021). Ultrafast in-situ forming halloysite nanotube-doped chitosan/oxidized dextran hydrogels for hemostasis and wound repair. *Carbohydrate Polymers*, 267, 118155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118155>
- Long, M., Zhang, Y., Huang, P., Chang, S., Hu, Y., Yang, Q., ... & Yang, H. (2018). Emerging nanoclay composite for effective hemostasis. *Advanced Functional Materials*, 28(10), 1704452. doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201704452>
- Long, Z., Wu, Y. P., Gao, H. Y., Li, Y. F., He, R. R., & Liu, M. (2018). Functionalization of halloysite nanotubes via grafting of dendrimer for efficient intracellular delivery of siRNA. *Bioconjugate Chemistry*, 29(8), 2606-2618. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.8b00321>
- Long, Z., Zhang, J., Shen, Y., Zhou, C., & Liu, M. (2017). Polyethyleneimine grafted short halloysite nanotubes for gene delivery. *Materials Science and Engineering: C*, 81, 224-235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.07.035>
- Lisuzzo, L., Cavallaro, G., Milioto, S., & Lazzara, G. (2021). Halloysite nanotubes filled with salicylic acid and sodium diclofenac: effects of vacuum pumping on loading and release properties. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 11(4), 663-673. doi: <https://doi.org/10.1007/s40097-021-00391-z>
- Luo, X., Zhang, J., Wu, Y. P., Yang, X., Kuang, X. P., Li, W. X., ... & Liu, M. (2020). Multifunctional [email protected] 3 O 4@[email protected] Nanoplatfor for Effective Chemo-Photothermal Combination Therapy of Breast Cancer with MR Imaging. *ACS Biomater. Sci. Eng*, 6(6), 3361-3374. doi: <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b01709>
- Mabrouk, M., Beherei, H. H., & Das, D. B. (2020). Recent progress in the fabrication techniques of 3D scaffolds for tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 110, 110716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110716>
- Majumder, S., Viau, C., Brar, A., Xia, J., & George, S. (2022). Silver nanoparticles grafted onto tannic acid-modified halloysite clay eliminated multidrug-

- resistant Salmonella Typhimurium in a Caenorhabditis elegans model of intestinal infection. *Applied Clay Science*, 228, 106569. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106569>
- Massaro, M., Buscemi, G., Arista, L., Biddeci, G., Cavallaro, G., D'Anna, F., ... & Riela, S. (2018). Multifunctional carrier based on halloysite/laponite hybrid hydrogel for kartogenin delivery. *ACS Medicinal Chemistry Letters*, 10(4), 419-424. doi: <https://doi.org/10.1021/acsmchemlett.8b00465>
- Massaro, M., Licandro, E., Cauteruccio, S., Lazzara, G., Liotta, L. F., Notarbartolo, M., ... & Riela, S. (2022). Nanocarrier based on halloysite and fluorescent probe for intracellular delivery of peptide nucleic acids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 620, 221-233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.03.151>
- Mathi, D. B., Gopi, D., & Kavitha, L. (2020, November). Halloysite nanotubes strengthened hydroxyapatite/biopolymer composite coating on titanium for implant applications. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2270, No. 1, p. 110025). AIP Publishing LLC. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0019799>
- Mo, X., Wu, F., Yu, B., Wang, W., & Cai, X. (2020). Folate-PG modified halloysite nanotube for enhancing tumor targeting and anticancer efficacy. *Applied Clay Science*, 193, 105664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105664>
- Molaei, A., & Yousefpour, M. (2019). Preparation of Chitosan-based nanocomposites and biomedical investigations in bone tissue engineering. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 68(12), 701-713. doi: <https://doi.org/10.1080/00914037.2018.1493683>
- Molaei, A., Amadeh, A., Yari, M., & Afshar, M. R. (2016). Structure, apatite inducing ability, and corrosion behavior of chitosan/halloysite nanotube coatings prepared by electrophoretic deposition on titanium substrate. *Materials Science and Engineering: C*, 59, 740-747. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.10.073>
- Nekounam, H., Gholizadeh, S., Allahyari, Z., Samadian, H., Nazeri, N., Shokrgozar, M. A., & Faridi-Majidi, R. (2021). Electroconductive Scaffolds for Tissue Regeneration: Current opportunities, pitfalls, and potential solutions. *Materials Research Bulletin*, 134, 111083. doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.111083>
- Ou, Q., Huang, K., Fu, C., Huang, C., Fang, Y., Gu, Z., ... & Wang, Y. (2020). Nanosilver-incorporated halloysite nanotubes/gelatin methacrylate hybrid hydrogel with osteoimmunomodulatory and antibacterial activity for bone regeneration. *Chemical Engineering Journal*, 382, 123019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123019>
- Panchal, A., Fakhrullina, G., Fakhrullin, R., & Lvov, Y. (2018). Self-assembly of clay nanotubes on hair surface for medical and cosmetic formulations. *Nanoscale*, 10(38), 18205-18216. doi: <https://doi.org/10.1039/C8NR05949G>
- Paul, A., Augustine, R., Hasan, A., Zahid, A. A., Thomas, S., Agatemor, C., & Ghosal, K. (2022). Halloysite nanotube and chitosan polymer composites: Physicochemical and drug delivery properties. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 72, 103380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103380>
- Persano, F., Gigli, G., & Leporatti, S. (2021). Halloysite-Based Nanosystems for Biomedical Applications. *Clays and Clay Minerals*, 1-21. doi: <https://doi.org/10.1007/s42860-021-00135-8>
- Prishchenko, D. A., Zenkov, E. V., Mazurenko, V. V., Fakhrullin, R. F., Lvov, Y. M., & Mazurenko, V. G. (2018). Molecular dynamics of the halloysite nanotubes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(8), 5841-5849. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110716>
- Sa, L., Kaiwu, L., Shenggui, C., Junzhong, Y., Yongguang, J., Lin, W., & Li, R. (2019). 3D printing dental composite resins with sustaining antibacterial ability. *Journal of Materials Science*, 54(4), 3309-3318. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2801-7>
- Sahiner, N., & Sengel, S. B. (2017). Various amine functionalized halloysite nanotube as efficient metal free catalysts for H<sub>2</sub> generation from sodium borohydride methanolysis. *Applied Clay Science*, 146, 517-525. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.008>
- Saleh, M., Prajapati, N., Karan, A., Rahman, N., Stavitskaya, A., DeCoster, M., & Lvov, Y. (2021). Halloysite Nanotube Vehicles for Drug Delivery Through a Model Blood-Brain Barrier. *Clays and Clay Minerals*, 69(5), 603-611. doi: <https://doi.org/10.1007/s42860-021-00161-6>
- Same, S., Kadkhoda, J., Navidi, G., Abedi, F., Aghazadeh, M., Milani, M., ... & Davaran, S. (2022). The fabrication of halloysite nanotube-based multicomponent hydrogel scaffolds for bone healing. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 20, 2280800022111875. doi: <https://doi.org/10.1177/2280800022111875>
- Satish, S., Tharmavaram, M., & Rawtani, D. (2019). Halloysite nanotubes as a nature's boon for biomedical applications. *Nanobiomedicine*, 6, 972

1849543519863625. doi: <https://doi.org/10.1177%2F1849543519863625>
- Schmitt, H., Creton, N., Prashantha, K., Soulestin, J., Lacrampe, M. F., & Krawczak, P. (2015). Preparation and characterization of plasticized starch/halloysite porous nanocomposites possibly suitable for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(4), 41341. doi: <https://doi.org/10.1002/app.41341>
- Sen, L., He, D., Li, S., Chen, R., Yuan, P., Li, S., ... & Gao, Z. (2022). Magnetic Halloysite Nanotube-Based SERS Biosensor Enhanced with Au@ Ag Core-Shell Nanotags for Bisphenol A Determination. *Biosensors*, 12(6), 387. doi: <https://doi.org/10.3390/bios12060387>
- Shi, Y. F., Tian, Z., Zhang, Y., Shen, H. B., & Jia, N. Q. (2011). Functionalized halloysite nanotube-based carrier for intracellular delivery of antisense oligonucleotides. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 1-7. doi: <https://doi.org/10.1186%2F1556-276X-6-608>
- Shu, Z., Zhang, Y., Ouyang, J., & Yang, H. (2017 a). Characterization and synergetic antibacterial properties of ZnO and CeO<sub>2</sub> supported by halloysite. *Applied Surface Science*, 420, 833-838. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.219>
- Shu, Z., Zhang, Y., Yang, Q., & Yang, H. (2017 b). Halloysite nanotubes supported Ag and ZnO nanoparticles with synergistically enhanced antibacterial activity. *Nanoscale Research Letters*, 12(1), 1-7. doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1859-5>
- Stavitskaya, A. V., Novikov, A. A., Kotelev, M. S., Kopitsyn, D. S., Rozhina, E. V., Ishmukhametov, I. R., ... & Vinokurov, V. A. (2018). Fluorescence and cytotoxicity of cadmium sulfide quantum dots stabilized on clay nanotubes. *Nanomaterials*, 8(6), 391. doi: <https://doi.org/10.3390/nano8060391>
- Suner, S. S., Demirci, S., Yetiskin, B., Fakhrullin, R., Naumenko, E., Okay, O., ... & Sahiner, N. (2019). Cryogel composites based on hyaluronic acid and halloysite nanotubes as scaffold for tissue engineering. *International journal of biological macromolecules*, 130, 627-635. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.025>
- Tan, C., Zheng, J., Feng, Y., & Liu, M. (2021). Cell Membrane-Coated Halloysite Nanotubes for Target-Specific Nanocarrier for Cancer Phototherapy. *Molecules*, 26(15), 4483. doi: <https://doi.org/10.3390%2Fmolecules26154483>
- Tappa, K. K., Jammalamadaka, U. M., & Mills, D. K. (2014, August). Design and evaluation of a nanoenhanced anti-infective calcium phosphate bone cements. In 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 3921-3924). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944481>
- Torres, E., Dominguez-Candela, I., Castello-Palacios, S., Vallés-Lluch, A., & Fombuena, V. (2020). Development and characterization of polyester and acrylate-based composites with hydroxyapatite and halloysite nanotubes for medical applications. *Polymers*, 12(8), 1703. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12081703>
- Tully, J., Yendluri, R., & Lvov, Y. (2016). Halloysite clay nanotubes for enzyme immobilization. *Biomacromolecules*, 17(2), 615-621. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b01542>
- Venkatesh, C., Fuenmayor, E., Doran, P., Major, I., Lyons, J. G., & Devine, D. M. (2019). Additive manufacturing of PLA/HNT nanocomposites for biomedical applications. *Procedia Manufacturing*, 38, 17-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.003>
- Wei, P., Jing, W., Yuan, Z., Huang, Y., Guan, B., Zhang, W., ... & Yang, X. (2019). Vancomycin-and strontium-loaded microspheres with multifunctional activities against bacteria, in angiogenesis, and in osteogenesis for enhancing infected bone regeneration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(34), 30596-30609. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b10219>
- Wei, W., Abdullayev, E., Hollister, A., Mills, D., & Lvov, Y. M. (2012). Clay nanotube/poly (methyl methacrylate) bone cement composites with sustained antibiotic release. *Macromolecular Materials and Engineering*, 297(7), 645-653. doi: <https://doi.org/10.1002/mame.201100309>
- Wei, W., Minullina, R., Abdullayev, E., Fakhrullin, R., Mills, D., & Lvov, Y. (2014). Enhanced efficiency of antiseptics with sustained release from clay nanotubes. *RSC Advances*, 4(1), 488-494. doi: <https://doi.org/10.1039/C3RA45011B>
- Wu, Y., Yang, Y., Liu, H., Yao, X., Leng, F., Chen, Y., & Tian, W. (2017). Long-term antibacterial protected cotton fabric coating by controlled release of chlorhexidine gluconate from halloysite nanotubes. *RSC Advances*, 7(31), 18917-18925. doi: <https://doi.org/10.1039/C7RA01464C>
- Xia, D., Jia, Z., Shen, Y., Zheng, Y., Cheng, Y., Xiong, P., ... & Zhou, Y. (2022). pH Stimuli-Responsive, Rapidly Self-healable Coatings Enhanced the Corrosion Resistance and Osteogenic Differentiation of Mg-1Ca Osteoimplant. *Small*, 2106056. doi: <https://doi.org/10.1002/sml.202106056>
- Yah, W. O., Takahara, A., & Lvov, Y. M. (2012). Selective modification of halloysite lumen with octadecylphosphonic acid: new inorganic tubular micelle. *Journal of the American Chemical*



*Society*, 134(3), 1853-1859.  
doi:<https://doi.org/10.1021/ja210258y>

Yuan, P., Tan, D., & Annabi-Bergaya, F. (2015). Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects. *Applied Clay Science*, 112, 75-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.001>

Zhang, Y., Chen, Y., Zhang, H., Zhang, B., & Liu, J. (2013). Potent antibacterial activity of a novel silver nanoparticle-halloysite nanotube nanocomposite powder. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 118, 59-64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2012.07.025>

**BİYOMEDİKAL UYGULAMALARDA KULLANILAN MİKROBİYAL BİYOPOLİMERLERE BAKIŞ**Belma NURAL YAMAN<sup>1,2\*</sup>, Benay ÇOLAK<sup>2</sup>, Ahmet ÇABUK<sup>2,3</sup><sup>1</sup> Department of Biomedical Engineering, The Faculty of Engineering and Architecture, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir

ORCID No : 0000-0003-2576-1300

<sup>2</sup> Department of Biotechnology and Biosafety, Graduate School of Natural and Applied Science, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir

ORCID No : 0000-0003-2116-5966

<sup>3</sup> Department of Biology, Faculty of Science, Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir

ORCID No : 0000-0002-4619-6948

Anahtar Kelimeler	Öz
Biyomedikal uygulamalar, Biyopolimer, Mikroorganizma.	<i>Mikrobiyal biyopolimerler, mikroorganizma, bitki vb. dahil canlı organizmaların ürünleri olarak tanımlanır. Biyolojik olarak parçalanabilir, biyoyumlu, toksik olmayan veya düşük toksik, anti enflamatuar ve antimikrobiyal aktivite gibi özelliklere sahip olabilirler. Polisakkarit, lipid ve protein olarak gruplandırılmışlardır. Mikrobiyal biyopolimerler, biyomedikal uygulamalar, doku mühendisliği, gıda endüstrisi, yara onarım sistemi, ilaç dağılımını içeren değişken sektörlerdeki biyomalzemeler olarak önemli bir kaynaktır. Bu nedenle, tıbbi implantların şekline dolaylı olarak bu alanlar için seçim kriterleri hayati önem taşımaktadır. Medikal uygulamalarda güvenli ve uzun süreli implant için bu kriterler pasif ve inert seçilmelidir. Bu derlemede, biyopolimer türevli mikroorganizmalar, özellikle aljinat, kitin, kitosan, levan, polihidroksalkanoatlar, hyaluronik asit ele alınmış ve mikrobiyal biyopolimerlerin biyomedikal araştırma alanındaki potansiyeline ışık tutulmuştur. Biyomedikal uygulamalar için bu polimerlerin ekonomik faktörleri, biosentezi ve özellikleri incelenmiştir. Mikrobiyal biyopolimerlerin olağanüstü derecede değişken olma ve uyarılmış özelliklere sahip olma yetenekleri, onları biyomedikal araştırmalardaki sorunları çözmek için avantajlı kılar. Mikrobiyal biyopolimerler, doku mühendisliği, tıbbi cihazların geliştirilmesi, ilaç dağılımı, kanser tedavisi ve yara iyileşmesi dahil olmak üzere bir dizi tıbbi uygulamada sürdürülebilir süreçleri düzenlemek için kullanılabilir. Bu nedenle bu biyopolimerlerin tarihçesi, özellikleri, ekstraksiyon yöntemleri ve uygulama alanları yaklaşımı üzerinde durulmuştur.</i>

**INSIGHT TO THE MICROBIAL BIOPOLYMERS USED IN BIOMEDICAL APPLICATIONS**

Keywords	Abstract
Biomedical application, Biopolymer, Microorganisms	<i>Microbial biopolymers are products of living organisms include microorganism, plant etc. They could be biodegradable, biocompatible, non or low toxic and show anti-inflammatory and antimicrobial activity. They have been grouped in polysaccharide, lipid and protein. Microbial biopolymers are important source as biomaterials in variable sectors consist of biomedical applications, tissue engineering, food industry, wound repair system, and also drug delivery. Therefore, the selection criteria are vital for these areas because these materials use for shaping of medical implants. These criteria should be elected passive and inert for safe and long-term implant in medical applications. In this review, biopolymers derivatives from microorganisms are handled especially alginate, chitin, chitosan, levan, polyhydroxalkanoates, hyaluronic acid and this review has highlighted the potential of microbial biopolymers in the field of biomedical research. For biomedical applications, the economic factors, biosynthesis, and characteristics of these polymers have been examined. The ability of microbial biopolymers to be extraordinarily variable and to have induced features makes them advantageous for</i>

\* Sorumlu yazar; e-posta : [nuralbelma@gmail.com](mailto:nuralbelma@gmail.com); [bnural@ogu.edu.tr](mailto:bnural@ogu.edu.tr)

*solving issues in biomedical research. Microbial biopolymers can be used to arrange sustainable processes in a range of medical applications, including tissue engineering, the development of medical devices, drug delivery, cancer therapy, and wound healing. Therefore, these biopolymers historical past, properties and extraction methods and application approach were emphasized.*

Derleme Makale		Review Article	
Başvuru Tarihi	: 21.11.2022	Submission Date	: 21.11.2022
Kabul Tarihi	: 25.01.2023	Accepted Date	: 25.01.2023

## 1. Introduction

The term of polymer is derived from the Latin words "polus" and "meros" which means "many part". The structure of the polymers consists of large, identical and/or comparable macromolecule chains with recurrent, long chains. The monomers that make up polymers are connected by covalent bonds, and macromolecules with high molecular weights are created in the process (Mohan et al., 2016). The primary themes utilized in the classification of polymers include polymer origin, chain structure, formation mechanism, temperature behavior, transport, crystallinity, and application area (O dian, 2004).

Commercial applications use synthetic polymers called "plastics" including PE (polyethylene), PP (polypropylene), PVC (polyvinylchloride), and PET (poly-ethylene terephthalate). Plasticizers, UV stabilizers, and other additives for synthetic polymers are generated from fossil basic sources such crude oil, coal, or natural gas (Othman, 2014). The most prevalent bio-based polymers in nature include polysaccharides (such as cellulose, etc.), poly-nucleotides (DNA, RNA), and polypeptides (Othman, 2014;(Chen et al., 2008; Othman, 2014)). Proteins (casein, whey, collagen), lipids (fatty acids, waxes, polyhydroxyalkanoates) and polysaccharides (alginate, pectin, starch, etc.), as well as cellulose, xanthan and other substances can all be converted into biopolymers. It can also be synthesized using materials originating from microorganisms (Çankaya and Sökmen, 2017).

Except the chemical synthesis, there are natural polymers being synthesized in living organisms and natural polymers has been known as biopolymers. The biopolymers are described as polymeric biomaterial which is formed by monomers. They are bonded each other to generate larger molecules (Mohan et al., 2016). The "bio" defines the source of materials as living organisms (Ghosh et al., 2021). Therefore "biopolymers" could be described as polymers that are synthesized by living organisms (Mohan et al., 2016). These biopolymers are synthesized by reactions catalyzed by enzyme (Jose et al., 2022) which bonds the blocks including amino acids, sugar, hydroxyl group and fatty

acid to form the molecules possess high molecular weight (Moradalil and Rehm, 2020). Microorganisms produce these biopolymers at the very different classes (Gosh et al., 2021) and microbial polymers have the vital properties such as biodegradable, nontoxic, non-immunogenic, non-inflammatory and biocompatible (Jose et al., 2022). They are ideal for biotechnological use in biomedical application (Salernitano and Migliaresi, 2018) to compare especially synthetic polymers (Lee and Mooney, 2012). Although the synthetic polymers have been generally accepted, there is big problem about the accumulations of microplastics that causes the harmful effects in ecosystem (Jose et al., 2022). At the same time, using of non-biodegradable polymers in biomedical applications have some concerns about the surgical removal (Wani et al., 2016).

To decide on biomaterials selection is very important because it effect the shaped of medical implants. On the other hand, the criteria are to be chosen passive and inert for safe and long-term implant in medical areas. It is known real that any material could be evoked cellular response. That's mean, there are no material being totally "inert"; therefore, the most important feature of biomaterials to be considered is their interaction with the implanted tissue (Chesterman et al., 2020). Biodegradable polymers are usable in medical application as products for repairing or remodeling, but some properties are required for long-term materials stability:

- 1)To be feasible to manufacture consisting of available of bulk polymer in sufficient commercial quantities
- 2)The shown ability to shape polymers to be designed final product;
- 3)Mechanical properties that appeal enough short-term performance
- 4)To be low toxic of the products following degradation at local tissue reaction
- 5)Using as drug delivery system in extend release processes.

This review is organized as follows: In introduction is explained the description of polymers, classification of polymers, biopolymers, the criteria of biopolymer selection. Literature Survey is emphasized importance and the classification and properties of microbial

polymers including alginate, chitin, chitosan, levan, hyaluronic acid and polyhydroxybutyrate. This is followed by definition, chemical and physical properties, application areas including biomedical, drug delivery, wound repair or wound dressing material, tissue engineering of these microbial polymers.

## 2. Literature Survey

### 2.1. Alginate

Alginate is defined as a group of edible anionic polysaccharides. Moreover, naturally it has been placed on the cell walls for brown algae such as *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria hyperborea*, *Ascophyllum nodosum*; on the other hand this polymer is derived from various bacterial species (*Azotobacter*, *Pseudomonas*) and (Szekalska et al., 2016).

In the early 1940s, the irreversible hydrocolloid alginate material was developed. The search for an alternative for agar-based materials has been globally accelerated. When the main supplier of red seaweed was stopped exporting in Japan during World War II, brown seaweed native to the American coast was used as a new alternative. It has been observed that alginate from brown seaweed requires a minimum of simple equipment and instrumentation. In addition, it has been stated that it has superior properties than agar, with its speed of use, affordable price and user-friendly acceptance by patients. Since then, alginate has managed to become one of the most widely used materials in the world (Barr, 2020).

The extraction of alginate from seaweed is a multi-step process that usually starts with treating the dried raw material with diluted mineral acid. Alginate obtained after the purification steps is converted to the water-soluble sodium salt in the presence of calcium carbonate. It is then recycled back to the acid or expected salt (Szekalska et al., 2016). Figure 1 shows the procedure for the extraction of sodium alginate from brown algae.

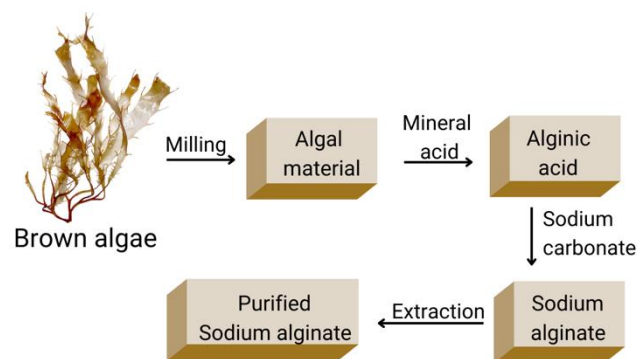


Figure 1. Extraction of sodium alginate from brown algae

When the alginate in algae cell walls is exposed to strong sea waves, it provides flexibility and a strong structure to the algae, protecting it from possible injury (Raus et al., 2021). The chemical structure of alginate, a linear biopolymer composed of 1,4-linked  $\beta$ -D mannuronic acid (M) and 1,4  $\alpha$ -L-guluronic acid (G) residues, is given in Figure 2 (Raus et al., 2021).

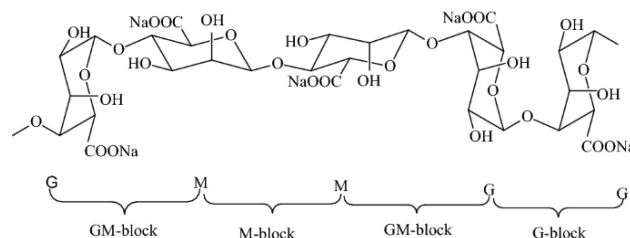


Figure 2: Chemical structure of alginate (Sahoo and Biswal, 2021)

A large amount of alginate biopolymer is encountered in nature due to the abundance of algae in water and living organisms all over the world. The annual production of industrial alginate is around 30,000 metric tons. It is estimated that less than 10% of the material is biosynthesized alginate. Therefore, there is adequate potential for developing alginate-based sustainable biomaterials (Pawar and Edgar, 2012).

Because of its properties such as biocompatibility, ease of gelation (Lee et al., 2012), low or non-toxicity, and non-immunogenicity, alginate has a wide range of applications in biomedical applications and engineering (Batista et al., 2019). Alginate hydrogels are used in wound healing, drug delivery and tissue engineering applications because they preserve the structural similarity in the cell. Wound healing alginate dressings provide a physiologically moist micro-environment. As a result, it promotes wound healing by minimizing bacterial infection in the wound area. Alginate gels can be used for cell transplantation in tissue engineering. Alginate gels are man-made tissue and organ replacements for patients who have lost an organ or tissue (Lee and Mooney, 2012).

A hydrogel film made of alginate and aloe vera was prepared for use in wound healing applications in a study reported by Pereira and colleagues (Pereira et al., 2013). The films were developed by combining the hemostatic properties of calcium alginate gels with the therapeutic properties of aloe vera. Depending on the type of wound, the resulting high-transparency gels can be applied to the wound in either dry or wet form. As a result, alginate/aloe vera hydrogel films have been demonstrated to have the potential to be used as a dressing for dry or wet wounds (Pereira et al., 2013). By the way, alginate biopolymer is widely used in the food industry as a food additive and component. Alginate is added to foods for the purpose of microbial and viral protection of fruits and vegetables. As a food additive, it

is used as a gelling, thickening, stabilizing or emulsifying agent. Last but not least, alginate is preferred as a drug coating and drug delivery agent, such as the encapsulation of probiotics, thanks to its ability to encapsulate natural substances (Puscaselu et al., 2020). On the other hand, as well as the using of alginate often in biomedical applications, there are some disadvantages of this polymer. Mono-covalent cations dissolve alginate blocks in gel forms, whereas non-binding blocks are not degraded by bacteria found in mammalian hosts. Although alginate is a naturally derived polymer, some disadvantages of the application process should be known (Sahoo and Biswal, 2021).

## 2.2. Chitin

Chitin which is the second most common natural biopolymer after cellulose in the world, found in the shells of crustaceans such as shrimp, lobster and crab (el Knidri et al., 2018). At the beginning of the 19th century, chemist Henri Braconnot started working on chitin in France. In 1811, and defined chitin biopolymer as the insoluble residue left after extracting fungi with water, alcohol, and dilute alkali cork/mushroom. These residues were obtained from *Agaricus volvaceus*, *Agaricus acris*, *Agaricus cantarellus*, *Agaricus piperatus*, *Hydnum repandum*, *Hydnum hybridum* and *Boletus viscidus*. In 1823, Odier, described the insoluble substance he isolated from the exoskeleton of insects as chitin. (Crini and Lichtfouse, 2019; Batista et al., 2018).

The production of chitin biopolymer can be from three sources: crustaceans, insects and microorganisms. Commercial chitin is extracted from the shells of crustaceans such as shrimp, crab, lobster, and krill, which are supplied in large quantities by the shellfish processing industries. Chitin extraction is carried out by two methods, chemically and biologically. While acids and bases are used in the chemical method of chitin extraction, microorganisms are used in the biological method. Chitin can be extracted biologically using lactic acid bacteria. Further to that, mixed cultures of lactic acid bacteria and proteolytic microorganisms yield enough for extraction (Arbia et al., 2013)

The chitin biopolymer is a linear amino-polysaccharide composed of  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) linked 2-acetamido-2 deoxy- $\beta$ -D-glucopyranose units and partially  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) linked 2-amino-2-deoxy-. The chemical structure of chitin is shown in Figure 3 (Ruiz and Corrales, 2017).

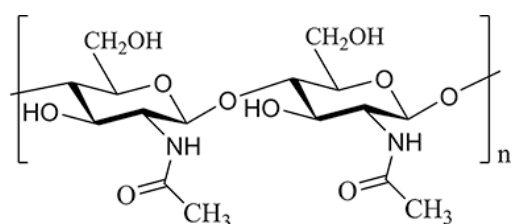


Figure 3. Chemical structure of chitin (Ruiz and Corrales, 2017)

Chitin and cellulose have structurally similar properties. Because of intramolecular and intermolecular hydrogen bonds, it is insoluble in water, aqueous solutions, and common organic solvents, just like cellulose. Chitin is a biopolymer closely related to proteins, minerals, lipids and pigments. As a result of the studies, it was stated that the specific properties of chitin, such as the degree of deacetylation and molecular mass, vary according to the process conditions (Arbia et al., 2013).

Chitin is a natural biopolymer that is non-toxic, biodegradable, and biocompatible. The chitin polymer is used in a variety of biomedical applications, including drug delivery, tissue engineering, and wound healing. Its benefits include the ability to easily process it into various forms such as membranes, sponges, gels, microparticles, nanoparticles, and nanofibers (Anitha et al., 2014). By the way, chitin is used in areas such as clarification of fruit juices and processing of milk including in the food industry. Except for food; It is preferred in many fields, including biosensors, due to its biodegradability, non-toxicity, physiological inertness, anti-bacterial properties, hydrophilicity, gel-forming properties and protein activity. Chitin-based biomaterials are used for the purification of industrial pollutants because chitin absorbs silver thiosulfate complexes and actinides. Another area of use is wound dressing and controlled drug release in medical and pharmaceutical applications. In dentistry, chitin is a hydroxyapatite-chitin-chitosan composite bone filling material that forms a self-curing paste for directed tissue regeneration in the treatment of periodontal bone defects (Rinaudo, 2006). In Figure 4, the processing possibilities of chitin biopolymer are given.

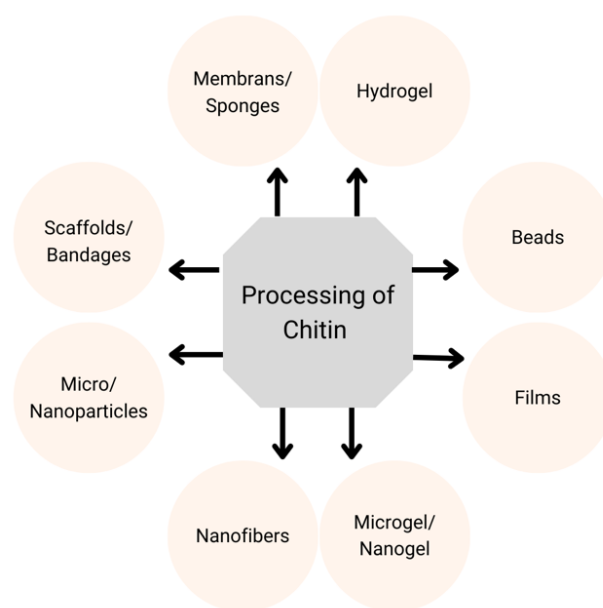


Figure 4. Processing possibilities of chitin biopolymer

### 2.3. Chitosan

Chitosan is a biopolymer formed when chitin becomes soluble in aqueous acidic medium when the degree of deacetylation reaches approximately 50% (Rinaudo, 2006). The chitosan biopolymer was first discovered by Rouget in 1859 by heating chitin in a concentrated potassium hydroxide solution. *Rouget observed that chitin became soluble with the applying of chemical and heat treatments. It was named as chitosan by Hoppe-Seyler in 1984* (Batista et al., 2018).

Chitosan is a biocompatible and degradable material derived from natural sources, such as the exoskeletons of insects, crustaceans, and fungi (Dash et al., 2011). In the microbial extraction of chitosan, microorganisms such as *Mucor rouxii* and *Phycomyces blakesleeanus* are used. Chitosan is produced using cell cultures of these microorganisms. The deacetylation of chitin occurs when *Aspergillus niger* is added to the culture medium. At the end of the incubation period of 96 hours, chitosan biopolymer is obtained (Kuzgun and İnanlı, 2013).

The chitosan molecule is a copolymer composed of N-acetyl-D-glucosamine and D-glucosamine units present in different degrees depending on the degree of acetylated moieties. The chemical structure of chitosan is shown in Figure 5 (Ruiz and Corrales, 2017).

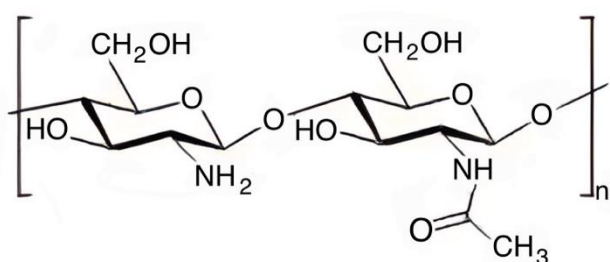


Figure 5. Chemical structure of chitosan (Ruiz and Corrales, 2017)

Chitosan is the only polycation in nature. The charge density varies according to the degree of acetylation and the pH of the environment. Chitin has a wide range of biological activities, including antitumoral, antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory properties that make it suitable for use as a therapeutic polymer. Chitin has antimicrobial activity against a variety of microorganisms, including bacteria, filamentous fungi, and yeast (Aranaz et al., 2021).

The outstanding feature of chitosan over other biopolymers (cellulose, starch and galactomannans etc.) is that its chemical structure is suitable for specific modifications at the C-2 position without much difficulty. When designing polymers, special groups can be included next to chitosan for different applications (Rinaudo, 2006).

Chitosan, which has a different structure than synthetic polymers, is preferred in biomedical applications due to its physical and chemical properties, including the fact that it is biodegradable, non-toxic, and biologically compatible. Suspensions, solutions, particles, beads, resins, spheres, nanoparticles, sponges, gels/hydrogels, and membranes are all examples of applications for chitosan and its derivatives. This biopolymer is used in medicine, pharmacy, food industry, edible film technology, biotechnology, textile, and paper industries, in addition to practical applications. Chitosan is used in environmental applications such as water treatment, wastewater treatment, sludge dewatering, and membrane filtration because it is an environmentally friendly biopolymer (Anitha et al., 2014; Morin-Crini et al., 2019).

Chitosan is used as a polymeric mixture with chitin in tissue engineering through various modifications and combinations. These mixtures ensure the preservation of the porous structure of the scaffold in the tissue. It reduces the deterioration of the material and accelerates bone formation in vivo (Anitha et al., 2014). Chitosan films containing prednisolone are used in drug release. Layered polyelectrolyte capsules and chitosan gels are frequently used in the controlled release of drugs or proteins (Rinaudo, 2006). Food industry and nutrition are two other important applications for chitosan, which has indigestible high viscosity and high-water binding properties. As a dietary fibre, it reduces the absorption of fat and cholesterol and lowers cholesterol.

In the human body, chitosan and its derivatives promote weight loss and fat burning. Thus, it helps to lower systolic and diastolic blood pressure. Thanks to its prebiotic feature, it has the ability to improve the intestinal microbiota by increasing the bioavailability of probiotics. Chitosan has a wide range of applications in the beverage industry. The solution is used in the form of particles and beads. It is used in the clarification and filtration of fruit juices, wine, beer, tea, etc. products. Chitosan is preferred as a stabilizer, preservative, flavor enhancer and acidity regulator in various beverages (Morin-Crini et al., 2019).

### 2.4. Levan

Levan biopolymer is a biocompatible exopolysaccharide with potential uses in various industries. The origins of the levan biopolymer begin back to "natto," a traditional Japanese dish thought to aid in living a long and healthy life. Because levan is an important component of natto, it attracts the interest of researchers who prefer products supporting natural life (Öner et al., 2016). The beginning of studies on the production, collection and biosynthesis of levan was in Germany, France and England between 1870-1940. In 1930, the trade of

polysaccharide polymers began in the United States (Srikanth et al., 2015).

Levan biopolymer is a  $\beta$ -(2,6)-linked fructose polymer obtained from different plant, fungal, yeast and bacterial sources (González-Garcinuño et al., 2018; Taran et al., 2017). Extraction occurs as exopolysaccharide from sucrose-based substrates by bacteria such as *Acetobacter*, *Bacillus*, *Erwinia*, *Gluconobacter*, *Halomonas*, *Microbacterium*, *Pseudomonas* and *Halomonas* species can be used as an alternative to many mesophilic levan-producing microorganisms. *Halomonas* species have industrial potential due to their production capacity that does not require sterile environment and high yield at high salt concentration (Tohme et al., 2018).

Levan is soluble in both water and oil due to its  $\beta$ -(2,6) bonds. While it is soluble in varying degrees in cold water, it is completely soluble in hot water. Levan biopolymer has no toxic properties. It also does not irritate the eyes. Levan stands out in the commercial industrial area, as it is a standard film-forming agent and a stable polymer (Srikanth et al., 2015).

The levan's film-forming ability, solubility in water and oil, strong adhesiveness, compatibility with salts and surfactants, low viscosity, heat stability, and acid-alkali stability allow it to be used in a variety of research and industrial applications. Levan is used in many biomedical applications such as stabilizer, emulsifier, thickener, encapsulating agent, osmoregulatory, food and feed additive, cryoprotectant, plasma substitute, drug activity extender, antitumor, antidiabetic and antihyperlipidemic agent in medicine. Levan synthesis, production and catalysis are becoming increasingly important due to potential applications in biomedical engineering (Çakmak et al., 2020; González-Garcinuño et al., 2018). The prominent features of levan in biomedical applications; biocompatibility, biodegradability, flexibility, edibility and being an environmentally friendly biopolymer. In addition, it has important biomedical properties such as antioxidant, anti-inflammatory, anti-carcinogenic, anti-AIDS, hyperglycemic inhibitor. Levan is a surfactant and natural adhesive (Srikanth et al., 2015). By the way, levan is also widely used in the food industry. Colloidal emulsions, aerosols and foams can be formed with Levan biopolymer. Levan can be added to food products as a beneficial prebiotic fibre for the gut microbiota. Yogurt, cereal products, fruit juices and bread can be given as examples of functional foods with adding of levan. It has also been stated that levan can be used as a fat substitute when phosphorylated (Haddar et al., 2021).

In a study has been reported by Gomes et al., 2018, it was determined that the membranes containing chitosan, sulfated levan and alginate developed have suitable

conditions for different applications in the biomedical field such as biological adhesives (Gomes et al., 2018).

## 2.5. Polyhydroxyalkanoates

Polyhydroxyalkanoates (PHAs) can be synthesized by different types of microorganisms. The main production conditions are environments where essential nutrients (such as N, P, S, O or Mg) are limited and the carbon source is high. PHAs are used as a reducing agent or as a carbon/energy source. PHAs in polyester structure, which are similar to petrochemical plastics due to their physicochemical properties and are deposited in cell storage granules in microorganisms (Salehizadeh and van Loosdrecht, 2004).

PHAs produced by bacteria are of interest to researchers because they can be produced from renewable resources and are truly biodegradable and highly biocompatible thermoplastic materials (Chen and Wu, 2005). Depending on the requirements of different applications, PHA can be mixed with another polymer, enzymes or even inorganic materials such as hydroxylapatite to further adjust their mechanical properties or biocompatibility (Williams et al., 1999).

PHB materials physically show similar properties to petroleum-derived plastics such as commonly used polypropylene (Madison and Huisman, 1999). Showing thermo-plastic properties, PHB is four times harder than polyethylene. While PHB exists in the liquid phase inside the cells, it exists in the solid phase in the atmosphere. During extraction, PHB taken from the cells with the help of organic solvents tends to crystallize. PHB materials are hard and brittle, and their melting temperatures show the variation between 158 °C and 188 °C depending on their polymerization level. Because PHBs are thermo-plastic, they are resistant to pressure and can be shaped (Muhammadi et al., 2015).

The weights of PHB polymers can be between 60 and 2000 kDa (Braunegg et al., 1998). It is known that the localization of genes involved in PHB synthesis is on the chromosome or on plasmid DNA (Steinbüchel and Schlegel, 1991). PHB finds wide use in various industrial applications due to various reasons such as biodegradability, high biocompatibility and low toxicity (Chesterman et al., 2020). The molecular weights of the obtained PHB polymers are generally affected by various factors such as the type of bacteria used, the growth condition of the bacteria, and the place where the cells are in their life cycle (Dunlop and Robards, 1973; Taidi et al., 1994).

Many bacteria have the ability to store the energy and skeleton of carbon atoms as biodegradable compounds with polymeric structures and properties similar to synthetic plastics. However, these polymers can be produced or accumulated a few in industrially valuable quantities (Miu et al., 2022). Among the microorganisms

that can produce PHA, are *Pseudomonas oleovorans* (Durner et al., 2000; Ramsay et al., 1991), *Pseudomonas aeruginosa* (Timm et al., 1990) and *Pseudomonas putida* (Tobin and O'Connor, 2005), *Ralstonia eutropha* (Durner et al., 2000), *Bacillus megaterium* (Gouda et al., 2001; Güngörmedi et al., 2014), *Bacillus drentensis* BP17 (Penkhrue et al., 2020), *Bacillus aryabhatai* (Balakrishna et al., 2020), *Geobacillus kaustophilus* (Gedikli et al., 2019).

Polyhydroxybutyrate (PHBs) are deposited after being produced as storage granules in the cell and structurally contain long polymer chains consisting of a combination of hydrophobic units containing short-chain  $\beta$ -hydroxy fatty acids. It is used as an intracellular storage material in prokaryotes (Poirier, 2002; Slater et al., 1992). It has been reported that PHB occupies a large volume inside the cell, and when looking at the right-hand helix structure, the presence of a double folded axis has been reported. The molecular structure of each strand contains twists that repeat every 0.596 nm (Anderson and Dawes, 1990).

PHB has used in tissue engineering scaffolds because of its ideal material properties. These properties are compatibility, support cell growth, guide and organize cells allow its applications in tissue growth (Wani et al., 2016). On the other hand, PHAs are particularly used in healthcare, which includes the manufacture of various medical materials such as suture threads, tissue repair devices, joint cartilage repair, nerve guides, and bone marrow skeletons (Koller et al., 2010). PHAs are also used in the manufacture of packaging for personal hygiene products, which are common in daily use, disposable table mats or bags that are biodegradable in nature. Although PHAs have all these advantages, they may find it difficult to find a place in the market because they are more costly than plastics produced by petrochemical means (Masaeli et al., 2013). Since PHA is biodegradable and biocompatible polymers, it can also be used in the synthesis of composites, which are widely used in wound healing, together with proteins that can be added to their structures (Quillaguamán et al., 2010). PHB and PHBV ( $\beta$ -hydroxybutyrate- $\beta$ -hydroxyvalerate) can be given as examples of PHA derivatives polymers commonly used by researchers and biomedical industries (Williams et al., 1999). The brittleness of PHB is improved by copolymerization of -hydroxybutyrate with  $\beta$ -hydroxyvalerate (Chen and Wu, 2005). The variety of applications have been resourced from the elastomeric property of PHAs and its derivations. The PHAs have been applied in the multiple research areas because of its biological effective properties such as biocompatibility, bioresorbability, biodegradability (Hincliffe et al., 2021).

## 2.6. Hyaluronic Acid

Hyaluronic acid is a natural and linear biopolymer composed of disaccharide repeats, in which D-glucuronic acid (GlcUA) and N-acetylglucosamine (GlcNAc) are alternately joined by  $\beta$ -1,3 and  $\beta$ -1,4 glycosidic bonds. The chemical structure of hyaluronic acid is shown in Figure 6 (Liu et al., 2011).

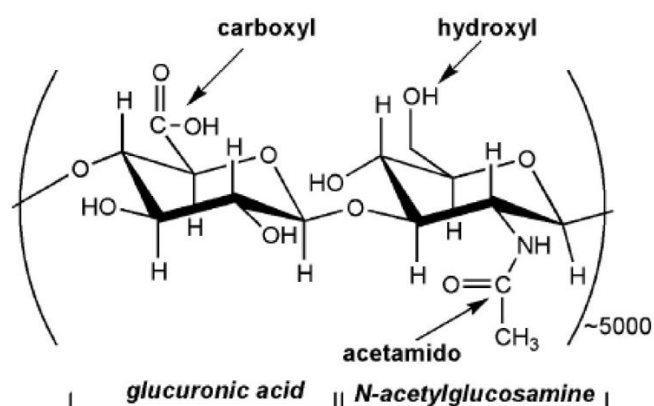


Figure 6. Chemical structure of Hyaluronic Acid (Liu et al., 2011)

Hyaluronic acid was discovered for the first time in history by scientists named Karl Meyer and John Palmer. Meyer and Palmer described a new high molecular weight polysaccharide isolated from the vitreous of cattle eyes in their paper published in the Journal of Biological Chemistry in 1934. They named "hyaloid" (glassy glass-like appearance) for this new polysaccharide and hyaluronic acid derived from "uronic acid" (Selyanin et al., 2015). The term "hyaluronan" was added in 1986 to adapt to the polysaccharide terminology (Liu et al., 2011).

Hyaluronic acid can be extracted from various mammals and marine animals. Hyaluronic acid extraction was obtained from many sources such as vitreous body, umbilical cord, cock marrow and *streptococci* in the 1930s and 1940s. The yield and purity to be obtained vary according to the source and technique used. Industrial scale production of hyaluronic acid was first made by Shiseido in the 1980s. One of the most commonly used bacteria for hyaluronic acid production is *Streptococcus zooepidemicus* (Abdallah et al., 2020; Liu et al., 2011).

In one study, hyaluronic acid from *Streptococcus equi* ssp. was extracted with high efficiency. The bacterial production was performed at 33°C, on 24 hours and by shaking 187 rpm. As a result, hyaluronic acid with an average weight of 79416 Da was obtained with a simple and sequential method (Güngör et al., 2019).



In another study, hyaluronic acid extraction from fish eye and optimization of purification process were made. Hyaluronic acid was extracted and purified from the glassy humors of fish by following protein electrodeposition, detailed precipitation, selective recovery and membrane separation processes. With a waste material, low cost and high purity hyaluronic acid was obtained (Murado et al., 2012).

Hyaluronic acid belongs to the group of substances called mucopolysaccharides, which belong to the family of glycosaminoglycans (GAGs). Hyaluronic acid differs from other glycosaminoglycans groups because it does not contain a sulfate group. Hyaluronic acid has extremely slippery and hydrophilic properties (Saranraj and Naidu, 2013).

Hyaluronic acid is a one-of-a-kind biopolymer that can be assembled into extracellular pericellular matrices, has effects on cell signalling, and is viscoelastic and hydrodynamic. Thanks to these properties, it is preferred as a biomaterial (Falcone et al., 2006). Hyaluronic acid can be used in the human body because of important functions such as wound repair, cell migration and cell signalling. Because of its versatility, it is used in a wide range of biomedical applications, including tissue engineering and cancer treatment (Dovedytis et al., 2020). Biomedical applications of hyaluronic acid are shown in Figure 7. In tissue engineering, hyaluronic acid-based scaffolds are used. These scaffolds are biocompatible, degradable and absorbable. Polycations are added to improve the adhesive properties of hyaluronic acid-based scaffolds. Composite scaffolds formed in this way are very suitable for cartilage structures since they can synthesize advanced proteoglycans (Dovedytis et al., 2020). Furthermore, hyaluronic acid plays an important role in the biological processes necessary for wound healing and granular tissue formation, inflammation and generation of epithelium. It is also used in the treatment of external skin injuries, scars and chronic and acute wounds such as abrasions and burns. Thanks to the anti-ulceration feature of hyaluronic acid, stomach and duodenal ulcers can be treated (Yasin et al., 2022).

By the way, hyaluronic acid is used in cosmetic products to prevent and treat wrinkles, expression lines and fibroblastic depletion. Hyaluronic acid is a substance with a natural moisturizing effect. Unlike other humidifiers, it is not affected by relative humidity because it has good water retention at both high and low relative humidity (Yasin et al., 2022).

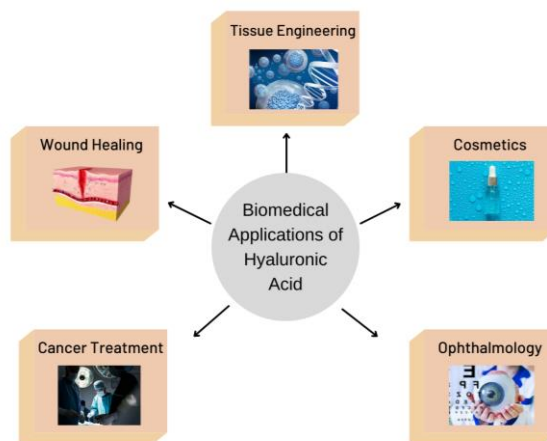


Figure 7. Biomedical applications of hyaluronic acid

### 3. Future Perspectives

Alginate, chitin, chitosan, HA, PHB, levan, obtained from renewable resources are only a few examples for biopolymers. The biological features of these polymers, which come from bacteria, algae, and fungi and can be used in a variety of industrial settings, have been compiled in Table 1.

Medical applications for biopolymers like chitosan and PLA silk are being researched more and more (Rebelo et al. 2017). The unique properties of biopolymers, like biocompatibility and biodegradability, provide significant benefits and increase the likelihood that they will be used in implantable medical applications. Since synthetic materials do not match the needs of biological systems, these novel materials are crucial in medicine. Recent studies have so shown that combining biopolymers with synthetic materials can transform medicine. The usage of non-renewable resources is raising environmental concerns, which is driving up demand for biodegradable polymers. Plastic packaging that is incorporated into society and supports a healthy, self-sustaining life is increasingly made of biodegradable polymers. It's even developing into the newest big thing. By 2023, the Markets and Markets annual report (Biopolymer's Market Forecast, 2020) projects that the market for biodegradable plastics would increase to \$6.12 billion. In order to replace present polymers, bio-based polymers are currently undergoing study and development. Researchers are seeking for novel materials that can replace polymers generated from petroleum. Renewable raw ingredients make up bio-based polymers. These polymers now account for a negligible (less than 1%) share of the plastics market. By using a bacterial fermentation technique to create monomers from agricultural plants' renewable resources, bio-based polymers are created (Baranwal et al. 2022).

Table 1  
Biopolymer's producers and properties

Biopolymer's Name	Producer Microorganisms	Effects/Properties
Alginate	<i>Macrocystis pyrifera</i> , <i>Laminaria hyperborea</i> , <i>Ascophyllum nodosum</i> (Szekalska et al., 2016)	Biocompatibility, ease of gelation, low or non-toxicity, non-immunogenicity (Lee et al., 2012)
Chitin	<i>Agaricus volvaceus</i> , <i>Agaricus acris</i> , <i>Agaricus cantarellus</i> , <i>Agaricus piperatus</i> , <i>Hydnum repandum</i> , <i>Hydnum hybridum</i> , <i>Boletus viscidus</i> (Crini and Lichtfouse, 2019; Batista et al., 2018).	Insoluble in water, non-toxic, biodegradable, biocompatible (Arbia et al., 2013; Anitha et al., 2014)
Chitosan	<i>Mucor rouxii</i> , <i>Phycomyces blakesleeana</i> , <i>Aspergillus niger</i> (Kuzgun and İnanlı, 2013)	Antitumoral, antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory (Aranaz et al., 2021)
Levan	<i>Acetobacter</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Erwinia</i> , <i>Gluconobacter</i> , <i>Halomonas</i> , <i>Microbacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Halomonas</i> (Tohme et al., 2018)	Film-forming ability, solubility in water and oil, adhesiveness, low viscosity, heat stability, acid-alkali stability, emulsifier, thickener, encapsulating agent, osmoregulator, food and feed additive, cryoprotector, plasma substitute, drug activity extender, (Çakmak et al., 2020; González-Garcinuño et al., 2018)
PHAs	<i>Pseudomonas oleovorans</i> (Durner et al., 2000; Ramsay et al., 1991), <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (Timm et al., 1990) and <i>Pseudomonas putida</i> (Tobin and O'Connor, 2005), <i>Ralstonia eutropha</i> (Durner et al., 2000), <i>Bacillus megaterium</i> (Gouda et al., 2001; Güngörmedi et al., 2014), <i>Bacillus drentensis</i> BP17 (Penkhrue et al., 2020), <i>Bacillus aryabhatai</i> (Balakrishna et al., 2020), <i>Geobacillus kaustophilus</i> (Gedikli et al., 2019)	Biocompatibility, bioresorbability, biodegradability, elastomeric (Hinchliffe et al., 2021)
HA	<i>Streptococcus zooepidemicus</i> (Abdallah et al., 2020; Liu et al., 2011), <i>Streptococcus equi</i> ssp. (Güngör et al., 2019)	Cell signalling, cell migration, viscoelastic, hydrodynamic, biocompatible, degradable, natural moisturizing (Falcone et al., 2006)

#### 4. Conclusion

The potential of microbial biopolymers in biomedical research area has emphasized in this review. The economic aspects, biosynthesis and properties of these polymers have been addressed for biochemical applications. The microbial biopolymers have advantage for overcoming of problems in biomedical research, because these polymers can be varied extraordinary and have the induced properties. Sustainable processes can be organized with microbial biopolymers in variety medical applications consist of tissue engineering, medical device development, drug deliver, cancer therapy, wound repairment.

#### Author Contribution

In this review; Author1, Conceptualization, Investigation, Writing; Author2, Investigation, Writing; Author3, Supervision, review & editing.

#### Conflict Of Interests

The authors have not declared any conflict of interests.

#### References

- Abdallah, M. M., Fernández, N., Matias, A. A., & Bronze, M. do R. (2020). Hyaluronic acid and Chondroitin sulfate from marine and terrestrial sources: Extraction and purification methods. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 243). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116441>
- Ahmad Raus, R., Wan Nawawi, W. M. F., & Nasaruddin, R. (2021). Alginate and alginate composites for biomedical applications. In *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences* (Vol. 16, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2020.10.001>
- Anderson, A. J., & Dawes, E. A. (1990). Occurrence, metabolism, metabolic role, and industrial uses of bacterial polyhydroxyalkanoates. *Microbiological Reviews*, 54(4). <https://doi.org/10.1128/mr.54.4.450-472.1990>
- Anitha, A., Sowmya, S., Kumar, P. T. S., Deepthi, S., Chennazhi, K. P., Ehrlich, H., Tsurkan, M., & Jayakumar, R. (2014). Chitin and chitosan in selected biomedical applications. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 39, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.02.008>
- Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Caballero, A. H., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 19). <https://doi.org/10.3390/polym13193256>

- Arbia, W., Arbia, L., Adour, L., & Amrane, A. (2013). Chitin extraction from crustacean shells using biological methods -A review. *Food Technology and Biotechnology*, 51(1).
- A.R.C. (2020). Biopolymers Market–Forecast (2022–2027). <https://www.industryarc.com/Report/11739/biopolymersmarket.html> this site was available on 23.12.2022
- Balakrishna Pillai, A., Jaya Kumar, A., & Kumarapillai, H. (2020). Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) in *Bacillus aryabhattai* and cytotoxicity evaluation of PHBV/poly(ethylene glycol) blends. *3 Biotech*, 10(2). <https://doi.org/10.1007/s13205-019-2017-9>
- Barr, T. (2020). The Past and Future of the Seaweed Derived Impression Material Alginate.
- Braunegg, G., Lefebvre, G., & Genser, K. F. (1998). Polyhydroxyalkanoates, biopolyesters from renewable resources: Physiological and engineering aspects. In *Journal of Biotechnology* (Vol. 65, Issues 2–3). [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(98\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(98)00126-6)
- Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., & Kumar, A. (2022). Biopolymer: A Sustainable Material for Food and Medical Applications. *Polymers*, 14(5), 983. <https://doi.org/10.3390/polym14050983>
- Çakmak, H., Çelik, P. A., Çınar, S., Hoşgün, E. Z., Mutlu, M. B., & Çabuk, A. (2020). Levam Production Potentials from Different Hypersaline Environments in Turkey. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.10.1.61-64>
- Çankaya, N. (2017). Biyopolimerler ve Montmorillonit Kil Nanokompozitleri. *Politeknik Dergisi*, 20(3).
- Chen, G. Q., & Wu, Q. (2005). The application of polyhydroxyalkanoates as tissue engineering materials. In *Biomaterials* (Vol. 26, Issue 33). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.04.036>
- Chen, Y., Guo, Z., Wang, X., & Qiu, C. (2008). Sample preparation. In *Journal of Chromatography A* (Vol. 1184, Issues 1–2). <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.10.026>
- Chesterman, J., Zhang, Z., Ortiz, O., Goyal, R., & Kohn, J. (2020). Biodegradable polymers. In *Principles of Tissue Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818422-6.00019-8>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Sustainable Agriculture Reviews 35. In *Sustainable Agriculture Reviews* (Vol. 35, Issue Chitin and Chitosan: History, Fundamentals and Innovations).
- Dash, M., Chiellini, F., Ottenbrite, R. M., & Chiellini, E. (2011). Chitosan - A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. In *Progress in Polymer Science* (Oxford) (Vol. 36, Issue 8). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.02.001>
- de Lima Batista, A. C., de Souza Neto, F. E., & de Souza Paiva, W. (2018). Review of fungal chitosan: past, present and perspectives in Brazil. In *Polimeros* (Vol. 28, Issue 3). <https://doi.org/10.1590/0104-1428.08316>
- Dovedytis, M., Liu, Z. J., & Bartlett, S. (2020). Hyaluronic acid and its biomedical applications: A review. In *Engineered Regeneration* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.10.001>
- Dunlop, W. F., & Robards, A. W. (1973). Ultrastructural study of poly  $\beta$  hydroxybutyrate granules from *Bacillus cereus*. *Journal of Bacteriology*, 114(3). <https://doi.org/10.1128/jb.114.3.1271-1280.1973>
- Durner, R., Witholt, B., & Egli, T. (2000). Accumulation of poly[(R)-3-hydroxyalkanoates] in *Pseudomonas oleovorans* during growth with octanoate in continuous culture at different dilution rates. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(8). <https://doi.org/10.1128/AEM.66.8.3408-3414.2000>
- el Knidri, H., Belaabed, R., Addaou, A., Laajeb, A., & Lahsini, A. (2018). Extraction, chemical modification and characterization of chitin and chitosan. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 120). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.139>
- Falcone, S. J., Palmeri, D., & Berg, R. A. (2006). Biomedical applications of hyaluronic acid. *ACS Symposium Series*, 934. <https://doi.org/10.1021/bk-2006-0934.ch008>
- Gedikli, S., Çelik, P. A., Demirbilek, M., Mutlu, M. B., Denkbaz, E. B., & Çabuk, A. (2019). Experimental Exploration of Thermostable Poly ( $\beta$ -Hydroxybutyrates) by *Geobacillus kaustophilus* Using Box-Behnken Design. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(2). <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1335-z>
- Ghosh, S., Lahiri, D., Nag, M., Dey, A., Sarkar, T., Pathak, S. K., Edinur, H. A., Pati, S., & Ray, R. R. (2021). Bacterial biopolymer: Its role in pathogenesis to effective biomaterials. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/polym13081242>
- Gomes, T. D., Caridade, S. G., Sousa, M. P., Azevedo, S., Kandur, M. Y., Öner, E. T., Alves, N. M., & Mano, J. F. (2018). Adhesive free-standing multilayer films containing sulfated levan for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.01.027>

- González-Garcinuño, Á., Tabernero, A., Domínguez, Á., Galán, M. A., & Martín del Valle, E. M. (2018). Levan and levansucrases: Polymer, enzyme, microorganisms and biomedical applications. *Biocatalysis and Biotransformation*, 36(3). <https://doi.org/10.1080/10242422.2017.1314467>
- Gouda, M. K., Swellam, A. E., & Omar, S. H. (2001). Production of PHB by a *Bacillus megaterium* strain using sugarcane molasses and corn steep liquor as sole carbon and nitrogen sources. *Microbiological Research*, 156(3). <https://doi.org/10.1078/0944-5013-00104>
- Güngör, G., Gedikli, S., Toptaş, Y., Akgün, D. E., Demirbilek, M., Yazıhan, N., Aytar Çelik, P., Denkbaş, E. B., & Çabuk, A. (2019). Bacterial hyaluronic acid production through an alternative extraction method and its characterization. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(6). <https://doi.org/10.1002/jctb.5957>
- Güngörmedi, G., Demirbilek, M., Mutlu, M. B., Denkbaş, E. B., & Çabuk, A. (2014). Polyhydroxybutyrate and hydroxyvalerate production by *Bacillus megaterium* strain A1 isolated from hydrocarbon-contaminated soil. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(15). <https://doi.org/10.1002/app.40530>
- Haddar, A., Hamed, M., Bouallegue, A., Bastos, R., Coelho, E., & Coimbra, M. A. (2021). Structural elucidation and interfacial properties of a levan isolated from *Bacillus mojavensis*. *Food Chemistry*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128456>
- Hinchliffe, J. D., Madappura, A. P., Syed Mohamed, S. M. D., & Roy, I. (2021). Biomedical applications of bacteria-derived polymers. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/polym13071081>
- Jose, A. A., Hazeena, S. H., Lakshmi, N. M., B, A. K., Madhavan, A., Sirohi, R., Tarafdar, A., Sindhu, R., Awasthi, M. K., Pandey, A., & Binod, P. (2022). Bacterial biopolymers: From production to applications in biomedicine. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 25, 100582. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100582>
- Koller, M., Atlíć, A., Dias, M., Reiterer, A., & Braunegg, G. (2010). Microbial PHA Production from Waste Raw Materials. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5_5)
- Kuzgun, N. K., & İnanlı, A. G. (2013). Kitosan üretimi ve özellikleri ile kitosanın kullanım alanları. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi* 6, 6(2).
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. In *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 37, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
- Liu, L., Liu, Y., Li, J., Du, G., & Chen, J. (2011). Microbial production of hyaluronic acid: current state, challenges, and perspectives. In *Microbial Cell Factories* (Vol. 10). <https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-99>
- Madison, L. L., & Huisman, G. W. (1999). Metabolic Engineering of Poly(3-Hydroxyalkanoates): From DNA to Plastic. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63(1). <https://doi.org/10.1128/mmr.63.1.21-53.1999>
- Masaeli, E., Morshed, M., Nasr-Esfahani, M. H., Sadri, S., Hilderink, J., van Apeldoorn, A., van Blitterswijk, C. A., & Moroni, L. (2013). Fabrication, Characterization and Cellular Compatibility of Poly (Hydroxy Alkanoate) Composite Nanofibrous Scaffolds for Nerve Tissue Engineering. *PLoS ONE*, 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057157>
- Miu, D. M., Eremia, M. C., & Moscovici, M. (2022). Polyhydroxyalkanoates (PHAs) as Biomaterials in Tissue Engineering: Production, Isolation, Characterization. In *Materials* (Vol. 15, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/ma15041410>
- Mohan, S., Oluwafemi, O. S., Kalarikkal, N., Thomas, S., & Songca, S. P. (2016). Biopolymers – Application in Nanoscience and Nanotechnology. In *Recent Advances in Biopolymers*. <https://doi.org/10.5772/62225>
- Moradali, M. F., & Rehm, B. H. A. (2020). Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 18, Issue 4). <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0313-3>
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., & Crini, G. (2019). Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 17, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00904-x>
- Muhammadi, Shabina, Afzal, M., & Hameed, S. (2015). Bacterial polyhydroxyalkanoates-eco-friendly next generation plastic: Production, biocompatibility, biodegradation, physical properties and applications. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 8(3-4). <https://doi.org/10.1080/17518253.2015.1109715>
- Murado, M. A., Montemayor, M. I., Cabo, M. L., Vázquez, J. A., & González, M. P. (2012). Optimization of extraction and purification process of hyaluronic acid from fish eyeball. *Food and Bioprocess Processing*, 90(3). <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.11.002>

- Odian, G. (2004). Principles of Polymerization. In Principles of Polymerization. <https://doi.org/10.1002/047147875x>
- Öner, E. T., Hernández, L., & Combie, J. (2016). Review of Levan polysaccharide: From a century of past experiences to future prospects. In *Biotechnology Advances* (Vol. 34, Issue 5). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.05.002>
- Othman, S. H. (2014). Bio-nanocomposite Materials for Food Packaging Applications: Types of Biopolymer and Nano-sized Filler. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.042>
- Pawar, S. N., & Edgar, K. J. (2012). Alginate derivatization: A review of chemistry, properties and applications. In *Biomaterials* (Vol. 33, Issue 11). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.01.007>
- Penkhrue, W., Jendrossek, D., Khanongnuch, C., Pathomareeid, W., Aizawa, T., Behrens, R. L., & Lumyongid, S. (2020). Response surface method for polyhydroxybutyrate (PHB) bioplastic accumulation in *Bacillus drentensis* BP17 using pineapple peel. *PLoS ONE*, 15(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230443>
- Pereira, R., Mendes, A., & Bártolo, P. (2013). Alginate/Aloe vera hydrogel films for biomedical applications. *Procedia CIRP*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.042>
- Poirier, Y. (2002). Polyhydroxyalkanoate synthesis in plants as a tool for biotechnology and basic studies of lipid metabolism. In *Progress in Lipid Research* (Vol. 41, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/S0163-7827\(01\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0163-7827(01)00018-2)
- Puscaselu, R. G., Lobiuc, A., Dimian, M., & Covasa, M. (2020). Alginate: From food industry to biomedical applications and management of metabolic disorders. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/polym12102417>
- Quillaguamán, J., Guzmán, H., Van-Thuoc, D., & Hatti-Kaul, R. (2010). Synthesis and production of polyhydroxyalkanoates by halophiles: Current potential and future prospects. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 85, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2397-6>
- Ramsay, B. A., Saracovan, I., Ramsay, J. A., & Marchessault, R. H. (1991). Continuous production of long-side-chain poly- $\beta$ -hydroxyalkanoates by *Pseudomonas oleovorans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(3). <https://doi.org/10.1128/aem.57.3.625-629.1991>
- Rebello, R., Fernandes, M., & Fangueiro, R. (2017). Biopolymers in Medical Implants: A Brief Review. *Procedia Engineering*, 200, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.034>
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. In *Progress in Polymer Science* (Oxford) (Vol. 31, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Ruiz, G. A. M., & Corrales, H. F. Z. (2017). Chitosan, Chitosan Derivatives and their Biomedical Applications. In *Biological Activities and Application of Marine Polysaccharides*. <https://doi.org/10.5772/66527>
- Sahoo, D. R., & Biswal, T. (2021). Alginate and its application to tissue engineering. In *SN Applied Sciences* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04096-w>
- Salehizadeh, H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2004). Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: Recent trends and biotechnological importance. *Biotechnology Advances*, 22(3). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.09.003>
- Salernitano, E., & Migliaresi, C. (2018). Composite Materials for Biomedical Applications: A Review. <https://doi.org/10.1177/228080000300100102>
- Saranraj, P., & Naidu, M. A. (2013). Hyaluronic Acid Production and its Applications-A Review. In *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives* (Vol. 4, Issue 5).
- Selyanin, M. A., Boykov, P. Ya., Khabarov, V. N., & Polyak, F. (2015). The History of Hyaluronic Acid Discovery, Foundational Research and Initial Use. In *Hyaluronic Acid*. <https://doi.org/10.1002/9781118695920.ch1>
- Slater, S., Gallaher, T., & Dennis, D. (1992). Production of poly-(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) in a recombinant *Escherichia coli* strain. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(4). <https://doi.org/10.1128/aem.58.4.1089-1094.1992>
- Srikanth, R., Reddy, C. H. S. S., Siddartha, G., Ramaiah, M. J., & Uppuluri, K. B. (2015). Review on production, characterization and applications of microbial levan. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 120). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.003>
- Steinbüchel, A., & Schlegel, H. G. (1991). Physiology and molecular genetics of poly ( $\beta$ -hydroxyalkanoic acid) synthesis in *Alcaligenes eutrophus*. In *Molecular Microbiology* (Vol. 5, Issue 3).

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.1991.tb00725.x>

- Szekalska, M., Puciłowska, A., Szymańska, E., Ciosek, P., & Winnicka, K. (2016). Alginate: Current Use and Future Perspectives in Pharmaceutical and Biomedical Applications. In *International Journal of Polymer Science* (Vol. 2016). <https://doi.org/10.1155/2016/7697031>
- Taidi, B., Anderson, A. J., Dawes, E. A., & Byrom, D. (1994). Effect of carbon source and concentration on the molecular mass of poly(3-hydroxybutyrate) produced by *Methylobacterium extorquens* and *Alcaligenes eutrophus*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 40(6). <https://doi.org/10.1007/BF00173975>
- Taran, M., Etemadi, S., & Safaei, M. (2017). Microbial levan biopolymer production and its use for the synthesis of an antibacterial iron (II,III) oxide–levan nanocomposite. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(12). <https://doi.org/10.1002/app.44613>
- Tobin, K. M., & O'Connor, K. E. (2005). Polyhydroxyalkanoate accumulating diversity of *Pseudomonas* species utilising aromatic hydrocarbons. *FEMS Microbiology Letters*, 253(1). <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.09.025>
- Tohme, S., Haciosmanoğlu, G. G., Eroğlu, M. S., Kasavi, C., Genç, S., Can, Z. S., & Toksoy Oner, E. (2018). *Halomonas smyrnensis* as a cell factory for co-production of PHB and levan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.197>
- Wani, S., Shaikh, S., & Sayyed z, R. (2016). Microbial Biopolymers in Biomedical Field. *MOJ Cell Science & Report*, 3(3). <https://doi.org/10.15406/mojcsr.2016.03.00055>
- Williams, S. F., Martin, D. P., Horowitz, D. M., & Peoples, O. P. (1999). PHA applications: Addressing the price performance issue I. Tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 25(1-3). [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(99\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(99)00022-7)
- Yasin, A., Ren, Y., Li, J., Sheng, Y., Cao, C., & Zhang, K. (2022). Advances in Hyaluronic Acid for Biomedical Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 910290. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.910290>
- Zhang, Z., Ortiz, O., Goyal, R., & Kohn, J. (2014). Biodegradable Polymers. In *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-22805-3.00013-X>

**YAPI ELEMANLARININ YENİDEN KULLANIMI VE ENVANTER KISITLI YAPISAL OPTİMİZASYON**Soner SEZER<sup>1</sup>, Hakan ÖZBAŞARAN<sup>2\*</sup>, Murat HİÇYILMAZ<sup>3</sup><sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. ABD., Eskişehir/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8116-3837><sup>2\*</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1959-5297><sup>3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4132-4285>

Anahtar Kelimeler	Öz
Yeniden kullanım Yapısal optimizasyon Stok Envanter Döngüsel ekonomi	<i>İnşaat sektörü çevresel etkiler ve atık oluşumu bakımından en büyük paydaşlardan birisidir. Karar verici kuruluşların çevresel etkileri azaltmak amacıyla baskılarını gündün güne arttırdığı bilinmektedir. Bu amaç doğrultusunda, bir döngüsel ekonomi stratejisi olan yeniden kullanımın yapısal sistemlere uygulanması değerli bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu literatür incelemesinde, son yıllarda yapı elemanlarının yeniden kullanımına olan ilginin artması ile gündeme gelen envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) alanındaki çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. EKYO yönteminden yapısal elemanların yeniden kullanımı ile elde edilen kazanımı maksimize etmesi beklenmektedir. EKYO yönteminin daha geniş bir perspektifte tartışılabilmesi için öncelikle yapısal elemanlarının yeniden kullanımı, inşaat sektörünün çevresel etkileri ve döngüsel ekonomi modeli, yapı elemanlarının yeniden kullanımının önündeki engeller ve sunulan çözümler, literatürde sunulan uygulama incelemeleri ve vaka çalışmaları özetlenmiştir. Ardından bu incelemenin ana konusu olan envanter kısıtlı yapısal optimizasyona dair literatürdeki çalışmaların geniş incelemeleri sunulmuştur.</i>

**REUSE OF STRUCTURAL ELEMENTS AND INVENTORY CONSTRAINED STRUCTURAL OPTIMIZATION**

Keywords	Abstract
Reuse Structural optimization Stock Inventory Circular economy	<i>The construction industry is one of the biggest stakeholders in terms of environmental impacts and waste production. It is known that the pressure on the decision-making organizations to reduce environmental impacts is increasing day by day. For this purpose, the application of reuse, which is a circular economy strategy, to structural systems has emerged as a valuable solution. In this literature review, it is aimed to analyze the studies in the field of inventory constrained structural optimization (ICSO) which has come to the fore with the increasing interest in the reuse of structural elements in recent years. It is expected that the ICSO method will maximize the gain obtained by the reuse of structural elements. Primarily in order to discuss the ICSO method in a wider perspective, the reuse of structural elements, the environmental impacts of the construction sector and the circular economy model, the barriers and solutions to the reuse of structural elements, and the application reviews and case studies presented in the literature are summarized. Then extensive reviews of studies in the literature on inventory constrained structural optimization, which is the main subject of this review, are presented.</i>

Derleme Makale

Başvuru Tarihi

: 10.04.2023

Kabul Tarihi

: 07.12.2023

Review Article

Submission Date

: 10.04.2023

Accepted Date

: 07.12.2023

\* Sorumlu yazar: [ozbasaran@ogu.edu.tr](mailto:ozbasaran@ogu.edu.tr)<https://doi.org/10.31796/ogummf.1280445>Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Yapı mühendisliğinin yeni bir çalışma alanı olarak görülen yapısal optimizasyon, yapısal tasarım süreçlerini karar verme problemlerine dönüştürerek ele almaktadır. Karar verme, var olan seçeneklerden en iyisinin arandığı bilişsel bir eylemdir. Karar verme problemine dönüştürülen tasarım süreçleri, önceden tanımlanmış kısıtlar dahilinde sonucun uygunluğunu belirten amaç fonksiyonunun minimize veya maksimize edilmesiyle yürütülür. Problemdeki kaynak kullanımlarını ve/veya çeşitli faaliyetlerin miktarlarını temsil eden tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonunun en iyi değerini elde edecek şekilde değiştirilerek karar verme probleminin optimum çözümünün bulunması hedeflenmektedir. Bir yapısal tasarım süreci için tasarım değişkenleri genellikle kesit özelliklerini karakterize eden parametreleri, kısıtlar ise yer değiştirme, gerilme gibi limitleri ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu ise yapı maliyetini minimize edecek şekilde seçilmektedir (Saka, Hasançebi ve Geem, 2016).

Geleneksel yapısal optimizasyon yöntemi ihtiyaç duyulan miktarda ve istenilen dayanım ve geometri özelliklerini karşılayacak çeşitlilikte yapısal elemana sahip olduğu varsayımı ile yürütülmektedir. Her ne kadar günümüz için bu varsayım geçerli olsa da doğal kaynakların tükenmesi gibi sebeplerle yeni yapı elemanı bulunamaması ya da çeşitli gerekçelerle yeni yapı elemanı üretilmesinin eskisi kadar cazip olmaması gibi senaryolar altında bu varsayımın geçersiz olabileceği düşünülmektedir. Yeni yapı elemanı üretiminin cazibesini yitirmesi karbon salınımı ve yerleşik enerji gibi çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik bakımından dezavantajlı hale gelmesi ile açıklanmaktadır. Bu noktada ömrünü tamamlamış yapılardan kazanılan yapı elemanlarının yeniden kullanılması fikri değerli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Yeniden kullanımın çevresel etkileri azaltırken atık yönetimi konusunda da ciddi katkılar sunması beklenmektedir.

Yapısal elemanların yeniden kullanımı her ne kadar yenilikçi bir fikir gibi görülsün de tarih boyunca bilinen ve uygulanan bir yöntemdir. Özellikle sanayi devriminden önceki dönemlerde kısıtlı lojistik imkânlar nedeniyle yapısal eleman ihtiyacının yerel kaynaklardan karşılandığı bilinmektedir. Bu durumun inşaat süreci için ciddi bir kısıt oluşturduğu düşünülmektedir. Yapısal bileşenlerin yeniden kullanımına dair örnekler tarihin çeşitli döneminde rastlanmaktadır. Örneğin: Antik Roma, Mısır ve Yunan uygarlıklarında yıkılan binaların taş ve tuğlalarının yeniden kullanıldığı bilinmektedir (Addis, 2006). İspanya'nın Kordoba şehrinde 8. yüzyılda inşa edilen Kurtuba Camii sütunlarının bir kısmı yakın çevrede bulunan Roma ve Vizigot harabelerinden elde edilmiştir (Balbas, 1965; akt.: Brütting, Wolf ve Fivet, 2019a). Birinci dünya savaşından sonraki süreçte de

yapı elemanı tedarik sıkıntılarından dolayı yeniden kullanımın popüler bir yöntem olduğu bilinmektedir (Brütting ve diğ., 2019a).

Bu çalışmada, son yıllarda yapı elemanlarının yeniden kullanımına olan ilginin artması ile gündeme gelen envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) alanındaki çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır. EKYÖ, klasik yapısal optimizasyon yönteminde sıklıkla tercih edilen ağırlık ya da maliyet minimizasyonu ile değil daha çok çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik kavramlarıyla temellendirildiğinden Bölüm 2'de inşaat sektörünün çevresel etkileri ve döngüsel ekonomi; EKYÖ'nün önündeki muhtemel engellerin anlaşılabilmesi için Bölüm 3'te yapısal elemanların yeniden kullanımı ile ilgili problemler ve bu problemlere sunulan bazı çözümler; yeniden kullanımın sunduğu çıktıların anlaşılabilmesi için Bölüm 4'te literatürde bulunan bazı uygulama incelemeleri ve vaka çalışmaları incelenmiştir. Ardından bu çalışmanın ana amacı olan envanter kısıtlı yapısal optimizasyon alanındaki çalışmaların detaylı incelemeleri Bölüm 5'te sunulmuştur.

## 2. İnşaat Sektörünün Çevresel Etkileri ve Döngüsel Ekonomi

İnşaat sektörü; doğal kaynak tüketimi, sera gazı emisyonları, enerji sarfiyatı ve atık oluşumu konularında büyük paydaşlardan birisidir (Allwood ve Cullen, 2012; Eurostat, 2022). Öyle ki Avrupa Birliği içerisindeki en büyük atık oluşumu inşaat ve yıkım kaynaklıdır. Bu atığın miktarı hafriyat atıkları hariç yıllık 350 milyon tondan daha fazladır (European Commission, 2017). İnşaat sektörünün yerleşik etkilerinden önemli bir kısmının da taşıyıcı sistemlerden kaynaklandığı bilinmektedir. Hammadde çıkarılması, işleme, nakliye, montaj gibi safhalarda enerji tüketilmekte ve karbon salınımı yapılmaktadır. Yerleşik etkilerin azaltılması amacıyla döngüsel ekonomi modelinin inşaat sektörü için de uygulanması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Döngüsel ekonominin iş modelleri 1970'li yıllardan beri bilinmektedir. İlgili model mevcut ekonomik sistemdeki kaynak kullanımının malzeme tüketimi açısından sürdürülebilir olmadığı fikrinden ortaya çıkmıştır (Stahel, 2013). Döngüsel ekonominin ana hedefi üretilen bir ürünün mümkün olduğunca tekrarlı çevrimler ile kullanımda tutulmasını sağlamaktır. Bu bağlamda onarım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm olmak üzere üç temel strateji esas alınmaktadır. Döngüsel ekonomi modelinin ana başlıkları ve çevrim şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.





Şekil 1. Döngüsel ekonomi modeli (Ünlütürk ve diğ., 2020)

Konuya yapı mühendisliği açısından bakıldığında, yeniden kullanım ve geri dönüşüm seçeneklerinden hangisinin daha cazip olduğu halen tartışılan bir konudur. Geri dönüşümün en çok tercih edilen döngüsel ekonomi yöntemi olduğu bilinmektedir. Geri dönüşüm için yeniden işleme gerekliliğinden ortaya çıkan enerji sarfiyatının çevreye olumsuz etkileri olduğu eleştirisi hâkimdir. Bu bağlamda yeniden kullanım seçeneğinin, yapıların çevresel etkilerini düşürmek noktasında daha iyi bir çözüm sunabileceği ileri sürülmüştür (Allwood ve Cullen, 2012; Iacovidou ve Purnell, 2016). Çelik bileşenler için yeniden kullanım, geri dönüşümleri için salınan karbonu %60'dan fazla azaltabilmektedir (Gorgolewski, 2008). Yeung, Walbridge

Haas ve Saari (2017) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanım ve geri dönüşüm için karşılaştırmalı bir yaşam döngüsü ve maliyet analizi sunulmuştur. Yapılan vaka çalışmasına göre yeniden kullanım ile çevresel etki parametrelerinin büyük çoğunluğunun azaldığı ancak maliyetlerin arttığı ifade edilmiş, çevresel etkiler ile birlikte maliyetlerin de azaltılması için bir dizi önerilerde bulunulmuştur. Vares, Hradil, Sansom ve Ungureanu (2020) tarafından yapılan çalışmada çeşitli yeniden kullanım senaryoları için ekonomik ve çevresel değerlendirmeler yapılmıştır. Çelik yapılar için yapılan vaka çalışmasının neticesinde yeniden kullanılan elemanların geri dönüşüme göre daha düşük çevrim maliyeti olduğu, çevresel etkinin de azaldığı rapor edilmiştir. Literatürde yeniden kullanım ve geri dönüşümün karşılaştırıldığı çalışmalarda, yeniden kullanımın çevresel etkileri azalttığı konusunda bir mutabakat olsa da maliyet konusunda birbirinden farklı sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Bunun temel sebebinin vaka çalışmalarında değişkenlik gösterebilecek belirsiz parametreler olduğu düşünülmektedir. Örneğin yıkım maliyetleri, taşıma mesafeleri, kazanılan elemanların ekstra işlemlere ihtiyacı olup olmadığı gibi çok sayıda vakaya özgü belirsiz parametre bulunmaktadır. Bu bağlamda genel

geçer sonuçlar aramak yerine vaka bazında analiz yapma gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

### 3. Yapı Elemanlarının Yeniden Kullanımının Önündeki Engeller ve Çözümler

Yapı elemanlarının yeniden kullanımı her ne kadar cazip bir alternatif olarak sunulsa da önünde bazı engeller bulunduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Iacovidou ve Purnell (2016) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanımın çok büyük potansiyeller vaat ettiği ve bu potansiyelin sektör tarafından kabul edildiği ancak ekonomik, organizasyonel, politik ve teknik engeller bulunduğu belirtilmiştir. Ekonomik engeller seçici yıkımın getirdiği ek maliyetler, depolama ve nakliye giderlerinin artması, yeniden kullanılmak üzere kazanılan elemanlar için bir pazar bulunmaması gibi sebeplerle; organizasyonel engeller yeniden kullanılacak elemanlarla ilgili herhangi bir standart bulunmaması, yıkım operasyonlarının dar bir programla ve çok sayıda tarafla yapılması, bileşenlerin depolanması için altyapı eksikliği gibi sebeplerle; politik engeller yeniden kullanıma teşvik ve rehberlik edecek politikalar geliştirilmemesi gibi sebeplerle; teknik engeller mevcut yapıların söküm için tasarlanmamış olması, yeniden kullanılacak elemanların yapısal performanslarını belgeleyip garanti edecek prosedürlerin olmaması, seçici yıkım ve yeniden kullanım konusundaki teknik bilgi ve tecrübe eksikliği, kazanılacak elemanlardaki kalite konusundaki belirsizlik ve eleman boyutlarındaki çeşitlilik gibi sebeplerle açıklanmaktadır. Yeniden kullanımın kazandıracaklarının literatürde belgelenmesine karşın konu hakkında inşaat sektörü içerisinde bilgi ve bilinirlik noktalarında eksikler olduğunun altı çizilmiştir. Yeniden kullanım ile sağlanabilecek avantajları ortaya koyan çalışmaların artmasıyla sektör paydaşlarının adaptasyonunun kolaylaşabileceği ifade edilmiştir. Tingley, Cooper ve Cullen (2017) tarafından İngiltere için yapılan çalışmada yapısal çeliğin yeniden kullanımının önündeki engeller sektör temsilcileri ile görüşmeler yapılarak araştırılmıştır. En önemli engeller olarak maliyet, bulunabilirlik ve depolama, müşteri talebinin düşük olması, çeliğin izlenebilirliği ve tedarik zincirindeki boşluklar raporlanmıştır. Katılımcıların büyük çoğunluğunun yeniden kullanımın en büyük faydasının çevresel etkiler üzerinde olacağını düşündüğü bildirilmiştir. Ruan (2020) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanılan çelik elemanlar ile inşa edilen yapıların performansını değerlendirecek herhangi bir standart olmadığı ifade edilmiş, yeniden kullanılan elemanlardaki kusurların yapısal stabiliteye etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak; yeniden kullanılacak elemanların önceki hizmet ömründe, sökülürken, taşınırken, yeniden kaynaklanırken ve montaj sırasında hasar alabileceği; bu elemanların

sonraki hizmet ömürlerinde basınç etkisi altında olması durumunda geometrik kusurlarının ve bu kusurlardan oluşan ek gerilmelerin tespit edilmesinin kritik olduğu vurgulanmıştır. Vares ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada yönetmeliklerin yeniden kullanım yöntemini desteklemediği, mevcut bina stokunun sökülmesi için tasarlanmadığı, mevcut binalardan malzeme kazanılmasının karmaşık ve zorlu bir süreç olduğu vurgulanmıştır. Condotta ve Zatta (2021) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanımın Avrupa birliği tarafından kaynak yönetimi, çevresel etkiler ve atık yönetimi konularındaki faydaları sebebi ile teşvik edilen bir öncelikli alan olduğu ifade edilmiştir. Buna karşın geri kazanılan elemanların kullanımına ilişkin bazı yasal boşluklar olduğu, AB normlarındaki bütünlükten uzak yapı gereği çeşitli tutarsızlıkların ortaya çıktığı belirtilmiştir. İlgili yasal boşluk ve tutarsızlıkların mevcut problemleri derinleştirdiği ifade edilmiştir. Bir yapı elemanı yıkım yoluyla elde edildiğinde AB normlarına göre iki farklı statüde değerlendirilebildiği, geri kazanılan unsurun gelecekteki kullanımı aynı kalacaksa “önleme” kategorisine girdiği, daha sonra yeniden kullanılabilmesi yasal olarak yapı malzemesi standartlarına tabi olduğu belirtilirken; kullanım amacı değişirse “yeniden kullanıma hazırlama” kategorisinde değerlendirildiği ve atık olarak kabul edildiği; kontrol, temizleme ve geri kazanım süreçlerinden geçmesi gerektiği bildirilmiştir. Bu işlemlerin ardından yapı malzemeleri yönetmeliğine uygunluğu değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Yapı malzemeleri yönetmeliğinin ise ürünün kendisi ile ilgili değil kullanım alanıyla ilgili standartları ortaya koyduğundan dolayı yeniden kullanımı kısıtladığı belirtilmiştir. Yasal çerçevedeki problemlerin yeniden kullanımı doğrudan engellemese de proje sürelerini uzattığı, süreç maliyetlerini arttırdığı, elemanların performans değerlendirmelerinde sorunlara yol açtığı ve son kullanıcıda olumsuz bir izlenim bıraktığı vurgulanmıştır.

Literatürde tanımlanan engellerin aşılması için önemli sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılardan eleman kazanma sürecinin kolaylaştırılması amacıyla “söküme göre tasarım” kavramı ortaya atılmıştır. Bu tasarım yöntemine göre; yeni yapılacak yapıların ömürlerini tamamladığında kolayca sökülerek, elemanlarının geri kazanılacak şekilde tasarlanması beklenmektedir. Tasarım aşamasında yapının gelecekte nasıl söküleceğine ilişkin projelendirme yapılması, yapısal elemanlar birbirine bağlanırken mümkün olduğunca kalıcı bağlantılardan kaçınılması sökülme sırasında minimum maliyet ve hasar hedeflerinin sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca hangi yapının ne zaman söküleceği, söküldüğünde nasıl bir envanter elde edileceği, sökülme maliyetinin ve işlem süresinin tahmin edilebilirliği gibi önemli bilgiler elde edilerek yapı elemanlarının yeniden kullanımının sürdürülebilirliğine katkı sağlanması beklenmektedir.

Bu sayede yeniden kullanım için gereken seçici yıkım maliyetlerinin düşeceği ve kurtarılan malzemeler için yeni bir pazar yaratılacağı belirtilmiştir (Rios, Chong ve Grau, 2015). Buna ek olarak sökülme göre tasarım yönteminin yerleşik enerjiyi, hava kirliliğini ve emisyonları düşüreceği bildirilmiştir (Akinade ve diğ., 2017). Kanter (2018) tarafından yapılan incelemede çelik yapılar için sökülme göre tasarımdaki son durum ve tasarım sürecine olan etkileri ele alınmıştır. Sökülme göre tasarımın çevresel, sosyal ve finansal faydalara yol açabileceği ifade edilmiştir. Çalışmaya göre çelik yapıların sökülme göre tasarımına dair geniş bir literatür olsa da tasarım ekiplerinin uygulayacağı net prosedürlerin henüz geliştirilemediği bildirilmiştir. Sökülme göre tasarım yönteminde kullanılmak üzere tasarım ekiplerini destekleyecek çok fazla araç olmadığı, buna karşın BIM (yapı bilgi modellemesi) ile sökülme göre tasarıma ciddi bir destek sağlanabileceği ifade edilmiştir. Kanyılmaz, Birhane, Fishwick ve Castillo (2023) tarafından yapılan çalışmada yapısal çeliğin yeniden kullanımı konusundaki engeller; malzeme bulunabilirliği, yeterli tasarım standartlarının olmayışı, ön maliyetler ve inşaat öncesi yıkımın oluşturduğu karbon etkisi, yıkımdan elde edilecek malzemelerin yeniden kullanımının maksimize edilmesi konusundaki problemler, yeniden kullanımın tüm inşaat ekosisteminde etkin şekilde kullanımı ve koordinasyonunun sağlanamaması olarak başlıklandırılmıştır. Salama (2017) tarafından yapılan çalışmada betonarme yapılar için sökülme göre tasarım konusu incelenmiştir. Çalışmada betonarme binaların yeniden sökülme gibi geleneksel yöntemlerle inşaa edilmesi sebebiyle sökülme göre tasarım ilkelerine çok uzak olduğu, bu sebeple yıkıma mecbur kaldığı ifade edilmiştir. Ön üretimli betonarme elemanların yaygınlaşması ile sökülme göre tasarımın kolaylaşacağı belirtilmiştir. Buradan hareketle demontaj kapasitesinin artırılması ve sökülme göre tasarım prensiplerinin uygulanabilmesi için ön üretimli betonarme eleman ve sistemlerin geliştirilmesi noktasında daha çok çalışmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna ulaşılmıştır. Walsh ve Shotton (2022) tarafından yapılan çalışmada İrlanda için yapısal malzeme kullanımında ahşapın yükselen bir trend olduğu vurgulanarak ilerleyen zamanlarda kereste tedariki anlamında ciddi bir baskı oluşacağı belirtilmiştir. Bu sorunun önüne geçilebilmesi amacıyla tipik bir müstakil konut üzerinde yapısal malzemelerin yeniden kullanımı araştırılmış, yeniden kullanım potansiyelini maksimize etmek amacıyla sökülme için tasarım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sökülme için tasarımla birlikte yeniden kullanılabilir eleman oranının %41’den %74’e çıkarıldığı belirtilmiştir. Estrella ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada yapılardan yeniden kullanılmak üzere malzeme kazanımının zorlu bir süreç olduğu belirtilerek ilk tasarımın sökülebilir elemanlarla gerçekleştirilmesi ile bu sorunun önüne geçilebileceği belirtilmiştir. Bu amaç

doğrultusunda PixelSlab adı verilen bir modüler taşıyıcı ahşap sistem önerilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel testlerin ardından önerilen sistemin defalarca hasara uğramadan sökülüp yeniden kullanılabilir olduğu, diğer yapı elemanları ile uyumlu olduğu, söküm ve yeniden uygulama için ciddi bir işçilik gerekeceği, kompakt tasarımı sayesinde nakliye operasyonlarını kolaylaştırdığı belirtilmiştir.

Yapı elemanlarının yeniden kullanılmasının önündeki engellerin aşılması için güncel teknolojik imkanlardan faydalanılmasını amaçlayan çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Ness, Swift, Ranasinghe, Xing ve Soebarto (2015) tarafından yapılan çalışmada yapı bilgi modellemesi (BIM) ile birleştirilmiş radyo frekans tanıma (RFID) teknolojisinin, yapısal çeliğin yeniden kullanımı için mevcut olan bazı belirsizliklerin giderilmesi amacıyla kullanımı araştırılmıştır. Önerilen metodoloji sayesinde yapı elemanlarının sahipliği, üretici bilgisi, üretim tarihi ve yeri, fiziksel özellikleri ve konumları gibi bilgilerin künyelenip kolayca dijitalize edilebileceği belirtilmiştir. Dijitalize edilen verilerin BIM entegrasyonu ile yeniden kullanımının önündeki büyük engellerden birisi olan sahadaki bilgi eksikliğini azaltarak yapısal çeliğin sökümü, geri kazanımı ve yeniden kullanımını kolaylaştırabileceği ifade edilmiştir. Akberieh, Jayasinghe, Waldmann ve Teferle (2020) tarafından yapılan çalışmada yaşam döngüsü sonlandırma kararında ve yapı sökümünün dijital olarak gerçekleştirilmesinde BIM uygulamaları incelenmiştir. BIM tabanlı yaklaşımın şehirleri ve binaları yeniden kullanılacak elemanlar ile dolu madenler olarak kabul ederek, yeniden kullanımı destekleyeceği ve sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyeller vaat eden bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Yeung, Walbridge ve Haas (2015) tarafından yapılan çalışmada yapısal çeliğin yeniden kullanımında geometrik karakterizasyonun (yapı elemanlarının ve bağlantı geometrilerinin belirlenerek dökümanteye edilmesi) önemi araştırılmıştır. Geometrik karakterizasyonun bilinmeyen eleman boyutlarına erişilmesi, montaj geometrisinin belirlenebilmesi, güvenilirlik değerlendirilirken belirsizliğin ölçülmesi gibi nedenlerle önemli olduğunun altı çizilmiştir. Geometrinin algılanabilmesi için üç boyutlu görüntüleme teknolojilerinden faydalanılmıştır. Yapısal çeliğin yeniden kullanımı için maliyetler ve risklerin azaltılması ile geri dönüşümden daha cazip olabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca karar verme sürecine rehberlik edebilecek bir prosedür önerilmiştir. Önerilen karar verme prosedürü üç alt başlık barındırmaktadır. Bunlar sırasıyla ön analiz, detaylı analiz ve karar verme aşamalarıdır. Ön analizde deneyimli bir uzmanın mevcut yapının yeniden kullanılabilirlik potansiyelini kabaca değerlendirmesi beklenmektedir. Ayrıntılı analiz ise kendi içinde dört alt süreçte yürütülecektir. Bunlar geometrik ve mekanik özelliklerin belirlenmesi, yapısal analiz, yaşam

döngüsü analizi ve ekonomik analizdir. Üçüncü aşamada ise toplanan bilgiler ışığında nihai karar verilmektedir. Çalışmada önerilen üç boyutlu görüntüleme teknolojisi tabanlı yarı otomatik kesit tanıma sisteminin, oluşturulan prosedüre veri toplama aşamasında destek olabileceği ifade edilmiştir. Hradil ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada yapı elemanlarının yeniden kullanılmasının önündeki engellerin aşılması için çevrimiçi pazarlama, eleman etiketleme ve BIM teknolojilerinin etkili olabileceği belirtilmiştir. Fujita ve Masuda (2014) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanılacak yapısal çeliğin dayanım özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi tahribatsız muayene süreci yürütülmüştür. Bu bağlamda ultrasonik sertlik ölçüm cihazı vasıtasıyla sertlik değerleri elde edilerek Vickers sertlik metodu ile çekme dayanımına dönüşümü sağlanmıştır. Kimyasal bileşen analizi için ise optik emisyon spektrometresi kullanılmıştır. Yapılan vaka çalışmasının neticesinde yeniden kullanılacak elemanların performansının doğrulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. Vaka Çalışmaları ve Uygulamalar

Bu kısımda literatürde bulunan bazı teorik vaka çalışmaları ve gerçek hayat uygulamalarından bahsedilmiştir. Gorgolewski, Straka, Edmonds ve Sergio-Dzoutzidis (2008) tarafından yapılan çalışmada yapısal elemanların yeniden kullanıldığı bazı uygulamalar incelenmiştir. İlk inceleme Güney Londra'da uygulanan BedZED (The Bedington Zero Energy Development) projesidir. Projede kullanılan yapısal çeliğin %95'i 50 km'lik çevrede bulunan geri kazanılmış elemanlardan elde edilmiştir. Proje için kullanılan yapısal çeliğin %80'lik kısmı ise Brighton Tren İstasyonu'nun tadilatı sonucu kazanılan elemanlardan oluşmaktadır. Başlangıçta geri kazanılmış elemanların tasarıma uyumluluğu noktasında endişeler olduğu ancak esnek tasarım sayesinde çok küçük değişikliklerle uyum sorunlarının aşıldığı ifade edilmiştir. Kazanılan elemanların kumlanıp boyandığı, ekstra bulon delikleri ve kaynak izleri dışında eski ömürlerine işaret eden herhangi bir emare kalmadığı bildirilmiştir. Çalışmada sunulan bir diğer örnek de Toronto Scarborough Üniversitesi içindeki öğrenci merkezidir. Binada kullanılan yapısal çeliğin 16 tonluk kısmı Royal Ontario Müzesinin yıkımı sonucu hurdaya ayrılan yapısal çelikten elde edilmiştir. Elde edilen çelik elemanlar bir imalathanede boyuna kesilerek istenen ölçülerde yeni elemanlar üretilmiştir. Elemanlar temizlenmiş, yeniden boyanmış ve yeni bulon delikleri açılarak sahaya gönderilmiştir. Projede yeniden kullanımın çevresel kaygılarla tercih edildiği ve maliyete etkisinin nötr bulunduğu ifade edilmiştir. Çalışmadaki son uygulama incelemesi ise Kanada'nın British Columbia eyaletindeki bir ilkokul binasıdır. Bir yangın neticesinde kullanılmaz hale gelen Roy Stibbs Okulunun hızlıca inşa edilip tekrar kullanıma

sunulması için ömrünü tamamlamış başka bir okul binasındaki çelik elemanların yeniden kullanıldığı belirtilmiştir. Yeni binanın yapısal sisteminin, eski binayla oldukça yakın tasarlanmasıyla elemanların minimum işleme kullanılması sağlanmıştır. İki bina arasındaki deprem yüklerinin farklılığından dolayı çapraz elemanların yeniden tasarımı gibi bazı değişiklikler yapılırsa da yeniden kullanım potansiyelinin artırılması için eski tasarıma sadık kalmaya çalışılmıştır. Bu sayede çoğu eleman temizlenip boyandıktan sonra doğrudan kullanılabilmiştir. Söküm ve nakliye sırasında bazı elemanlarda oluşan hasarların tamir edildiği belirtilmiştir. Tahmini yeniden kullanım oranının %75 olduğu bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca yeniden kullanımın daha efektif hale getirilmesi için bir dizi öneride bulunulmuştur. Tasarım süreçlerinde yeniden kullanım kararının erken aşamalarda verilmesiyle entegrasyonun kolaylaştığı, yeniden kullanılacak elemanların çoğu zaman kullanıma hazır olmadıkları ve kazanılan elemanların oldukça farklı kesitler barındırabileceği için esnek tasarımlar yapması gerektiği, yeniden kullanım potansiyelinin üst düzeye çıkarılabilmesi için mevcut envanterin detaylı kayıtlarının tutulması ve geri kazanılmış yapısal elemanların ulaşılabilirliğinin artırılması gerektiği, eski yapı elemanlarının mekanik özelliklerinin değerlendirilebilmesi için prosedürler geliştirilmesi gerektiği rapor edilmiştir. Hradil ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada yapı elemanlarının yeniden kullanımının çevresel etkilerinin araştırılması için üç adet vaka çalışması sunulmuştur. Bu çalışmalar sırasıyla Finlandiya'da bulunan ön üretimli elemanlardan oluşan bir betonarme hangar, Romanya'da bulunan bir endüstriyel yapının çelik kirişleri ve küçük bir mahallede yeniden kullanım politikasının uygulanması üzerinedir. Her vaka çalışması için çevresel etkilerde ciddi miktarda azalma gözlenmiştir. Pongiglione ve Calderini (2014) tarafından yapılan vaka çalışmasında İtalya Cenova'da kullanılmayan bir endüstriyel yapının taşıyıcı sistem elemanlarının, yeni inşa edilecek tren istasyonunda değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kullanılan malzeme miktarının ne kadar azaldığı ile ilgilenmektedir. Sonuç olarak yapısal çeliğin yeniden kullanımının %30'a varan oranda malzeme ve CO2 salınımı tasarrufuna imkân verdiği bildirilmiştir. Vares, Hradil, Pulakka, Ungureanu ve Sansom (2018) tarafından sunulan teorik vaka çalışmasında literatürde optimize edilmiş bir sanayi yapısı kullanılmıştır. Çevresel etkilerin ve maliyetlerin analiz edilmesi amacıyla yapının yeni elemanlarla ve yeniden kullanılan elemanlarla tasarlandığı iki süreç yürütülmüştür. Yeniden kullanımın çevresel faydaların yanı sıra yatırım maliyetini de %10 oranında düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Sandin, Carlsson, Chúláin ve Sandberg (2021) tarafından yapılan çalışmada yeniden kullanım ve söküm için tasarım

konularını örnekleyen bir proje uygulaması ele alınmıştır. Halihazırda ön üretimli şekilde ahşaptan imal edilen Villa Anneberg projesindeki yeniden kullanım potansiyeli araştırılmış ve yeniden kullanım oranının artırılabilmesi için çeşitli geliştirmeler yapılmıştır. Öncelikle mevcut proje için söküm prosedürleri üretilmiş, çatı kaplamalarından temele kadar sökümün nasıl gerçekleştirileceği detaylı olarak açıklanmıştır. Ardından mevcut tasarımın sökümü uygunluğu bağlamında güçlü ve zayıf yönleri irdelenmiş ve gelişime açık olan konular tartışılmıştır. Geliştirilebileceği belirtilen konulardan üç tanesi seçilerek iyileştirmeler önerilmiştir. Bunlar: duvar-döşeme birleşim modifikasyonu, duvar-duvar birleşim modifikasyonu ve döşeme-döşeme birleşim modifikasyonudur. Geliştirmelerin ana motivasyonu atık oluşumunu engellemek ve söküm sürecini kolaylaştırmaktır. Duvar-döşeme ve duvar-duvar birleşimlerinde bağlantı civatalarına ulaşmak için alçı plakanın kaldırılması gerektiği ve buhar bariyerlerine zarar verildiği, bu durumun hem atık ürettiği hem söküm sürecini zorlaştırdığı hem de sökülen malzemenin yeniden kullanım için tamirat gereksinimi ortaya çıkardığı ifade edilmiştir. Döşeme-döşeme birleşimlerinde ise yapıştırıcı kullanımı sebebiyle söküm işleminin zorlaştığı ve söküm sırasında geri kazanılan malzemelerde ciddi tahribatlara neden olduğu belirtilmiştir. Tasarım civatalara kolayca ulaşılacak şekilde revize edilmiştir. Civataların üstünde alçı ya da yalıtım elemanı yerine süpürgelik ya da kolayca açılacak kapaklar tercih edilmiştir. Tabliye-tabliye birleşiminde yapıştırıcı kullanımdan vazgeçilerek yapıştırıcının eksikliğini tolere edebilmek için ilave kirişler ve civatalar eklenmiştir. Yeniden kullanılabilir ahşap oranı mevcut tasarım üzerinde herhangi bir değişiklik yapmadan %82,7 iken tasarımda bahsi geçen değişiklikler yapıldığında ise %86,4 olarak bulunmuştur. Çalışma ahşap yapıların sökümü göre tasarımı rehber niteliğindedir. Buna göre ahşap yapıların söküm için tasarımı yapıdırma, çivileme gibi söküm sürecini zorlaştıran bağlantılardan mümkün olduğunca kaçınılması gerekmektedir. Bağlantılarda civata tercih edilse dahi civataların kolayca ulaşılabilir bölgelerde konumlandırılması oldukça önemlidir. Kolay ulaşılabilirlik hem söküm sürecini hızlandırmakta hem de söküm sırasında kazanılacak elemanlarda hasar oluşumunu minimize etmektedir. Mekanik ve elektrik tesisatının sökümü uygun tasarlanması gerekmektedir. İlk kurulum, söküm ve ikinci kurulum aşamalarının detaylı olarak projelendirilmesiyle oluşabilecek sorunların öngörülebileceği ve tasarım aşamasındayken önüne geçilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

## 5. Envanter Kısıtlı Yapısal Optimizasyon (EKYO)

Yapısal optimizasyon; belirli kısıtlar altında, tasarım değişkenlerinin doğrudan ya da dolaylı olarak etki ettiği amaç fonksiyonu ya da fonksiyonlarının değerlendirilmesi ile oluşturulan uygunluk kriterine göre, mümkün olan en iyi yapısal sistemi arayan bir yapı mühendisliği alanıdır. Burada kısıtlar genellikle yönetmelik, şartname ya da mühendislik biliminin gerekliliklerini, tasarım değişkenleri probleme özgü olarak eleman boyutları ya da kesit özellikleri gibi optimize edilecek sistemi karakterize eden parametreleri; amaç fonksiyonu ise yapı ağırlığı, maliyet gibi çözümün performansını değerlendirmek için kullanılacak kriter ya da kriterleri ifade etmektedir. Yapısal optimizasyon ile deneme yanılma esaslı geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla daha az malzeme kullanımı gerektiren, daha ekonomik ve çevre dostu yapısal tasarımlara çok daha kısa sürede ulaşıldığı kabul görmüş bir gerçektir.

Yapısal optimizasyon sağladığı imkanlarla sınırlı dünya kaynaklarının daha efektif kullanılması noktasında ciddi katkılar sunsa da bazı kabuller ile yürütülmektedir. Bunlardan bir tanesi de istenilen geometride, çeşitlilikte ve dayanım özelliklerinde ihtiyaç duyulan sayıda yapısal eleman bulunabilirdi varsayımdır. Bu varsayım günümüz için büyük ölçüde kabul edilebilir olsa da bazı gelecek senaryolarının gerçekleşmesi durumunda geçersiz olabileceği tartışılmaktadır. Bu senaryolardan kötümser olanı doğal kaynakların tükenmesi ve yeni yapısal eleman üretilememesi iken literatürde daha çok kabul gören senaryo ise yeni yapı elemanı üretmenin çeşitli sebeplerle cazibesini yitirmesidir. Bahsi geçen sebepler Bölüm 2’de açıklanan çevresel ve ekonomik kaygılar ile temellendirilmektedir.

Çoğu sektör gibi inşaat sektörü de çevresel etkilerin azaltılması noktasında ciddi bir yükümlülük ve baskı altındadır. Avrupa Birliği’nin döngüsel ekonomi politikaları için sunduğu eylem planında Avrupa’daki en büyük atık kaynağının inşaat ve yıkım sektörünün faaliyetleri sonucunda ortaya çıktığı, atıkların büyük oranda geri dönüştürülebilir veya yeniden kullanılabilir potansiyelde olduğu vurgulanmış, döngüsel ekonomi modelinin inşaat sektöründe yaygınlaştırılmasına yönelik politikalar geliştirilmesi bir hedef olarak sunulmuştur (European Commission, 2015). Buradan da anlaşılabilirliği gibi gelecekte çevresel etkilerin azaltılması ve atık yönetimi için inşaat sektörü üzerindeki baskıların daha da artacağı açıktır. Bunun doğal sonucu olarak geri dönüşüm ve yeniden kullanıma olan talebin artacağı tahmin edilmektedir. Bölüm 2’de detaylarıyla bahsedildiği gibi, geri dönüşümün daha çok tercih edilen bir yöntem olduğu bilirse de çevresel etkilerin azaltılması konusunda yeniden kullanım ile daha başarılı sonuçlara ulaşıldığı literatürdeki çeşitli çalışmalarda

sunulmuştur. Yapı elemanlarının yeniden kullanımı, yapı mühendisleri açısından çeşitli belirsizlikler içeren ciddi bir optimizasyon problemini gündeme getirmektedir. Bu problemin çözümü için envanter kısıtlı yapısal optimizasyon yöntemi değerli bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon, geri kazanılmış yapısal elemanların oluşturduğu eleman havuzları kullanılarak gerçekleştirilen özel bir yapısal optimizasyon yöntemidir. Havuzda bulunan yapı elemanlarının geometrik özellikleri, mekanik özellikleri ve stok miktarları bilinmektedir. Bu özellikler kullanılarak, mevcut olan elemanlar ile belirlenmiş amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi yapısal tasarım aranmaktadır. Diğer bir deyişle yapı elemanlarının yeniden kullanımındaki faydanın maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. Yapısal elemanların yeniden kullanımı söz konusu olduğu için geleneksel yapısal optimizasyondan farklı olarak amaç fonksiyonları da çevresel etkileri kapsayacak şekilde değişiklikler gösterebilmektedir zira minimum ağırlığı ya da minimum maliyeti amaçlamak yeniden kullanılan elemanlarla oluşturulan sistemlerin performansını değerlendirirken yanlıtıcı olabilmektedir.

### 5.1 Araştırma Metodolojisi

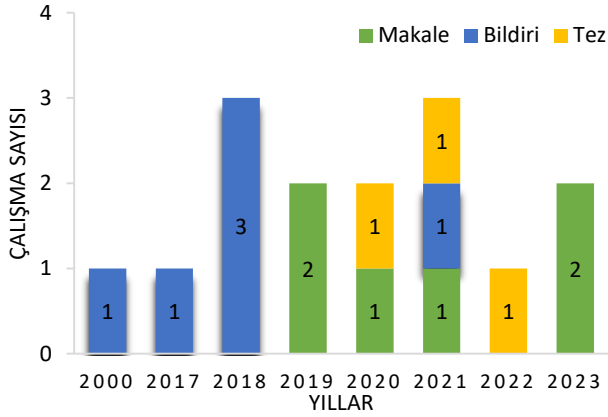
Literatürdeki envanter kısıtlı yapısal optimizasyon çalışmalarına ulaşmak için ScienceDirect, Web of Science, Springer Link, Taylor & Francis, Google Scholar, Researchgate ve Academia veri tabanlarından Tablo 1’de sunulan anahtar kelimeler ile taramalar yapılmıştır. Taramalar sonucunda ulaşılan çalışmalardan algoritmik bir yapısal optimizasyon metodolojisi ya da uygulaması içerenler filtrelenmiştir.

Tablo 1. Anahtar kelimeler

Structural, reused elements	Inventory constrained structural optimization	Design for deconstruction, optimization
Reuse, load bearing, optimization	Stock constrained structural optimization	Optimization for deconstruction
Reused, optimization, structural	Circular design, structural, optimization	Reused elements, structural, optimum
Reuse building elements	Circular economy, construction, optimization	Structure, reclaimed elements, optimum
Reused steel structure, optimum	Frame, reused, optimum	Truss, reused, optimum

Yalnızca yapısal elemanların yeniden yapısal eleman olarak kullanıldığı çalışmalar esas alınmıştır. Bu bağlamda eski yapı elemanlarının taşıyıcı sistem oluşturma haricinde farklı amaçlar için kullanıldığı ya da yapıların dışındaki kaynaklardan elde edilen malzemelerin yapı elemanı olarak değerlendirildiği

çalışmalar ve kazanılan elemanların cephe sistemleri ve iç tasarım öğeleri gibi mimari elemanlarda kullanılması amacıyla yapılan çalışmalar bu incelemenin kapsamının dışındadır. Taramalar neticesinde belirtilen nitelikleri taşıyan 15 adet çalışmaya ulaşılmıştır. Ulaşılan çalışmaların yıllara ve türlere göre dağılımları Şekil 2'de gösterilmiştir.



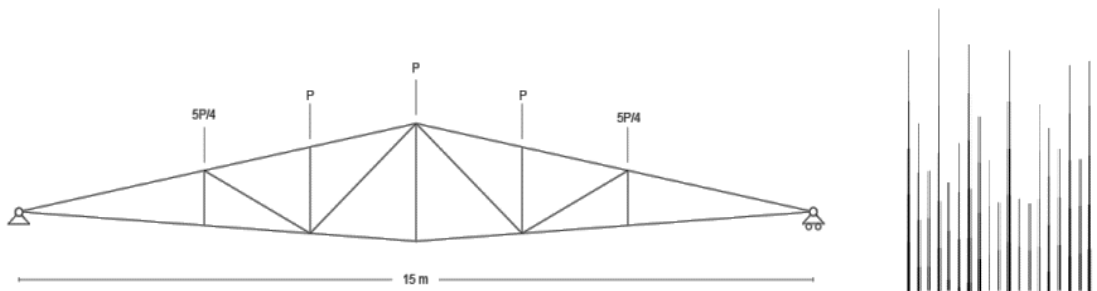
Şekil 2. Çalışmaların yıllara ve türlere göre dağılımları

## 5.2 Literatürdeki EKYO Çalışmalarının Kapsamlı İncelemeleri

Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) alanında yazarların ulaşabildiği ilk çalışma Fujitani ve Fujii (2000) tarafından sunulmuştur. Düzlem çerçeve sistemin yeniden kullanılan elemanlarla optimize edildiği çalışma, bu alanda öncü olması bakımından önemliken modern EKYO çalışmalarından bazı farklılıklar içermektedir. Stok listesindeki elemanların boylarına ilişkin herhangi bir veri sunulmamış, elemanların istenilen boyda olduğu varsayılmıştır. Optimizasyon Genetik Algoritma (GA) ile gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak geleneksel yapısal optimizasyonda olduğu gibi ağırlık minimizasyonu, kısıtlar olarak ise elemanların gerilme ve birim şekil değiştirme limitleri seçilmiştir. Optimizasyon süreci basit bir atama problemi olarak ele alınmıştır. Yapısal elemanın gerilme ve birim şekil değiştirme talebi ile stok elemanlarının kapasiteleri

karşılaştırılarak ilgili atamalar gerçekleştirilmiştir. İki katlı, iki açıklıklı ve altı yapısal elemanlı çerçeve sistem için altı ve dokuz stok elemanı ile iki farklı problem optimize edilmiştir. Sonuç olarak genetik algoritmanın envanter kısıtlı optimizasyon için kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir. Literatür taramaları sırasında bahsedilen öncü çalışmadan sonra EKYO alanında uzun yıllar boyunca yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Avrupa Komisyonu'nun hedefleri, artan çevresel kaygılar, yerleşik enerji ve atık yönetimi gibi kavramların önem kazanmasıyla EKYO'nun tekrar gündeme geldiği düşünülmektedir.

Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon probleminin temel sorunlarından birisi stoktaki elemanların ilgili yapısal elemana nasıl atanacağı problemidir. Bukauskas, Shepherd, Walker, Sharma ve Bregulla (2017) tarafından yapılan çalışmada atama probleminin çözümü için bir yöntem sunulmuştur. Atama problemi form uydurma problemi olarak modellenmiştir. Literatürde oldukça popüler bir form uydurma problemi olan kutulama problemi benzetim için tercih edilmiştir. Kutulama probleminin çözümü için geliştirilmiş özel sezgisel yöntemler incelenerek eleman atama probleminin kutulama problemi ile benzerlikleri ortaya konulmuştur. Buradan hareketle kutulama probleminde başarılı sonuçlar veren Ön Sıralamalı First-Fit yöntemi, atama problemi için çözücü olarak seçilmiştir. İlgili yöntemle dairesel elemanlarla oluşturulmuş ahşap bir çatı kafesine atama uygulaması yapılmıştır. Atama yapılan kafes ve literatürden oluşturulan farklı uzunluk ve değişken çaptaki yapay ağaç stoku Şekil 3'te sunulmuştur. Ön Sıralamalı First-Fit yöntemi için, atanacak elemanlar ve stok elemanları dört farklı şekilde sıralanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sıralama kriteri olarak yapısal elemanlar için rastgele ya da eksenel kuvvet, stok elemanı için ise rastgele ya da çap kriteri uygulanmıştır. Başarım, kesimden kaynaklı atık esas alınarak değerlendirilmiş olup karşılaştırma için çalışma süresi ve iterasyon sayıları da sunulmuştur. Elde edilen dört farklı durumdan en başarılı bulunana yapısal eleman için eksenel yük, stok elemanı için çap sıralaması içeren Ön Sıralamalı First-Fit yöntemi olmuştur.



Şekil 3. Atama yapılan kafes sistem ve stok elemanları (Bukauskas ve diğ., 2017)

Yazarların ulaşabildiği literatür çerçevesinde amaç fonksiyonunda çevresel etkileri barındıran ilk çalışma Brütting, Senatore ve Fivet (2018a) tarafından yapılmıştır. Çalışmanın bu yönüyle ciddi bir özgün değere sahip olduğu düşünülmektedir. Çalışmada yapı elemanlarının yeniden kullanımıyla bir elemandan birden fazla hizmet ömrü elde edilmesi ve bu sayede çevresel etkilerin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kafes sistemlerin stoktaki elemanlarla optimum tasarımına dair yapısal optimizasyon formülasyonları sunulmuştur. Ağırlığın, kesim kaynaklı atıklarının ve yerleşik enerjinin

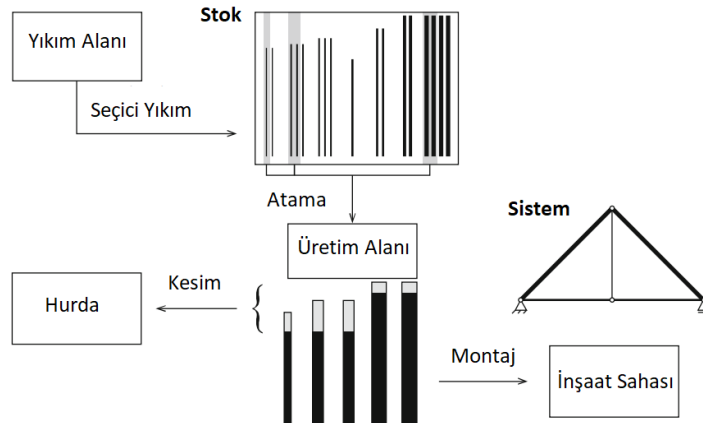
minimizasyonu amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon bir atama problemi olarak kurgulanmıştır. Atama probleminin nasıl çözüldüğü Şekil 4'te özetlenmiştir. Atamalar; satırları yapısal elemanları, sütunları stok elemanlarını ifade eden bir matris ile sağlanmaktadır. Matriste ikilik (binary) sayı sistemi kullanılmıştır. Gerçekleşen atamalar 1 ile gösterilmektedir. Stok listesindeki  $j$  eleman indislerini,  $a$  eleman geometrilerini,  $l$  eleman boylarını,  $n$  ise hangi elemandan kaç adet bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Brütting ve diğ. (2018a) tarafından sunulan atama çözümü

Çalışmada kesit, topoloji ve geometri optimizasyonu yapılmıştır. Kısıt olarak elemanların aksenal kuvvetleri, Euler burkulması, düğüm yer değiştirmeleri ve atama kuralları esas alınmıştır. Yapısal eleman uzunluğundan daha kısa stok elemanlarının ilgili elemana atanması engellenmiştir. Uyum optimizasyonu için amaç fonksiyonu, yük altında deformasyonların minimizasyonu olarak formüle edilmiştir. Yeniden kullanım ile ilgili olan amaç fonksiyonlarında ağırlık minimizasyonu hedeflenmiştir. Bu sayede kesit alanları minimize edilerek eleman kapasitelerinin daha iyi kullanılması amaçlanmaktadır. Ortaya çıkan ağırlık çevresel etkilerin hesaplanması için de etkin

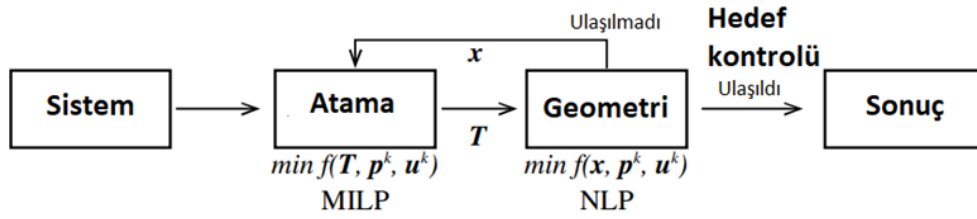
parametredir. Atık oluşumunun önüne geçilmesi ve daha uygun bir yerleşim yapılması amacıyla kesimden kaynaklı atıkların minimizasyonu da bir amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Yeniden kullanımın çevreye olan etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla yaşam döngüsü analizi yapılmıştır. Çalışmada sunulan yaşam döngüsü analizinin genel şeması Şekil 5'te gösterildiği gibidir. Şemada gösterilen her süreç için çevresel etkiler ayrı ayrı hesaplanarak kilogram başına harcanan enerji ve sera gazı emisyonları elde edilmiştir.



Şekil 5. Yeniden kullanım için sunulan yaşam döngüsü değerlendirme şeması) (Brütting ve diğ., 2018a)

Optimizasyon problemi atama ve geometri optimizasyonu olarak iki parçaya ele alınmıştır. Atama optimizasyonu için MILP (Mixed Integer Linear Programming), geometri optimizasyonu için ise NLP (Non-Linear Programming) kullanılmıştır. Önerilen optimizasyon prosedürü Şekil 6'da sunulmuştur. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için üç farklı kafes sistem optimize edilmiş ve sonuçlar klasik yapısal optimizasyon yöntemiyle ağırlığı minimize edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar neticesinde EKYO ile elde edilen yapıların toplam ağırlığı klasik yapısal optimizasyonla elde edilenlerden

daha fazla bulunmuştur. Bunun sebebi stoktaki görece küçük enkesitli eleman sayısının sınırlı olması ile açıklanmıştır. İlgili tasarımların ağırlıkları daha fazla olsa da yerleşik enerjilerinin daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Vaka çalışmalarından %71'e varan enerji tasarrufu elde edildiği ifade edilmiştir. Bu değer önemli oranda azaltılmış bir çevresel etkiyi ifade ettiği vurgulanmıştır. Yeniden kullanımda en büyük yerleşik enerji tüketiminin seçici yıkım prosedürü için gerekli olduğu ifade edilmiştir.



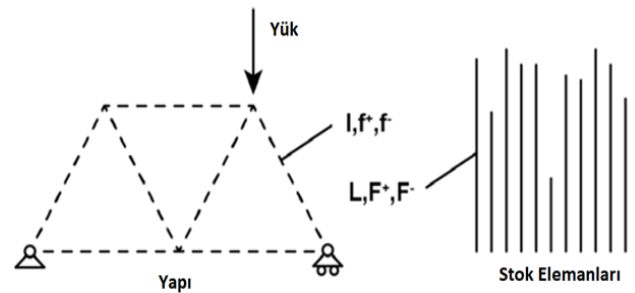
Şekil 6. Brütting ve diğ. (2018a) tarafından önerilen EKYO prosedürü

Bukauskas, Shepherd, Walker, Sharma ve Bregulla (2018) tarafından yapılan çalışmada klasik yapısal optimizasyon metodolojisinde tasarım değişkenlerinin genellikle geometriyi, topolojiyi ya da eleman boyutlarını ifade edecek şekilde seçildiği, envanter kısıtlı yapısal optimizasyonda ise bunlara ek olarak stok elemanların gereken yere atanması probleminin ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Atama, tanımlanan envanter kümesi içerisinde istenen nitelikleri sağlayan yapının oluşturulabilmesi için gerekli olan talimatlar olarak tanımlanmıştır. Atamanın doğruluğunun; maliyet, malzeme tüketimi, yaşam döngüsü etkisi gibi parametreleri doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Düşük performanslı atama kararlarının; stok elemanlarında çok sayıda kesim yapılarak atık üretilmesi, eleman kesitlerinin gereğinden büyük seçilerek kapasite israfı, gereğinden küçük kesitler seçilerek ilave malzeme ihtiyacı doğması gibi istenmeyen etkilere sebep olabileceği vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmada bir kafes sistem özelinde envanter kısıtlı yapısal optimizasyon metodolojisi sunulmuştur. Elemanların enine kesilmesine ve birbirine mafsallı bağlantılarla eklenmesine izin verilmiştir. Bunun dışında elemanları boyuna kesilmesi ve kaynakla eklenmesi gibi senaryolar engellenmiştir. Bu bağlamda bir tamsayı programlama prosedürü kurgulanarak optimizasyon çerçevesi oluşturulmuştur. Önerilen sistemde, geometrisi önceden belirlenmiş kafes sistem çözümlerine elemanlar için uzunluklar, aksel çekme ve basınç kuvvetlerine ilişkin talepler hesaplanmıştır. Aynı parametreler için stok elemanlarının kapasiteleri de elde edilerek hangi stok elemanın hangi yapısal elemana atanabileceğine dair metrikler oluşturulmuştur. Bu sayede problem karar verme

problemi olarak yeniden kurgulanmıştır. Önerilen atama yönteminin şematik gösterimi Şekil 7'de sunulmuştur. Burada l ve L yapısal eleman ve stok elemanı için boyları, f+ ve F+ çekme kuvveti talebi ve kapasitesini, f- ve F- basınç kuvveti talebi ve kapasitesini ifade etmektedir.

Ayrıca geleneksel yapısal optimizasyon metodolojisinde sıklıkla tercih edilen ağırlık minimizasyonuna dayalı amaç fonksiyonunun envanter kısıtlı optimizasyon için doğru bir yaklaşım olmadığı vurgulanmıştır. Bu durum yapı ağırlığının envanterdeki



Şekil 7. Bukauskas ve diğ. (2018) tarafından önerilen atama prosedürü

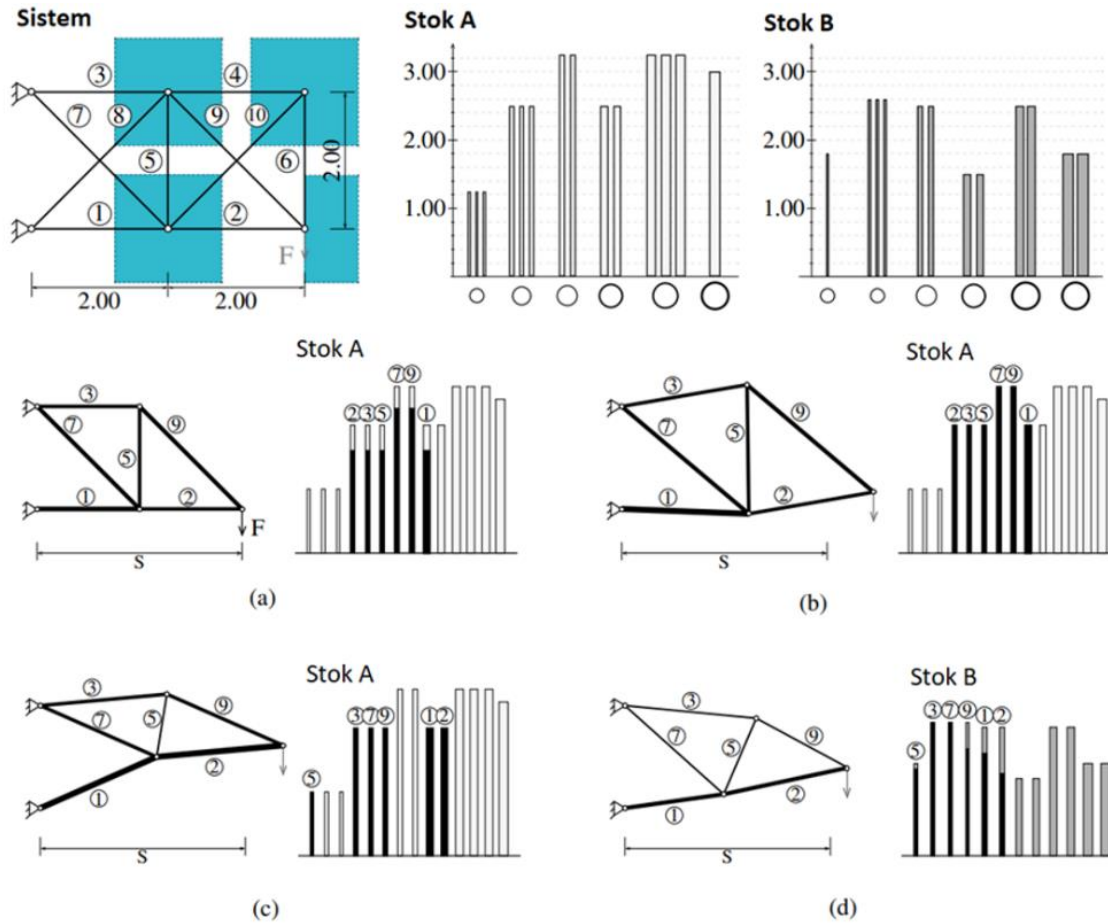
elemanlara uygulanan kesim gibi işlemleri yansıtmamasıyla açıklanmıştır. Buradan hareketle amaç fonksiyonu olarak kesim oranının minimizasyonu önerilmiştir. Kesim oranı kullanılmayan atık kütlelerin kullanılan kütleyle bölünmesi ile elde edilmiştir. Kafes yapılar için kesim oranının nasıl belirlenebileceği ile ilgili analitik bir süreç sunularak yaklaşık bir yöntem de önerilmiştir. Atama optimizasyonları için



Polynomial-Time Heuristic algoritmalarının kullanılabilirliği ifade edilmiştir.

Brütting, Desruelle, Senator ve Fivet (2018b) ve Brütting Desruelle, Senator ve Fivet (2019b) tarafından yapılan çalışmalarda bir gerçek hayat problemi ile birlikte kafes sistemler için EKYO uygulaması sunulmuştur. Çalışmalar metodolojideki birtakım farklılıklar haricinde Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmanın devamı niteliğindedir. Önceki çalışmaya ilave olarak, eleman ataması yapılırken talep edilenden daha kısa kesitlerin de atanabileceği bir bellek oluşturulmuştur. Bu belleğin arama alanı genişlettiği ifade edilmiştir. Daha kısa

elemanların atanması durumu, geometri optimizasyonu sırasında düğümler hareket ettirilken işlevsellik kazanmaktadır. Bu sayede yinelemeli bir atama prosedürü oluşturulmuştur. Nihai sonuçlar değerlendirilirken eleman boyu kısıtı tekrar uygulanarak başarısız atamaların önüne geçilmiştir. Optimizasyon prosedürü ve kısıtlar Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada sunulduğu gibidir. Atama optimizasyonu MILP (Mixed-Integer Linear Programming) ile gerçekleştirilmiştir.



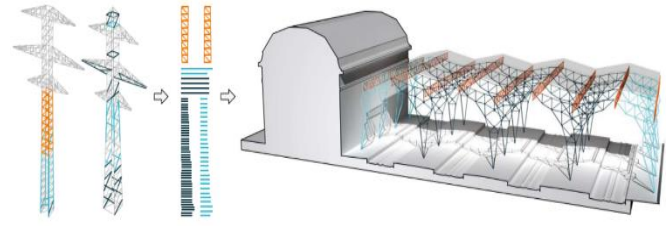
Şekil 8. Brütting ve diğ. (2018b) tarafından çözülen teorik envanter kısıtlı yapısal optimizasyon problemi: a) Atama ve topoloji optimizasyonu, b) Kısa elemanların engellendiği optimizasyon, c) Stok A için kapsamlı optimizasyon, d) Stok B için kapsamlı optimizasyon

Optimizasyonun amacı yapısal kütleyi azaltarak maksimum kapasite kullanımını sağlamaktır. Kısıt olarak eleman iç kuvvetleri, düğüm yer değiştirmeleri ve yerel burkulma değerleri kullanılmıştır. Atamalar ve topoloji optimize edildikten sonra geometri optimizasyonuna geçilmektedir. Bu aşamada hareket serbestliği olan düğümlerin yeri değiştirilerek atanan elemanlar ile varsayılan topolojideki çubuklar arasındaki uzunluk uyumsuzlukları giderilmektedir.

Yapılan geometri optimizasyonu ile stok elemanlarının minimum işlemle yeniden kullanımı amaçlanmaktadır. Geometri optimizasyonu doğrusal olmayan programlama (NLP) ile yürütülmüştür. Çalışmada iki adet vaka analizi sunulmuştur. Bunlardan birisi 10 elemanlı konsol kafestir. İlgili örnek ve ulaşılan sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Kafesin toplam açıklığı ve mesnetlerin konumları sabittir. Düğüm noktalarının hareket edebileceği alanlar mavi

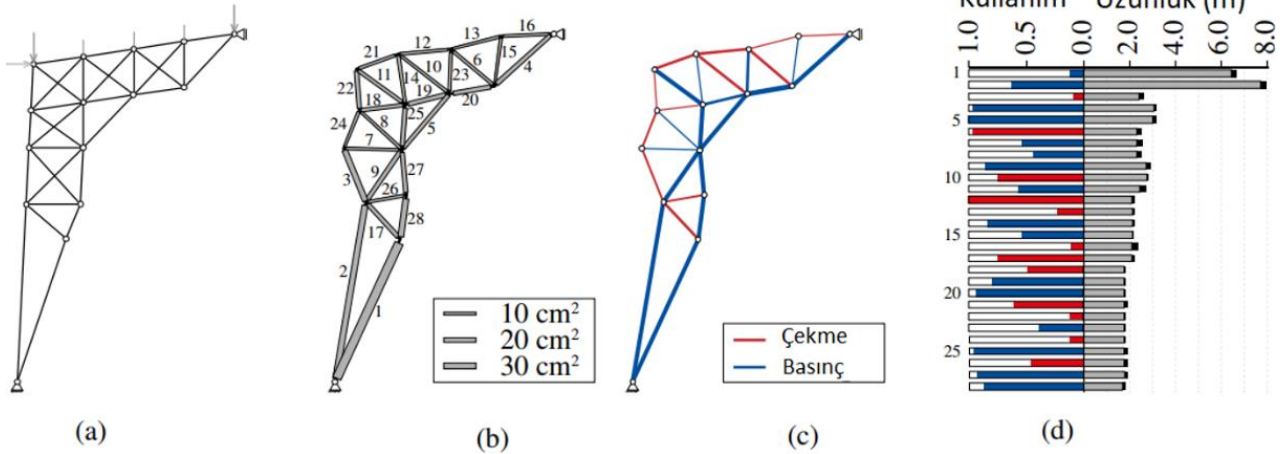
dikdörtgen bölgeler ile ifade edilmiştir. Atama sonucunda stok elemanlarının kullanılan kısmı koyu renk ile gösterilmiştir. İki farklı stok durumu ve dört farklı senaryo için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar sadece atama ve topoloji optimizasyonu (Şekil 8a), talep edilenden kısa elemanların atanmadığı optimizasyon (Şekil 8b) ve her bir stok için tam kapsamlı optimizasyondur (Şekil 8c ve d). Sadece atama ve topoloji optimizasyonu olan senaryoda beklediği gibi en büyük kesim kaynaklı atık miktarı oluşmuştur. Geometri optimizasyonunu da içeren senaryolarda sıfır kesim atığı elde edilmiştir. İki stok durumunun farklılıkları da sonuçlara doğrudan yansımıştır. Görece küçük enkesitli stok elemanı miktarının çok olduğu durum için toplam ağırlık daha az bulunmuştur. Aynı sistem yeni elemanlarla da tasarlanarak çevresel etkiler kıyaslanmıştır. Yeniden kullanım ile elde edilen sistemler yeni elemanlar ile oluşturulan sistemlerden daha ağır ve daha düşük ortalama kapasite kullanımına sahip olsalar da çevresel etkiler bakımından daha başarılı bulunmuştur.

İkinci vaka çalışmasında bir gerçek hayat problemi ele alınmıştır. Bu bağlamda enerji nakil hattı direklerinden elde edilen stok elemanları ile bir tren istasyonu çatısı tasarlanmış ve optimize edilmiştir. İlgili problem Şekil 9'da gösterilmiştir. Yapısal tasarım için İsviçre standartları kullanılmıştır. Aynı yapı klasik optimizasyon yöntemiyle de optimize edilerek karşılaştırma için çevresel etkileri elde edilmiştir.



Şekil 9. Brütting ve diğ. (2018b) tarafından sunulan gerçek hayat problemi

Optimizasyon çatı sisteminin tamamı için değil bir kısmı için yürütülmüştür. Optimizasyon süreci ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10a optimizasyondan önceki durumu, Şekil 10b optimizasyon neticesindeki son durumu, Şekil 10c elemanların hangi aksel yüküne çalıştıklarını ve Şekil 10d ise kapasite kullanımlarını ve uzunlukları göstermektedir. Uzunluklar için verilen şemada gri kısım kullanılan boyu, siyah kısım kesim kaybını ifade etmektedir. İlgili gerçek hayat probleminin çözümü neticesinde, yeniden kullanım ile elde edilen yapının, yeni elemanlar ile yapılan yapıya göre %50 daha ağır olduğu, dolayısıyla elemanların daha düşük talep/kapasite oranlarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın yerleşik enerji ve karbon salınımı incelendiğinde sırasıyla %63 ve %56 daha düşük değerlere ulaşıldığı belirtilmiştir.



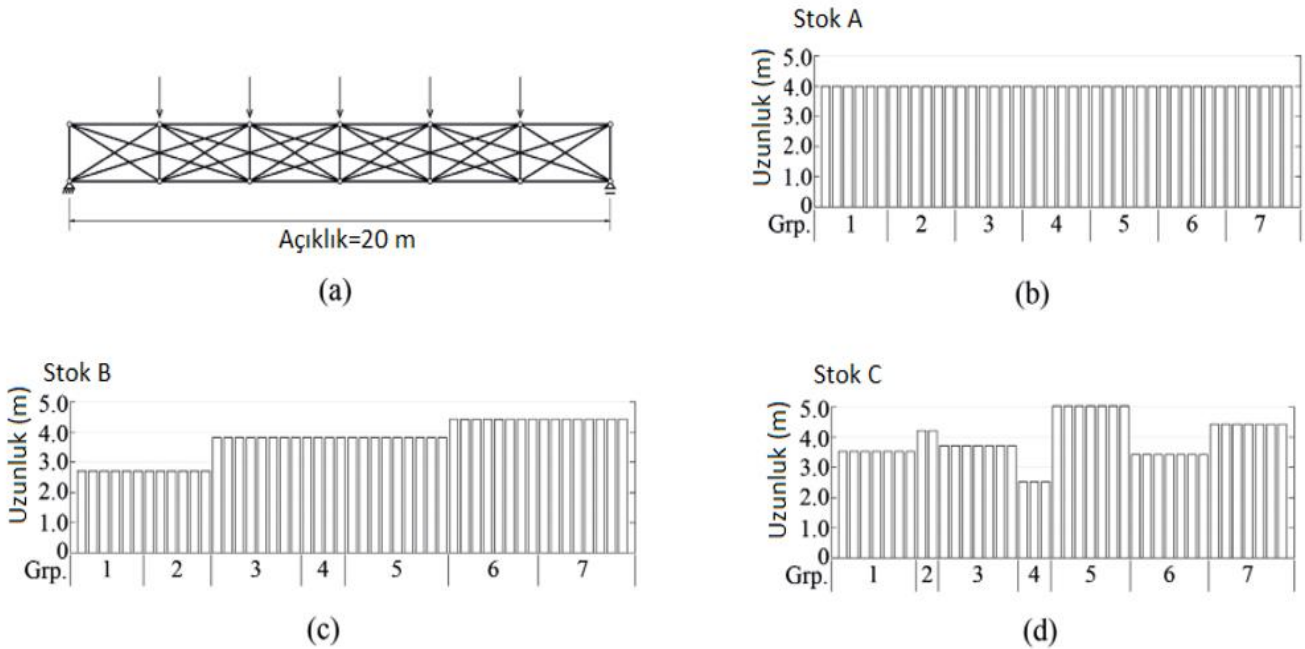
Şekil 10. Brütting ve diğ. (2018b) tarafından sunulan gerçek hayat probleminin sonuçları: a) EKYO öncesi durum, b) EKYO ile elde edilen sistem, c) Elemanların aksel yük durumları, d) Kapasite kullanımları ve eleman uzunlukları

Brütting, Senatore ve Fivet (2019c) tarafından yapılan çalışmada 3 boyutlu kafes yapılar için yeniden kullanılan elemanlar ile optimum tasarım yapılmıştır. Çalışmanın iki temel amacı vardır. Bunlardan ilki EKYO ile kafes sistem tasarlamakken ikincisi ise stok elemanları ile modül oluşturularak bu modülleri farklı

yapılarda kullanılabilir hale getirmektir. Buradaki hedefin kullanıma hazır optimal bir eleman stoku sağlamak olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon süreci belirli kısımlara ayrılmıştır. Bunlar: atama ve topoloji optimizasyonu, stok optimizasyonu, yapısal optimizasyon ve geometri optimizasyonudur. Atama ve

topoloji optimizasyonu Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada sunulduğu gibidir. Amaç fonksiyonu çevresel etkinin minimizasyonudur. Stok optimizasyonu ideal stok konfigürasyonunun (modül parçaları) yakalanması için kurgulanmıştır. Çok amaçlı bir optimizasyon süreci işletilmiştir. İlk amaç fonksiyonu stok elemanlarının sayısını minimize ederek maksimum eleman kullanımı sağlar. İkinci ve üçüncü amaç fonksiyonları ise kesim atıklarını ve toplam ağırlığı minimize etmek için çalışır. Üç amaç fonksiyonu çeşitli ağırlıklar ile tek amaç fonksiyonunda toplanmıştır. Yapısal optimizasyon Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada tanıtıldığı gibi, ilk iki optimizasyon sürecinin içerisinde ele alınmıştır. Kısıt olarak gerilme, yer değiştirme, kuvvet dengesi, geometrik uyumluluk ve burkulma tanımlanmıştır. Problem MILP ile çözüldüğü için doğrusal olmayan denklemler doğrusallaştırılarak yansıtılmıştır. Atama ve topoloji optimizasyonu sırasında daha küçük kesitler ile maksimum rijitlik aranmış olur. Stok optimizasyonu sırasında minimum kesme atığı amaçlandığı için stok elemanları varsayılan boyda kullanılarak geometri optimizasyonu da dolaylı olarak gerçekleştirilir. Optimizasyon hedefi olarak belirlenen çevresel etkiler yaşam döngüsü değerlendirmesi ile

hesaplanmış yerleşik enerji ve karbon salınımlarıdır. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi Brütting ve diğ. (2018a) tarafından sunulan yöntem ile yapılmıştır. Çalışmada iki farklı vaka optimizasyonu sunulmuştur. Birincisi düzlem kafes sistem için üç farklı stok durumunu içeren çalışmadır. Stoklar; eşit uzunluklu stok elemanları, muhtemel bir kafesin sökümünden ortaya çıkabilecek stok elemanları ve uzunlukları rastgele belirlenen stok elemanlarından elde edilen üç farklı listeden oluşmaktadır. Problem ve stok durumları Şekil 11'de gösterildiği gibidir. Stok elemanları için kapasitelerin %90'ı kullanılarak bir güvenlik faktörü de eklenmiştir. EKYO ile elde edilen sonuçlar, tamamen yeni elemanlardan oluşan ağırlık ve geometrisi optimize edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Her senaryo için envanter kısıtlı optimizasyonun bulunduğu toplam yapı ağırlıkları daha fazla, eleman kapasite kullanımları daha düşük olsa da çevresel etkileri çok daha az bulunmuştur. Stok senaryolarından en iyi sonucu veren eşit uzunluklu elemanlara sahip konfigürasyondur. Geometri optimizasyonunun yapıldığı senaryoda, kesim atıkları minimize edildiği için ağırlıklar daha da artarken çevresel etkiler azalmıştır.



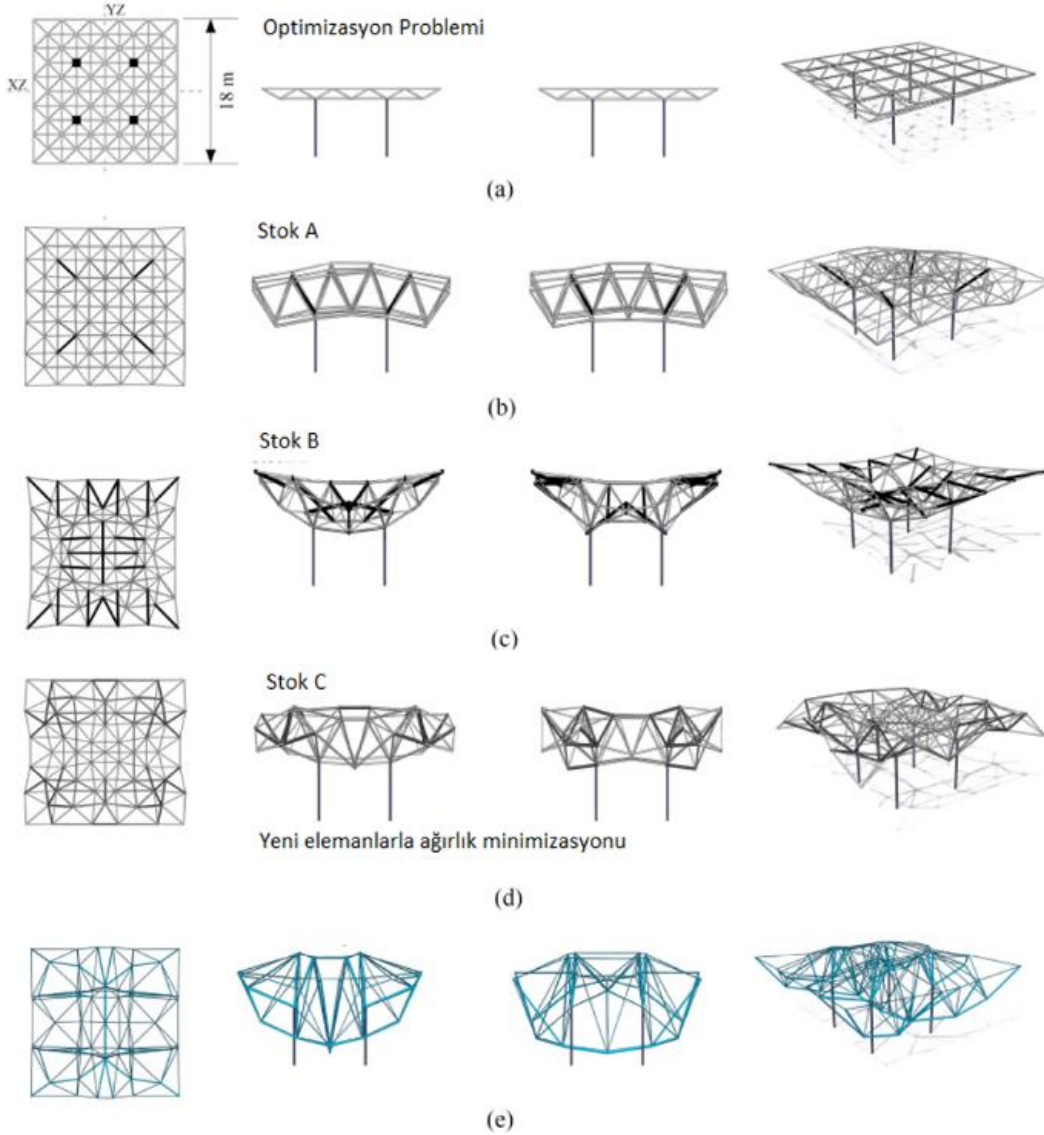
Şekil 11. Brütting ve diğ. (2019c) tarafından optimize edilen düzlem kafes problemi: a) Optimize edilecek sistem, b) Eşit uzunluklu stok, c) Bir kafesin sökümünden elde edilen stok, d) Rastgele uzunluğa sahip elemanlardan oluşturulan stok

Üç boyutlu kafes için yapılan vaka çalışmasında hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla sistemin simetrik olduğu ve topolojinin değişmediği kabul edilmiştir. Düğüm yer değiştirmeleri ve geometrik uyumluluk kısıtları ihmal edilmiştir. İlk vaka çalışmasındaki stokların eleman sayıları artırılarak

kullanılmıştır. Problem Şekil 12'de gösterildiği gibidir. Burada Şekil 12a problemin sunumunu, Şekil 12b, c ve d sırasıyla stok A, B ve C ile elde edilen optimum sonuçları ve Şekil 12e ise yeni elemanlar ile ağırlık minimizasyonu sonucunda elde edilen optimal sonucu göstermektedir. Üç boyutlu kafes için elde edilen

sonuçlar da düzlem kafes ile benzerdir. Yeni elemanlar ile tasarlanan kafese göre ağırlığı fazla, kapasite kullanımı düşük ancak çevresel etkileri oldukça az bulunmuştur. Sonuç olarak, önerilen yöntemin büyük ölçekli problemlerde de başarı ile çalıştığı, bu sırada hesaplama maliyetlerini düşürmek için bazı

basitleştirmelere ihtiyaç duyulabileceği belirtilmiştir. Envanter kısıtlı optimizasyonun çıktılarının stokun durumuna bağlı olarak büyük değişiklikler gösterdiği bildirilmiştir. Yöntemin etkinliğinin daha gerçekçi olarak gösterilebilmesi için hayali stoklar yerine gerçek bir stok durumu ile çalışılabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 12. Brütting ve diğ. (2019c) tarafından sunulan üç boyutlu kafes problemi ve optimum çözümler: a) Optimize edilecek sistem, b) Stok A için optimizasyon, c) Stok B için optimizasyon, d) Stok C için optimizasyon, e) Yeni elemanlarla ağırlık minimizasyonuna dayalı optimizasyon

Brütting, Senatore, Schevenels ve Fivet (2020) tarafından yapılan çalışmada çerçeve sistemler için EKYO prosedürü önerilmiştir. Çalışma iki farklı senaryo ile ilerlemektedir. Bunlardan birisi her bir yapı elemanı için stoktaki bir elemanın kullanılması diğeri ise stoktaki bir eleman kesilerek birden fazla yapı elemanı oluşturulmasıdır. Yöntemin etkinliğini gösterebilmek için iki adet vaka çalışması yapılmıştır. Vaka çalışmaları için kullanılan stok bilgileri eski binaların imalat

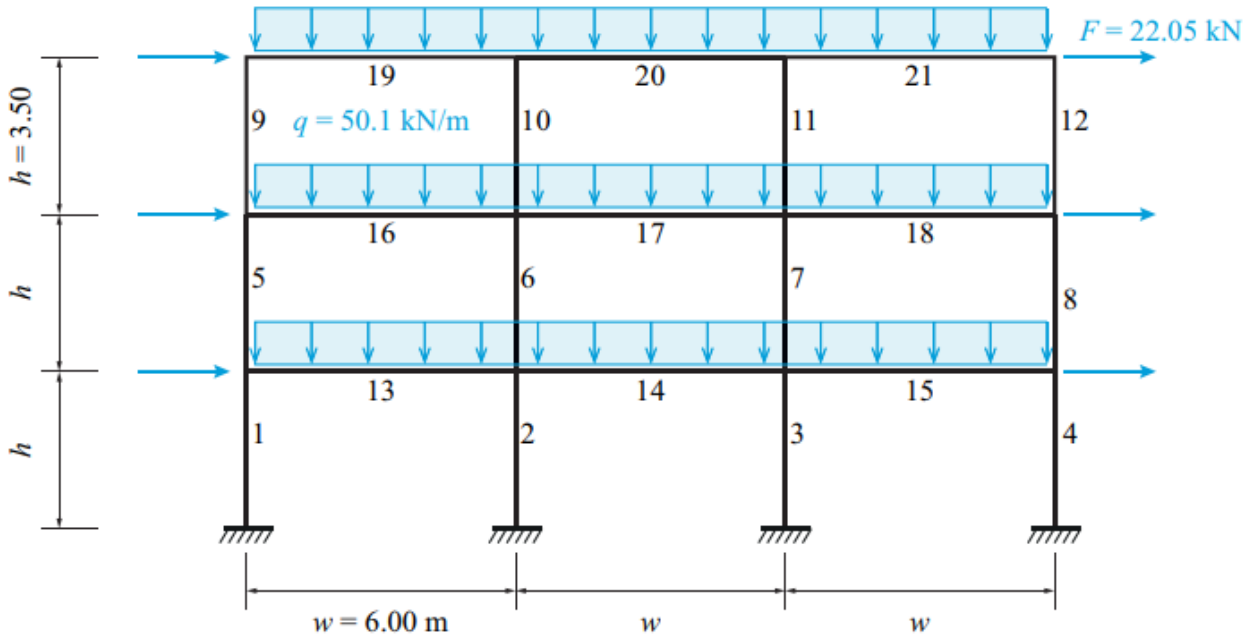
çizimlerinden elde edilmiş gerçek stok listeleridir. Optimizasyon bir atama problemi olarak kurgulanmıştır. Stok elemanları malzeme özellikleri (yoğunluk, elastisite modülü, akma dayanımı), kesit boyutları (alan, atalet momenti), uzunluk ve stok konumu (taşıma mesafesi için) ile karakterize edilmektedir. Atamalar Brütting ve diğ. (2018a) tarafından yapılan çalışmada sunulan yöntemle, ikilik formatta bir matris aracılığıyla yapılmaktadır. Amaç

fonksiyonu tüm atamalar ve her bir atama durumunda oluşacak maliyetlerin toplamını içermektedir. Tüm yapısal kısıtlar ve sera gazı emisyonları amaç fonksiyonunun içerisinde hesaplanmaktadır. Atama yapılmadan önce her bir stok elemanın hangi etkiler altında kullanılabilir bölgede olduğunu belirten bir künyeleme işlemi yapılmıştır. Atamaya dair geometrik kısıtlar ayrıca tanımlanmış, bu sayede her bir elemana bir stok elemanı atanmış, kısa bir stok elemanın uzun bir yapısal elemana atanmasının önüne geçilmiştir. Bir stok elemanı kesilerek birden fazla yapısal eleman oluşturulması için ayrı bir optimizasyon prosedürü önerilmiştir. Buna göre, stok elemanlarının atama matrisi birtakım değişikliklere uğratarak elemanın daha önce kısmen ya da tamamen kullanılıp kullanılmadığını niteleyen indikatörler eklenmiştir. Çalışmada öncekilerden farklı olarak amaç fonksiyonu doğrudan sera gazı emisyonunun minimizasyonu olarak kurgulanmıştır. Yeniden kullanım ve yeni elemanlar ile imalat için uygulanması gereken her sürecin kilogram bazında sera gazı emisyonları, yönetmelik ve bazı teknik raporlardan alınarak toplam maliyet matematiksel olarak modellenmiştir. Atama kararı verildikten sonra, atanan elemanın hacmi ve özgül ağırlığı vasıtasıyla ağırlığı hesaplanarak ağırlığın bir fonksiyonu olan sera gazı emisyonunun bir kısmı oluşturulmaktadır. Buna taşıma sırasındaki emisyonlar

da eklenerek amaç fonksiyonu elde edilmektedir. Yeni elemanlar ile inşaatın maliyetini ifade eden sera gazı salınımları ise doğrudan ağırlığın bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Optimizasyon için Gurobi 8.1 yazılımı aracılığıyla MILP (Mixed-Integer Linear Programming) yöntemi kullanılmıştır. Lineer bir yöntem olduğundan dolayı optimizasyon probleminin içerisindeki doğrusal olmayan denklemler Taylor serisi açılımları aracılığıyla doğrusallaştırılmıştır. Kullanılan optimizasyon yönteminin, metasezgisel algoritmalara göre avantajlı tarafının global optimuma ne kadar yaklaşıldığını ifade eden bir indikatörü olduğundan bahsedilmiştir.

İlk vaka çalışmasında geri dönüştürülmüş ve yeniden kullanılmış elemanlar ile bir düzlem çerçeve optimizasyonu sunulmuştur. Problem Şekil 13'te gösterildiği gibidir. Üçü geri dönüşüm üçü yeniden kullanım olmak üzere altı farklı kombinasyon incelenmiştir.

Sonuç olarak yeniden kullanım ile elde edilen elemanlarla oluşturulan yapı, geri dönüştürülmüş elemanlar ile yapılan yapıdan daha ağır olsa da daha düşük sera gazı emisyonuna yol açtığı bildirilmiştir. Daha uygun bir stok kullanılarak işletilecek optimizasyon prosedürü ile hem ağırlığın hem de sera gazı emisyonunun çok daha düşük olabileceği vurgulanmıştır.



Şekil 13. Brütting ve diğ. (2020) tarafından optimize edilen düzlem çerçeve

İkinci vaka çalışması bir ofis binasının EKYÖ ile tasarımıdır. İlgili üç boyutlu sistem Şekil 14'te gösterilmiştir. Yüklerin belirlenmesi için İsviçre yük ve çelik yapılar yönetmelikleri kullanıldığı; sabit yük, kar yükü ve azaltılmış rüzgâr yükünün kombinasyonu olarak atandığı belirtilmiştir. Tasarım iki parçada

optimize edilmiştir. Öncelikle "ikincil kirişler" eldeki stok ile optimize edilmiş, daha sonra yapının geri kalanı için mevcut stok ile optimizasyon yapılmıştır.

Optimizasyon sonucuna göre ilk örnekteki benzer şekilde yeniden kullanım ile bina ağırlığı artmış ancak

sera gazı emisyonları azalmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, sera gazı emisyonları bakımından değerlendirildiğinde optimal sonuçların stok elemanlarının kesilerek yeni elemanlar üretilmesine müsaade edilen durumda elde edildiği bildirilmiştir. Doğrudan atamaya göre %4 ila %9 arasında daha düşük emisyon değerlerine imkân verse de hesaplama maliyeti daha yüksek bulunmuştur. Yeniden kullanımın daha yüksek kütle ve daha düşük kapasite kullanımlarına neden olsa da sera gazı emisyonlarını %35'e kadar azaltabildiği ifade edilmiştir.



Şekil 14. Brütting ve diğ. (2020) tarafından optimize edilen üç boyutlu çerçeve sistem

Bukauskas (2020) tarafından yapılan çalışmada EKYO için bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle tasarımcıların kolaylıkla kullanabileceği bir analitik yöntem oluşturularak tasarım uzayı hakkında öngörü sağlanabilmesi hedeflenmiştir. Yapısal optimizasyonda esas alınan amaç fonksiyonu genellikle ağırlık veya ağırlığın fonksiyonları iken EKYO için bunun yeterli olmadığı ifade edilerek enerji maliyetleri, kesim kayıpları gibi kriterleri de içeren yeni bir amaç işlevi önerilmiştir. Nihai hedef olarak önerilen yöntemle, yeniden kullanılan ahşap ve çelik elemanlar ile iki ayrı kafes sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Klasik yapısal optimizasyon yönteminin küçük değişiklikler ile EKYO için uygulanabilir olup olmadığı tartışılmış ve kesim atıkları ile çevresel etkileri içeremediği için EKYO'nun yeni yaklaşımlara gereksinim duyulduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada daha önce Bukauskas ve diğ. (2018) tarafından sunulan kesim atığı oranına dayalı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Atama probleminin çözümü için Bukauskas ve diğ. (2017) tarafından sunulan yöntem temel alınarak bazı kısıtlamalar eklenmiştir. Atama yöntemi yaşam döngüsü etkilerini en aza indirmek amacıyla çalışacak şekilde geliştirilip; eleman gerilmeleri, burkulmalar ve düğüm yer değiştirme kısıtlarını da esas alacak şekilde genişletilmiştir. Atama için daha önce kutulama probleminde başarı sağladığı literatürde ifade edilen Greedy Assigment Heuristic Algoritması tercih edilmiştir. Önerilen yöntem Brütting ve diğ. (2018a)

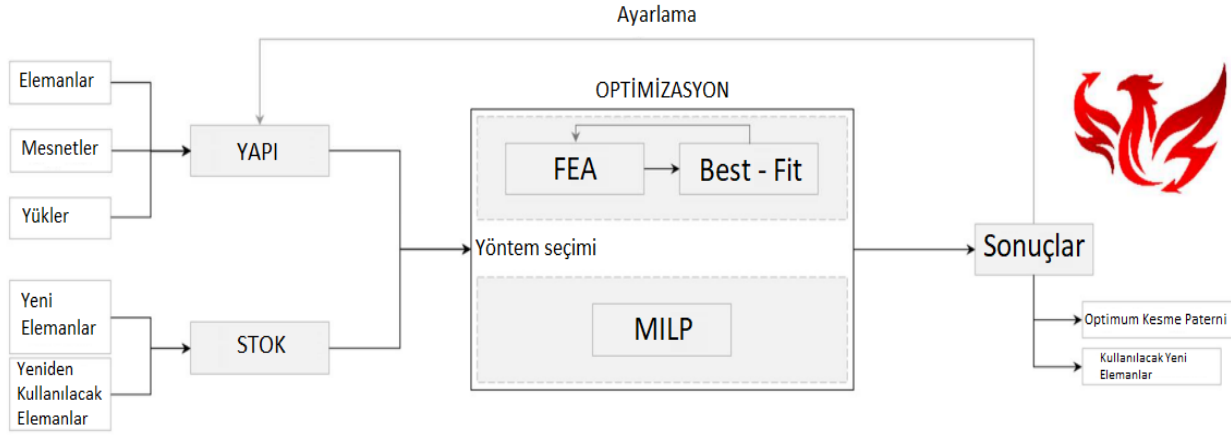
tarafından çözülen üç farklı kafes problemine uygulanarak iki yöntem arasında karşılaştırma yapılmıştır. Howe formundaki kafes sistem için iki yöntem karşılaştırıldığında bu çalışmada önerilen atama yöntemi ile bulunan sonuçların Brütting ve diğ. (2018a) tarafından bulunan sonuçlardan daha ağır olduğu buna karşın kesim atığı miktarının daha az olduğu ve %3 oranında daha düşük yerleşik enerji içerdiği bildirilmiştir. Warren formu kafes sistem için sonuçlar aynı bulunmuştur. Pratt formu için ise hem ağırlık daha az hem de çevresel etki daha düşük bulunmuştur. Daha iyi sonuçlar bulunmasının nedeni olarak algoritmanın daha geniş bir perspektifte kesimler yaparak bir stok elemanından birden fazla yapı elemanı üretilmesine izin vermesi gösterilmiştir. Sonuç olarak, yapısal tasarımda yaşam döngüsü etkilerinin azaltılmasına dair baskıların tasarımcıları EKYO'ya yönlendirebileceği, EKYO yönteminin geleneksel optimizasyon teknikleri ile başarılı şekilde çözümünün mümkün olmaması nedeni ile yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu bildirilmiştir. Ayrıca karşılaştırmalar neticesinde sunulan yöntemin daha başarılı bulunduğu vurgulanmıştır.

Warmuth, Brütting ve Fivet (2021) tarafından yapılan çalışmada envanter kısıtlı yapısal optimizasyon için "Phoenix3D" adında bir hesaplama aracı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen aracın kullanıcı dostu bir arayüze sahip olduğu ve sonuçları görselleştirebildiği bildirilmiştir. İlgili hesaplama aracına ait akış şeması Şekil 15'te sunulmuştur. Araç Mixed-Integer Linear Programming (MILP) ve Best-Fit Heuristic (BFH) olmak üzere iki farklı optimizasyon metodunu içermektedir. Her iki yöntem için de en az çevresel etkiye sahip yapının tasarlanması amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

İki yöntemin kıyaslanması ve önerilen hesaplama aracının kabiliyetlerinin gösterilebilmesi amacıyla vaka çalışmaları yapılmıştır. Geliştirilen araçta yeni elemanlar ile yeniden kullanılan elemanların birlikte kullanılabilmesi bir senaryo da bulunmaktadır. Yeni elemanlar için istenilen uzunlukta ve sınırsız sayıda üretim yapılabileceği varsayılmıştır. Bir stok elemanı kesilerek yeni elemanlar türetilmesine müsaade edilmiştir. MILP ile optimizasyon daha önce Brütting ve diğ. (2019b) ve Brütting ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda sunulduğu şekilde gerçekleştirilmiştir. BFH ile işletilen optimizasyonun ise topoloji ile ilgilenmediği vurgulanmıştır. Ayrıca BFH için sadece eleman kapasiteleri esas alındığı bildirilmiştir yani MILP'deki gibi deformasyon sınırları hesaba katılmamıştır. Amaç fonksiyonu olarak değerlendirilen çevresel etkiler daha önce Brütting ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği şekilde hesaplanmıştır. Vaka çalışması olarak üç farklı çatı sistemi üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Bunlar statikçe belirli ve belirsiz iki boyutlu düzlem kafes ve

üç boyutlu uzay kafestir. Vaka çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre MILP ile elde edilen çözümlerin büyük çoğunluğunun daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu bildirilmiştir. BFH ile elde edilen sonuçlar

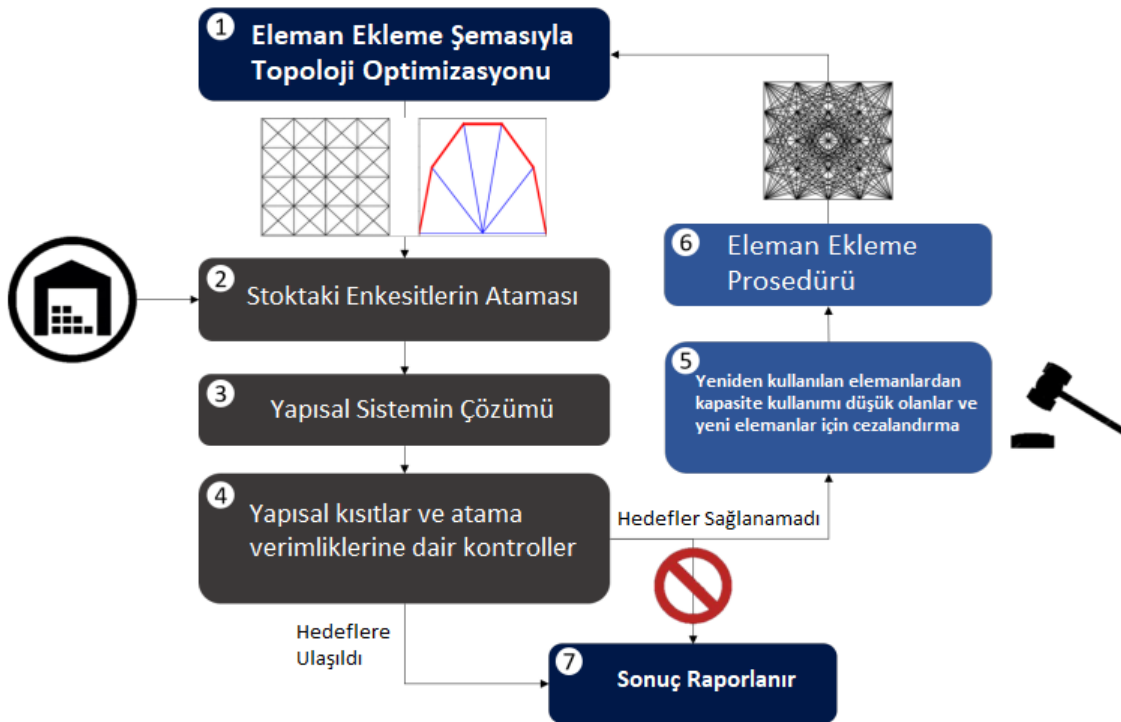
bir miktar daha yüksek çevresel etkiye sahip olsa da algoritmanın hesaplama maliyeti oldukça düşük bulunmuştur.



Şekil 15. Warmuth ve diğ. (2021) tarafından geliştirilen hesaplama aracının akış şeması

Van Gelderen (2021) tarafından yapılan çalışmada çelik kafesler için taşıyıcı elemanların yeniden kullanılmasını temel alan topoloji optimizasyonu yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem eleman ekleme şemasına dayanmaktadır. Yapı hacminin en aza indirilerek yeniden kullanılan eleman miktarının maksimize edilmesi amaç olarak belirlenmiştir. Önerilen yöntemde topoloji optimize edildikten sonra yeniden kullanılacak elemanların maksimum verimle üyelere atanması hedeflenmektedir. Yeniden kullanılan elemanların kapasite kullanımları ile atama yapılan üyenin kapasite talepleri dikkate alınarak ilgili

atamalar gerçekleştirilmiştir. Stokta bulunmayan elemanların yerine yeni elemanlar atanmaktadır. Sonraki adımda yeniden kullanılan elemanlardan verimsiz olanlar ve yeni elemanlar cezalandırılır. Bu sayede yeni eleman kullanımı minimize edilirken yeniden kullanılan elemanların da verimli bir şekilde atanması hedeflenir. Cezalar her iterasyonda yenilenecek algoritmanın daha başarılı sonuçlar bulması beklenir. Son adımda herhangi bir yapısal kısıt ihlali olup olmadığı kontrol edilerek sonuç raporlanır. Önerilen optimizasyon prosedürü Şekil 16'da sunulmuştur.



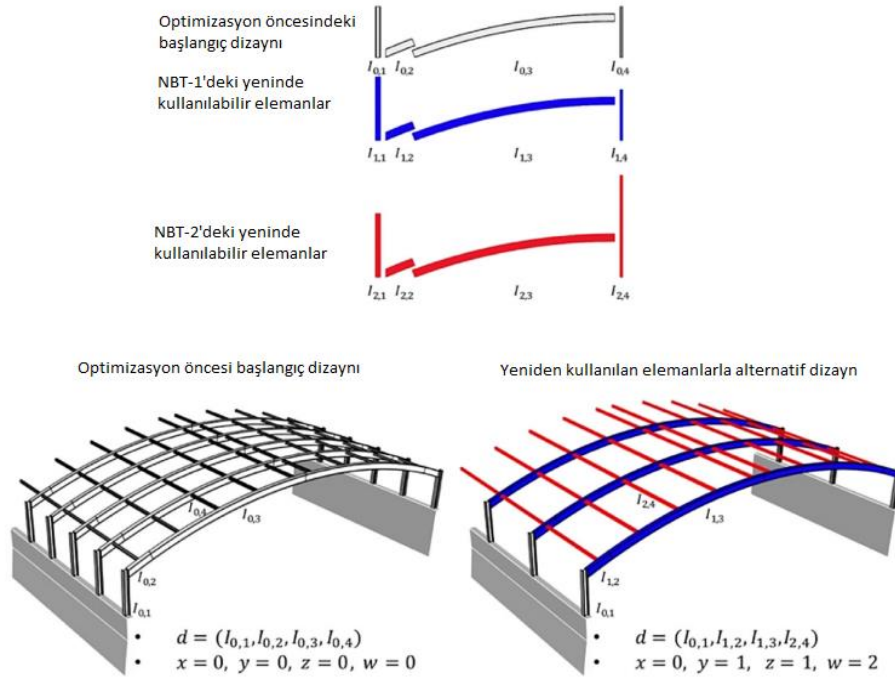
Şekil 16. Van Gelderen (2021) tarafından sunulan optimizasyon prosedürü

Atama yöntemi Brütting ve diğ. (2019b) tarafından sunulan yöntemin geliştirilmiş halidir. Temel farklılık eleman verimine ve yeni eleman kullanılmasına dayanan cezalandırma yöntemidir. Bu bağlamda enkesit cezası ve yeni eleman kullanma cezası olarak iki adet ceza tanımlanmıştır. Cezalar için çeşitli eşik değerler belirlenmiştir. Bu eşik parametrelerinin uygunluğuna göre bulunan çözümün verimliliği büyük oranda değişmektedir. Maksimum verimi hedefleyecek parametreler girilerek sürece başlanması, çözüm bulunamadığı takdirde parametrelerin kademeli olarak azaltılması tavsiye edilmiştir. Önerilen cezaya dayalı atama yöntemi ile Brütting ve diğ. (2019b) tarafından yapılan çalışmada verilen atama yöntemi karşılaştırılarak cezaya dayalı yöntemin toplam yapısal eleman hacmini azalttığı ve yeniden kullanım oranını arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yirmi iki metre açıklıklı bir kafes sistem beş farklı tasarım ve yedi farklı kısıt durumu için optimize edilerek kafesin tamamen yeni elemanlar ile tasarlanması durumu ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli parametre ayarlamaları ile %76-97 aralığında yeniden kullanım oranlarına ulaşılmıştır. Kesitlerin ortalama kapasite kullanımları ise 0.73-0.81 aralığındadır. Tamamen yeni elemanlar ile yapılan kafes ile karşılaştırıldığında, yeniden kullanılan elemanlar ile yapılan sistemin toplam taşıyıcı sistem hacminin daha yüksek olduğu, eleman sayısının daha fazla olduğu ve elemanlar için kapasite kullanımlarının daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Sunulan yöntemin etkinliğini göstermek için bir de gerçek hayat vaka çalışması yapılmıştır. Gerçek bir binadan geri kazanılmış çelik elemanlar ile Ahoy stadyumunun çatısı optimize edilmiştir. Farklı parametre ayarlamaları ile %87 ila %100 arasında yeniden kullanım oranları elde edilmiştir. Vaka çalışmasının sonucunda mevcut yapıya kıyasla büyük bir hacim azalışı sağlansa da bunun gerçekçi olmadığı vurgulanmıştır. Rüzgâr yükleri, malzeme faktörleri, burkulma, düğüm kararsızlığı ve öz ağırlığın ihmal edildiği; yalnızca eleman gerilmelerinin esas alındığı ifade edilmiştir. Çalışmada ayrıca yeniden kullanım ile tasarım yönteminin çıktılarının büyük oranda stok durumuna bağlı olduğu vurgulanmıştır. Yeniden kullanılacak binaların eleman dokümantasyonunun yapılması, yeniden kullanımın daha erişilebilir hale getirilmesi, mevcut binalardan daha kolay veri toplanabilmesinin ilgili yöntemin uygulanabilirliğini arttıracak ifade edilmiştir.

Kim ve Kim (2021) tarafından yapılan çalışmada gürültü bariyeri tünelleri için CO2 emisyonu ve maliyet minimizasyonuna dayalı yeniden kullanım esaslı bir optimizasyon prosedürü önerilmiştir. Önerilen yöntemde gürültü bariyerlerinin BIM (Building Information Modeling) modelinden yeniden kullanılabilir çelik kirişler ile ilgili bilgiler elde edilip stok elemanlarının özelliklerini içeren stok listeleri oluşturulmaktadır. Yani mevcut gürültü bariyeri tünellerinin elemanları ile yeni gürültü bariyeri tünellerinin oluşturulması ve optimizasyonu hedeflenmektedir. İlgili işlem Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Kim ve Kim (2021) tarafından optimize edilen gürültü bariyeri tünelleri

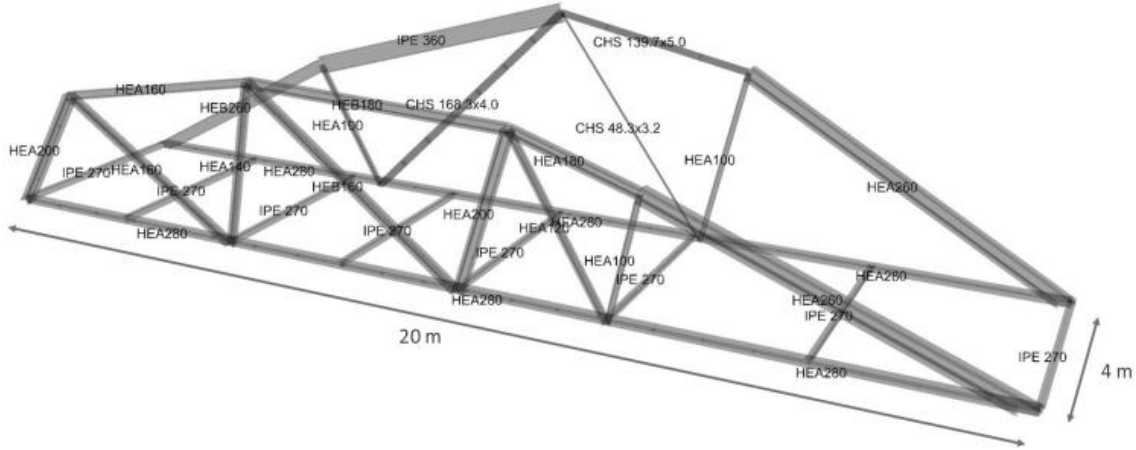


Optimizasyon çok amaçlı bir genetik algoritma ile yapılmıştır. İlk amaç fonksiyonu CO2 emisyonlarını minimize ederken ikinci amaç fonksiyonu maliyet minimizasyonu yapmaktadır. CO2 emisyonları için Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) tarafından sağlanan veriler, maliyetler için ise gürültü bariyeri tüneli inşa eden bir firmanın verileri kullanılmıştır. Çalışmanın çevresel etkiler ile birlikte maliyetleri de esas alması bakımından önemli bir özgün değer içerdiği vurgulanmıştır.

Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için bir dizi vaka çalışması yapılmıştır. Çalışmada üç farklı stok durumu tanımlanmıştır. Bunlardan birisi yeni üretilen elemanları içerir. Diğer ikisi ise önceki gürültü bariyeri tünellerinden elde edilen elemanların BIM modellerinden oluşturulmuştur. İki adet vaka senaryosu bulunmaktadır. İlk senaryoda kazanılan elemanların ömrünün oluşturulacak sistemin ömründen uzun olduğu kabul edilmiştir. İkinci senaryoda ise yeniden kullanılan elemanların ömrünün oluşturulan sistemin beklenen ömründen düşük olduğu varsayılmış ve zaman içerisinde elemanlara bakım-değişim yapılması gereksinimi modellenmiştir. Tanıtılan yöntemle yapılan vaka çalışmalarında duruma bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonlarını %1 ila %92 düşerken maliyetlerde de %25'e kadar azalma gözlenmiştir. Çevresel etkiler azaltılırken maliyetin de azalması çalışmanın önemli çıktılarında birisidir.

Van Lookeren Campagne (2022) tarafından yapılan çalışmada tasarım sürecinin stok elemanları ile tersine çevrilerken mevcut olan elemanlar doğrultusunda, yeni

elemanlara ihtiyaç duyulmaksızın ve aşırı boyutlandırma olmaksızın optimum makaslı köprü tasarımı yapılmasının amaçlandığı belirtilmiştir. Giriş verisi olarak köprünün uzunluğu, genişliği ve yeniden kullanılabilir çelik elemanların stok miktarının tanıtılması gerekmektedir. Önerilen stok kısıtlı büyüme yönteminin Eurocode'a uygun gerekli hesaplamaları, tasarım kısıtlarını ve optimizasyon adımlarını içerdiği belirtilmiştir. Optimizasyon için algoritmik bir tasarım ortamı olan Grasshopper tercih edildiği ve Python kodları ile yönetildiği, hesaplamalar için sonlu elemanlar çözücüsü olan Karamba yazılımının da koda entegre edildiği belirtilmiştir. Çalışmada başarımları değerlendirmek için dört farklı Warren kafes modeli kıyaslanmıştır. Bunlar; standart bir kafes sistem, kesitleri optimize edilmiş kafes sistem, yeniden kullanılan elemanların yalnızca talep edilen forma uygun olarak yerleştirildiği kafes sistem ve çalışmada önerilen stok kısıtlı büyüme yönteminin tatbik edildiği, elemanların kesim gibi işlemlerden geçirilmeden talep edilen elemandan daha büyük şekilde atanabildiği kafes sistemdir. Yapılan teorik uygulama sonucunda; önerilen yöntemin yeni çelik elemanlar gerekmeksizin, minimum atıkla ve eleman kapasite kullanımlarını maksimize eden çözümler sunduğu raporlanmıştır. Yeni elemanlar ile yapılmış sistemle kıyaslandığında önerilen yöntemin %16 daha fazla kütleyle sahip çözüm ürettiği ancak %63 daha az gömülü karbon salınımı elde ettiği belirtilmiştir. Çalışmada sunulan örnek bir köprü tasarımı Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Van Lookeren Campagne (2022) tarafından EKYO uygulanan örnek bir köprü tasarımı

Sohani, Nourzad ve Saghatforoush (2023) tarafından yapılan çalışmada çok katmanlı bir EKYO prosedürü önerilmiştir. Yeniden kullanımı maksimize etmek için yapısal elemanlarla birlikte kaplama ve bölme elemanlarının da optimizasyonu hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşımda ilk katmanda sırasıyla kiriş ve kolonlar üzerinde EKYO yaklaşımı uygulanmaktadır. Ardından ikinci katmanda dış duvar tipi, kaplama elemanlar ve çatı için yeniden kullanım odaklı

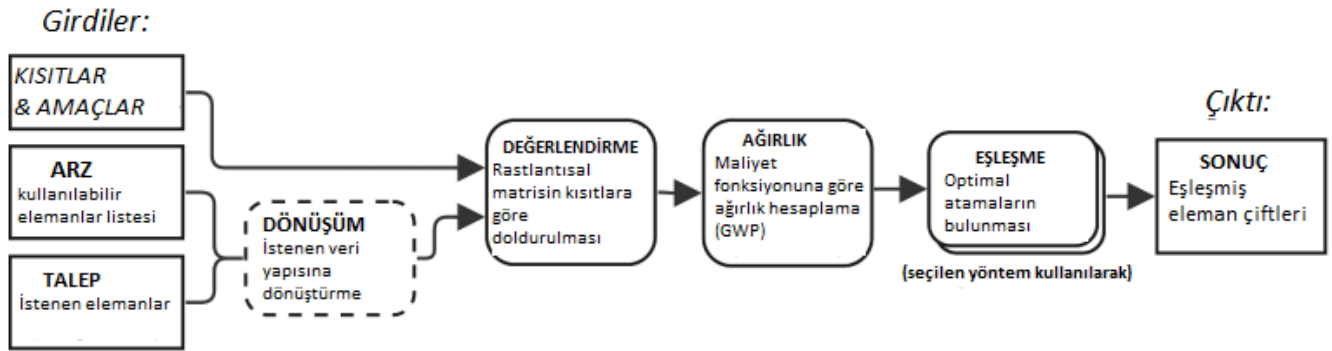
optimizasyon uygulanmıştır. Optimizasyon için MATLAB programı üzerinden Genetik Algoritma kullanıldığı belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak geri kazanılmış elemanların tahsis oranı kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri ise ihtiyaç duyulan bileşenler olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı sistemin cephe kaplamaları ile uyumlu olarak atanabilmesi için bir dizi kısıt tanımlandığı belirtilmiştir. Oluşturulan optimizasyon sürecinde en uygun tasarımın stoktaki

elemanları en çok kullanan tasarım olarak belirlendiği bildirilmiştir. Çalışmada bir adet hipotetik yapı oluşturularak ilgili yapının elemanları kullanılarak inşa edilebilecek üç farklı plan üzerinde EKYO uygulaması yapılmıştır. Çalışma, yapısal olmayan elemanların da dahil edilmesi ile EKYO konseptini genişletmesi bakımından öncü olarak değerlendirilebilir olsa da amaç fonksiyonu olarak sadece yeniden kullanım oranını esas alındığı ve çevresel etki değerlendirme, karbon salınımı gibi kabul görmüş amaç işlevleri ile genişletilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmadaki hâkim bakış açısının mimari odaklı olduğu, yapısal sistemin verimliliğinin artırılması amacıyla yapı mühendisliği açısından sunulan çerçevenin gelişime açık olduğu bildirilmiştir.

Tomczac, Haakonsen ve Łuczowski (2023) tarafından yapılan çalışmada EKYO prosedürlerinin öne çıkan zorluklarından birisi olan stok elemanı ile atanacak elemanın eşleştirilmesi probleminin çözümü için çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Kullanıcı tanımlı kısıtlar ve optimizasyon kriterlerini göz önünde bulunduran, istenen elemanlar için stok elemanlarını en uygun şekilde atamayı amaçlayan bir araç oluşturulduğu belirtilmiştir. Önerilen aracın stok elemanları ile tasarım yapmadığı, yapılmış bir tasarım ve sabit bir topoloji üzerine optimum atamaları gerçekleştirmek üzere çalıştığı ifade edilmiştir. Aracın giriş verilerinin; talep edilen tasarım, stok listesi, kısıtlama listesi ve amaç işlevinden oluştuğu bildirilmiştir. Optimizasyon süreci için ağgözlü algoritma, maksimum iki parçalı grafik yöntemi (Maximum Bipartite Graph Method -

MaxBM) ve karma tamsayı programlama (Mixed Integer Programming - MIP) olmak üzere üç farklı metodolojinin Python ortamında kullanıldığı belirtilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak küresel ısınma potansiyeli (GWP) değerlendirilerek minimizasyon işlemi yürütülmüştür. Kısıt olarak ise elemanların alanı, uzunluğu ve atalet momenti seçilmiş olup tasarımda talep edilenden küçük olamayacağı belirtilmiştir. Problem ağgözlü algoritma için stok elemanlarının parçalara ayrılarak birden fazla elemana atanabileceği şekilde, diğer algoritmalar için ise her elemanın bir elemana atanacağı şekilde kurgulanmıştır. Önerilen algoritmaların başarımını değerlendirmek amacıyla basit bir varsayımsal stok ve talep listesi üzerinde ve gerçek hayat koşullarına yakın bir ahşap çatı makası üzerinde atamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerin ardından en başarılı sonuçların MIP ile bulunduğu ancak hesaplama maliyetinin yüksek olduğu, tatbik edilmesi en kolay yöntemin ise ağgözlü algoritma olduğu raporlanmıştır. Diğer EKYO araştırmalarında bulunduğu gibi; algoritmaların verdiği optimal çözümlerdeki kesitlerin olması gerektiğinden büyük elemanlardan oluştuğu ve bunun daha az verimli bir çözüm sunduğu ancak çevresel etkiler bakımından önemli ölçüde daha düşük sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır. Sunulan yöntemin akış şeması Şekil 19'da gösterilmiştir.

İncelenen çalışmaların amacı, tatbik edilen yapı türü, optimizasyon metodolojisi, seçilen amaç fonksiyonu ve kullanılan kısıtlar Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 19. Tomczac ve diğ. (2021) tarafından sunulan atama yönteminin akış şeması

Tablo 2. İncelenen EKYO çalışmaları

Yazar-Yıl	Amaç	Yapı Türü	Optimizasyon	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar
<i>Fujitani ve Fuji (2000)</i>	Çerçeve sistemler için EKYO prosedürü sunmak	İki katlı iki açıklıklı düzlem çerçeve	Genetik Algoritma	Ağırlık minimizasyonu	Gerilme Birim şekil değiştirme
<i>Bukauskas ve diğ. (2017)</i>	EKYO için atama problemi çözümü sunmak	Düzlem kafesler	Ön Sıralamalı First-Fit Algoritması	Kesim kaybı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2018a)</i>	Kafes sistemlerde EKYO için optimizasyon yöntemi sunmak	Howe Kafes Warren Kafes Pratt Kafes 41 aday elemanlı 2 açıklıklı köprü kafesi	MILP (Mixed Integer Linear Programming) NLP (Non-Linear Programming)	Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu Kesim atığı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Burkulma Düğüm yer değiştirmeleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Bukauskas ve diğ. (2018)</i>	EKYO için teorik zorlukları ele almak. Kesim atığına dayalı yeni bir amaç fonksiyonu sunmak.	Düzlem kafesler	Polynomial-Time Heuristics	Kesim oranı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2018b)</i>	EKYO yöntemiyle kafes yapılar için gerçek hayat problemleri ile birlikte optimizasyon sunmak	10 elemanlı konsol kafes Tren İstasyonu Çatısı	MILP NLP	Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu Kesim atığı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Burkulma Düğüm yer değiştirmeleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2019b)</i>	Kafes yapıların EKYO yöntemi için tasarım prosedürü sunmak.	10 elemanlı konsol kafes Tren İstasyonu Çatısı	MILP NLP	Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu Kesim atığı minimizasyonu	Eleman kapasiteleri Burkulma Düğüm yer değiştirmeleri Atamaya dair kısıtlar
<i>Brütting ve diğ. (2019c)</i>	Kafes tipi yapılar için yeniden kullanılmak üzere optimum kit eleman grupları tasarlamak	41 aday elemanlı 20 metre açıklıklı düzlem kafes 200 elemanlı 3B Kafes	MILP	Çevresel etki minimizasyonu Ağırlık Minimizasyonu Eleman Sayısı Minimizasyonu	Gerilme Yer değiştirme Burkulma Kuvvet dengesi Geometrik uyumluluk
<i>Brütting ve diğ. (2020)</i>	Çerçeve sistemler için EKYO yöntemi ile tasarım prosedürü geliştirmek	3 kat 3 açıklıklı çerçeve 2 Katlı ofis binası (Gerçek hayat problemi)	MILP	Sera gazı emisyonlarının minimizasyonu	Yer değiştirme Gerilme Birim şekil değiştirme Düğüm yer değiştirmeleri Uç kuvvetler-dış yük dengesi
<i>Bukauskas (2020)</i>	Tasarım uzayını karakterize etmek için analitik yöntem geliştirmek Kafes sistemlerin EKYO ile optimizasyonu	Howe Kafes Warren Kafes Pratt Kafes	Greddy Heuristic Method	Kesim oranı minimizasyonu Ağırlık minimizasyonu Yerleşik enerji minimizasyonu	Eleman gerilmeleri Burkulmalar Düğüm yer değiştirmeleri Atama kısıtları
<i>Warmuth ve diğ. (2021)</i>	EKYO için bir hesaplama aracı geliştirmek	İzostatik kafes Hiperstatik kafes 250 elemanlı uzay çatı	MILP Best-Fit Heuristic	Çevresel etki minimizasyonu	Gerilme Burkulma
<i>Van Gelderen (2021)</i>	EKYO için cezaya dayalı atama sistemi ile kafes topoloji optimizasyonu	22m açıklıklı düzlem kafes Ahoy Stadyumu çatı sistemi	Lineer Programlama	Yapısal eleman hacmi minimizasyonu	Eleman gerilmeleri <b>Ekstra cezalar:</b> Verim cezası Yeni eleman kullanma cezası
<i>Kim ve Kim (2021)</i>	Gürültü bariyeri tünellerinin giriş sistemleri için EKYO yönteminin uygulanması	Gürültü bariyeri tüneli	Genetik Algoritma	CO <sub>2</sub> emisyonu minimizasyonu Maliyet minimizasyonu	Atama kısıtları
<i>Van Lookeren Campagne (2022)</i>	Makaslı köprü tasarımı için EKYO prosedürü önerilmesi	Makaslı köprü	Grasshopper	Gömülü karbon salınımı minimizasyonu	Geometrik kısıtlar Tasarım yönetmeliği kısıtları
<i>Sohani ve diğ. (2023)</i>	Yapısal olmayan elemanların da EKYO prosedürüne entegrasyonu	Tek katlı hipotetik bina	Genetik Algoritma	Yeniden kullanım oranı maksimizasyonu	Yapısal elemanlar ile yapısal olmayan elemanların uyumuna ilişkin kısıtlar
<i>Tomczak ve diğ. (2023)</i>	EKYO için atama problemi çözümü sunmak	Basit bir atama problemi ve gerçek hayatı yakınsayan bir ahşap çatı makası	Açgözlü algoritma MaxBM MIP	Küresel ısınma potansiyeli minimizasyonu	Uzunluk Alan Atalet Momenti

## 6. Tartışma ve Sonuçlar

Bu literatür incelemesinde son yıllarda yapısal optimizasyon disiplininin bir alt kolu olarak ortaya çıkan envanter kısıtlı yapısal optimizasyon (EKYO) çalışmalarının incelenmesi amaçlanmıştır. Envanter kısıtlı yapısal optimizasyon konusunun bağlamı gereği; öncelikle yapısal elemanlarının yeniden kullanımı, inşaat sektörünün çevresel etkileri ve döngüsel ekonomi, yapısal elemanların yeniden kullanımının

önündeki engeller ve çözümler, literatürde sunulan uygulama incelemeleri ve vaka çalışmaları özetlenmiştir. Ardından envanter kısıtlı yapısal optimizasyona dair literatürde bulunan çalışmaların geniş incelemeleri aktarılmıştır. Bu çalışma neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- İnşaat ve yıkım sektörü atık oluşumu, yerleşik enerji kullanımı, sera gazı emisyonu gibi çevresel etkiler bakımından en büyük paydaşlardan

birisidir. Karar verici pozisyonundaki kurumlar ve bilim dünyası tarafından ilgili olumsuz etkilerin azaltılması hususunda azımsanamayacak sayıda eylem planı, yöntem ve uygulama sunulmuştur. Yapı elemanlarının yeniden kullanımı konusu da gündemde olan döngüsel ekonomi stratejilerinden birisidir. Artan çevresel kaygılar ile birlikte yapı elemanlarının yeniden kullanımına ilişkin baskıların da artacağı ve uygulamaların yaygınlaşacağı anlaşılmaktadır.

- Taramalar neticesinde elde edilen çalışmaların yıllara göre dağılımları incelendiğinde, ulaşılan ilk çalışmanın ardından takip eden on yedi sene boyunca herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı görülmektedir. 2017 yılından sonra EKYO alanına olan ilginin arttığı, önce konferans bildirileri takip eden yıllarda ise tezler ve makaleler sunulduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun artan çevresel kaygılar ve sektör üzerindeki baskılar ile AB eylem planlarındaki kararlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Yapı elemanlarının yeniden kullanımının, geri dönüşüm gibi stratejilere göre daha düşük çevresel etkilere sebep olduğu konusunda görüş birliği olduğu anlaşılmıştır. Buna karşın yapı elemanlarının yeniden kullanımına dair; Bölüm 3'te sunulan maliyet, bulunabilirlik, yasal boşluklar gibi engeller bulunduğu bilinmektedir. İlgili engellerin aşılması için yapılmış çeşitli çalışmalar olsa da yapı elemanlarının yeniden kullanımının yaygınlaşması için daha fazla çalışmaya ve yasal düzenlemelere ihtiyaç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- EKYO yöntemlerinin teorik problemlerden gerçek hayat problemlerine kadar çeşitli yapısal sistemlere uygulandığı görülmüştür. Optimizasyon sonuçları irdelendiğinde, EKYO'nun stok elemanlarının yüksek verimlilikle yeniden kullanımı ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi gibi hedefleri gerçekleştirerek yapısal elemanların yeniden kullanımı ile beklenen faydayı maksimize ettiği, buradan hareketle de kullanılabilir ve pratik bir yaklaşım olduğu anlaşılmaktadır.
- Yapısal optimizasyon metodolojisinde yaygın şekilde amaç fonksiyonu olarak tercih edilen ağırlık veya maliyet minimizasyonunun, EKYO süreçlerinin performansını tam olarak değerlendiremediği anlaşılmaktadır. EKYO için yerleşik enerjiye, sera gazı emisyonlarına ve kesim kayıplarına dayalı çeşitli amaç fonksiyonları önerildiği gözlemlenmiştir. Literatürdeki az sayıda çalışmadan görüldüğü kadarıyla, üzerinde mutabakata varılan herhangi bir amaç işlevinin bulunmadığı anlaşılmaktadır.

- EKYO için tercih edilen optimizasyon yöntemlerinin yapısal optimizasyon literatürünün oldukça gerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Öyle ki kutulama problemlerine özgü First-Fit, Best-Fit gibi çeşitli sezgisel yöntemler ve doğrusal ya da doğrusal olmayan programlama gibi görece eski tekniklerin tercih edildiği, metasezgisel algoritmalar ise yalnızca görece eski bir yöntem olan genetik algoritmanın kullanıldığı görülmüştür. Yapısal optimizasyon literatüründe başarısını ispatlamış modern optimizasyon yöntemlerinin EKYO için uygulanması ile başarımın artabileceği düşünülmektedir.
- Taramalar neticesinde ulaşılan çalışmaların önemli bir kısmının birkaç araştırma grubu tarafından yapıldığı görülmüştür. Bu konuda daha çok araştırmacının çalışma yapmasıyla EKYO'nun mühendislik pratiğine dönüşüm sürecinin hızlanacağı düşünülmektedir.

### Teşekkür

Bu makalenin birinci yazarı YÖK 100/2000 Doktora Projesi kapsamında, Yapay Zekâ tematik alanında doktora bursuyla desteklenmektedir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Yazar1, Literatür araştırması, makalenin yazımı, düzeltmelerin yapılması ve yayına hazırlık konularında; Yazar2 ve Yazar3, Araştırma sürecinin takibi, yönlendirilmesi, kontrolü ve sonuçların değerlendirilmesi, inceleme ve düzeltme konularında katkı sağlamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Academia. Erişim adresi: [www.academia.edu](http://www.academia.edu). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Addis, B. (2006). *Building with reclaimed components and materials: A design handbook for reuse and recycling*. London, UK: Routledge.
- Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D. & Teferle, F. N. (2020). BIM-based end-of-lifecycle decision making and digital deconstruction: Literature review. *Sustainability*, 12(7), 2670. doi: <https://doi.org/10.3390/su12072670>
- Akinade, O.O., Oyedele, L.O., Ajayi, S.O., Bilal, M., Alaka, H.A., Owolabi, H.A., Bello, S.A., Jaiyeoba, B.E. & Kadiri, K.O. (2017). Design for Deconstruction (Dfd): Critical success factors for diverting end-of-

- life waste from landfills. *Waste Management*, 60, 3-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>
- Allwood, J.M. & Cullen, J.M. (2012). *Sustainable materials: with both eyes open*. Cambridge, UK: UIT Cambridge.
- Balbas, L. T. (1965). *La mezquita de Córdoba y las ruinas de Madinat Al-Zahra*. Madrid, Spain: Editorial Plus-Ultra.
- Brütting J., Senatore G., Fivet, C. (2018a). *Advanced Computing Strategies for Engineering: Optimization formulations for the design of low embodied energy structures made from reused elements.*, Eds: Smith, I., Domer, B., Cham, Switzerland: Springer.
- Brütting, J., De Wolf, C. & Fivet, C. (2019a). The reuse of load-bearing components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, 012025. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012025>
- Brütting, J., Desruelle, J., Senatore, G. & Fivet, C. (2019b). Design of truss structures through reuse. *Structures*, 18, 128-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.006>
- Brütting, J., Desruelle, J., Senatore, G., & Fivet, C. (2018b, July). *Optimum truss design with reused stock elements*. In Proceedings of IASS Annual Symposia, 1-8, Boston, USA.
- Brütting, J., Senatore, G. & Fivet, C. (2019c). Form follows availability-Designing structures through reuse. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 60(4), 257-265. doi: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2019.202.033>
- Brütting, J., Senatore, G., Schevenels, M. & Fivet, C., (2020). Optimum design of frame structures from a stock of reclaimed elements. *Frontiers in Built Environment*, 6(57). doi: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00057>
- Bukauskas, A. (2020). *Inventory-constrained structural design* (PhD Thesis). University of Bath, Bath, UK.
- Bukauskas, A., Shepherd, P., Walker, P., Sharma, B., & Bregulla, J. (2017, September). *Form-Fitting strategies for diversity-tolerant design*. In Proceedings of IASS annual symposia, 1-10, Hamburg, Germany.
- Bukauskas, A., Shepherd, P., Walker, P., Sharma, B., & Bregulla, J. (2018, July). *Inventory-constrained structural design: new objectives and optimization techniques*. In Proceedings of IASS annual symposia, 1-8, Boston, USA.
- Condotta, M. & Zatta, E. (2021). Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128413. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128413>
- Estrella Arcos, E. X., Muresan, A. M., Redealli, D., Brütting, J., Warmuth, J., & Fivet, C. (2023, June). *A Reuse-Ready Timber Slab-and-Column System for Modular Building Structures*. In World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). Timber for a livable future (pp. 3588-3593), Oslo, Norway. <https://doi.org/10.52202/069179-0467>
- European Commission (2015). *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. Brussels, Belgium: Eur-Lex.
- European Commission (2017). *Efficient use of mixed wastes – improving management of construction and demolition waste final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Eurostat (2022). Waste statistics online database. Erişim adresi: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste), Erişim tarihi: 30.01.2022
- Fujita, M. & Masuda, T. (2014). Application of various NDT methods for the evaluation of building steel structures for reuse. *Materials*, 7(10), 7130-7144. doi: <https://doi.org/10.3390/ma7107130>
- Fujitani, Y., & Fujii, D. (2000, May). *Optimum structural design of steel plane frame under the limited stocks of members*. In Proceedings of the RILEM/CIB/ISO international symposium, integrated life-cycle design of materials and structures, 198-202, Helsinki, Finland.
- Google Scholar. Erişim adresi: <https://scholar.google.com>. Erişim tarihi: 02.12.2023
- Gorgolewski, M. (2008). Designing with reused building components: some challenges. *Build. Res. Inf.*, 36, 175-188. doi: <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>
- Gorgolewski, M., Straka, V., Edmonds, J. & Sergio-Dzoutzidis, C. (2008). Designing buildings using reclaimed steel components. *Journal of Green Building*, 3(3), 97-107. doi: <https://doi.org/10.3992/jgb.3.3.97>
- Hradil, P., Talja, A., Wahlström, M., Huuhka, S., Lahdensivu, J. & Pikkuvirta, J. (2014). *Re-use of*

- structural elements environmentally efficient recovery of building components*. Espoo, Finland: VTT Technology 200.
- Iacovidou, E. & Purnell, P. (2016). Mining the physical infrastructure: opportunities, barriers and interventions in promoting structural component reuse. *Sci Total Environ*, 557–558, 791–807. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.098>
- Kanters, J. (2018). Design for deconstruction in the design process: State of the art. *Buildings*, 8(11), 150. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>
- Kanyilmaz, A., Birhane, M., Fishwick, R., & del Castillo, C. (2023). Reuse of Steel in the Construction Industry: Challenges and Opportunities. *International Journal of Steel Structures*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13296-023-00778-4>
- Kim, S. & Kim, S.-A. (2021). Design optimization of noise barrier tunnels through component reuse: Minimization of costs and CO2 emissions using multi-objective genetic algorithm, *J. Clean. Prod.*, 298, 126697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126697>
- Ness, D. & Swift, J., Ranasinghe, D. C., Xing, K., Soebarto, V. (2015). Smart steel: new paradigms for the reuse of steel enabled by digital tracking and modelling. *Journal of Cleaner Production*, 98, 292-303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.055>
- Pongiglione, M. & Calderini, C. (2014). Material savings through structural steel reuse: A case study in Genoa. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 87-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.011>
- Researchgate. Erişim adresi: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Rios, F.C., Chong, W.K. & Grau, D. (2015). Design for disassembly and deconstruction—challenges and opportunities. *Procedia Eng.*, 118, 1296–1304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.485>
- Ruan, C. (2020). *Imperfections on the stability of reused steel structures* (BS Thesis), Häme University of Applied Sciences, Hämeenlinna, Finland.
- Saka, M. P., Hasançebi, O. & Geem, Z. W. (2016). Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.01.005>
- Salama, W. (2017). Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 617-635. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.03.005>
- Sandin Y., Carlsson A., Chúláin U.C. & Sandberg K. (2021). *Design for deconstruction and reuse: case study Villa Anneberg*. Borås, Sweden: RISE.
- ScienceDirect. Erişim adresi: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Sohani, H., Hosseini Nourzad, S. H., & Saghatforoush, E. (2023). The optimized form of building made from the reused elements. *Architectural Engineering and Design Management*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2285344>
- Springer Link. Erişim adresi: [link.springer.com](http://link.springer.com). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Stahel, W.R. (2013). Policy for material efficiency-sustainable taxation as a departure from the throwaway society. *Phil Trans R Soc A*, 371, 20110567. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>
- Taylor Francis. Erişim adresi: [www.tandfonline.com](http://www.tandfonline.com). Erişim tarihi: 02.12.2023
- Tingley, D. D., Cooper, S. & Cullen, J. (2017). Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective. *Journal of Cleaner Production*, 148, 642-652. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.006>
- Tomczak, A., Haakonsen, S. M., & Łuczowski, M. (2023). Matching algorithms to assist in designing with reclaimed building elements. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3(3), 035005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/acf341>
- Ünlütürk, Ş., Öztürk, P. H., Kardeş, S., Birdal, M., Saral, B., Aşıroğlu, B., Ergün, G. ve Yokuş, P. P. (2020). *İşletmeler için döngüsel ekonomi rehberi*. İstanbul: Hedefler İçin İş Dünyası Platformu – Dcube Döngüsel Ekonomi Kooperatifi.
- Van Gelderen, T. (2021). *Truss topology optimization with reused steel elements: An optimization tool for designing steel trusses with a set of reclaimed elements* (MSc Thesis), Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Van Lookeren Campagne, F. (2022). *Efficiently including reclaimed steel elements in a truss bridge design by performing a stock-constrained shape and topology optimization*, (MSc Thesis), Delft University of

Technology, Delf, Netherlands.  
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:85cbf0eb-0a2f-4be8-aecc-84616a5f8643>

Vares, S., Hradil, P., Pulakka, S., Ungureanu, V., & Sansom, M. (2018, October). *Environmental-and life cycle cost impact of reused steel structures: A case study*. In Proceedings of the 6th International Symposium on Life Cycle Civil Engineering IALCCE, 28-31, Ghent, Belgium.

Vares, S., Hradil, P., Sansom, M. & Ungureanu, V. (2020). Economic potential and environmental impacts of reused steel structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 750-761. doi: <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1662064>

Walsh, S. J., & Shotton, E. (2022). *Design for deconstruction and reuse: An Irish suburban semi-detached dwelling*. Technical Report, School of Architecture, Planning & Environmental Policy, University College Dublin, April 1, 2022. <http://hdl.handle.net/10197/13111>

Warmuth, J., Brütting, J., & Fivet, C. (2021, August). *Computational tool for stock-constrained design of structures*. In Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures, 1-9, Guilford, UK.

Web of Science. Erişim adresi: [www.webofscience.com](http://www.webofscience.com).  
Erişim tarihi: 02.12.2023

Yeung, J., Walbridge, S. & Haas, C. (2015). The role of geometric characterization in supporting structural steel reuse decisions. *Resources, conservation and recycling*, 104, 120-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.017>

Yeung, J., Walbridge, S., Haas, C. & Saari, R. (2007). Understanding the total life cycle cost implications of reusing structural steel. *Environment Systems and Decisions*, 37(1), 101-120. doi: <https://doi.org/10.1007/s10669-016-9621-6>

## EVALUATION AND COMPARISON OF CONSTRUCTION TECHNOLOGIES FOR HIGH-RISE BUILDINGS \*

Maral Fakhari <sup>1\*</sup>, Hasan Ünver <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Architecture, Engineering and Architecture Faculty, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir-Turkey, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8596-8146>

<sup>2</sup> Department of Architecture, Engineering and Architecture Faculty, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir-Turkey, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8994-3659>

Keywords	Abstract
<p>High-rise Buildings Structural Systems Construction Technologies Construction Methods Innovative Approaches</p>	<p>The development of human societies in different countries around the world is increasing dramatically. High-rise buildings are being constructed as a response to the challenges of limited and expensive urban land, and they are crucial for urbanization. Today, besides serving as structures for economic growth in cities, high-rise buildings remain symbolic of prestige and power for countries and companies. These buildings entail immense architectural and engineering complexity, necessitating a comprehensive planning approach for their design and construction. With the availability of numerous alternative solutions for various aspects of building design and construction systems, there is a need for an evaluation framework that is comprehensive, transparent in decision-making, and reliable and practical in its application. The aim of the article is to create a framework for the evaluation of construction systems, building materials, construction technologies, and methods of high-rise buildings. The scope of the article is the 30 tallest buildings listed in CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat). After evaluating the effects caused by the elevation of buildings and the application options for these effects, examining the scope according to these application options and as a result creating matrices for each building constitutes the method of the study.</p>

## YÜKSEK KATLI BİNALAR İÇİN YAPIM TEKNOLOJİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI \*

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Yüksek Binalar Strüktür Sistemleri Yapım Teknolojileri Yapım Yöntemleri Yenilikçi Yaklaşımlar</p>	<p>Dünya genelinde farklı ülkelerde insan toplumlarının gelişimi dramatik bir şekilde artmaktadır. Sınırlı ve pahalı kentsel arazinin zorluklarına cevap olarak inşa edilen yüksek binalar kentselleşme için hayati öneme sahiptir. Yüksek binalar, şehirlerde ekonomik büyümeye hizmet etmenin yanı sıra, ülkeler ve şirketler için prestij ve gücün simgesi de olmaktadır. Bu binalar, kapsamlı bir planlama yaklaşımını gerektiren geniş bir mimari ve mühendislik karmaşıklığı içermektedir. Bina tasarımı ve inşaat sistemlerinin çeşitli yönleri için birçok alternatif çözüm bulunmasıyla birlikte, kapsamlı, karar vermede şeffaf ve uygulanması güvenilir ve pratik olan bir değerlendirme çerçevesine ihtiyaç vardır. Bu makalenin amacı, yüksek binaların yapım sistemleri, yapı malzemeleri, inşaat teknoloji ve yöntemlerinin değerlendirilmesine yönelik bir çerçeve oluşturmaktır. Makalenin kapsamı, CTBUH'da (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) listelenen en yüksek 30 binaadır. Binaların yükselmesi ile oluşan etkilerin ve bu etkilere yönelik uygulama seçeneklerinin değerlendirilmesinin ardından kapsamın bu uygulama seçeneklerine göre irdelenmesi ve sonuç olarak her bina için matrisler oluşturulması, çalışmanın yöntemini oluşturmaktadır.</p>

Review Article

Derleme Makale

Submission Date : 07.07.2023

Başvuru Tarihi : 07.07.2023

Accepted Date : 08.11.2023

Kabul Tarihi : 08.11.2023

\* This article was produced from the first author's master's thesis.

\*\* Corresponding author: [maral.fakhari@gmail.com](mailto:maral.fakhari@gmail.com)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1324093>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## Introduction

High-rise buildings stand out as the symbolic structures of all modern cities because of the prestige they represent and the strong emotional reactions they evoke. Although high-rise buildings have been built for religious purposes since ancient times, technologically, high-rise buildings are an invention of the late 19th century. With the developing technology after the Industrial Revolution, these and similar structures found the opportunity to develop vertically. "The first true tall building was the Home Insurance Building of 1885, the brainchild of architect William LeBaron Jenney who came up with the idea of using an internal steel skeleton to carry the structural loads of the building," (Noderer, 1952). This 11-story building has been recognized as the world's first skyscraper by the CTBUH (CTBUH-1, 2023) and some other sources (Domosh, 1987; Leslie, 2010; Preservation Chicago, 2006).

The practicability of high-rise buildings has been possible with a series of technological developments. The first of these is the progress in structural systems and building materials. In the economic conditions before the 1st World War, the use of stone, the traditional structural system, became widespread, and this, of course, was associated with problems. "As buildings rose higher, the thickness of stone walls at the base soon became untenable, a situation exemplified by Chicago's Monadnock Building of 1893, designed by Daniel Burnham and John Root" (Nagelberg, 1967). Another example is the Dakota Apartments, a residential complex built in New York's Upper West Side in 1884. While the thickness of the masonry perimeter walls on the ground floor of the nine-story building is 7.1 m, this thickness decreases to 4.1 m from the sixth floor (Landau and Condit, 1996). This has led to a significant reduction in the building's salable and leasable effective areas. With the Industrial Revolution and the two world wars that followed, the steel industry developed, and the use of steel and concrete as building materials opened the way for the construction of high-rise buildings.

However, the structural steel developments were insufficient for the development and feasibility of high-rise buildings. The period between 1885-1930 was the invention of elevator systems that accelerated the development of high-rise buildings. The elevator system was also another innovation in Home Insurance Building (Valente, 2012). Afterward, developments in hydrophore, fire safety, heating, ventilation, and air conditioning systems were also important factors, as well as the elevator. In the 1910s, higher buildings such as the Woolworth building (the highest building before World War I), which consisted of 55 stories of a reinforced concrete (RC) structure, symbolized the Gothic style with a height of 241 meters, and 18 years

later the Empire State Building with 102 stories, height 381 meters were built. In the early 1930s European Modernists became interested in the typology can change it forever. "Le Corbusier's Cartesian Skyscraper and Mies Van Der Rohe's glass skyscraper foreshadowed a movement in architecture that would last to this day" (Abel, 2003).

## Definition of the Problem

As the height rises with each new high-rise building, the effects of vertical loads (such as live loads and dead loads) and lateral loads (such as wind and earthquake) on the structure have increased at the same rate. Thus, innovative applications became necessary, both in the establishment of the ground-building relationship and in the design of the structure. These problems are significantly solved with innovative structural systems, and formwork systems which are used to construct tall buildings. determining how the world's highest buildings use these innovative applications and systems has formed the research motivation of the paper.

## Aim, Scope, and Method

This article aims to examine the relationships between building height and the use of innovative applications that respond to this need for elevation. Furthermore, the study has focused on the analysis of the structural systems, materials, and formwork methods employed in the world's 30 tallest buildings listed by CTBUH. The reasons for using the database in question, CTBUH;

- gives titles such as "World's Tallest Building" and refereeing building heights;
- organizes annual conferences and global awards programs on the subject;
- establishes academic collaborations for funded research projects;
- recognized as a global authority with extensive online resources and physical outputs (CTBUH-2, 2023).

After evaluating the effects caused by the elevation of buildings and the application options for these effects, examining the scope according to these application options and as a result creating matrices for each building constitutes the method of the study.

## 1. Definition of High-Rise Buildings

Looking at the history of American urban architecture at the turn of the twentieth century, it is seen that high-rise buildings emerged as a response to the rapidly increasing urban population (Brown, 2011). Today, many reasons, including the attempt to produce a concept of the skyline, a national credit or pride, and cultural identity, have made high-rise buildings an

inevitable feature of urban development, (Al-Kodmany, 2013).

Since the emergence of high-rise buildings, many definitions have been made in different parts of the world, depending on different social, environmental, cultural, and urban conditions, that can be taken into account in the designation of high-rise buildings. For example, the height and proportion of the building in comparison to the urban built environment around it are factors that can be taken into account in the determination of high-rise buildings (Figure 1). A building that is not particularly tall can be classified as a tall building if it has sufficient slenderness. Another consideration that can be taken into account in the determination is whether typical technical solutions for 'tall buildings' are used. (Partovi and Svard, 2016).

On the other hand, high-rise buildings are referred to as 'tower buildings' and 'skyscrapers' (Hasol, 2003). They are defined as "the building with a very high height compared to the floor area" (Hasol, 1993) and "the building whose height is at least 60.50 m at the lowest elevation visible from any of its facades according to the Zoning Regulation" (Hasol, 2017).

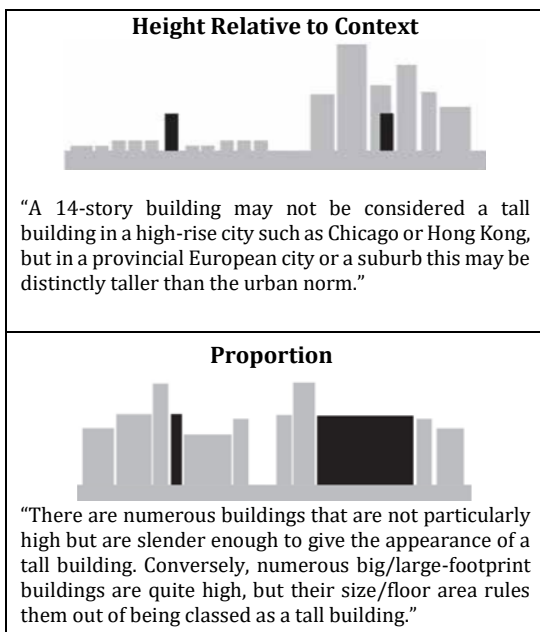


Figure 1: CTBUH Height Criteria for Measuring & Defining Tall Buildings (CTBUH-3), Source: CTBUH-3, 2023

According to (CTBUH-2021) a supertall building is defined as a building over 300 m, and a mega-tall building is defined as a building over 600 m. Another definition states that high-rise buildings are "buildings having many stories; sufficiently tall so that the use of an elevator is essential" (Harris, 2000:472). As can be seen,

different sources provide varying definitions of high-rise buildings based on criteria such as proportion, quantitative height, and/or number of floors.

From a global perspective, in terms of the countries with the highest number of high-rise buildings, as shown in Figure 2, three countries hold the record for the most high-rise constructions, accounting for approximately 77% of all high-rise buildings completed and under construction worldwide since 1980. China has the highest number of high-rise buildings in the world, accounting for 53%. Dubai, with iconic high-rise buildings like Burj Khalifa and Marina 101, ranks as the country with the second-highest number of skyscrapers, accounting for 14%. The United States is the third leading country, with 10% of the world's highest buildings (CTBUH-4, 2021).

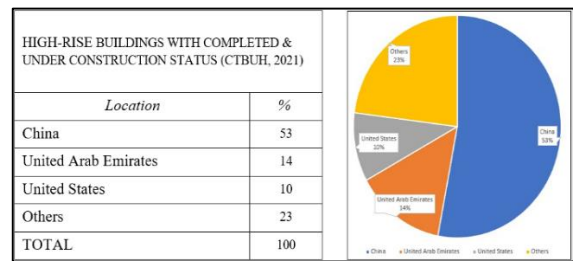


Figure 2: The rate of "the high-rise buildings with completed and under construction status" regarding location. Source: CTBUH-4, 2021

As shown in Figure 3 the average height of a high-rise building varies from year to year. According to the (CTBUH-5, 2021) the average height of the 20 highest buildings declined to 351 meters, down from 377 meters in 2019 (the highest figure recorded in 20 years). The average height of all buildings 200 meters and higher to complete in 2020 was 254 meters.

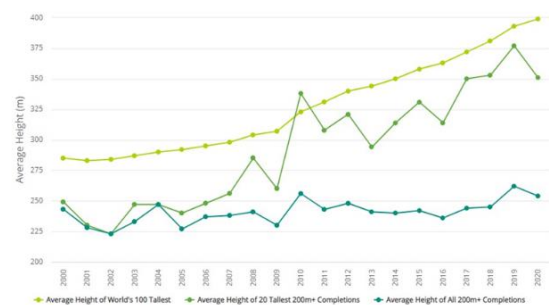


Figure 3: World's 100 Highest Average Building Height. Source: CTBUH-5, 2021

As a result, as the high-rise building race in the world continues, it is seen buildings that need more innovative solutions are designed and built with both increasing

height and different aesthetic concerns. Considering that the evolution of structural systems is a process that follows the rise of structures step by step, it is clear that there will be more elegant solutions in the future.

## 2. Structural Systems in High-Rise Buildings

The structural systems of high-rise buildings are determined based on the vertical and lateral loads they experience. As the height of a building increases, various factors contribute to the overall weight, including the building's structural components, architectural elements such as walls, finishing works, technical equipment, exterior systems, and more. These factors collectively contribute to the vertical loads, commonly referred to as dead loads. Additionally, as the building's usage area expands, there will be an increase in the number of occupants and movable items such as furniture, which are considered live loads.

Furthermore, high-rise buildings are subjected to lateral loads such as earthquakes and wind forces, which also escalate with the building's height. Designing high-rise structures typically involves intricate calculations and computer simulations to ensure that the building can safely withstand all anticipated vertical and horizontal loads. These analyses are essential to guarantee the structural integrity and safety of the building under various loading conditions.

### 2.1. Vertical Loads on the Structure of High-Rise Buildings

It is evident that a high-rise building is subjected to a wide range of different loads, both external and internal, which can be static or dynamic in nature. In this simple classification, the direction of the loads is taken into account, as previously mentioned.

"The weight of the building itself, along with the weight of the occupant, furniture, and equipment inside the building," are typically distributed through the columns and beams of the structure, and ultimately transferred to the foundation (Garrison, 2005). Beams are designed to withstand bending stress. Columns are designed to withstand the compressive forces resulting from the building's weight and also shear forces resulting from the lateral loads such as earthquake and wind effects, while the foundation is constructed to safely distribute these forces into the ground.

The distribution of vertical loads through the columns and beams of a high-rise building is accomplished through a specifically designed structural system. This system typically comprises a network of columns, beams, and slabs that collaborate to support the building's weight and distribute it to the foundation.

The columns, which transfer the load from the beams to the foundation, are vertical elements typically made of RC or steel. They are utilized to resist compressive forces (Nakipoğlu et al, 2022). The size and spacing of the columns are determined by various factors, including the building's height, the structure's weight, and the expected loads.

Horizontal elements are known as beams span between the columns and provide support for the slabs. Similar to columns, beams are also constructed from RC or steel and designed to resist bending and shear forces. The size and spacing of the beams depend on factors such as the distance between columns and the anticipated loadings they will carry (Nakipoğlu et al, 2022).

Slabs, on the other hand, are the horizontal elements constituting the building's floors. Typically made of RC, slabs are supported by beams. The size and thickness of the slabs are determined by factors including the span between beams and the anticipated loadings they will bear (Abdulwahid et al, 2013). Through the collective efforts of columns, beams, and slabs, a high-rise building forms a load-bearing system capable of supporting the structure's weight and distributing it to the foundation. This meticulously designed system ensures the long-term safety and stability of the structure.

### 2.2. Lateral Loads on the Structure of High-Rise Buildings

A high-rise building is threatened by lateral loads specifically due to its height. These lateral forces are the load-bearing forces caused by elements such as wind, earthquakes, live loads on the building or the equipment carried by the building, and ground movements due to various geological effects.

Wind load is the most intense and unpredictable lateral load that has a great impact on high-rise buildings. As the height of the building increases, the wind load also increases. Wind load can be divided into both static and dynamic loading depending on the period. "Static wind effect primarily causes elastic bending and twisting of structure. Dynamic wind effect for a high, long span and slender structures requires a 'dynamic analysis' of the structure" (Mendis et al., 2007).

A building is a barrier against the wind. When a building is exposed to wind gusts, wind currents run parallel to the center on either side of the building, which is called a vortex shedding, this is especially true in high-rise buildings (Figure 4). The reason for this effect is that the high-velocity wind spreads to both sides simultaneously. Vortex shedding, causes alternating whirling air folds to form at a certain frequency (Krishnappa et al, 2022). This stimulates the structure and creates periodic lateral forces that cause vibration.

These vibrations can be harmful if they coincide with the natural frequency of the building and eventually cause the building to get tired.

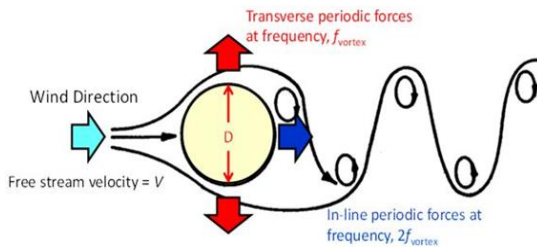


Figure 4: Vortex Shedding Phenomenon on High-rise Buildings. Source: MECA, 2023

Earthquakes, another lateral force, are also one of the most dangerous and unexpected loads that cause a lot of damage to structures in various ways. The ground plates are constantly moving, the pressure increases as these plates continue to move. When the pressure reaches a critical threshold, it releases energy in the form of seismic waves, and an earthquake occurs. The duration of ground movements is usually a few seconds or even minutes for large earthquakes. Earthquakes are measured in terms of acceleration in both directions.

### 3. Precautions Against Lateral Loads

Recently, new ideas and designs have been proposed to design earthquake reinforcement to improve structural behavior during ground motion and replace traditional designs. One suitable method is to use various techniques to control structural vibrations (Chikmath et al, 2022). Energy attenuating systems, different types of dampers as well as base isolation devices can be used for such purposes to prevent buildings from possible damage by reducing the structural response during earthquakes (Naderpour, et al., 2019). Apart from these, there are ground improvements, deep foundation systems, structural monitoring of lateral movements in buildings, innovative arrangements in building elements such as core and columns, and innovations in building materials. Within the scope of the study, building materials, structure systems and formwork technologies used in the creation of these structural systems will be discussed.

#### 3.1. Materials Used in High-Rise Buildings

High-rise buildings can utilize different materials in their structural systems, including reinforced concrete (RC), steel, and composite materials that combine the two. However, there are limitations to using wood as a material for tall buildings due to factors such as cost,

structural strength, and especially fire safety. Examples of wooden high structures include Mjøstårnet in Brumunddal, Norway, Limberlost Place in Toronto, Canada, 503 on Tenth in Portland, USA, and Treet buildings, but their heights are relatively limited.

Several designs for taller buildings, such as the W350 Tower in Tokyo, Japan with 70 floors and 350 m height, Oakwood Tower in London, England with 80 floors and 300 m height, and River Beach Tower in Chicago, USA with 80 floors and 228 m height, have remained at the concept stage.

In the 1960-1970s, steel was commonly used in high-rise buildings, but since the 1970s, the use of RC has increased due to its high strength and performance compared to steel. In recent years, composite structures have gained popularity due to their combination of the axial loads of concrete and the high resistance of steel against horizontal loads. According to the CTBUH database, 7 of the world's 100 tallest buildings have all-steel structures, with the newest being 30 Hudson Yards in New York, USA, completed in 2019. This indicates that steel is not widely preferred in high-rise buildings beyond a certain threshold due to structural and economic considerations.

Concrete, although it has high compressive strength, has low tensile stress capacity. To address this weakness, steel reinforcements are added to concrete, resulting in the emergence of RC as a building material. In the CTBUH database, 27 out of the world's 100 tallest buildings are constructed entirely with concrete, with the newest being the Central Park Tower, a 98-floor building with a height of 472.4 m, completed in 2020. This building is currently the tallest all-concrete building globally, ranked 13th among the top 100. Most of the other all-concrete buildings (excluding the Central Plaza in Hong Kong built in 1992) were constructed after 2008.

Composite structures have gained popularity as innovative structural systems because RC consumes less usable floor area compared to steel. The combination of concrete's axial load capacity and steel's resistance to horizontal loads has led to the increased use of composite elements in buildings. The prevalence of composite structures has been observed in North America, Japan, and Europe since the late 19th century. In the CTBUH database, 63 out of the world's 100 tallest buildings and 12 of the highest buildings have composite structures, indicating that composite solutions are a more suitable option for the growing trend of tall buildings.

### 3.2. Structural System Types of High-Rise Buildings

In the early 20th century, the primary focus of structural systems in buildings was on withstanding vertical loads. However, in the 1960s, significant changes were made to the structural systems of high-rise buildings, leading to the adoption of more suitable systems beyond the widely used "rigid frame system" for large steel or concrete buildings. Advancements in materials research, aiming to discover materials with high strength and low density, have made it possible to increase the height of buildings while reducing their weight. However, as mentioned earlier, horizontal loads caused by wind and earthquakes pose significant challenges. Therefore, particularly in high-rise buildings, new structural systems are designed to account for not only vertical loads (such as fixed loads and live loads) but also lateral loads resulting from wind forces and seismic waves. Starting from the 1960s, research on classifying height-based load-bearing systems began, and as a result, the load-bearing systems of high-rise buildings were categorized into two groups: exterior and interior structures. This classification was established by Falconer in 1981;

#### 3.2.1. Interior Structures

The systems in the interior structure group are;

- rigid frame system,
- braced hinged frame,
- shear wall hinged frame,
- staggered truss,
- shear wall (shear truss) - frame interaction,
- core outrigger,
- buttressed core.

The 'rigid frame system', also known as the 'moment-bearing frame system', is a structural system used in steel or RC-constructed high-rise buildings consisting of linear elements such as beams and columns, connected to each other by nodal points based on moments.

The 'braced hinged frame', usually works by combining two structural systems, one main and one subsidiary. The goal is for buildings to show the lowest slope among other domains against lateral loads. This system consists of 'steel shear trusses' in addition to 'steel hinged frames' that are constructed in a single diagonal, cross bracing, k bracing, and v bracing.

The 'shear wall hinged frame', is used in RC buildings and is an interconnected shear wall. The interconnections of the elements of this system provide stiffness beyond the overall strength of the shear walls. This system is used for buildings within 10 -80 stories or even higher buildings. The remarkable point of this system is the location of the shear wall to carry the

horizontal load and limit the horizontal displacement. Therefore, the location of the shear wall in the design is very important to choose correctly.

The 'staggered truss' system, is a type of structural steel frame used in high-rise buildings. The system consists of a series of high trusses arranged in steps on adjacent column lines, covering the overall width between two rows of outer columns, and can be built up to 40 stories.

The 'shear wall (shear truss) - frame interaction', consists of two groups (braced rigid frame) and (shear wall rigid frame). this system can provide the necessary lateral strength in terms of bending mode, and a more efficient console, and the internal core can be designed for gravity loads. Shear walls and truss structures can provide stiffness of up to 40 stories and allow for larger openings.

The 'core outrigger' system, consists of a central core with outriggers, connecting the core to the outer columns. The central core contains either braced frames or shear walls. The outrigger system considering the advent of mega-columns for exceptionally high-rise buildings in the perimeter structure can be built up to 150 stories.

The 'buttressed core' system, has a different plan (applied with a Y-shaped or triangular plan with three wings with a central core), the design of which uses conventional materials and structural techniques with a significant increase in height. It is a system with an inherently stable form in which each wing is supported by two other wings that together create shear strength and increased moment of inertia. The core also provides the torsional strength of the building. This system can provide a height of over 1000 meters (200 stories).

#### 3.2.2. Exterior Structures

External structure subsets are;

- framed tube,
- braced tube,
- bundled tube,
- tube-in-tube,
- diagrid,
- space truss,
- superframe.

The 'framed tube', is an economical solution for high-rise buildings. In this system, the peripheral parts of the building are allocated for the installation of columns at very close distances, which are connected to each other by thick beams. This system consists of rigid frames, but the difference between this system and rigid frames is due to the following features: The columns are very close to each other and contain rigid vertical elements

(beam + slab), which work exactly like a tube and appropriate for buildings having 40-100 stories.

The 'braced tube' system, is designed to increase the user capacity in high-rise buildings and to locate a large distance between columns. Therefore, the number of columns is reduced, which is economically desirable. The braced tube system is obtained by adding diagonal elements that often intersect at the corner columns of the tube structure. With this reinforced system, higher buildings with 100-170 stories can be built (Ali and Moon, 2018).

New construction systems are constantly being developed to achieve a higher level and minimize the "slip delay" phenomenon. One of the systems is the 'bundled tube' system. The stated structural system is created by grouping two or more independent interconnected tubes to obtain a single multicellular tube. A bundled tube system is built to effectively resist any external force, whether from the braced tube or frame tube in general, and is appropriate for buildings within about 110 stories. One of the most famous examples of buildings using this system is the Willis Tower (formerly Sears Tower) (Figure 5).

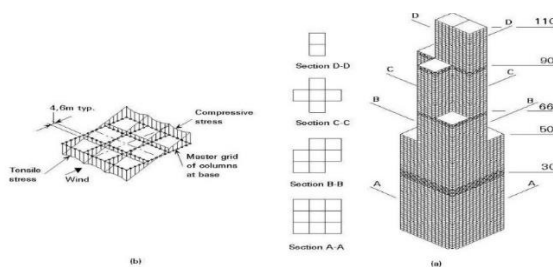


Figure 5: Willis Tower. (a) Shear Leg Behaviour. (b) Modular Floor Configuration. Source: Marabi, 2016.

The 'tube-in-tube' system, also known as "hull and core", consists of a core tube inside the structure which holds services such as utilities and lifts, as well as the usual tube system on the exterior which takes the majority of the gravity and lateral loads. The inner and outer tubes interact horizontally as the shear and flexural components of a wall-frame structure" (Sreevalli, et al., 2017). This system can be constructed 90-150 per different tube.

One of the structures that has recently emerged as a new solution for high-rise buildings that combines structural strength, decorative features, and morphological adaptability is called 'diagrid structures'. This system can be built in these two groups; (1) 'uniform-angle diagrid' (steel, concrete, and composite types are used)

can be constructed up to 80-110 stories; (2) 'varying-angle diagrid' (steel or composite) can be used up to 130 stories.

The 'space truss', emerged in search of light, fast, and industrial solutions in high-rise building technologies. This system ensures that large openings in buildings are executed with a column-free and lightweight structure, making the structures more flexible and efficient in terms of performance. Up to 150 stories are mostly constructed with composite.

The 'super frame', also known as 'mega frame', is categorized into the stand-alone super frame and super framed conjoined tower structure which is a conceptual expansion and modification of the stand-alone superframe. Conjoined supertall towers are a relatively new architectural phenomenon. With this system, height can be increased very efficiently up to about 250 stories.

### 3.3. Innovative formwork systems used in the construction of tall buildings

In order to have a precise perception of how tall structures are constructed it is needed to look at the processes and techniques. Modern formwork systems are widely used in the construction of tall buildings which offer unique advantages and characteristics. Here are some of the commonly used formwork systems briefly introduced: slip form construction, jump form construction, climbing formwork construction, table form/ flying form construction, column system formwork construction, and tunnel form construction.

In recent years, 'slip form construction' has been very popular, especially for high-rise buildings with more than 10 stories. However, for low-rise buildings, this method is not economically viable. "Basically, this method involves the continuous placing of concrete in a shallow mold having the same plan as the building to be constructed. This rigid mold, or 'slip form' as it is called, forms the working deck which is jacked slowly upwards at a controlled rate until the required elevation is reached" (Tiwary, 2017). Sliding form construction is used in three forms; vertical slip form, horizontal slip form, and tapered slip forming.

'Jump form construction' is one of the methods of structure cores (elevators, stairs, etc.) for high-rise buildings. The structure of the formwork is cast in a set of vertical sections called 'lifts'. Typically, this type of formwork is built of steel members and concrete form panels are attached to this frame. After sufficient strength of the concrete, the formwork is moved back and then jumped to a higher level. The jump form is generally used in three forms; normal jump/climbing

form, guided-climbing jump form, and self-climbing jump form.

‘Climbing form’ construction is a formwork system used in the construction of vertically RC elements that allow construction to proceed without interruption. This formwork can be anchored to the structure at the desired height and move vertically and horizontally for each concreting unit. The size of the mold should be equal to the height of the floor, otherwise, it will not be economical and practical. Types of climbing form are as follows; climbing formwork (crane-climbing), climbing formwork (self-climbing), and gliding formwork.

“A table form/flying form is a large preassembled formwork and falsework unit, often forming a complete bay of suspended floor slab. It offers mobility and quick installation for construction projects with regular plan layouts or long repetitive structures” (Rupasinghe, et al., 2007). This system is designed for high-rise structures and heavy loads. The system includes the main frame, diagonal members, jacks, and accessories that connect them. The mainframes, which are the basic elements of the system, can be manufactured in different sizes.

The ‘Column system formwork’ system has a modular nature. An important criterion for the cost-effectiveness of the column system formwork system is the quick and easy adjustment of the cross-section and height with the least effort and the least possible number of system components. In addition, columns with the same cross-section are often constructed in series and large numbers so that the systems can be quickly moved to the next use without any assembly effort.

The ‘Tunnel form’ system is used as a modern innovation to create repetitive cellular structures. This is a steel formwork that is used during the placing of the concrete to form the floor and the wall at the same time. They can be in different shapes, sizes, and modules. The formwork system is supported by hot air blowers which accelerate the setting of the concrete. This system becomes more economical for symmetric construction like mass housing projects and contains a huge quantum of symmetrical work.

**4. Results and Findings**

The analysis of the structural evolution of high-rise buildings worldwide was conducted using the synthesis method. For this analysis, a selection was made of the 30 highest buildings constructed within the last 15 years. These buildings were thoroughly examined, taking into account factors such as the structural materials employed, the type of structural system implemented, and the formwork technologies utilized in their construction. To ensure a comprehensive evaluation, each of the 30 high-rise buildings in the sample

underwent a detailed analysis. The data obtained from this analysis were meticulously collected and organized into evaluation tables specific to each building. These evaluation tables served as valuable references for studying and comparing the structural characteristics and advancements exhibited by each high-rise building within the sample.

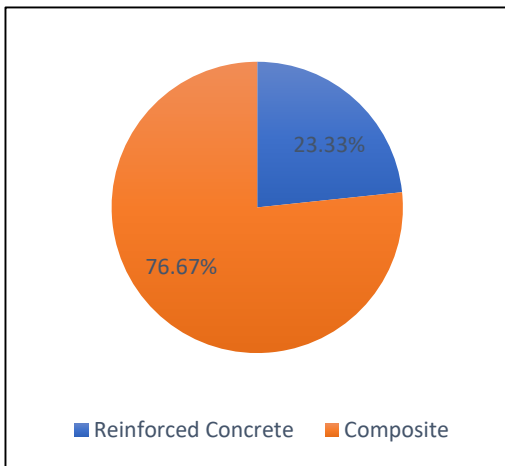
1. Jeddah Tower	
Building Information	Location: Jeddah, Saudi Arabia
	Height: 1.007 metres (3.281 ft)
	Floors: 168
	Architect: Adrian D. Smith, Adrian S + Gordon Gill Architecture
	Completed date: unknown
	Function: Residential/Serviced apartments
Structural System	Material: Concrete
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reinforced concrete tube</li> <li>➤ Double-layered wing-walls</li> </ul>
Construction Techniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Climbing formwork</li> </ul>

Figure 6: One example of the tables for each of the 30 tall structures.

Figure 6 provides an example of the evaluation tables used for analyzing the structural materials, systems, and construction techniques of the selected high-rise buildings. These tables are organized according to separate categories such as function, location, construction date, formwork systems (which play a crucial role in high-rise construction), structural systems, and building materials. Through this comprehensive examination, a comparative analysis was conducted to assess the similarities and differences among the high-rise buildings. Table 1, presents the final matrix that summarizes the results of the evaluation tables. This matrix encompasses materials inspection, structural inspection, and formwork technology inspection. The table, Specifically, highlights the usage of reinforced concrete (RC) in 7 out of 30 surveyed buildings, accounting for 23.33% of the sample. (Figure 7) The primary reasons for this choice include the ease of procurement, minimal need for specialized detailing, and lower cost associated with RC. On the other hand, composite materials, such as steel over concrete and concrete-steel composite, were observed in 23 buildings







Reinforced Concrete	7
Composite	23

Figure 7: The rate of construction materials of the 30 sample buildings.

The analysis of the selected high-rise buildings revealed that the average height of buildings constructed with reinforced concrete (RC) structures is 500.14 m, while buildings with composite structures have an average height of 473.65 m. These findings indicate that there is no significant difference in the average height between buildings constructed with these two building materials, as shown in Table 1.

Out of the 30 buildings in the sample, 23 were built with interior structures, while 7 were constructed with exterior structures. The prevalence of interior structures is attributed to their ease and cost-effectiveness compared to exterior structures, despite the aesthetic and similar benefits offered by the latter, as illustrated in Figure 8.

Regarding the structural systems used in the buildings, Figure 8 demonstrates that the outrigger system was employed in 17 buildings (56.67%), the shear wall frame system in 4 buildings (13.33%), the bundled system in 2 buildings (2.7%), the diagrid system in 2 other buildings (6.67%), the trussed tube system in 2 buildings (2.7%), the buttressed core system in 1 building (1.3%), and the mega form tube system in 1 building (1.3%). It is noteworthy that all of the sample buildings incorporate a core system.

Furthermore, as part of the study, another assessment focused on building materials has been conducted. The evaluation revealed a consistent preference for reinforced concrete (RC) structures across all 7 buildings. Notably, the analysis of Table 1 highlights the

utilization of various interior structure types in these buildings (Figure 9).

Interior Structure	Outriggered frame	17	23
	Buttressed core	1	
	Core + dynamic form	1	
	Shear walled frame	4	
Exterior Structure	Trussed tube	2	7
	Bundled frame tube	2	
	Mega frame tube	1	
	Diagrid frame tube	2	

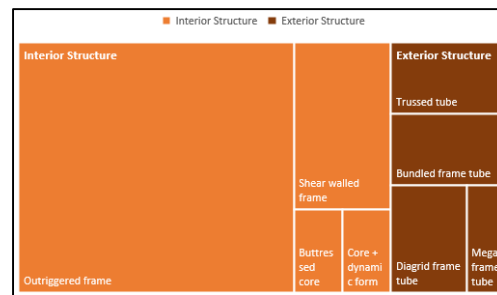
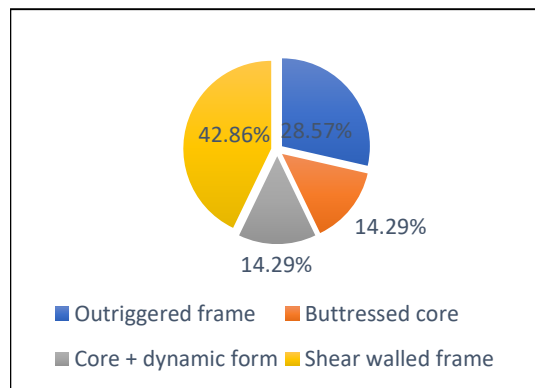


Figure 8: The rate of “the high-rise buildings with completed and under construction status” regarding structural systems of the 30 sample buildings.



Outriggered frame	2
Buttressed core	1
Core + dynamic form	1
Shear walled frame	3

Figure 9: Types of interior structures used in RC buildings.

Based on the analysis, among the 23 buildings constructed with composite structures, 16 were designed as interior structures while 7 were designated as exterior structures. This indicates a prevalent use of composite structures for interior configurations. Additionally, it was noted that all exterior structures in the sampled buildings were constructed using

composite materials, as illustrated in Table 1 and (Figure 10).

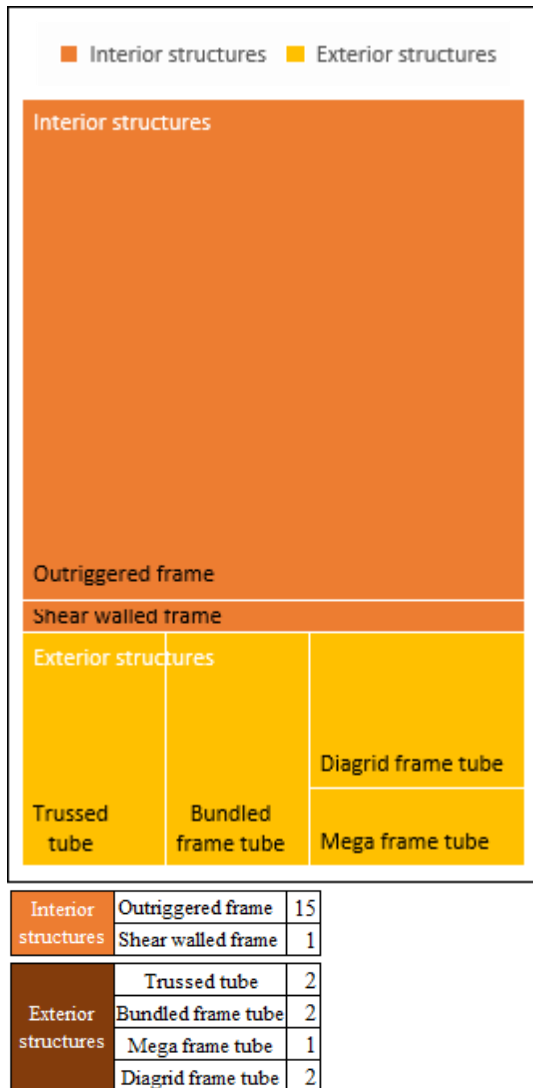
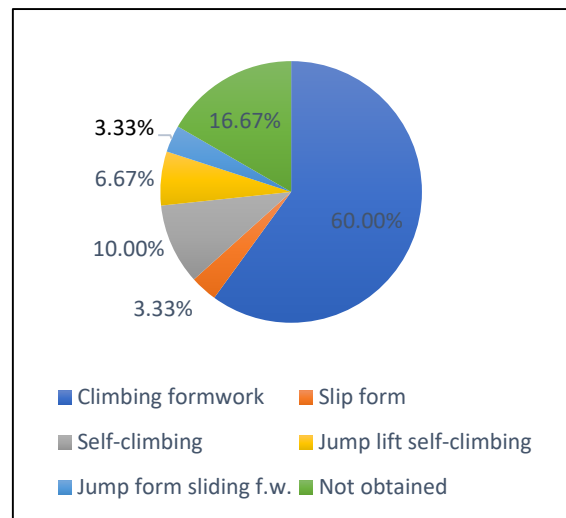


Figure 10: Types of interior and exterior structures used in composite buildings.

In accordance with the findings of this study (as illustrated in Figure 11), it was determined that among the examined examples, climbing formwork was employed in the construction of 18 buildings, accounting for 60.00% of the total. Moreover, the slip form technique was utilized in one building (3.33%), self-climbing formwork was employed in three buildings (10.00%), jump lift self-climbing formwork was used in two buildings (6.67%), and jump form sliding formwork technique was utilized in one building (3.33%). Unfortunately, the specific formwork types used in the remaining 5 buildings could not be obtained for this study.

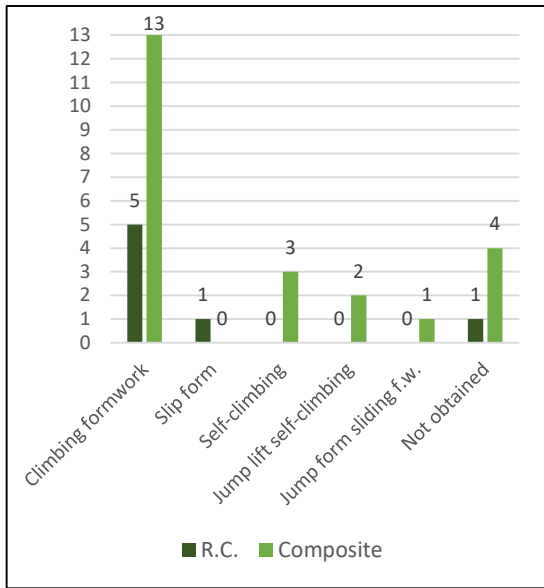


Climbing formwork	18
Slip form	1
Self-climbing	3
Jump lift self-climbing	2
Jump form sliding f.w.	1
Not obtained	5

Figure 11: The rate of formwork type of the 30 sample buildings.

The assessment of formwork technologies utilized in the examined examples unveiled the application of five distinct methods, as outlined in Table 1. Among these methods, climbing formwork emerged as the most prevalent, employed in 18 buildings (60.00%) (Figure 11). The widespread use of climbing formwork can be attributed to the numerous advantages it offers, including heightened productivity, time and cost efficiency, enhanced safety measures, versatility, improved concrete quality, flexibility, adaptability, and improved construction planning.

Self-climbing formwork was employed in 3 buildings (10.00%). This formwork technology, although relatively newer compared to climbing formwork, is gaining popularity due to its capacity to minimize labor needs, enhance safety, and accelerate construction timelines. Alongside these two technologies, jump lift self-climbing formwork was utilized in 2 buildings (6.67%), while slip form and jump form sliding formwork were each used in 2 buildings (Figure 11).



	Interior structure	Exterior structure	Total
Climbing formwork	16	2	18
Slip form	1	0	1
Self-climbing	2	1	3
Jump lift self-climbing	1	1	2
Jump form sliding f.w.	0	1	1
Not obtained	3	2	5
Total	23	7	30

Figure 12: Comparison of building material and formwork type

During the analysis of the correlation between structural materials and formwork technologies, it was noted that climbing formwork was extensively utilized in both reinforced concrete (RC) and composite structure buildings. Out of the 7 buildings with RC structures, climbing formwork was employed in 5 buildings (71.42%), while slip-form technology was utilized in one building. Unfortunately, data regarding the formwork technology of one RC building could not be obtained (Figure 12).

Regarding the composite structure buildings, climbing formwork was employed in 13 buildings (56.52%) out of the 23 analyzed. In addition, self-climbing technology was used in 3 buildings (13.04%), jump lift self-climbing in 2 buildings (8.69%), and jump from sliding formwork in 1 building (4.35%). Information on the formwork

technology of 4 composite buildings could not be obtained (Figure 12).

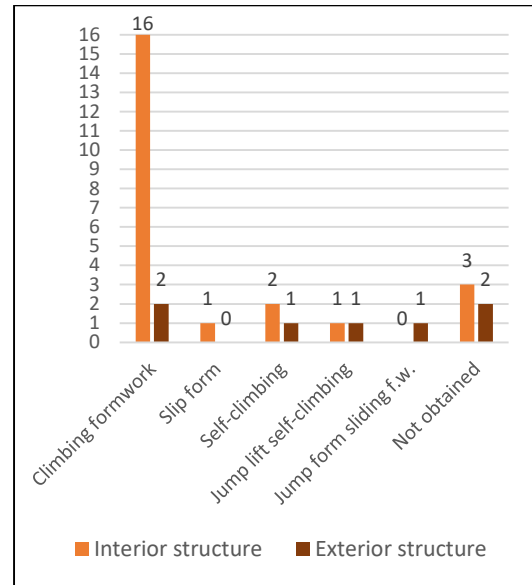


Figure 13: Comparison of structure type and formwork type

In the analysis of formwork technologies used in interior and exterior structures, it was found that climbing formwork was predominantly employed in both types of structures. Among the 23 interior structure buildings in the sample, climbing formwork was used in 16 buildings (69.56%). This indicates that factors such as easy manufacturing and the cost-effectiveness of climbing formwork play a significant role in its selection. Furthermore, self-climbing technology was used in 2 interior structure buildings, slip-form technology was used in 1 building, and jump lift self-climbing technology was used in 1 building. Data on the formwork technology of 3 buildings with interior structures could not be obtained (Figure 13). In buildings with exterior structures, climbing formwork was also the most frequently used method, with 2 buildings (28.57%) employing this technology. Additionally, self-climbing technology was used in 1 building, jump lift self-climbing technology in 1 building, and slip form technology in 1 building. Information on the formwork technology used in 2 buildings with exterior structures could not be obtained (Figure 13).

	Outriggered frame	Buttressed core	Core + dynamic form	Shear walled frame	Interior Total	Trussed tube	Bundled frame tube	Mega frame tube	Diagrid frame tube	Exterior Total	TOTAL
Climbing formwork	12	0	0	4	16	0	1	1	0	2	18
Slip form	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Self-climbing	2	0	0	0	2	1	0	0	0	1	3
Jump lift self-climbing	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2
Jump form sliding f.w.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Not obtained	2	0	1	0	3	0	0	0	2	2	5
<b>TOTAL</b>	<b>17</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>23</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>30</b>

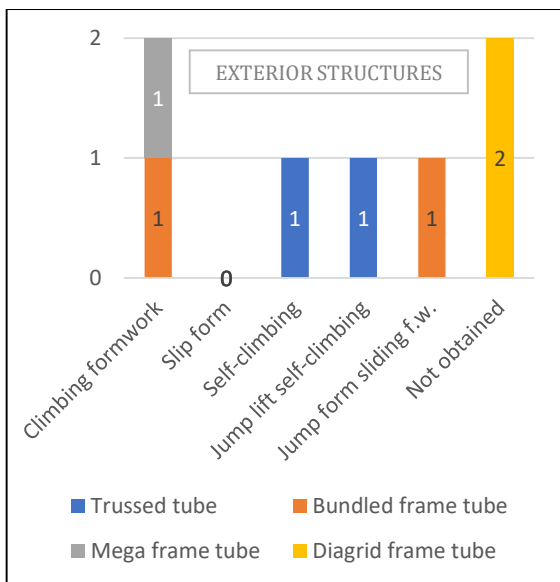
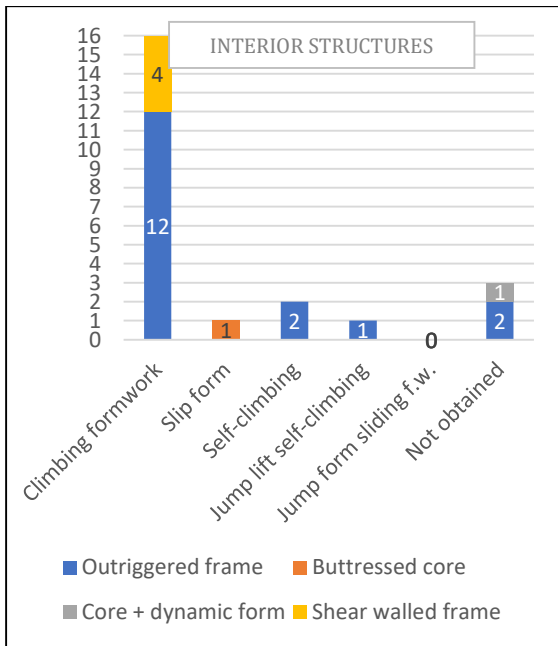


Figure 14: Comparison of structure types and formwork type

In the analysis of formwork types employed in different structure types, it was observed that climbing formwork is predominantly utilized in buildings with internal structures. Among the internal structure types, climbing

formwork was employed in 12 outriggered frame buildings and 4 shear-walled frame buildings (refer to Figure 14). Notably, outriggered frame buildings exhibited a greater diversity of formwork technology types compared to other interior structure types. Out of the 5 formwork types used in the sample, 3 were implemented in outriggered frame buildings, while the remaining 3 structure types each preferred a single formwork technology (Figure 14).

In contrast, there was no significant concentration of formwork types observed in the subtypes of external structures. Climbing formwork was used once in bundled frame tube and mega frame tube structures. Trussed tube buildings, on the other hand, showed a preference for 1 self-climbing technology and 1 jump lift self-climbing technology (Figure 14). Although the number of exterior structure buildings is smaller than that of interior structures, the dispersed use of formwork types in the exterior structure category suggests that more specialized solutions are employed to address the unique nature of these structures.

### 5. Evaluation and Conclusion

As the population in cities grows, so does the demand for high-rise buildings. Looking at the continuous process of high-rise construction globally, it is evident that large cities compete on the world stage to claim the title of having the tallest building, symbolizing their power, prestige, and global standing in the growing economy.

The primary challenge in designing structural systems for high-rise buildings is addressing the displacement caused by lateral loads. As the height of the building increases, lateral displacements also increase proportionally. Consequently, the options for choosing structural systems decrease with increasing altitude. However, advancements in materials and technology have made it possible to increase building height by reducing the weight of the structure.

A new approach involves employing a hybrid structural system, which combines two or more systems that mutually reinforce each other. This enhances the rigidity of the new structural system while minimizing issues such as deformation due to lateral displacement, which can lead to damage, structural errors, and uncomfortable conditions for occupants.

Upon evaluating the 30 tallest buildings selected as a sample from the CTBUH database, which were constructed over the last 15-year period, the following findings were obtained regarding their structural materials, structure types, core types, and formwork technologies:

- Despite the increase in building height, the use of interior structure is predominant.
- However, the need for elevation is met by the increased use of composite, a relatively new structural material.
- In the context of being a combination of these two factors, outrigger frame buildings are mostly preferred.
- Among the reviewed buildings, the use of a central core is the only option in terms of stiffness.
- Although there are newer technologies, climbing formwork technology is still mostly preferred in high-rise buildings.

Innovative approaches extracted from technology have led to the development of building systems and structural processes. These rapidly changing systems directly affect the design and construction process and have led to optimizations in the construction industry.

## References

- Abel, Chris. (2003). *Sky High*. Royal Academy Publications; Illustrated edition. ISBN-13 : 978-1903973332
- Abdulwahid, Mohanad Y.; Al-Qasem, Imad A.; Arman, Ibrahim. (2013). *Determination of Load Transfer In Reinforced Concrete Solid Slabs By Finite Element Computer Analysis*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 8, Issue 3 (Sep. - Oct. 2013), pp 01-07.
- Al-Kodmany, Kheir. (2013). *The Visual Integration of Tall Buildings: New Technologies and the City Skyline*. Journal of Urban Technology. Volume 20, Issue 2, pp. 25-44. <https://doi.org/10.1080/10630732.2012.735481>.
- Ali, Mir M. and Moon, Kyoung Sun. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*. Architectural Science Review. Volume 50.3, pp 205-223.
- Ali, Mir M. and Moon, Kyoung Sun. (2018). *Advances in Structural Systems for Tall Buildings: Emerging Developments for Contemporary Urban Giants*. Buildings 8(8):104. DOI:10.3390/buildings8080104
- Brown, Adrienne R. (2011). *Between the Mythic and the Monstrous: The Early Skyscraper's Weird Frontiers*. Journal of Modern Literature, Vol. 35, No. 1, Re-assessing, Breaking, Transcending Genres (Fall 2011), pp. 165-188. <https://doi.org/10.2979/jmodelite.35.1.165>.
- Chikmath, Channabasaveshwar; Sodha, Ankit; Vasanwala, Sandip. (2022). *Direct Displacement Based Design for Reinforced Concrete Framed Structures with Seismic Isolation*. GU J Sci 35(2): 446-462 (2022) DOI: 10.35378/gujs.826607.
- CTBUH-1. (2023). *History of Measuring Tall Buildings*. <https://www.ctbuh.org/history/history-of-measuring-tall-buildings>. (Accessed at 02.06.2023)
- CTBUH-2. (2023). *About CTBUH*. <https://www.ctbuh.org/about>. (Accessed at 02.06.2023)
- CTBUH-3. (2023). *CTBUH Height Criteria for Measuring & Defining Tall Buildings*. [https://cloud.ctbuh.org/CTBUH\\_HeightCriteria.pdf](https://cloud.ctbuh.org/CTBUH_HeightCriteria.pdf). (Accessed at 02.06.2023)
- CTBUH-4. (2021). *Countries*. <https://www.skyscrapercenter.com/countries>. (Accessed at 01.01.2021)
- CTBUH-5. (2021). *Tallest Buildings*. <https://www.skyscrapercenter.com/buildings> (Accessed at 01.01.2021)
- Domosh, Mona. (1987). *Imagining New York's first skyscrapers, 1875-1910*. Journal of Historical Geography. Volume 13, Issue 3, July 1987, Pages 233-248. [https://doi.org/10.1016/S0305-7488\(87\)80112-3](https://doi.org/10.1016/S0305-7488(87)80112-3).
- Falconer, Daniel W. (1981). *Classification of Tall Building Systems*. MSc. Thesis. Lehigh University Civil Engineering. Lehigh University. May 1981.
- Garrison, Phillip. (2005). *Basic Structures for Engineers and Architects*. Blackwell Publishing Ltd., , Carlton, Victoria, Australia. ISBN-13 978-14051-2053-1.
- Hasol, Doğan. (1993). *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*. Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları. İstanbul, 1993. Geliştirilmiş 5. Baskı.
- Hasol, Doğan. (2003). *Dictionary of Architecture and Building*. Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları. İstanbul, 2017.
- Hasol, Doğan. (2017). *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*. Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları. İstanbul, 2017. Geliştirilmiş 15. Baskı.
- Harris, Cyril M. (2000). *Dictionary of Architecture & Construction*. McGraw-Hill. New York.

- Krishnappa, Likith; Sander, Aljoscha; Thoben, Klaus-Dieter. (2022). *Aerodynamic Devices to Reduce/Suppress Vortex Induced Vibrations on a Wind Turbine Tower: A Review*. Journal of Physics: Conference Series 2265 (2022) 032053. IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/2265/3/032053.
- Landau, Sarah and Condit, Carl W. (1996). *Rise of the New York skyscraper, 1865-1913*. New Haven, CT: Yale University Press. ISBN 978-0-300-07739-1.
- Leslie, Thomas. (2010). *Built Like Bridges: Iron, Steel, and Rivets in the Nineteenth-century Skyscraper*. Journal of the Society of Architectural Historians, Vol. 69, No. 2 (June 2010), pp. 234-261. <https://doi.org/10.1525/jsah.2010.69.2.234>.
- Naderpour, Hosein; Naji, Naghmeh; Burkacki, Daniel; Jankowski, Robert. (2019). *Seismic Response of High-Rise Buildings Equipped with Base Isolation and Non-Traditional Tuned Mass Dampers*. Applied Sciences. 2019, 9(6), 1201; <https://doi.org/10.3390/app9061201>
- Nagelberg, Alvin. (1967). *Monadnock Building Found To Be Sinking*. Chicago Tribune, 71. June 14 1967.
- Nakipoğlu, Abdulhamit; Al Hagri, Mohammad Gamal; Döndüren, Mahmud Sami. (2022). *Effect of Column Cross Section and Concrete Compressive Strength On the Resistance of RC Columns Subjected to Axial Loads and Loads Created By Creep*. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2022; 11(4), 999-1005.
- Noderer, Elvadore R. (1952). *US Industrial Might Rooted In Engineering*. Chicago Tribune, 45. 12 August 1952.
- Marabi, Bahram. (2016). *A Numerical and Analytical Study On Optimization And Efficiency of Structural Forms By Two-Outrigger In Tall Buildings*. Conference: SEPKA-ISEED 2016At: University Technology of Malaysia Volume: Vol 28 Special Issue 3.
- MECA, 2023. *Take Vortex Shedding Seriously*. <https://www.mecaenterprises.com/take-vortex-shedding-seriously/>. (Accessed at 02.06.2023)
- Mendis, Priyan; Ngo, Tuan Duc; Haritos, N.; Hira, Anil; Samali, Bijan; Cheung, John. (2007). *Wind Loading on Tall Buildings*. Loading on Structures (EJSE Special Issu), 44.
- Özden, A. Varlık. (2010). *Betonun Basınç Ve Çekme Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler*
- Üzerine Bir Araştırma*. MSc. Thesis. T.C. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Partovi, Arezo and Svard, Jenny. (2016). *Global Analysis of Tall Buildings with Tubed Mega Frame Structures*. Stockholm, Sweden: Kth Royal Institute Of Technology, School Of Architecture and the Built Environment.
- Preservation Chicago. (2006). *Chicago's Seven Most Threatened Buildings*. [https://preservationchicago.org/wp-content/uploads/2021/12/nylife\\_2006.pdf](https://preservationchicago.org/wp-content/uploads/2021/12/nylife_2006.pdf). (Accessed at 02.06.2023)
- Rupasinghe, Rohan and Nolan, Eanna. (2007). *Formwork for Modern, Efficient Concrete Construction*. BRE Press. ISBN-13 : 978-1860819759
- Sev, Aysin and Özgen, Aydan. (2009). *Space Efficiency In High-Rise Office Buildings*. METU JFA 2009/2 (26:2) 69-89. DOI: 10.4305/METU.JFA.2009.2.4.
- Sreevalli, Tanneeru and Priya, N. Harika. (2017). *Effect of Shear Wall Area on Seismic Behavior of Multistoried Building Tube in Tube Structure*. International Journal of Engineering Trends and Technology Volume-44 (Number-4). DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V44P24.
- Şamhal, Erkan. (2005). *Lecture 1.1: Composite Construction* (arranged). <https://web.itu.edu.tr/~haluk/COMPOSITE%201.pdf>. (Accessed at 13.06.2023)
- Tiwary, Aditya. (2017). *Advanced Techniques in Constructions in High-rise Buildings*. Government Engineering College.
- Valente, João Miguel Serras Delgado. (2012). *Tall Buildings and Elevators - Historical Evolution of Vertical Communication Systems*. Final Thesis for the Degree of Master in Civil Engineering. Instituto Superior Tecnico. Universidade Tecnica de Lisboa.
- Yüksel, İsa. (2019). *An Overview on Tall Buildings from The Point of Structural Engineering*. Engineering Journal of Innovative Science and Engineering. 3(2): 86-101.

## BETON TEKNOLOJİSİNDEKİ YENİ GELİŞMELER

İlker Bekir TOPÇU<sup>1\*</sup>, İsmail HOCAOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2075-6361>

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9294-1120>

Anahtar Kelimeler	Öz
3D yazıcı betonlar Ultra yüksek dayanımlı betonlar Ultra hafif betonlar Eko-beton Saydam ve geçirgen betonlar	Beton teknolojisinde her geçen gün gelişen yeniliklerin uygulamaya girmekte olduğu görülmektedir. Bu makalede beton teknolojisinde son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış yeniliklerin bazıları anlatılmıştır. Yeniliklerin bazıları beton üretiminde kullanılan malzemelerle, bazıları ise özellikle gelişen dijital teknolojinin betonlara uygulanmasıyla ilgili olmaktadır. Uygulamada betonların işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılığında oldukça önemli gelişmeler olduğundan bunların ilgilenenlere tanıtılması yararlı olacaktır. Makalede yeni nesil çimento esaslı betonlar başlığı altında sırasıyla, 3D yazıcı ile üretilen betonlar, nano teknolojik ultra yüksek dayanımlı betonlar, kendi kendini ısıtan ve soğutan betonlar, kendi kendini kür eden betonlar, kendi kendini tamir eden betonlar, atık agregalı betonlar, Mars betonu, ultra hafif betonlar, kendini temizleyen betonlar, bükülebilir beton, eko beton (yeşil beton), yarı saydam ve geçirgen beton, nesnelere interneti (RIFID) teknolojili beton ve çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonlardaki (SIFCON) konular hakkında yeni gelişmeler literatüre bağlı olarak açıklanmış, bu yeniliklerin getirdiği avantajlar tanıtılmaya çalışılmıştır.

## NEW DEVELOPMENTS IN CONCRETE TECHNOLOGY

Keywords	Abstract
3D printed concrete Ultra high strength concretes Ultra-light concretes Eco-concrete Transparent and pervious concretes	It is seen that the innovations that are developing day by day in concrete technology are being put into practice. In this article, some of the innovations that have recently been widely used in concrete technology have been explained. Some of the innovations are related to the materials used in concrete production, and some of them are related to the application of the developing digital technology to concrete. In practice, it would be useful to introduce them to those who are interested, as there are significant developments in the workability, strength and durability. In the article, under the title of new generation cement-based concretes, concretes produced with 3D printers, nano-technology ultra-high strength concretes, self-heating and cooling concretes, self-curing concretes, self-repairing concretes, waste aggregate concretes, mars concrete, ultra-lightweight concretes, self-cleaning concretes, bendable concrete, eco-concrete (green concrete), translucent and pervious concrete and concrete with internet of things (RIFID) technology, cement slurry impregnated fibrous concretes (SIFCON) have been explained based on the literature, and the advantages brought by these innovations have been tried to be introduced.

Derleme Makale

Başvuru Tarihi : 23.08.2023

Kabul Tarihi : 07.12.2023

Review Article

Submission Date : 23.08.2023

Accepted Date : 07.12.2023

\* Sorumlu yazar: [ilkerbt@ogu.edu.tr](mailto:ilkerbt@ogu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1348428>

### 1. Giriş

Teknolojinin son derece hızlı gelişimi beton teknolojisini de olumlu yönde etkilemektedir. Çevre dostu karışım yöntemlerinden, kelimenin tam anlamıyla kendi kendini iyileştirebilen betona kadar, yeni beton teknolojisi, inşaatın geleceği için görünüşte sınırsız olanaklar sunmaktadır. Gelişimin ve yeniliklerin bazıları beton üretiminde kullanılan

malzemeler üzerinde olmaktadır. Özellikle beton içindeki boşlukları en aza indirmek için nano malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Yine sismik etkilere karşı hafifletilmiş betonların kullanılması da yaygınlaşmaya başlamıştır. Bununla birlikte betonlara eklenen kimyasallarla betonlara yeni özellikler kazandırılmaya çalışılmıştır. Depremlerden sonra ortaya çıkan yapı enkazlarının değerlendirilerek yeniden betonda agrega olarak kullanılması büyük



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

tasarruflar sağlayabilmektedir. Özel kimyasallarla ve biyolojik materyallerin kullanılması ile betonların kendi kendini tamir etmesi, kendi kendini temizlemesi ve kendi kendine kür etmesi sağlanabilmektedir. Ay ve Marsta yapılması planlanan yapılar için de (susuz beton uygulamalarının) 3D baskılı yazıcılar kullanılabilir. Gevrek bir malzeme olan beton içine katılan lifler yardımıyla sünek bir yapıya dönüşerek bükülebilir hale getirilebilmektedir. Saydam betonlar yardımıyla güneş ısı ve ışığı beton içinden geçirilerek enerji tasarrufu yaptıran betonlar üretilmeye başlanmıştır. Yine geçirimli betonlarla suların toplanması için yeni uygulamalar yapılmaya başlanmıştır. Burada açıklanan yenilikler dışında çok sayıda gelişme olduğu da bilinmektedir. Bu derleme makalesinde beton teknolojisinde yukarıda sayılan yenilikler incelenmeye çalışılmıştır. Bu yeniliklerin insanların sınırsız ihtiyaçları düşünüldüğünde teknolojinin beton üzerinde kullanılması ile sosyo-

kültürel yapıların oluşturulmasında oldukça avantajlı gelişmeler yaratacağı düşünülmektedir.

## 2. Yeni Nesil Çimento Esaslı Betonlar

Bu çalışmada; 3D yazıcı ile üretilen betonlar, nano-teknolojik ultra yüksek dayanımlı betonlar, kendi kendini ısıtan ve soğutan betonlar, kendi kendini kür eden betonlar, kendi kendini tamir eden betonlar, atık agregalı betonlar, Mars betonu, ultra hafif betonlar, kendini temizleyen betonlar, bükülebilir beton, eko beton (yeşil beton), yarı saydam ve geçirgen beton, nesnelere interneti (RIFID) teknolojiye betonlardaki gelişmeler ve çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton (SIFCON) hakkında genel bilgiler verilmiştir (Şekil 1). Günümüzde uygulama esasına ve gereksinimine göre çalışmada bahsi geçen her tipte beton üretilebilmekte ve teknolojik anlamda gelişimi devam etmektedir.



Şekil 1. İnceleme yapılan özel betonlar

### 2.1. 3D Yazıcı İle Üretilen Betonlar

Beton üretiminde 3D yazıcıların kullanılması, gelecek vaat eden beton yapı teknolojisi planlama aşamasının hemen ardından oluşturulan dijital verilerin şantiye ortamında uygulanmasını sağlarlar (Mechtcherine ve diğ., 2020; Schutter ve diğ., 2018; Mechtcherine ve diğ., 2019; Buswell ve diğ., 2007; Baduge ve diğ., 2021).



Şekil 2. 3D yazıcı ile beton üretimi ve kullanım alanları (a)Büyük ölçekli 3DCP (Anjuma ve diğ., 2017), (b)PERI/COBOD ve Mense-Korte'de iki katlı bir 3DPC evi, (c)2021'in başlarında Hollanda'nın ilk 3DP evi

(Kauppila, 2022), (d)Dünyanın en uzun 3DPC Köprüsü, Şangay (edition.cnn.com, 2019).

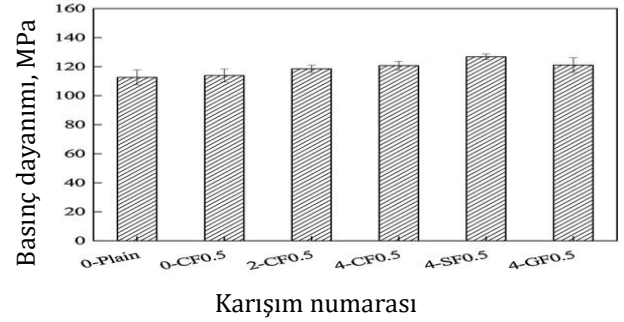
3D yazıcı kullanılarak üretilen betonun üretim aşamaları ve 3D yazıcı kullanılarak inşa edilmiş bazı yapı örnekleri Şekil 2'de gösterilmiştir. 3D yazıcılar kullanılarak üretilen betonlar hem zamandan kazanç sağlamakta hem de işçilik hatalarını neredeyse yok denecek kadar azaltmaktadır. Maliyet olarak ise toplam inşaat maliyetinin yaklaşık olarak yarısıdır (Weilandt ve diğ., 2009). Le ve diğ. (2012) 3D baskılı beton üretebilmek için en büyük dane çapının 2 mm olması gerektiğini belirlemişlerdir. Baskılı beton aynı zamanda büyük ölçekli imalatlarda tercih edilebilir (Gosselin ve diğ., 2016). Günümüzde 3D yazıcılar kullanarak yaklaşık 20 MPa basınç dayanımına sahip betonlar üretilebilmektedir. Lim ve diğ. (2012) %54 kum, %36 reaktif toz ve su/çimento oranı 0.28 olan 3D baskılı beton üretmeyi başarmışlardır. Gosselin ve diğ. (2016) %35 çimento, %45 silika kristalleri, %10 kireç taşı tozu %10 silis dumanı katkılı 3D baskılı beton üretmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda 11.7-16.9 MPa arasında basınç dayanımı elde etmişlerdir.

### 2.2. Nanoteknolojik Ultra Yüksek Dayanımlı Beton

Nanoteknolojinin beton sektöründe kullanılmaya başlaması ile ultra yüksek dayanımlı betonlar



üretilebilmektedir (Sanchez ve Sobolev, 2010). Nano boyutlu malzemeler beton içerisindeki boşlukları yüksek oranda doldurarak betonun kompasitesini arttırmaktadır (Li ve diğ., 2016). Çimentolu kompozit malzemelerde kullanılan başlıca nano malzemeler nano çinko oksit, nano-fiberler, nano-karbon, nano-grafen oksit, nano-titanyum oksit, nano karbon siyahı, nano-silika, nano demir oksit vb.'dir (Nanografi, 2023). Literatürde nano malzemelerin çimentolu sistemlerde kullanılarak harç ve betonların fiziksel ve mekanik dayanımları arttırılmaya çalışılmıştır. Sefien ve diğ., (2022) çimentolu sistemlerde %5 oranında demir oksitin çimento ile yer değiştirilmesi sonucu basınç dayanımının yaklaşık olarak %7.96 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Nik ve Bahari (2011) nano silika katkılı çimento esaslı harçların mikro yapısını ve nano silikanın mekanik dayanım üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Nano silika katkılı harçların mikro yapıyı fark edilebilir derecede iyileştirdiği, mekanik dayanımı da arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bazı araştırmalar, çimento bazlı sistemlere grafen oksit nano parçacıkları, nano montmorillonit, çok duvarlı karbon nanotüpler ve nano titanyum dioksit eklenmesinin basınç ve eğilme dayanımlarını artırabileceği sonucuna varmıştır (Mousavi ve diğ., 2021; Hocaoglu, 2022; Mousavi ve diğ., 2022). Noee ve Rajabli (2023) nano silikanın beton basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. 28 gün kür edilen betonlarda çimento yerine %11 oranında nano silika katılması ile referans betona göre basınç dayanımında yaklaşık %300 oranında artış gözlemlemişlerdir. Günümüz teknolojisinde nano boyutlu malzemelerin çimentolu sistemlerde kullanılması ile 120 MPa'nın üzerinde basınç dayanıma sahip beton üretilebilmektedir. Chu ve diğ., (2021) karbon, çelik ve cam nano parçacıklı betonlar üretmişler, nano fiber çelik katkılı betonda en yüksek dayanım elde etmişlerdir (Şekil 3). Şekil 3'te X ekseninde belirtilen simgeler, fiber tipi ve oranlarını temsil etmektedir. Servatme ve Şimşek (2018) farklı oranlarda nano-alüminat, nano-kalsit ve nano-silikat içeren betonların basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Çimento yerine %1 nano-alüminat konulduğunda 67.25 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir (Servatme ve Şimşek, 2018). Çimento yerine %2 nano-kalsit konulduğunda 79.46 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir (Servatme ve Şimşek, 2018). Çimento yerine %1 nano-silikat konulduğunda ise 97.86 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır (Servatme ve Şimşek, 2018).



Şekil 3. Nano karbon-çelik-cam katkılı betonlarda basınç dayanımı (Chu ve diğ. 2021)

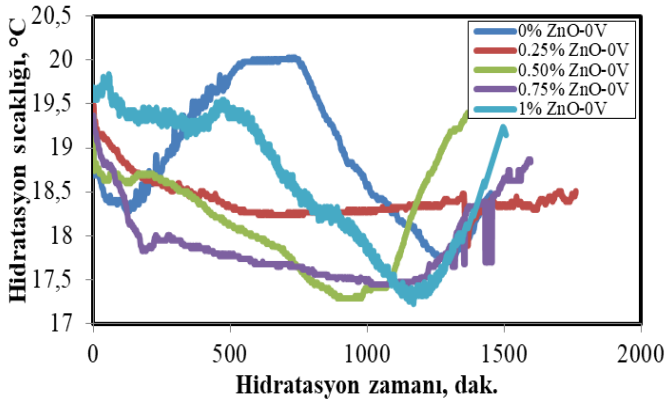
### 2.3. Kendi Kendini Isıtan ve Soğutan Beton

Beton bileşenlerinden su ile çimento bir araya gelmez hidrasyon reaksiyonları oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar ekzotermik (ısı açığa çıkartan) kimyasal tepkimelerdir. Kütle betonları, yüksek metrajlı beton dökümleri, sıcak hava koşullarında dökülmesi gereken betonlar ve soğuk derz oluşma potansiyeli bulunan imalatlarda olduğu durumlarda hidrasyon ısısını düşürmek kritik öneme sahiptir. Soğuk havalarda beton dökümleri ve prefabrik eleman imatları vb. durumlarda ise hidrasyon ısısını yükseltmek büyük öneme sahiptir (Hocaoglu, 2022).

Nano malzemeler beton teknolojisinde kullanılmadan önce, bilim insanları çimento esaslı malzemenin hidrasyon ısısını artırma ya da azaltmada bazı puzolanları (mineral katkı olarak) kullanmayı ve kimyasal katkılar eklemeyi tercih etmişlerdir (Pangdaeng ve diğ. 2014, Mazari ve diğ., 2020). Ancak kullanılan malzemelerle çok yüksek mekanik dayanımlara ulaşamadığı görülmüştür. Önceki araştırmalar karbon bazlı malzemelerin hidrasyon reaksiyonlarına etkisini de araştırmışlardır. Çimento esaslı kompozitlere bazı nano boyutlu malzeme ilave edilmesi sonucu hidrasyon ürünleri olan CSH ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin oluşumu hızlandırılabilir. Hocaoglu (2021) farklı s/ç oranlarına sahip harçlarda çimento yerine ağırlıkça %0.25 oranında grafen oksit katarak hidrasyon sıcaklığını bir gün süreyle incelemiştir. Grafen oksitin, hidrasyonun ilk aşamalarında harç iç sıcaklığını artırarak prizin daha kısa sürede gerçekleşebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Hocaoglu (2023) grafen oksit katkılı harçlara bir gün süreyle doğru akım uygulamıştır. Grafen oksitin yüksek oranda elektrik iletkenliği nedeniyle priz süresinin yüksek miktarda kıaldığını gözlemlemiştir (Hocaoglu, 2023). Önceki araştırmalarda nano çinko oksit vb. gibi nano boyutlu malzemelerin hidrasyon reaksiyonlarını yavaşlattığı, bu sayede prizi geciktirdiği belirlenmiştir. Gopalakrishnan ve Nithiyantham (2020), %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında nano çinko oksit katkılı harçlarda eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve priz süresine etkilerini araştırmışlardır. Nano çinko oksitin çimentolu sistemlerde prizi önemli

ölçüde geciktirdiğini, mekanik dayanımı ise yüksek oranda arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Gopalakrishnan ve Nithiyantham, 2020).

Hocaoğlu (2022) çimento yerine ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında nano çinko oksit konulan harçların hidrasyon sıcaklıklarını bir gün süreyle incelemiştir. Harç içerisindeki nano çinko oksit oranının artması ile hidrasyon sıcaklığının azaldığını ve priz süresinin önemli miktarda geciktiğini gözlemlemiştir (Hocaoğlu, 2022). Bu sayede kendini soğutma özelliğine sahip yeni nesil çimento esaslı malzeme üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Kendiliğinden soğuyabilen harç üretimi (Hocaoğlu, 2022)

#### 2.4. Kendi Kendini Kür Eden Beton

Beton sertleştikten hemen sonra en büyük sorun kürlenme işlemidir (Chand ve diğ., 2016). Özellikle ilk 7 günde hidrasyon reaksiyonlarının ilerleyen günlere kıyasla daha fazla gerçekleşmesi nedeniyle çeşitli önlemlerin alınması gerekmektedir. Çimento bazlı malzemelerin kürlenme süreci genellikle zaman alıcıdır ve ekonomik değildir. Ayrıca küresel ısınma sonucu kısıtlı su kaynakları da her geçen gün tükenmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için araştırmacılar, daha verimli kürlenme yöntemlerini belirlemeyi amaçlayan kapsamlı çalışmalar yapmışlardır. Umud verici bir çözüm, kürlenme işlemi için gömülü bir su kaynağının hazırlanmasını içerir (Bentz ve Weiss, 2011).

Önceki araştırmalarda çimentolu malzemelerin kendi kendine kürlenebileceği belirlenmiştir. Ghasvand ve diğ., (2022) sertleşmiş betonda hidrasyon suyu içeriğini arttırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanılabilirliğini belirlemişlerdir. Kendiliğinden sertleşen çimento esaslı kompozit sistemler, polimerler, süper emici, hafif agregalar, ahşap tozları ve büzülme azaltan katkı maddeleri kullanılarak üretilebilirler (Lokeshwari ve diğ., 2021; ACI (308-213) R-13, 2022; Kamal ve diğ., 2018). Jieting ve diğ., (2022), betona süper emici polimer eklendiğinde, kontrol numunelerine göre daha fazla  $C_2S$  ve  $C_3S$  oluştuğunu gözlemlemiştir. Kendini kürlen beton, daha etkili bir

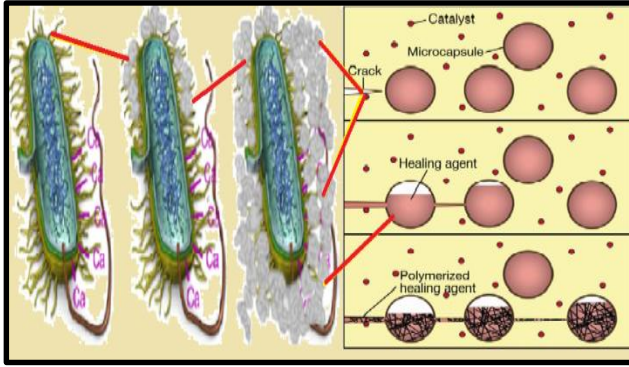
çimento hidrasyonu için çimento esaslı sistemlerde iç nem oranını artırabilecek yeni bir yöntemdir (Bentz ve diğ., 2005; Bilek ve diğ., 2002; El-Dieb ve El-Maaddawy, 2020). Ayrıca; çimento bazlı sistemlerde kendiliğinden kürlen katkılarının kullanılması su kaynaklarının korunması açısından da büyük önem taşımaktadır (El-Dieb, 2007). Seongwoo ve diğ. (2022), çimento esaslı kompozitlerde ağırlıkça %0, %0.3, %0.6, %1.2 ve %3 oranında kenaf selüloz mikro elyaflarını ikame etmiştir. Karışım içerisindeki kenaf selüloz mikro elyaf miktarının artması ile rölatif nem oranının da %3-30 arasında arttığını gözlemlemişlerdir. Özellikle beton sertleştikten sonra nem oranının artması çimentolu kompozit malzemenin kendi kendini kürlenme özelliği gösterebilmesi anlamına gelmektedir. Bashandy ve diğ., (2017), kendi kendine kürlen betonların, kürlenmemiş betona göre daha iyi mekanik özellikler gösterdiği sonucuna varmıştır. Ancak geleneksel kür ile kürlen betonlar kadar da iyi mekanik performans gösterememektedir.

#### 2.5. Kendi Kendini Tamir Eden Beton

Betonarme yapılar çatlak oluşum eğilimi yüksek bir malzemedir. Betonlarda çatlak oluşması betonun servis ömrünü kısaltmakta ve tamirati büyük maliyetler gerektirmektedir. Betonda çatlak oluşması ile özellikle deprem gibi sismik hareketlerde yapıların ileri derecede hasar oluşmasına hatta yapının göçmesine neden olabilmektedir (Song ve Saraswathy, 2007; Elsener, 2005). Betonda çatlak oluşumu ilk zamanlarda betona çok büyük zarar vermez, ancak; ileriki yaşlarda betonun dayanıklılığını büyük ölçüde azaltmaktadır (Henk ve diğ., 2010; Chahal ve diğ., 2012; Samani ve Attard, 2014; Pacheco ve Labrincha, 2012).

Betonda çatlak oluşumunu engellemek amacıyla beton içerisine kimyasal katkı ve polimer malzemeler eklemek gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Ancak; geliştirilen bu yöntemler genellikle kısa vadede etkili olmaktadır. Bu nedenle; çatlak oluşumunu uzun vadede önleyecek yöntemler geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur (Li ve Habert; 2012). Günümüzde çatlak oluşumunu azaltmak için nanoteknoloji modifiye edilmiş kompozit malzeme kullanımı, kendini tamir eden sistemlerin oluşturulması vb. yöntemler geliştirilmiştir. Betonda kendi kendine tamir etme mekanizması otojen iyileşme (Edvadsen, 1999), malzemenin polimerik kapsül içine alınması ve mikrobiyal  $Ca(CO)_3$  üretimi olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır (Edvadsen, 1999).

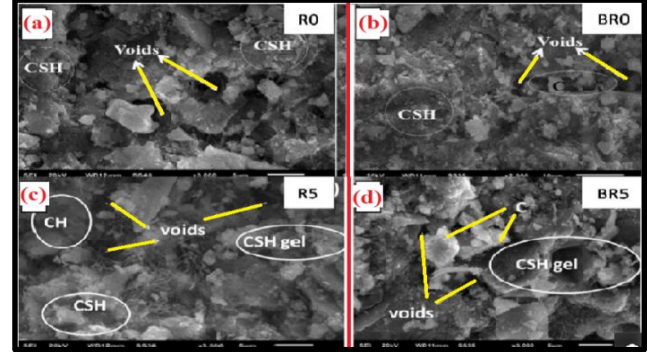
Son yıllarda belki de en tuhaf ama inanılmaz somut yeniliklerden biri, kendi kendini iyileştirebilen betonun geliştirilmesidir. Biyobeton olarak isimlendirilen bu betonlar, çatladığında veya hasar gördüğünde tutkal benzeri bir madde oluşturarak özel bir bakteri yardımıyla çatlakları doldurulabilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Bakteriler kullanılarak çatlaklı betonun tamiri (Althoeve ve diğ., 2023).

Proteinlerin ve şekerlerin bu salgısı daha sonra betonu güçlendirmek ve boşluğu tamamen kapatmak için sertleştiğinde kireçtaşı veya kalsit oluşturmaktadır. Kendi kendini iyileştiren betonla, bakım ve değiştirme maliyetlerinde büyük miktarda tasarruf sağlayabilir ve ayrıca daha güvenli yapılar üretilebilir.

Feng ve diğ., (2019) Elyaf lif ve PVA lifli bakterilerin betonun kendi kendini iyileştirme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmada ortama yetiştirilen bakterilerin optik yoğunluğunu elyaf içeren çok işlevli mikro plaka okuyucusu kullanılarak ölçülmüşlerdir. Bu durum PP elyafın ve PVA lifi bakteri konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur (Feng ve diğ., 2019). Bakteriyel elyaf takviyeli betonda, 300-500 µm çatlak genişliği elde edilmiş ve otojen iyileşme performansı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bakteri ve lifli numuneler için çatlak alanının tamir oranının hafif olmasına rağmen sadece bakterilerde olduğundan daha düşük olmakta, su geçirmezlik ve eğilme dayanımı geri kazanma oranı belirgin bir şekilde iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Patil ve diğ., (2008) Mikrobiyolojik olarak geliştirilmiş çatlak iyileşmesinin etkinliği ile işlem görmüş harçların basınç dayanımı ile kontrol numunelerinin karşılaştırmasını yaparak değerlendirmişler, çalışmalarında yapılan gözlemlere dayanarak, geliştirilmiş çatlak iyileştirme etkinliğinin küp numunelerin basınç dayanımını %12-13 oranında arttırdığı ve beton çatlakları için sızdırmazlık maddesi olarak kullanılabilmesi sonucuna ulaşmışlardır. Wangap ve diğ., (2014) Kapsüllenmiş sporların canlılığı ve mikro kapsüllerin harç numuneler üzerindeki etkilerini araştırarak, çimento esaslı malzemenin kendi kendini iyileştirme kapasitesini, çatlak iyileşme oranını ve su geçirgenliğini incelemişlerdir. Sonuçta biyokapsüllü numunelerde iyileşme oranının %48-80 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Vijay ve diğ., (2017) bakteri kullanımı ile betonda mikro yapıya etkisini araştırmışlar ve bakteri enjekte edilen betonda boşlukların fark edilir derecede arttığı, CSH jellerinin daha belirgin bir şekilde oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 6).



Şekil 6. Bakteri enjekte edilmiş betonun mikro yapıyı iyileştirmesi (Vijay ve diğ., 2017) (a-referans beton, b-bakterili beton, c-%5 RHA'lı beton, d- %5 RHA'lı bakterili beton)

## 2.6. Atık Agregalı Beton

Günümüzde enerji maliyetlerinin yüksek olması beton üretim maliyetini de olumsuz etkilemektedir. Ayrıca; dayanıklılık sorunlarından dolayı bir yapının ömrü yaklaşık 50 yıldır (TBDY, 2018). Bu durum bilim insanlarının aklına agregaların yeniden kullanma fikrini getirmiştir. Günümüzde atık agregaların betonda yeniden kullanılabilmesi gösterilmiştir (Yang ve diğ., 2022; Topçu ve Günçan, 1995) (Şekil 7).



Şekil 7. Atık agregaların geri dönüşümü (Ftmmachinery, 2023)

Atık agregaların betonda yeniden kullanılması fikri, çevre dostu bir imalatın oluşmasına öncülük etmektedir (Uygunoğlu ve diğ., 2014). Geri dönüştürülmüş beton tozu için yaygın olarak kullanılan üç ana ön işlem yöntemi bulunmaktadır. Bunlar: mekanik aktivasyon (Sun ve diğ., 2021), ısı aktivasyonu (Zhang ve diğ., 2022) ve karbonasyon (Fang ve diğ., 2021)'dur. Hızlandırılmış karbonasyonun, karbonasyon reaksiyonu yoluyla geri dönüştürülmüş tozun fiziksel aktivitesini iyileştirebileceği ve hızlandırılmış karbonasyon modifikasyonunun düşük maliyetli, basit işlem, kolay uygulama ve karbon absorpsiyonu ve fiksasyonu avantajlarına sahip olduğu belirlenmiştir (Qin ve Gao, 2019).

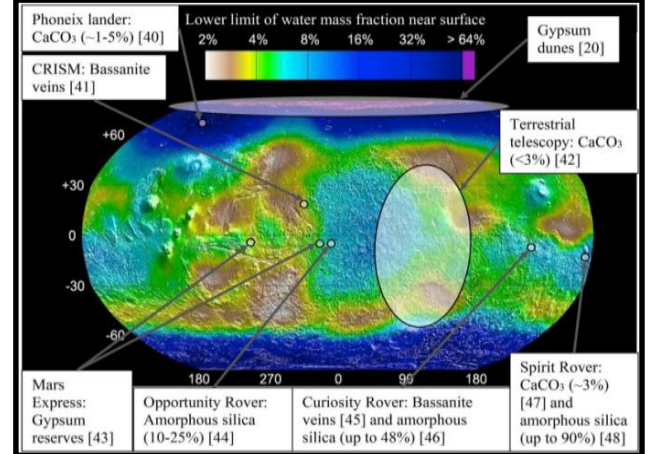
Karbonatlı geri dönüştürülmüş toz, betonun doluluğunu iyileştirmek ve ardından betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için yüksek kaliteli dolgu maddesi olarak betona karıştırılabilir (Tang ve diğ., 2020). Geri dönüştürülmüş agrega ve tozun kullanıma sunulması, betonun hazırlanması ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan, araştırmacılar, geri dönüştürülmüş betonun özelliklerinin evrimi üzerine birçok araştırma yürütmüştür (Likes ve diğ., 2022; Sasanipour ve diğ., 2020; Kazemian ve diğ., 2019). Genel olarak, geri dönüştürülmüş agrega, betonunun mekanik özelliklerinin (Elansary ve diğ., 2021), uzun vadeli büzülme özelliklerinin (Chinzorigt ve diğ., 2020) ve dayanıklılık özelliklerinin (Kazmi ve diğ., 2020), geri dönüştürülmüş agrega veya geri dönüştürülmüş tozun artan ikame oranıyla kademeli olarak azaldığı ve büyük bir dağılımın olduğu konusunda bilim insanları tarafından fikir birliği bulunmaktadır.

Önceki araştırmalarda atık agregalı betonlarda atık agrega miktarının artması ile betonun basınç dayanımında düşüşe neden olduğu belirlenmiştir (Topçu, 1997; Topçu ve Şengel, 2004). Bunun başlıca nedeni, geri dönüştürülmüş agregaların, daha düşük kaliteli ve düzensiz dağılmış karmaşık özelliklere sahip eski harcı ortaya çıkarması, gözenek yapısını ve betondaki gelişme modelini değiştirmesi (Gonzalez-Corominas ve diğ., 2016; Martinez-Garcia ve diğ., 2022) ve ayrıca betonda çoklu ara yüzey hasarları ortaya çıkarmasıdır (Memon ve diğ., 2022).

Geride dönüştürülmüş tozun kullanılması ise çimento klinkerini azaltarak hidrasyon ürünlerinde azalmaya yol açmaktadır (Duan ve diğ., 2020). Günümüzde bilim insanları bu olumsuz etkinin azaltılması konusunda araştırmalarını sürdürmektedirler. Pacheco ve diğ., (2019) geri dönüştürülmüş kaba agreganın betonun dağılımı üzerindeki etkisini incelemişler ve orta ikame oranlarında geri dönüştürülmüş kaba agregalı betonun dağılımındaki artışın en bariz olduğu sonucuna varmışlardır. Geleneksel verileri bir malzeme bileşimi perspektifinden incelemek ve algoritmaları optimize etmek için girişimlerde bulunulmasına rağmen, yüksek genelleme yetenekleri ile geri dönüştürülmüş agregalı betonun dağılımını karakterize etmek ve düzenlemek için hala bir yöntem eksikliğinin bulunduğu düşünülmektedir.

## 2.7. Mars Betonu

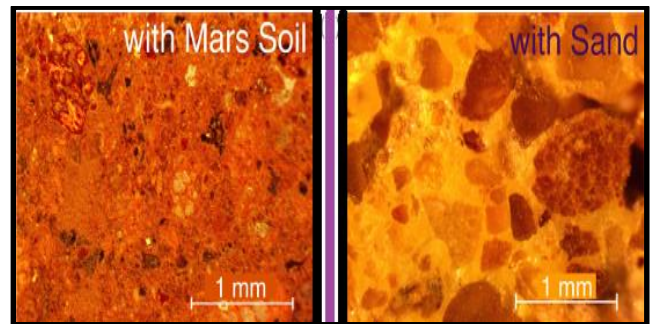
Teknolojinin ilerlemesi ve doğal kaynakların azalması bilim insanlarını Mars'ın sert ortamına dayanabilecek somut yeniliklerin araştırmaya itmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Bağlayıcı için kaynakların seçilmiş gözlemleri üretimi (PoP için bazanit veya alçıtaşı; OPC veya AAC için herhangi bir mineraloji; için amorf silika AAC, GC veya MSBB), bir harita üzerinde Mars yüzeyine yakın su bulunması (NASA, 2008; Reches, 2019)

Kızıl gezegende bolca bulunan malzemeleri kullanarak, Dünya'da geleneksel olarak kullandığımızdan iki kat daha güçlü bir beton türü geliştirilebildiği gözlenmiştir. Örneğin, Mars'ta su sınırlı bir kaynak olduğundan, kükürt, suyun yerini almaktadır. Mars betonu, Dünya'da sıklıkla kullanacağımız bir yenilik olmasa da, insanların Mars'ta bir koloni oluşturmaya çalışması durumunda kritik olabilmektedir. Ayrıca 3D yazıcıların yaygın şekilde kullanılmaya başlanması Marsta beton üretimini kolaylaştırabileceği değerlendirilmektedir.

Wan ve diğ., (2016) Mars toprağının beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 9). Şekil 9 incelendiğinde Mars toprağı ile üretilen betonun hemen hemen standart kumlu betonla benzer mikroyapı oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca, en büyük 1 milimetre toplam boyutuna sahip %50 Mars toprağından oluşan karışımın, Mars'ın daha az yoğun atmosferinde bir arada tutulacağını ve uzay boşluğunun neden olacağı Ay'da görülebilecek sorunları ortadan kaldıracığını da bulmuşlardır (Wan ve diğ., 2016).



Şekil 9. Mars toprağı ve standart kum ile üretilen betonun mikro incelemesi (Wan ve diğ., 2016)

## 2.8. Ultra Hafif Beton

Yapı ölü yüklerini azaltmak deprem mühendisliği için oldukça önemlidir. Hafif betonlar üretim şekilleri ve kullanım alanlarına göre farklı sınıflara ayrılmaktadırlar (Topçu, 1988). Hafif betonların birim ağırlıkları yaklaşık 1800-2000 kg/m<sup>3</sup>'tür (Topçu ve Işıkdag, 2008). Bilim insanları çok daha düşük birim ağırlığına sahip beton üretmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla beton birim ağırlığının 800 kg/m<sup>3</sup>'e kadar düşürülmüştür (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Üretilen bu özel betona "Ultra Hafif Beton" (UHB) ismi verilmiştir. Ultra hafif betonlar yapı yüklerini yüksek oranda azaltarak deprem güvenliği sağlamaktadır (Topçu ve diğ., 2023). Ayrıca; boşluk oranı yüksek bir beton üretilmesi sayesinde yalıtım malzemesi olarak da tercih edilebilmektedir.

Günümüzde UHB üretimi için genleşmiş cam agregaları ve genleşmiş killer vb. birim ağırlığı düşük malzemeler tercih edilmektedir (Spiesz ve Heidelberg, 2017; Yu vd., 2015). UHB'lerin en büyük dezavantajı, düşük basınç dayanımına (en yüksek 10 MPa) sahip olmasıdır. Bilim insanları UHB'lerde daha yüksek basınç dayanımı elde etmek için araştırmalarını sürdürmektedirler. Topçu ve Uygunoğlu (2007) hafif agregaların oktavlanması ile 28 günlük dayanımının %75 oranında artabileceğini gözlemlemişlerdir.

## 2.9. Kendini Temizleyen Beton

Genel olarak bina yüzeylerinde zamanla oluşan kirlilik, insan kaynakları ve doğal kaynaklar olarak ikiye ayrılan atmosferik kirlilikten kaynaklanmaktadır (Ünal ve Canbaz, 2022). Nanoteknoloji, betonlarda kendi kendini temizleme konusunda bilim insanlarının yardımına koşturmaktadır. Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>); güçlü oksidasyon kabiliyeti, korozyona karşı uzun süreli direnci ve iyi dağılımı, hidrofobikliği, kimyasal kararlılığı, inert yapısı, toksik olmaması, ucuzluğu ve ışık geçirgenliği nedeniyle çimento esaslı malzemelerin temizlenmesi uygulamalarında en çok çalışılan ve kullanılan malzemedir (He ve diğ., 2019). TiO<sub>2</sub> güneşe maruz kaldığında sertleşmiş betonda aktif hale gelir. Aktivasyon, TiO<sub>2</sub> elektrik yükünü değiştirerek beton ile beton yüzeyindeki kir ve kirleticiler arasında itici bir etkiye neden olur (Precast, 2020). Bir sonraki yağmur, gevşeyen kir parçacıklarını beton yüzeyden yıkayarak yapının temiz görünmesini sağlar (Precast, 2020). Betonda kullanılan foto katalitik malzemeler, sıkışık şehirlerde egzoz gibi havadaki kirleticilerin ayrıştırılmasına da yardımcı olma konusunda umut vaat etmektedir (Precast, 2020). Kendini temizleyen beton uygulamalarından bazıları arasında Roma'daki Jubilee Kilisesi, Roissy-Charles de Gaulle Uluslararası Havaalanı, Paris ve Bordeaux'daki Hotel de Police'deki Air France Genel Merkezi bulunmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Paris'teki Hotel de Police Binası (Precast, 2020)

Kendini temizleyen betonların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İçeriğindeki TiO<sub>2</sub> kendi kendini temizleyen betonun yüzeyinde beyaz noktalar oluşturmaktadır. TiO<sub>2</sub>'nin kimyasal reaksiyona girmesi için ışığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle iç mekan uygulamalarında kendini temizleyen betonların kullanılması uygun değildir (Topçu ve diğ., 2020).

## 2.10. Bükülebilir Beton

Beton sünek bir malzeme olmayıp gevrek yapıdadır. Özellikle sismik hareketlerin fazla olduğu alanlarda yapının sünek olması deprem güvenliği anlamına gelmektedir. Bilim insanları süneklik kabiliyeti yüksek beton üretmeyi başarmışlardır (Şekil 11). Bükülebilir betonlar kısa liflerle güçlendirilen çimento esaslı harçlarla üretilmektedirler. Önceki araştırmalarda betonun esnekliğini arttırmak için elyafyla birlikte cam elyafının da kullanılabildiği belirlenmiştir (Neeladharan ve diğ., 2018). Bükülebilir betonlar yol ve köprü inşaatlarında genleşme ve büzülme derzlerinin kullanımını ortadan kaldırırlar (Theconstructor, 2023).



Şekil 11. Bükülebilir betonda eğilme deneyi (Malzeme Bilimi, 2023)

Sünek betonlarla inşa edilen binalar daha fazla çekme gerilmesini karşılama özelliğine sahiptirler. Bu da deprem kuvvetlerinin karşılanmasında oldukça etkilidir (Theconstructor, 2023). Ayrıca sünek betonlar askeri amaçlar için yapılan beton brandaların oldukça sağlam ve dayanıklı olmasını sağlayabilmektedir (Theconstructor, 2023).

### 2.11. Eko Beton (Yeşil Beton)

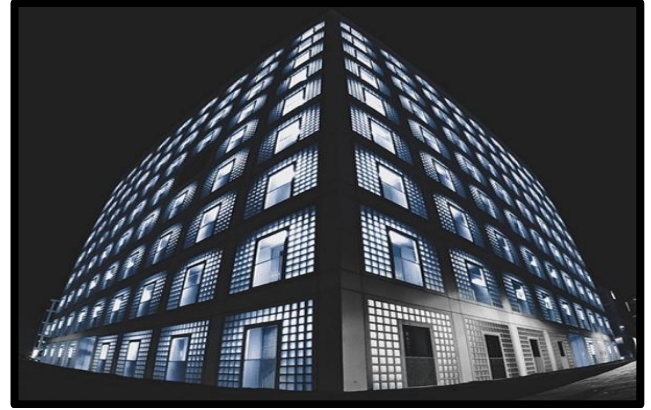
Yeşil beton, bileşenlerinden en az biri olarak atık malzeme kullanılan veya üretim süreci çevresel hasara yol açmayan veya performansı ve yaşam döngüsü sürdürülebilirliği yüksek olan beton olarak tanımlanmaktadır (Suhendro, 2014). Geleneksel betona göre daha az CO<sub>2</sub> üretir, ucuz ve dayanıklılığı daha yüksektir (Specifyconcrete, 2023). Yeşil beton kullanımının amacı, doğal kaynaklar üzerindeki yükü azaltmak ve geri dönüştürülebilir malzemelere bağımlılığı arttırmaktır. Çevre dostu beton yoluyla sürdürülebilirliği sağlamak için kullanılan çoklu stratejiler arasında, su tüketimini azaltmak için yıkama suyunun yeniden kullanılması iyi bir tekniktir (Specifyconcrete, 2023).

Enerji tüketen çimentonun yeniden kullanılabilir malzemelerle kısmen değiştirilmesi, çevre dostu inşaat malzemesi elde etmek için kullanılan en iyi stratejiler arasındadır. Örneğin, çimento uçucu kül, silis dumanı, odun talaşı, kireçtaşı tozu vb. ile değiştirilebilir (Nielsen ve Glavind, 2017). Yeşil betonun bazı avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Nielsen ve Glavind, 2017).

- Beton endüstrisinde CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık olarak %30 oranında azaltır. Beton endüstrisinin atık ürün kullanımını yaklaşık %20 oranında artırır.
- Çevre kirliliğini azaltarak, sürdürülebilirliği artırır. Daha az bakım ve onarım gerektirir.
- Konvansiyonel betona göre daha iyi işlenebilirliğe sahiptir. Yüksek ısıl direnç göstermesi sayesinde, yangına karşı dayanıklıdır. Aynı s/ç oranında benzer mekanik (basınç ve eğilme) dayanımına sahiptirler.

### 2.12. Yarı Saydam ve Geçirgen Beton

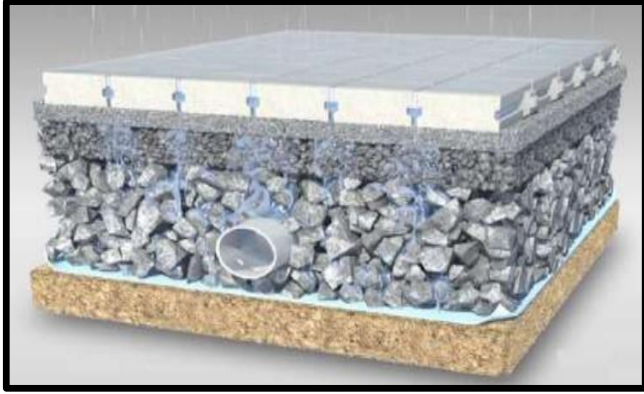
Yarı saydam (transparan) betonlar beton iç yüzeylerinin içerisine gömülen ışık geçiren elemanlar sayesinde üretilebilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2016). Losonci (2010) beton içerisine optik malzeme koyarak, güneş ışığı altında, ışığın beton içerisinden geçebileceğini gözlemlemiştir. Juerge (2007) 80 MPa dayanıma sahip betona plastik optik fiberler koyarak saydam beton üretmeyi başarmıştır. Transparan betonlar genellikle mimari açıdan estetik bir görüntü elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 12 Almanya' da yarısaydam betondan inşa edilmiş Stuttgart Şehir Kütüphanesinin bir fotoğrafıdır.



Şekil 12. Almanya Stuttgart Şehir Kütüphanesi (Ekoyapı, 2022)

Yarısaydam betonların maliyeti, diğer teknolojik betonlarda olduğu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu faktörler: cam veya diğer saydam malzeme kalitesi, üretim yöntemi ve süreci, projenin büyüklüğü, talep edilen özellikler, yerel malzeme ve işçilik maliyetleridir. Transparan betonlar ışık geçişine izin vermesi nedeniyle enerji maliyetini düşürmektedir. Ayrıca; bina ölü yükünü azaltarak deprem güvenliği sağlamaktadır. Ancak; yarı saydam beton, geleneksel betondan daha pahalıdır. Çünkü üretiminde daha fazla malzeme ve işçilik gerekmektedir. Ayrıca, yarı saydam betonun doğrudan güneş ışığı altında daha fazla ısı üretmesi nedeniyle, iç mekânlarda kullanılması durumunda klima maliyetlerini artırabilir. Yarı saydam betonun su geçirgenliği daha azdır. Bu nedenle suyun içeri girmesini önlemek için özel önlemler alınması gerekmesi dezavantajları arasındadır (Ekoyapı, 2022).

Geçirimli (poroz) beton ise ince agreganın kullanılmadığı, beton üretiminin yalnızca iri agregadan oluştuğu özel bir beton çeşididir (Şekil 13). Kentsel seller, dünyadaki birçok şehir için büyük bir sorundur. Çünkü beton ve asfalt, suyun emilebileceği yerin altındaki zemine geçmesine izin vermez. Beton ve diğer inşaat malzemelerinin suya karşı yalıtılması gerekir. Bu nedenle su betondaki boşluklara girerse ve donma-çözülme döngüleri oluşturursa, beton çatlamaya ve aşınmaya başlar. Bu sebeple, geçirimli beton henüz her ortamda kullanılabilecek bir çözüm değildir.



Şekil 13. Geçirimli beton (Shah ve diğ., 2017)

Geçirimli beton, taşkınları önlemek ve çevreye daha dost olmak için suyun zemine kadar ıslanmasına izin veren bir tür gözenekli betondur. Ne kadar çok geliştirilirse, soğuk iklimlerde kullanım için çözüme o kadar yakın olabilir. Geçirimli betonlar otoparklarda, bahçe duvarlarında, yüzme havuzu çevrelerinde ve yaya geçitleri vb. yerlerde su birikintilerini önlemede kullanılır (Shah ve diğ., 2017). Bu beton boşluklu bir beton olduğu için basınç dayanımı düşük olduğundan taşıyıcı elemanlarda kullanılması uygun değildir.

### 2.13. Nesnelerin İnterneti (RIFID) Teknolojili Beton

Teknolojik gelişmeler radyo frekans tanımlama (RIFID) yönteminin kullanılmasına olanak sağlamıştır (Uygunoğlu ve Topçu, 2020; Uygunoğlu ve diğ., 2021; Uygunoğlu ve Topçu, 2021). RIFID teknolojisinin kullanılarak betonun iç nemi, iç sıcaklığı, betonun bulunduğu konum vb. takip edilebilmektedir. Ülkemizde beton denetimi Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yetkilendirilen kurum ve kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmektedir.

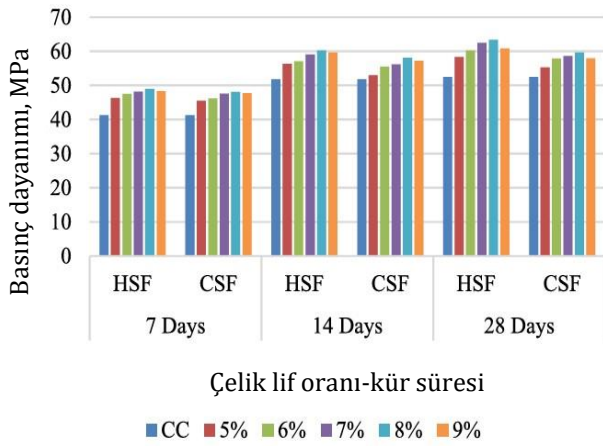
2019' dan itibaren beton imalatı uygulamada devrim niteliğine sahip çipli betona geçilmiştir (4708 sayılı kanun, 2018). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığında temin edilen çipler taze betonun içerisine gömüldükten sonra, RIFID okuyucu el terminali ile beton içerisindeki çipler sisteme tanıtılmaktadır (Şekil 14). Böylelikle beton döküm aşamasından, test edilip, basınç dayanım raporu hazırlanmasına kadar beton numuneleri takip altına alınabilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, daha karmaşık sensörlerin betonda kullanılması ve veri depolama gibi ek işlevlerin birleşimi ile yarı aktif bir sistemin daha da geliştirilmesini ve uygulanmasını hedeflemektedir.



Şekil 14. Betonda RIFID uygulaması (a- betonun kalıplara doldurulması, b- çipin beton içerisine gömülmesi, c- el terminali ile çipin okutulması, d- çipli betonun test edilmesi) (Zekiylıdırım, 2023)

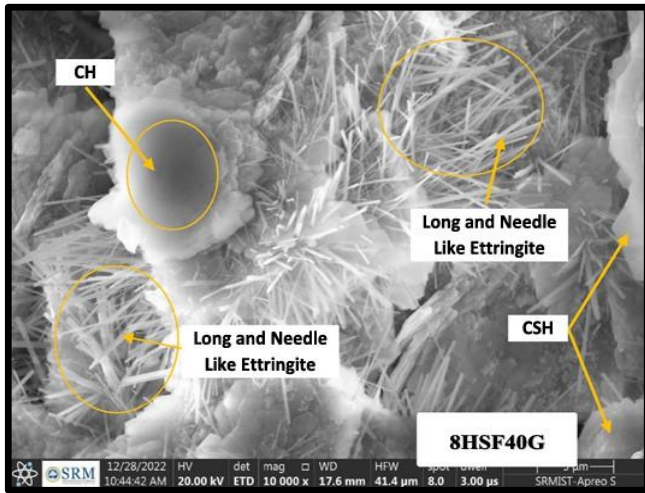
### 2.15. Çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonlar (SIFCON)

Lifli beton olarak üretilen çimento bulamacı emdirilmiş betonlar (SIFCON) yüksek sıcaklığa ve patlama riski bulunan ortamlar için üretilen özel bir beton çeşididir (Canbaz ve Ünüvar, 2016). SIFCON'un başlıca bileşenleri çimento, puzolan, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı, su ve çelik tel'dir (Yalçınkaya ve diğ., 2013). SIFCON çelik tel içermesi nedeniyle yüksek mekanik dayanıma sahiptir. Bazı araştırmacılar SIFCON' a silis dumanı ilavesi ile mekanik dayanımın değişip değişmeyeceğini araştırmıştır (Balaguru ve Kendzulak, 1986). Literatürde SIFCON ile ilgili güncel çalışmaların da yapıldığı görülmüştür. Nachiar ve diğ., (2023) 5%, 6%, 7%, 8% ve 9% çelik fiber katılmış SIFCON'un basınç dayanımı ve mikro yapılarını incelemiştirlerdir (Şekil 15). Şekil 15 incelendiğinde çimento esaslı kompozit içerisinde fiber tel oranının %8 olması ile en yüksek basınç dayanımı elde edilebileceği görülmüştür. Şekil 15'de HSF bağlanmış çelik fiberi CSF ise kıvrımlı çelik fiberi temsil etmektedir.



Şekil 15. SIFCON'da lif oranının ve kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Nachiar ve diğ., 2023)

Nachiar ve diğ., (2023) fiberlerle modifiye edilmiş betonların mikro yapılarını incelediğinde iğnemsı yapı olan etrenjitlerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 15). Etrenjitlerin oluşması daha boşluksuz bir mikro yapı oluşması anlamına gelmektedir.



Şekil 16. %8 fiber tellerle güçlendirilmiş SIFCON'un mikro yapısı (Nachiar ve diğ., 2023)

### 3. Teknolojik Betonların Maliyet Analizi ve Etkiler

Teknolojik betonlar, geleneksel betonlardan farklı özelliklere sahip olan ve daha özel uygulamalara yönelik olarak geliştirilen beton türleridir. Bu betonlar genellikle yüksek dayanıklılık, uzun ömür, özel kimyasal direnç özellikleri, hızlı sertleşme gibi avantajlara sahip olabilirler.

Teknolojik betonlar, özellikle yapısal güç ve dayanıklılığın önemli olduğu projelerde tercih edilmektedirler. Maliyetleri, geleneksel betonlardan daha yüksek olabilir. Çünkü üretim sürecinde özel katkı maddeleri, lifler veya ilave işlemler gerektirebilir. Ayrıca, özel özelliklere sahip olmaları nedeniyle, bazı

teknolojik betonların, geleneksel betonlara göre maliyetleri çok daha yüksek olabilmektedir.

Literatürde teknolojik betonların maliyetlerini inceleyen yayınlanmış kısıtlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen yeni nesil betonların; teknoloji karmaşıkları, başlangıç maliyetleri, yaşam döngüsü maliyetleri, çevre duyarlılıkları ve beton teknolojisinin gelecekteki etkilerini karşılaştırmak için Tablo 1 oluşturulmuştur. Tablo 1 hazırlanırken Mehta, (1999) tarafından oluşturulan kriterler kullanılmıştır. Tablo 1'de belirtilen gelişmekte olan betonların özellikleri düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak kategorize edilmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde teknolojik betonların genel olarak maliyetlerinin yüksek olduğu, ancak; gelecekteki etkilerinin ve çevreye duyarlılıklarının da yüksek olduğu gözlenmiştir. Doğal kaynakların korunması, sürdürülebilirlik, enerjinin tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması dâhil olmak üzere yeni teknoloji tekniklerinin kullanılması beton endüstrisinde sağlanabilir. Bununla birlikte, çimentonun üretim teknolojisine yakından takibi, çimento katkı malzemelerinin kullanımının artırılmasıyla geliştirilebilir. Beton, bileşenlerinin geri dönüştürülmesi ile maliyet düşürülebilir. Bu amaçla betonarme yapı elemanlarının dönüştürülmesinde maliyeti düşürecek yeni yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Yapıların servis ömrü, dayanıklı ve etkili yapı malzemeleri ile üretilerek artırılabilir. Beton endüstrisinde gelişen teknolojilerin kullanılması, inşaat endüstrisinin istikrarlı büyümesi için faydalı olacağı aşikârdır. Bu amaçla, yükleniciler performansa dayalı kodları ve şartnameleri kullanmaları gerekmektedir. Müteahhitler, daha düşük ilk maliyetli yaklaşımları değil, yaşam döngüsü maliyetini değerlendirmelidirler. Bu çalışmada incelenen teknolojik betonların tamamı çevreye duyarlı olduğu gözlenmiştir (Tablo 1). Ayrıca gelecekteki sürdürülebilirliklerinin de yüksek olacağı sonucuna varılmıştır. Özellikle yapay zekânın inşaat sektöründe daha fazla kullanılması ile teknolojik betonların geliştirileceği düşünülmektedir.



Tablo 1. Beton teknolojisindeki son gelişmeler için önerilen derecelendirmeler

Gelişen Teknoloji Çeşidi	Teknoloji Karmaşıklığı	Başlangıç Maliyeti	Yaşam Döngüsü Maliyeti	Çevre Duyarlılığı	Gelecekteki Etkisi
<b>3D yazıcı beton</b> (Florida, 2018; Estarque, 2020)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
<b>Nanoteknolojik yüksek dayanımlı beton</b> (Nanografi, 2023)	Yüksek	Çok yüksek	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
<b>Kendi kendini ısıtan-soğutan beton</b> (Hocaoğlu, 2022)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
<b>Kendini kür eden beton</b> (Lokeshwari ve diğ., 2021)	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
<b>Kendini tamir eden beton</b> (Lee ve Park, 2018)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Çok yüksek
<b>Atık agregalı beton</b> (Ohemeng ve Ekolu, 2020)	Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
<b>Mars betonu</b> (Wan ve diğ., 2016)	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
<b>Ultra hafif beton</b> (Sağlam ve diğ., 2022)	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
<b>Kendini temizleyen beton</b> (Shen ve diğ., 2015)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
<b>Bükülebilir beton</b> (Techinside, 2023)	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
<b>Eko beton</b> (Alqahtani ve diğ., 2021)	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
<b>Yarısaydam ve geçirgen beton</b> (Ekoyapı, 2022)	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
<b>RIFID Teknolojili Beton</b> (Uygunoğlu ve Topçu, 2020)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

#### 4. Sonuçlar

Teknolojinin kanıtlanmış bir ticari kaydı bulunmaktadır. Bununla birlikte, malzeme tasarrufu sağlayan yapısal uygulamalar, daha karmaşık ve yeni tasarım yöntemleri gerektirir. Endüstriyel güveni artırmak ve daha yaygın bir şekilde benimsenmesini sağlamak için başarılı projelerin daha fazla geliştirilmesi ve kanıtlanması gerekmektedir. Önemli miktarda araştırma ve yenilik yapılmasına rağmen, bazı önemli sorular hala devam etmektedir. Teknolojik imkânların inşaatın sürdürülebilirliğini geliştirmeye dönüştürücü bir katkı sağlayacaktır. Derleme makale kapsamında, 3D yazıcı ile üretilen betonlar, nano teknolojik ultra yüksek dayanımlı betonlar, kendi kendini ısıtan ve soğutan betonlar (faz değiştiren betonlar), kendi kendini kür eden betonlar, kendi kendini tamir eden betonlar, atık agregalı betonlar, Mars betonu, ultra hafif betonlar, kendini temizleyen betonlar, bükülebilir beton, eko beton (yeşil beton), yarı saydam ve geçirgen beton ile nesnelere interneti (RIFID) teknolojili beton, çimento bulamacı emdirilmiş lifli betonlar (SIFCON) hakkında yeni gelişmeler incelenmiştir. Betonun hangi amaçla kullanılması gerektiği iyi bilinirse, istenilen özelliğe sahip betonların üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu incelemede

elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- 3D yazıcıların inşaat sektöründe kullanılması ile zaman ve işçilik masraflarında tasarruf sağlanabilir.
- Günümüz teknolojisinde ultra yüksek performanslı betonlar üretilmektedir.
- Nanoteknoloji ile üretilen nano boyutlu malzemelerin çimento esaslı kompozitlerde kullanılması ile kendini ısıtan ve kendini soğutan beton üretilir. Kendini ısıtan betonlar soğuk havalarda priz süresini hızlandırmak, kendini soğutan betonlar ise sıcak havalarda priz süresini kısaltmada kullanılabilir.
- Biyolojik betonlar üretimi ile betonun servis ömrü uzatılabilir.
- Atık agregaların beton dönüşümünde yeniden kullanılması ile ekonomik ve çevre sağlığına duyarlı yapılar inşa edilebilir.
- Bilim insanlarının çalışmalarında kendini kürlen betonlar üzerine yoğunlaşması ile şantiye ortamındaki en büyük sorunlardan bir tanesi çözüme kavuşturulabilir.
- Yeni nesil kendini temizleyen betonlar ile gün ışığında betonlarda temiz bir görünüm elde edilebilir.
- Önceki çalışmalar Marsta beton üretilebileceğini göstermiştir.

- UHB' nin basınç dayanımı yaklaşık 10 MPa olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle UHB'lerde basınç dayanımlarının artırılmasına yönelik daha çok araştırmaların yapılması önerilmektedir.
- Esnek beton, çok çeşitli beton yapılar oluşturmak için kullanılmış ve heyecan verici yeni yapısal ve mimari olanaklar üretmiştir.
- Transparan betonlar mimarların estetik görünüm açısından vazgeçemediği özel bir beton türüdür.
- Geçirimli beton boşluklu bir beton türü olduğu için basınç dayanımı düşüktür. Bu nedenle taşıyıcı elemanlarda kullanılması uygun değildir.
- Ülkemizde yaşanan depremler, çipli beton uygulamasının doğru bir uygulama olduğunu kanıtlamıştır.

Bu çalışmada beton teknolojisindeki güncel gelişmeler genel hatlarıyla incelenmiştir. İnsanların ihtiyaçlarının sınırsız olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda yeni nesil betonların kullanılması zorunlu duruma gelmektedir. Ancak bu özel betonların da bazı dezavantajlarının bulunduğu gözlenmiştir. Bu nedenle gelişmekte olan bu teknolojik betonlar üzerine daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu makalede; Yazar1 ve Yazar2, literatür araştırması ve makalenin oluşturulmasına katkı sağlamışlardır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- ACI (308-213) R-13 (2022). Report on Internally Cured Concrete using Pre-Wetted Absorptive Lightweight Aggregate. American Concrete Institute.
- Alqahtani, F.K., Abotaleb, I.S., ElMenshawy, M. (2021). Life cycle cost analysis of lightweight green concrete utilizing recycled plastic aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40, 102670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102670>
- Althoeya, F., Zaidb, O., Arbilic M.M., Martínez-García, R., Alhamamia, A., Shahe, H.A., Yosri, A.M. (2023). Physical, strength, durability and microstructural analysis of self-healing concrete: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01730. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01730>
- Anjuma, T., Dongre, P., Misbah, F., Nanyam, V.P.S.N. (2017). Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. *Procedia Engineering*, 196, 228-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.194>

- Baduge, S.K., Navaratnam, S., Zidan, Y.A., McCormack, T., Nguyen, K., Mendis, P., Zhang, G., Aye, L. (2021). Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *Structures*, 29, 1597-609. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061>
- Balaguru, P., Kendzulak, J. (1986). Flexural behavior of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) made using condensed silica fume. *International Concrete*, 91, 1215-1230.
- Bashandy, A.A., Meleka, N.N., Hamad, M.M. (2017). Comparative study on the using of PEG and PAM as curing agents for self-curing concrete. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 8(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.20528/cjcr.2017.01.001>
- Bentz, D.P., Lura, P. Roberts, J.W. (2005). Mixture proportioning for internal curing. *Reprinted from the Concrete International*, 27(2), 35-40.
- Bentz, D.P., Weiss, W.J. (2011). Internal curing: A 2010 state-of-the-art review, U.S. Department of Commerce, *NISTIR 7765*. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7765>
- Bilek, V., Kersner, Z., Schmid, P., Mosler, T. (2002). The possibility of self-curing concrete. *Proceedings of the International Conference of Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, 51-60.
- Buswell, R., Soar, R., Gibb, A., Thorpe, A. (2007). Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224-231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>
- Canbaz, M., Ünivar, C. (2015). Lif ve çimento türünün SIFCON özelliklerine etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 400-404.
- Chahal, N., Siddique, R., Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 351-356. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>
- Chand, M.S.R., Giri, P.S.N.R., Kumar, P.R., Kumar, G.R., Raveena, C. (2016). Effect of self-curing chemicals in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 107, 356-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.018>
- Chinzorigt, G., Lim, M.K., Yu, M., Lee, H., Enkbold, O., Choi, D. (2020). Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO<sub>2</sub> treated

- recycled fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 136, 106062. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106062>
- Chu, S.H., Li, L.G., Kwan, A.K.H. (2021). Development of extrudable high strength fiber reinforced concrete incorporating nano calcium carbonate. *Additive Manufacturing*, 37, 101617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101617>
- Duan, Z., Singh, A., Xiao, J., Hou, S. (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Material of Journal*, 96, 448-454.
- Elansary, A.A., Ashmawy, M.M., Abdalla, H.A. (2021). Effect of recycled coarse aggregate on physical and mechanical properties of concrete. *Advances in Structural Engineering*, 24(3), 583-595. doi: <https://doi.org/10.1177/1369433220963792>
- El-Dieb, A.S. (2007). Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. *Construction and Building Materials*, 21, 1282-1287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.007>
- El-Dieb, A.S., El-Maaddawy, T. A. (2020). Performance of self-curing concrete as affected by different curing regimes. *Advances in Concrete Construction*, 9(1), 33-41. doi: <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.1.033>
- Elsener, B. (2005). Corrosion rate of steel in concrete-measurements beyond the Tafel law. *Corrosion Science*, 47, 3019-3033. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.021>
- Estarque, M. (2020). D'eficit habitacional e populaçao de rua crescentes desafiam gestao Bolsonaro. Erişim linki: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2018/11/deficit-habitacional-e-populacao-de-rua-crescentes-desafiam-nova-gestao>
- Fang, X.L., Xuan, D.X., Zhan, B.J., Li, W.F., Poon, C.S. (2021). A novel upcycling technique of recycled cement paste powder by a two-step carbonation process. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125192>
- Feng, J., Su, Y., Qian, C. (2019). Couple defect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, 228, 116-810. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116810>
- Florida, R., Schneider, B. (2018). The Global Housing Crisis. Erişim linki: <https://www.citylab.com/equity/2018/04/the-global-housingcrisis/ 557639/>
- Ghale Noee, A., Nasiri Rajabli, J. (2023). The effect of nano-silica powder on mechanical and non-mechanical characteristics of self-consolidating concrete (SCC) and its impact on environment protection. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 8, 166. doi: <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01128-3>
- Ghiasvand, H., Bastami, M., Farokhzad, R. (2022). Enhancing the internal curing process of self-compacting concrete containing lightweight aggregate and chemical additives. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-19. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2026824>
- Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M., Poon, C.S: (2016). Influence of steam curing on the pore structures and mechanical properties of fly-ash high performance concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 71, 77-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.010>
- Gopalakrishnan, R., Nithyanantham, S. (2020). Effect of ZnO Nanoparticles on cement mortar for enhancing the physico-chemical, mechanical and related properties. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 12(3), 348-355. doi: <https://doi.org/10.1166/ asem.2020.2505>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete-a new processing route for architects and builders, *Mater Des.*, 100, 102-109.
- He, B., Gao, Y., Qu, L., Duan, K., Zhou, W., Pei, G. (2019). Characteristics analysis of self-luminescent cement-based composite materials with self-cleaning effect. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1169-1183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.291>
- Henk, M. Jonkers, A. (2010). Bacteria mediated remediation of concrete structures. 2nd International Symposium on Service Life Design for structures, e-ISBN: 978-2-35158-097-4 830-840.
- Hocaoglu, İ. (2022). Investigation of the effect of current in zeolite-graphene oxide additives of mortar and development of a novel method for determining the setting time. *Journal of Building Engineering*, 46, 103803. doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103803>
- Hocaoglu, I. (2021). Self-heating mortars with using graphene oxide and increasing CSH gel formation

- with the direct current application. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 20(3), 559-575. doi: <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.3.559>
- Hocaoğlu, İ. (2023). Grafen oksit katkılı yeni nesil harçlarda dozaj ve doğru akım şiddetinin etkilerinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38 (1), 421-434. doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.940271>
- <https://malzemebilimi.net/cimentoicermeyenbukulebilir-beton-uretildi.html>, 27 Temmuz 2023.
- <https://precast.org/2020/08/selfcleaningconcrete/#:~:text=Titanium%20dioxide%20activates%20in%20the,pollutants%20on%20the%20concrete%20surface>
- <https://theconstructor.org/concrete/flexiblebendable-concrete-composition-application/36008/> 28 Temmuz 2023.
- <https://www.ekoyapidergisi.org/alternatif-malzemeler-yari-saydam-beton-transparan-beton>, 9 Şubat 2022.
- <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-make-recycled-concrete-aggregate-and-what-is-it-usedfor.html>, 1 Ağustos, 2023.
- <https://www.specifyconcrete.org/blog/eco-friendly-alternatives-to-traditional-concrete>, 28 Temmuz 2023.
- <https://www.techinside.com/bukulebilir-beton-gelistirdi/>
- <https://www.zekiyildirim.com.tr/ebis-elektronik-beton-izleme-sistemi-nedir-ciqli-beton-nedir>, 28 Temmuz 2023.
- JiETING, X., Xiao, Q., Zhenying, H., Yongkang, L., Ben, L., Zhengzhuan, X. (2022). Effect of superabsorbent polymer (SAP) internal curing agent on carbonation resistance and hydration performance of cement concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 3485373, 1-13. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/3485373>
- Johann, S., Strangfeld, C., Müller, M., Mieller, B., Bartholmai, M. (2017). RFID sensor systems embedded in concrete- requirements for long-term operation. *Materials Today: Proceedings*, 4, 5827-5832. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.053>
- Juergen, H. (2007). A new system for translucent concrete-Application Potentials. *Proceedings*, 51, 28-29.
- Kamal, M.M., Safan, M.A., Bashandy, A.A., Khalil, A.M. (2018). Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 16, 79-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.012>
- Kaupilla, I. (2022). 3D concrete printing – The ultimate guide, updated Feb 16, 2022, Erişim adresi: <https://all3dp.com/1/3d-concrete-printing-guide>
- Kazemian, F., Rooholamini, H., Hassani, A. (2019). Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 209, 690-700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.179>
- Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Wu, Y.F., Patnaikuni, I., Zhou, Y.W., Xing, F. (2020). Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. *Construction and Building Materials*, 264, 120284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120284>
- Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A. Gibb, A.G.F., Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high performance printing concrete, *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558-566.
- Lee, Y.S., Park, W. (2018). Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 3059-3070. doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8830-y>
- Li, V.C., Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.10.207>
- Li, X., Korayem, A.H., Li, C., Liu, Y., He, H., Sanjayan, J.G., Duan, W.H. (2016). Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: a study of dispersion and compressive strength, *Construction and Building Materials*, 123, 327-335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.022>
- Likes, L., Markandeya, A., Haider, M.M., Bollinger, D., McCloy, J.S., Nassiri, S. (2022). Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132651. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651>
- Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Autom Constr.*, 21, 262-268.

- Lokeshwari, M., Pavan, B.R., Bandakli, S.R., Tarun, P., Sachin, Kumar, V. (2021). A review on self-curing concrete. *Materials today: Proceedings*, 43(2), 2259-2264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.859>
- Losonczy, A. (2010). Translucent building block and a method for manufacturing The same. *US Patent Application Publication*, America.
- Martinez-Garcia, R., Rojas, M.I.S., Jagadesh, P., Lopez-Gayarre, F., Moran-del-Pozo, J.M., Juan-Valdes, A. (2022). Effect of pores on the mechanical and durability properties on high strength recycled fine aggregate mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01050. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01050>
- Mazari, M., Aval, S.F., Rodriguez-Nikl, T. (2020). Evaluating the use of recycled and sustainable materials in self-consolidating concrete for underground infrastructure applications. University Transportation Center for Underground Transportation Infrastructure. California State University. Erişim adresi: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/59164>
- Mechtcherine, V., Bos, F.P., Perrot, A., Leal da Silva, W.R., Nerella, V.N., Fataei, S., Wolfs, R.;J.M., Sonebi, M., Roussel, N. (2020). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*, 132, 106037. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
- Mechtcherine, V., Nerella, V., Will, F., Näther, M., Otto, J., Krause, M. (2019). Large-scale digital concrete construction -CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3Dprinting. *Automation in Construction*, 107, 102933. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- Mehta, P.K. (1999). Advancements in concrete technology, *Point of View: Reflections About Technology Choices*, 69-76.
- Memon, S.A., Bekzhanova, Z., Murzakarimova, A. (2022). A Review of improvement of interfacial transition zone and adherent mortar in recycled concrete aggregate, *Buildings*, 12(10), 1600. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings12101600>
- Mousavi, M. A., Sadeghi-Nik, A., Bahari, A., Ashour, A., Khayat, K.H. (2022). Cement paste modified by nano-montmorillonite and carbon nanotubes. *ACI Materials Journal*, 119, 173-185. doi:<https://doi.org/10.14359/51734612>
- Mousavi, M.A., Sadeghi-Nik, A., Bahari, A., Jin, C., Ahmed, R., Ozbakkaloglu, T., Brito, J. (2021). Strength optimization of cementitious composites reinforced by carbon nanotubes and titania nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 303, 124510. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124510>
- Nachiar, S., Sekar, A., Sarjune, N.A., Kumaresan, M. (2023). Effect of steel fiber in SIFCON using GGBS as binder replacement, *Materials Today: Proceedings*, 93, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.281>
- Nano-particles. (2023). Erişim adresi: <https://nanografi.com/popular-products/>
- Neeladharan, C., Anbarasan, M., Sathish, P. (2018) Experimental investigation on bendable concrete by using admixtures. *Suraj Punj Journal for Multidisciplinary Research*, 8, 11, 69-78.
- Nielsen, C.V., Glavind, M. (2007). Danish experiences with a decade of green concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 3-12.
- Nik, A.S., Bahari, A. (2011). Nano-particles in concrete and cement mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, (110-116), 3853-3855. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.3853>
- Ohemeng, E.A., Ekolu, S.O. (2020). Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00450. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00450>
- Pacheco, J., Brito, J., Chastre, C., Evangelista, L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 201, 110-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>
- Pacheco-Torgal, F.P., Labrincha, J.A. (2012). The future of construction materials research and the seventh un millennium development goal: A few insights. *Construction and Building Materials*, 40, 729-737. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.007>
- Pangdaeng, S., Phoo-Ngernkham, T., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials and Design*, 53, 269-274. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.018>
- Patil, H.S., Raijiwala, D.B., Prashant, H., Vijay, B. (2008). Bacterial concrete-a self-healing concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*, 3(12), 1719.

- Qin, L., Gao, X.J. (2019). Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation. *Waste Management*, 89, 254-264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.018>
- Reches, Y. (2019). Concrete on Mars: Options, challenges, and solutions for binder-based construction on the Red Planet. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103349. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103349>
- Resmi Gazete, 4708 sayılı yapı denetimi hakkında kanun kapsamında denetimi yürütülen yapılara ait taze betonun numune alınması, deneylerinin yapılması, raporlanması süreçlerinin izlenmesi ve denetlenmesine dair tebliğ, Sayı 30629, Aralık 18, 2018.
- Sağlam, R. N., Ulaş, M. A., Alyamaç, K.E. (2022). Hafif beton üretimi için gerekli olan hafif agrega miktarının yapay sinir ağı ile tahmin edilmesi. *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(2), 889-898. doi: <https://doi.org/10.35234/fumbd.1133877>
- Samani, A.K., Attart, M.M. (2014). Lateral strain model for concrete under compression. *ACI Structural Journal*, 44-453. doi: <https://doi.org/10.14359.51686532>
- Sanchez, F., Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in Concrete-A Review. *Construction and Building Materials*, 24, 2060-2071. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
- Sasanipour, H., Aslani, F. (2020). Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>
- Schutter, G.D., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G., Agusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete-technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- Seifan, M., Mendoza, S., Berenjian, A. (2022). Effect of nano and micro iron oxide particles on the workability, strength and absorption rate of cement mortar containing fly ash. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26, 3898-3912. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1824822>
- Servatmand, A., Şimşek O. (2018). Yüksek performanslı harç üretiminde optimum nano malzeme oranlarının belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(2), 327-332.
- Shah, C.R., Jadhav, R.A., Patil, S.S., Agrawal, A.C., Patil, S.N., Sawant, K.P. (2017). Rainwater harvesting and reducing water logging problem by using permeable concrete, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 4, 150-154.
- Shanghai opens world's longest 3D-printed concrete bridge, 2019, Erişim adresi: <https://edition.cnn.com/style/article/shanghai-3d-printed-bridge-scli-intl/index.html>
- Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L., Ye, J. (2015). Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of Cleaner Production*, 87, 762-765. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.014>
- Song, H.W., Saraswathy, V. (2007). Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - a review. *Intern. Journal of Electrochemical Science*, 2: 1-28.
- Spiesz, P.R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete - from laboratory research to field trials. H. Justnes, & H. Braarud (Eds.), *Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso*, 1-10.
- Spiesz, P.R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete - from laboratory research to field trials. In H. Justnes, & H. Braarud (Eds.), *Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso 2017*, 1-10.
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment, *Procedia Engineering*, 95, 2014, 305-320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>
- Sun, C., Chen, L.L., Xiao, J.Z., Singh, A., Zeng, J.H. (2021). Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar, *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105561. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>
- Tang, Q., Ma, Z.M., Wu, H.X., Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103807. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>
- Topçu, İ.B. (1997). Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(12), 1817-1823. doi:[https://doi.org/10.1016/S00088846\(97\)00190-7](https://doi.org/10.1016/S00088846(97)00190-7)

- Topçu, İ.B. (1998). Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1988, İstanbul.
- Topçu, İ.B., Akkan, E., Uygunoğlu, T. (2020). Self-Cleaning Concretes: An Overview. *Cement Based Composites*, 2, 6-11. doi: <https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.002>
- Topçu, İ.B., Günçan, N.F. (1995). Using waste concrete as aggregates. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1385-1390. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00131-U)
- Topçu, İ.B., Hocaoğlu, İ., Kara, İ. (2023). Ultra Hafif Betonda Güncel Gelişmeler. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15 (2), 689-703. doi: <https://doi.org/10.29137/umagd.1286178>
- Topçu, İ.B., Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete, *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 34-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.052>
- Topçu, İ.B., Şengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307-1312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, 42(12), 4108-4116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.024>
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2016). Saydam Betonların Özellikleri Üzerine Bir İnceleme, *Teknik Dergi*, 7469-7475.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). 18 Mart 2018 tarihli ve 30364 sayılı mükerrer Resmi Gazete, Afet ve Acil Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Ünal, S., Canbaz, M. (2022). Effect of industrial wastes on self-cleaning properties of concrete containing anatase-TiO<sub>2</sub>. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 21(2), 493-505. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.3.493>
- Uygunoğlu T., Kılçık F.M., Topçu İ.B. (2021). Nesnelerin internetinin (IoT) inşaat mühendisliğindeki rolü: gömülü sensör kullanım. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(3), 390-399. doi: <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.948567>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B. (2020). The role of internet of things (IoT) in civil engineering: RFID Applications. *International Journal of 3D Printing Technologies*
- Digital Industry, 4(3), 270-277. Erişim Linki: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B. (2021). Nesnelerin interneti (IoT) tabanlı kendini kürleyen akıllı beton üretimi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 245-253. doi: <https://doi.org/10.31202/ecjse.831009>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B., Çelik, A.G. (2014). Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 84, 691-700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.019>
- Vijay, K., Murmu, M., Deo, S.V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 152, 1008-1014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>
- Wan, L., Wendner, R., Cusatis, G. (2016). A novel material for insitu construction on Mars: experiments and numerical simulations. *Construction and Building Materials*, 120, 222-231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.046>
- Water Mass Map from Neutron Spectrometer, National Aeronautics and Space Administration, 2008.
- Weilandt, A., Grohmann, M., Bollinger, K., Wagner, M. (2009). *Rolex learning center in Lausanne: from conceptual design to execution*, Symp. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings, Italy.
- Yalçinkaya, Ç., Beglarigale, A., Yazıcı, H., Yiğiter. H. (2013). Yüksek sıcaklığın SIFCON'un direncine etkisi, THBB Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Bildirileri, İstanbul, Türkiye.
- Yang, F., Yao, Y., Wang, X., Wei, J., Feng, Z. (2022). Preparation of recycled and multi-recycled coarse aggregates concrete with the vibration mixing process. *Buildings*, 12, 1369. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12091369>
- Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 61, 18-28. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012)
- Zhang, D.S., Zhang, S.X., Huang, B.W., Yang, Q.N., Li, J.B. (2022). Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of recycled concrete powder from construction and demolition waste, *Jour. of Building Engineering*, 61, 105295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105295>

## A BRIEF OVERVIEW TO SOLID WASTE TREATMENT & RECENT PRACTICE OF TURKEY

Haldun KURAMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi University, Mining Engineering Department, Eskişehir/TURKEY

ORCID No : <http://orcid.org/0000000227738326>

Keywords	Abstract
Solid waste Sustainability Waste treatment Municipal solid waste	<p>High rates of energy and goods consumption, combined with increasing population growth and high living standards, lead to the ever-increasing production of solid waste. The amount of solid waste generated today has reached a level that poses serious threats to the environment and the sustainable management of the country's economies. Although action plans are being prepared and implemented by countries, unions and institutions for the environmentally friendly and sustainable management of solid waste, it is seen that the threat still exists for the near future. Within the scope of solid waste, management of household waste is undoubtedly one of the most important issues today. The MSW EU average for 2021 reached 530 million tons. Similarly, a total of 104.8 million tons of waste was generated in Turkey in 2020, 32.3 million tons of which were domestic waste. Although, today, the most common method of solid waste control globally is storage in open or controlled landfills, it is seen that Thermal conversion, MTB or Liquefaction applications, which enable energy production especially within the cyclical economy and production model, are increasingly increasing. The aim of this compilation study, in which global and country-based statistics are briefly presented, is to raise awareness of the increasing threat.</p>

### KATI ATIK ARITIMINA KISA BİR BAKIŞ VE TÜRKİYE'DEKİ GÜNCEL UYGULAMALAR

Anahtar Kelimeler	Öz
Katı atık Sürdürülebilirlik Atık arıtımı Evsel katı atık	<p>Yüksek orandaki enerji ve mal tüketimi, artan nüfus artışı ve yüksek yaşam standartları ile birleşince, katı atık üretiminin sürekli artmasına yol açmaktadır. Günümüzde üretilen katı atık miktarı, çevre ve ülke ekonomilerinin sürdürülebilir yönetimi açısından ciddi tehdit oluşturacak düzeye ulaşmıştır. Katı atıkların çevre dostu ve sürdürülebilir yönetimine yönelik ülkeler, birlikler ve kurumlar tarafından eylem planları hazırlanıp uygulanıyor olsa da yakın gelecek için tehdit hala devam etmektedir. Katı atık kapsamında evsel atıkların yönetimi şüphesiz günümüzün en önemli konularından biridir. 2021 yılı MSW AB ortalaması 530 milyon tona ulaşmıştır. Benzer şekilde Türkiye'de de 2020 yılında 32,3 milyon tonu evsel atık olmak üzere toplam 104,8 milyon ton atık üretilmiştir. Günümüzde katı atık kontrolünün dünya genelinde en yaygın yöntemi açık veya kontrollü depolama alanlarında depolama olmasına rağmen, özellikle döngüsel ekonomi ve üretim modeli kapsamında enerji üretimine olanak sağlayan Termal dönüşüm, MTB veya Sıvılaştırma uygulamalarının giderek arttığı görülmektedir. Küresel ve ülke bazlı istatistiklerin kısaca sunulduğu bu derleme çalışmasının amacı artan tehdit konusunda farkındalık yaratmaktır.</p>

Derleme Makale

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 11.10.2023

: 15.11.2023

Review Article

Submission Date

Accepted Date

: 11.10.2023

: 15.11.2023

\* Sorumlu yazar: [hkurama@ogu.edu.tr](mailto:hkurama@ogu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1374306>

### 1. Introduction

Solid waste (SW) generation together with industrial revolutions and increasing urbanization is not a new concept. However, in recent years, the increasing demand due to the increasing global population and high living standards has led to more and more

problems regarding the harmful effects of these wastes on the environment and the complexity of their management. Unless it is effectively disposed of or recycled, threats to the environment and economy are increasing. According to statistical evaluations, the world population is estimated to increase to 8 billion in 2025 and 9.3 billion in 2050. The fact that a large part of



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



this population lives in urban areas gives preliminary information about the future burden of municipal solid waste, MSW (Kaza et al., 2018). Rising energy prices and increasing load on treatment facilities are also the factors to be taken into consideration. Another factor to consider is the increasing use of natural resources. Global resource use has nearly quadrupled in the last 50 years. Considering that natural resources are limited, it requires the use of production methods that will ensure efficient use within the scope of the "green economy" (less air pollution, food security, water scarcity).

In general terms, solid waste can be defined as a non-liquid, insoluble material. However, in this definition a wide range of materials such as domestic, sanitary, commercial, institutional, catering, biomedical and e-waste can be cited. Therefore from past to present, institutions, countries and unions have created and implemented many legislations, regulations, laws and action plans for definition, classification and prevention of the SW. An example of this is the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), passed in the United States in 1976. In this law, "solid waste" is defined as industrial (mining, metallurgy, agriculture, water treatment plants, etc.) or social activities (garbage). Although hazardous wastes are among the materials that meet the definition of solid waste, detailed regulations have been developed to determine which materials will be considered solid, industrial or hazardous waste due to their special emphasis (Criteria for the Definition of Solid Waste and Solid and Hazardous Waste Exclusions, 2023). Later, many classifications of waste were developed depending on their source (domestic/industrial), composition (organic/inorganic) and suitability for recycling or reuse. Broad classification of SW and developments on this subject can be found in above web site. Effective waste management is undoubtedly an important concept in reducing the amount of SW or its impact on the environment. Today, the areas where solid waste management (SWM) is under the most pressure are urban areas where high population density is concentrated and, as a result, garbage generation is observed. Although the role of SWM in achieving sustainable development has been clearly emphasized in many action plans, it continues to dominate as an important social and governance issue. In this context, strategic target models (sustainable development strategy goals, SDG) created by the United Nations (UN) such as access to clean water (SDG6), sustainable and inclusive urbanization (SDG11), control of climate change (SDG13), land protection (SDG15) and sustainable consumption and production (SDG11/SDG12) is important. These models can be given as supporting regulations that promote the reduction of consumption of limited resources and a circular urban economy (Abubakar et al., 2022). Current information on this subject can be found in the 2023

Global Sustainability report published by the UN available at <https://sdgs.un.org/goals>.

As it mentioned above, with increasing living standards (especially for developed and developing countries), the advancement of technology, combined with consumers' desire to have more personal devices and population growth around the world, not only leads to an increase in waste amount, but also increases the complexity of the collection and pre-classification of waste. This situation requires special attention, precautions and treatment methods for municipal solid waste, MSW (Chen et al., 2020). The increase in the average amount of MSW measured per capita in the EU over just three years (from 2018 to 2021) can be given as one of the indicators showing the importance of this issue. The MSW EU average for 2021 reached 530 million tons. The average amount produced by each of the approximately 448 million people living in the European Union has increased from 477 kg per year in 2015 to 1,180 kg per year in 2021 (Waste Management in the EU: Infographic with Facts and Figure, 2023). This clearly demonstrates the difficulty of MSW control. In the recent article published by Meng et al. 2020, "Compositional Bayesian Regression" analyzes were conducted to predict, past and future waste generation and its impacts on the environment. The authors reported that although the share of waste treated in landfills will decrease from 28% to 18% in 2050 and more recycling, composting and energy recovery attempts will expect to increase, the burdens on environment will keep their importance. It is suggested that current projections will not meet the UN goals for waste reduction. New regulations should be made in this regard. In this context, for the transition from the linear economic model to the circular model and the reuse of waste generated within this scope or the use of secondary metal in production cycles, the evaluation of the latest experiences gained in classification, pre-enrichment and enrichment processes (process development, clean production), including hydrometallurgy, which is generally used for the enrichment of primary ores, for the reuse of solid waste will have positive effects on both reducing the amount of waste, sustainable management of natural resources and less energy use.

### 1.1. Linear versus Circular Economy model

The linear economy model (Figure 1-a) is a model developed in the 30 years following World War II (Aggeri, 2021). However, during this period, possible limitations in the future projections of rapidly growing economies in accessing raw material resources, increasing raw material prices, increasing production, consumption and the large increases in waste amounts have created high pressure on decision makers, practitioners and the entire public. This situation led to the beginning of research on the development of new economic models since the 1970s. As seen in Figure 1-b,

the circular economy is based on the idea of continuously recycling and reusing raw materials after use, rather than recreating them from limited resources. Compared to linear production/economy, the circular economy model uses a more efficient route and green production rout that allows resources to be created over time in a way that ensures their long-term use.

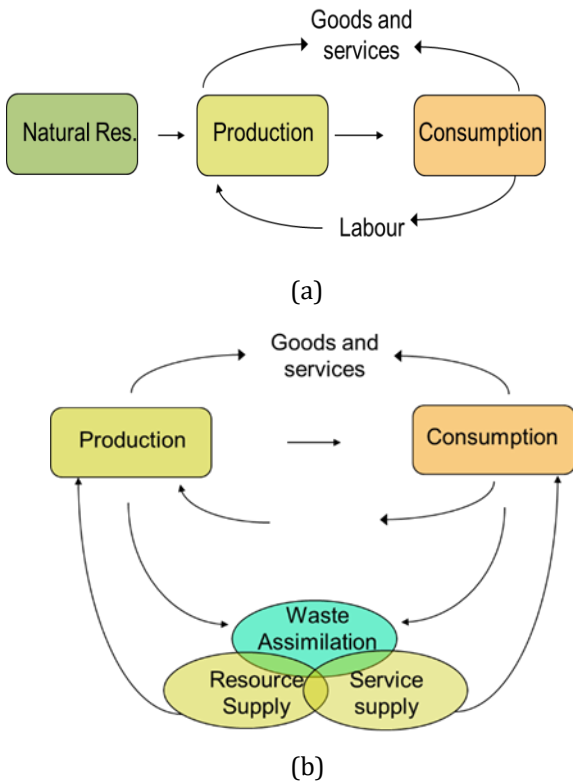


Figure 1. Schematic view of linear (a) and circular economy models (b),

The Strategy for the “Sustainable Use of Natural Resources” can be defined as "developing a framework that allows the sustainable use of input resources in an environmentally friendly manner" while maintaining the 3% economic growth rate targeted in the Lisbon strategy. The concept of 'Sustainability', which we use frequently today, dates back less than 30 years. It was first put forward in 1987 in the famous Brundtland Report (titled 'Our Common Future'), prepared by the UN with the contribution of many countries. In this report, sustainable development is defined as 'meeting the needs of today without compromising the ability of future generations to meet their own needs'.

As can be seen, although production/consumption waste has been on the agenda as a problem for many countries since 1798, it is important to underline the need to manage resources more efficiently for the first time on a global scale (Report of the World Commission on Environment and Development Our Common Future, United Nations, 1987).

When the linear economic model and the circular model are compared in terms of step plan, the linear model is in the form of "Take-make-dispose", while the circular model targets "Reduce-reuse-recycle". Both models can be considered "Eco-efficiency". However, while the linear model includes "short term from purchase to sales", the cyclical model covers the long term consisting of many sub-cycles. The benefits of circular economy can be found at Table1.

Table 1. Benefits of circular economy

Economic and social benefits		Environmental benefits
Resource/raw material savings		Reduction of greenhouse gas emissions,
Economic growth		Decrease in global climate temperature
Increase on employment		Ecosystem conservation
Increased consumer awareness		Protection of nature reserves and resources
Sustainable innovations		

In this context, the first EU-SDS was accepted and released by the European Council in 2001. The overall aim of this SDS was defined as supporting and promoting actions that enable the EU to continuously improve both current and existing quality of life. Benefiting from environmental and social advantages as well as the innovation potential of the economy to future generations through the effective management of resources. Later, the EU Directives 2006/12 and revised version of 2008/98 on waste management has generated practical actions on the matter of waste regulations in landfill disposal. This regulation strongly recommends that preventing landfill disposal should be the first priority of waste management. It has also been recommended that promoting reuse and recycling is the best ecological option to improve both the protection of natural resources, human health, the environment and energy recovery. Landfilling not only takes up more and more valuable land space, but also causes the release of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) into the atmosphere, the leaching of chemicals and pesticides into the soil, resulting in the contamination of water, soil and groundwater. With this regulation, the main long-term obligations expected from producers regarding waste management are to revise their SWM systems to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and increase energy recovery. In this context, developing waste prevention programs through separate collection of bio-waste is another recommended practice.

A report released by European Technology Platform on Sustainable Mineral Resources (ETP SMR), Strategic Research Agenda-March 2009, was also support the above statement and advised that the “Thematic Strategy” on the sustainable use of natural resources should be based on three pillars to manage the implementing of the strategy in securing access to raw

materials (Fourth status report on European technology platforms harvesting the potential, 2009; Being wise with waste – The EU's approach to waste management, 2010). These are;

- Open access to raw materials in world markets,
- Establishing frameworks for sustainable raw material supply within the EU
- Increasing natural resource efficiency and encouraging recycling.

Commission Decision 2011/753/EU and Commission Decision (EU) 2019/1004. The targets have been updated as follows;

- By 2020, increase the use of reusable materials in MSW (such as paper, metal, plastic and glass) in production processes to at least 50% by weight,
- Preparing non-hazardous construction and demolition waste for reuse by 2020, and increasing the usage rate in different sectors to at least 70%,
- Increasing recycling rates for MSW to a minimum of 55%, 60% and 65% by weight by

2025, 2030 and 2035, respectively. (Sustainable Development Guidance on Municipal Waste Data Collection, 2016; Sustainable Development Guidance for the Compilation and Reporting of Data on Municipal Waste According to Commission Implementing Decisions, 2019 )

**1.2. Present Situation**

Today, an estimated 11.2 billion tons of solid waste are collected globally in every year. The increasing volume and complexity of waste, and the relatively low recycling/re-use rates that still continue in developing and underdeveloped countries, which negatively affect ecosystems and human health and pose a serious threat for the future projections (Solid Waste Management, 2023).

The latest statistics data’s published by the Organization for Economic Co-operation and Development, OECD for some countries is presented at Fig. 2. When the data’s are evaluated, it is seen that countries with high income produce more solid waste (OECD Stats, 2023).

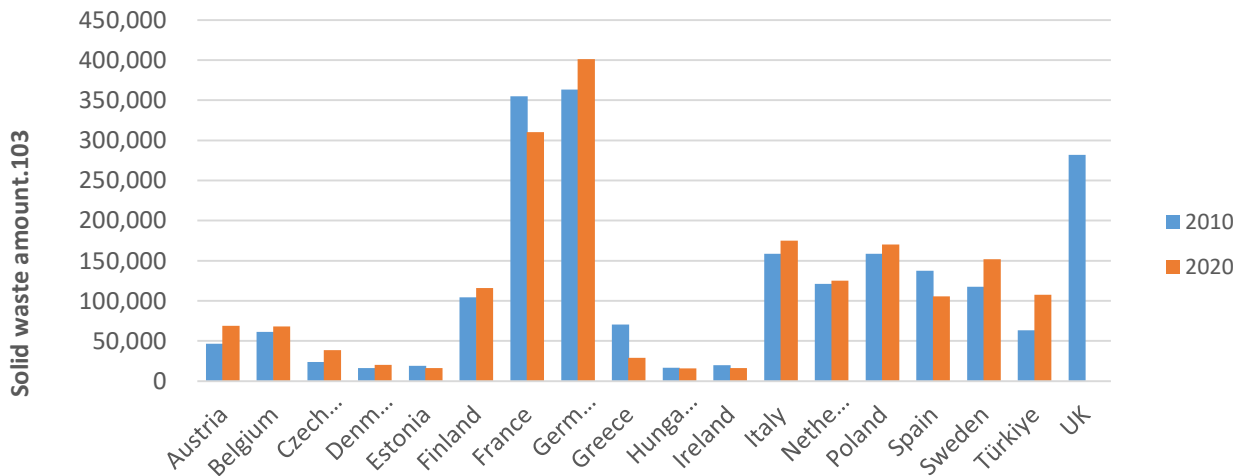
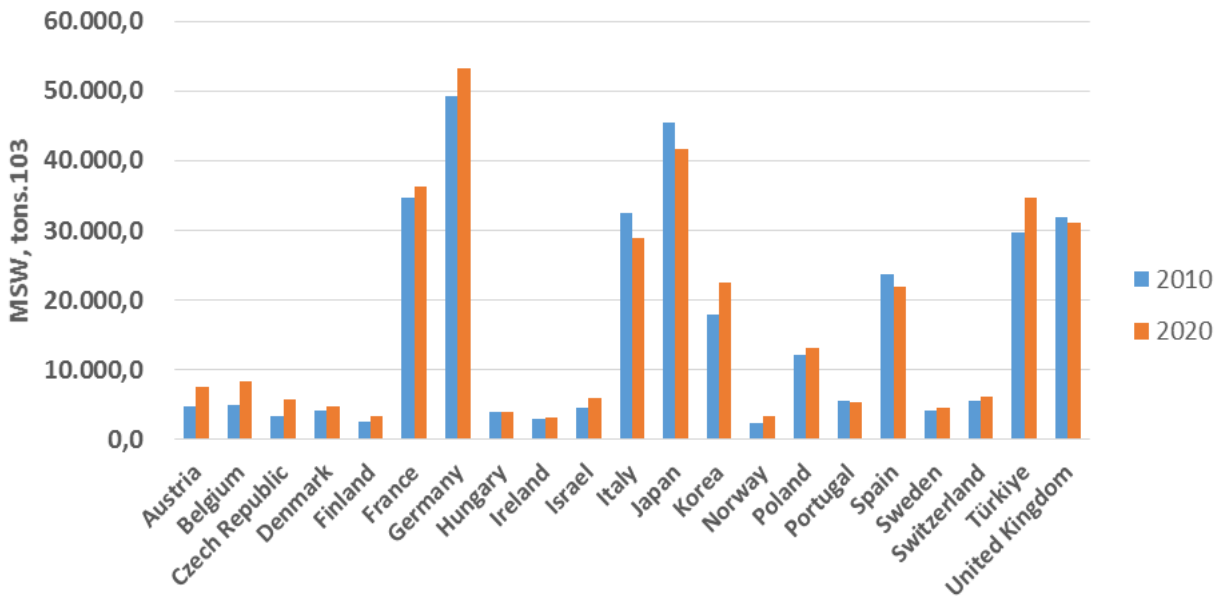


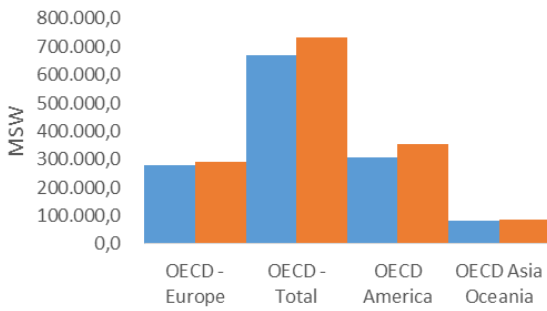
Figure 2. Total amount of SW’s generated by selected countries by years 2010 and 2020 (OECD Stats, 2023)

The latest report released by the World Bank for MSW also exhibits similarity with OECD (Figure 3). It was reported that as globally, approximately 2.01 billion tons of MSW is produced annually, and only 67 % of it is

managed safely, 33 % still creates environmental problems (kaza et al., 2018)



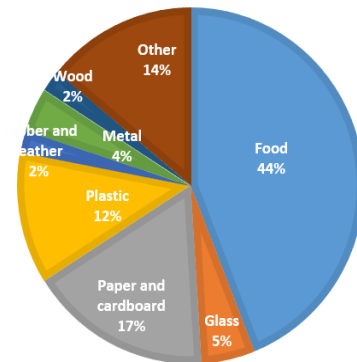
(a) Recyclable materials make up only 20 % of the waste stream (Fig.4-a).



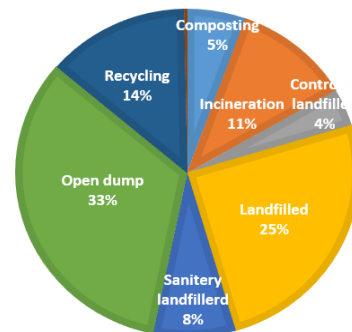
(b)

Figure 3. Total amount of MSW generated by countries (a) and unions (b) (Kaza et al., 2018).

These countries/unions try to balance this with the developments in the implementation of efficient collection and disposal techniques, however, considering that the problem is global, it necessitates that these countries should increase their responsibilities to include other regions. In this report it was also stated that the amount and the composition of waste varies according to income level and reflects various consumption patterns. Although they make up only 16% of the world's population, high-income countries produce approximately 34% of the world's waste, or 683 million tons. These countries produce relatively less organic waste (32% of total waste) and more dry waste that suitable for recycling, such as plastic, paper, cardboard, metal and glass (51% of total waste), while the wastes generated from middle or low-income countries are completely different, consisting of food (53%) and green waste (57%), respectively.



(a)



(b)

Figure 4. The shares of MSW contents (a) and the control methods (b) (Kaza et al., 2018).

As can be seen from Figure 4-b, the most preferred method for waste management worldwide is currently dumping or disposal in some form of landfill. Approximately 37% of waste is disposed of in some form of landfill, while 8% of this is stored in regular landfills with gas collection systems. Of the waste stored in open areas (about 31%), 19 % is recovered by recycling and composting, and 11 % is incinerated for final disposal. When these values are examined, the most striking point is that they once again clearly show the impact of income differences on the controlled disposal/stocking of waste. Applications that provide adequate waste disposal or treatment, such as controlled landfills, appear to be concentrated almost exclusively in high- and upper-middle-income countries. Another striking statistic is that 36% of landfill goes to recycling and composting, and 22 % goes to incineration, compared to 39 % for high-income countries. According to the 2021 statistical value, the proportion of MSW recycled or turned into compost in the EU has reached 49.6%. This corresponds to a 3.6 percent increase compared to 2017. Within the same framework, it is aimed to reduce the landfill rate to below 10 percent by 2035 and to increase the reuse/recycling rate to 60% by 2030.

On the other hand, within the scope of waste management, the EU also exports some of the waste collected within its own body. For 2021, EU's waste exports to non-EU countries reached 33 million tons. The majority of these exported waste mainly consists of ferrous and non-ferrous metal scrap as well as paper, plastic, textile and glass wastes. Approximately, 45% of these waste was sent to Turkey (14.7 million tons), followed by India (2.4 million tons), Egypt (1.9 million tons), Switzerland (1.7 million tons) and 1.5 million tons went to England. The share of ferrous metal waste (iron-steel) in total exports was 59% (19.5 million tons). Turkey was the main route in this export with 13.1 million tons (Waste management in the EU: infographic with facts and figures, 2023).

A brief assessment of EU waste management shows that on average a European produces around 5 tons of waste every year. Statistical data show that only 38% of this waste is recycled. As can be seen in Figure 5, composting practices for the recovery of precious metals from waste and energy production have improved greatly. However, material recycling for secondary metal use is still far from targets and below consumption rates.

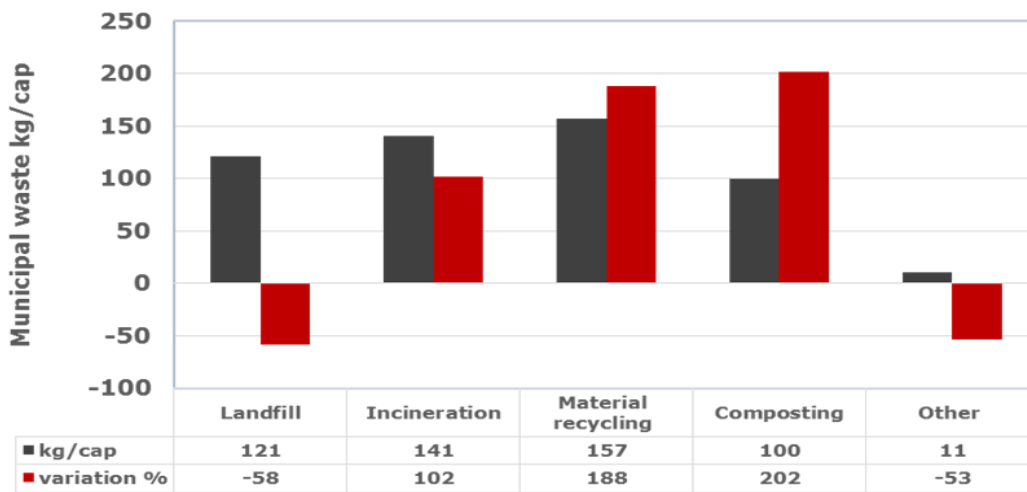


Figure 5. Evaluation practices of collected MSW waste (Waste management in the EU: infographic with facts and figures, 2023)

An overview of MSW waste globally, the importance of stockpiling techniques for controlling these wastes, and further information on landfill classifications can be found in the references that follow (Nanda and Berruti, 2021).

**2. Featured applications that serve for effective MSW management / Outstanding practices in service of effective MSW management**

An effective waste management system is a prominent issue in the transition to a circular economy, which was developed as an alternative to the linear economic

model defined as make-use-dispose. Today, the most common method of solid waste control globally is storage in open or controlled landfills. Although open landfilling is the simplest and least costly method, the use of controlled waste sites, which eliminate undesirable harmful effects on human and environmental health and allow the recovery of reusable/recyclable materials in waste, is increasingly becoming a method adopted by many countries. Classification, shredding and compaction operations are the supporting activities for this type of storage. Some applications are also supported by units that include the collection of leachate and gases. Although these

processes are positive in terms of reuse, what remains after this separation process is of great importance in terms of allowing the generation of electricity and thermoelectric energy from non-fossil sources and the use of thermal energy in an environmentally friendly manner in the residue consisting largely of organic and inert mineral fraction (Panepinto and Zanetti, 2021). Alternative methods, depending on the characteristics of the waste material, are given in the table to achieve a general improvement.

Table 2. Methods used instead of or in combination with controlled storage

Main	Process	Process outcomes
Thermal conversion	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasification</li> <li>Pyrolysis</li> <li>Combustion</li> </ul>	Lower quality SynG High quality SynG , oil Fuel gas Residues
MTB	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mechanical treatment</li> <li>Biological conversion Anaerobic digestion</li> </ul>	RDF Bio-gas
Liquefaction	Indirect liquefaction Methanation	Oil Bio-alcohol

A Mechanical Biological Treatment (MTB) system is basically a treatment method based on composting or anaerobic digestion. MTB is the most preferred application type by many countries as it allows the processing of commercial and industrial waste as well

as mixed domestic waste (Mechanical Biological Treatment, 2023).

The general application flow chart of this method is given in the Figure 6.

In this applications, "Mechanical treatment" refers to a mechanical sorting step, usually automated, where materials suitable for recycling are separated. Conveyors, industrial magnets, eddy current separators, drums and shredders are the most used devices for this process. In addition, some systems may include enrichment elements that are separated according to material density differences (gravity separation) and physicochemical surface properties differences (flotation). Additionally, MBT systems can alternatively produce waste-derived fuel (RDF), which consists of organic wastes with high calorific value and can be used in many areas from cement kilns to thermal power plants. Additionally, composting, instead of incineration, can be considered an environmentally acceptable way to help sustainably manage large amounts of organic waste by converting it into useful products such as fertilizer or soil conditioner. The basic criteria, applications and kinetics of the composting process can be found in the review article published by Onwosi et al., 2017. In general "Biological Treatment" means one of the following:

- Anaerobic digestion
- Composting
- Bio-drying

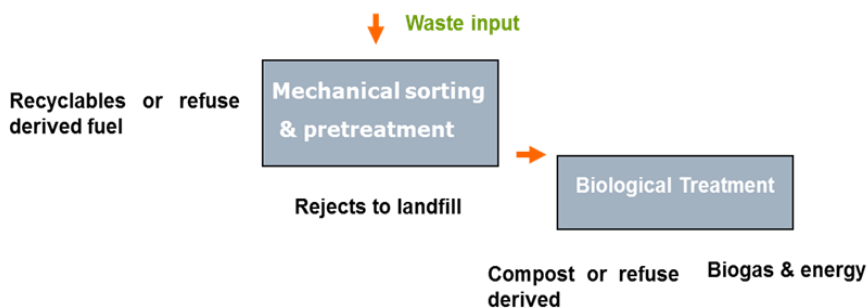


Figure 6. A schematic view of Mechanical biological treatment system

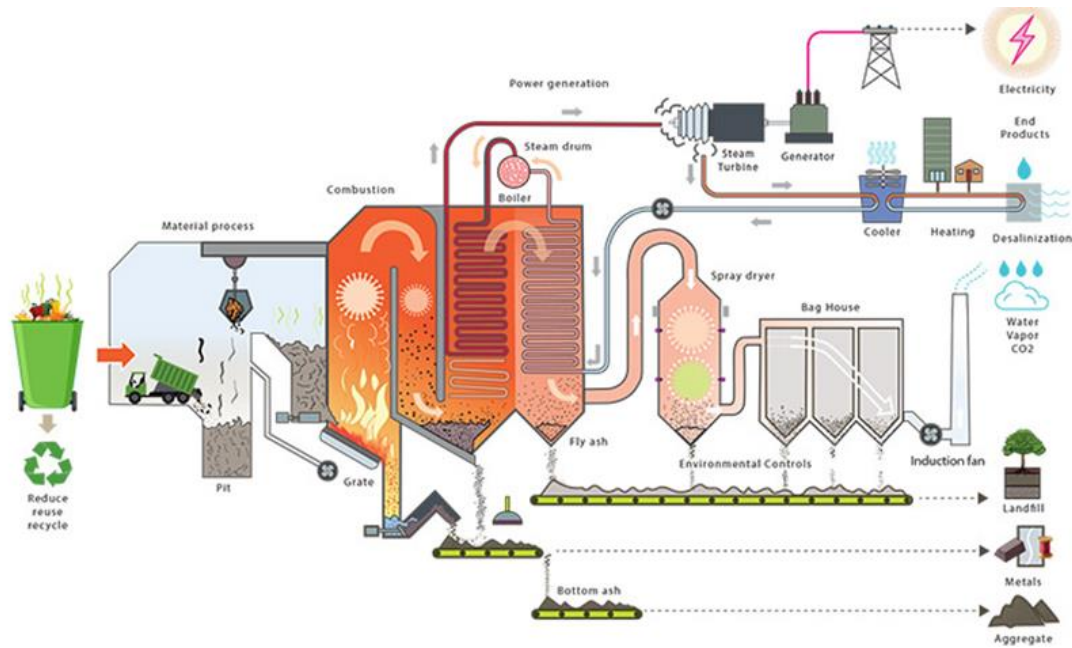


Figure 7. A typical flow-sheet of generating power from waste (waste to energy),

The possible products of this system can be given as follows;

- Biogas that can be use several systems
- Secondary metal, reusable paper, plastic, glass, etc. .
- An organic fertilizer and soil improver
- RDF
- Final safeable residual material

Waste-to-energy (WTE) plants are basically applications in which both domestic and industrial wastes are converted into heat and/or electrical energy. Although the most common application is incineration, pyrolysis and plasma gasification applications for generating electricity from MSW stand out as incineration techniques that have become widespread in recent years. In the incineration process, the main reaction is to burn the product obtained from the waste by contacting it with oxygen. The combustion process can be applied as stoichiometric combustion, excess air combustion and non-stoichiometric combustion.

The process is an exothermic reaction. While the heat generated during the combustion process allows the reaction to proceed, it can also be used to convert water into steam. This drives the turbine and electric generator (Figure 7).

Among thermal conversion processes, pyrolysis is one of the alternative processes that attract attention due to its various advantages such as flexibility in storage, transportation, turbines and different combustion devices. Basically, pyrolysis is similar to combustion, however in this way, decomposition is performed under inert condition in oxygen-deficient environment. The main output of the pyrolysis process is to produce usable high-value energy products instead of non-

renewable fossil fuels. Basically, depending on the product properties to be obtained, the pyrolysis process is classified into two types: slow (only heat and biochar) and fast pyrolysis (biochar and bio-oils) (Zaman et al., 2017). However, in recent years, attempts to obtain better quality products by using some catalysts in the conversion process have been continuing with great momentum.

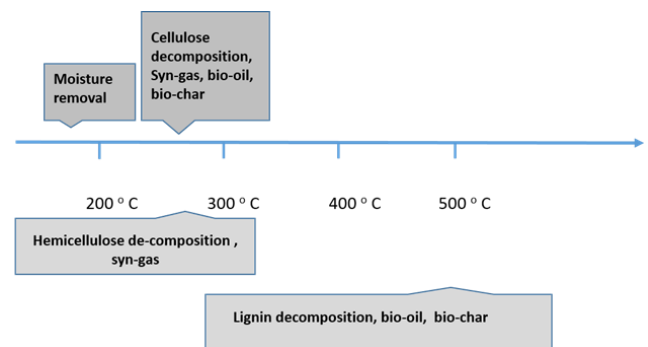


Figure 8. Decomposition reactions at different temperature

The plasma gasification process, in which the waste material is heated at a much higher temperature, differs from other WTE processes with this feature. This temperature is hot enough to break down the waste into its basic components.

- Fuel gas - producer gas or syngas
- Slag

Plasma gasification applications are still developing as a relatively new technology. Their biggest advantage is ability to produce more kilowatt hours of electricity per ton of MSW fed to the facility than incinerators. (Malinauskaite et al., 2017).

### 3. Waste Treatment Practice in Turkey

Turkey is one of the countries that has shown rapid economic growth in recent years. The annual GDP growth rate is 5% for 2021. However, this rapid growth also points to environmental challenges, intensive use of natural resources, waste production and an increase in energy demand. This situation clearly shows that in order for Turkey to continue its growth in the long term, it must switch to a cyclical growth model as part of the transition process (Technical Assistance for Assessment of Turkey’s Potential on Transition to Circular Economy, 2022).

Environmental protection actions were first addressed in national development programs starting from the 5th Development Plan covering the years 1985-1989. In the 11th Development Plan (2019-2023), it is addressed in a broad framework with additional protocols that make environmental benefits and sustainable environmental management even more important in parallel with increasing economic and social benefits. Nevertheless, as mentioned above, the increasing amount of SW in Turkey along with the increase in the level of production and consumption makes urban areas increasingly dependent on and at the same time suffering from landfills. The current Turkish waste management infrastructure is insufficient to meet the country’s needs, which necessitates the development of more efficient waste and resource management. In 2020, 226 million tons (Mt) of MSW was produced in the EU27. In 2020, 76% of municipal waste in the EU27 was recovered through composting/digestion (18%),

recycling (31%) and incineration (energy recovery) (27%), while 24% was landfilled (23%). and is recycled through incineration, (Without energy recovery) (1%). Countries such as Germany and Denmark have particularly increased their recycling practices, reaching recovery rates of 99 percent. On the other hand, Turkey sent 87% of the 32 million tons of MSW produced in the same year to landfill. According to Turkish Statistical Institute data TURKSTAT (Waste Statistics 2020). A total of 104.8 million tons of waste was generated in Turkey in 2020, 30.9 million tons of which was hazardous. The distribution and change of the total amount of waste by sectors for 2018 and 2020 is presented at Figure 9. As can be seen, the total amount of waste increased by 10.5% compared to 2018. The high rate of increase in the amount of hazardous waste, reaching approximately 49 % compared to 2018, shows serious threats to human health and environment are not far away if the same trend will continue. The increasing amount of waste observed in the mining sector in the last two years is seen as another source of concern. When compared to other sectors, the mining sector stands out from other sectors and attracts attention with the increase in the total amount of waste by 63 % and approximately 26 M tons of it being included in the hazardous waste class. This situation clearly shows that existing or new techniques within the sustainable production concept for the mining sector should be taken into consideration for both production and reuse, and production plans should be revised.

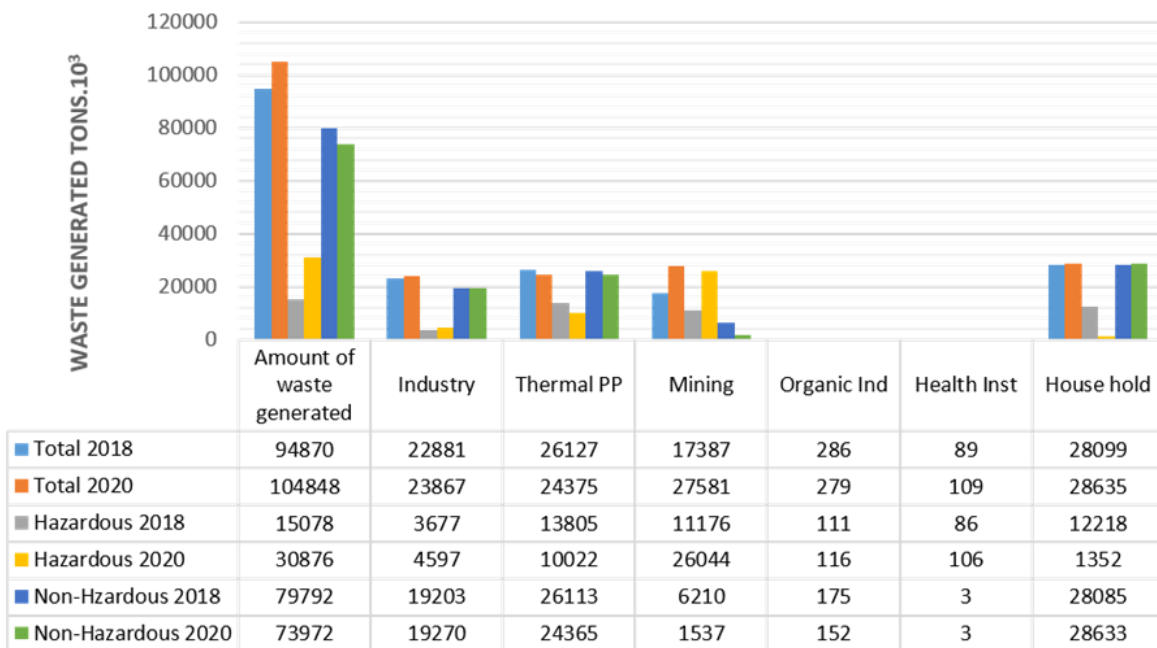
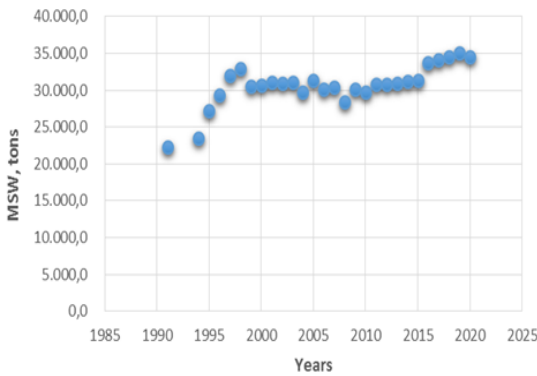
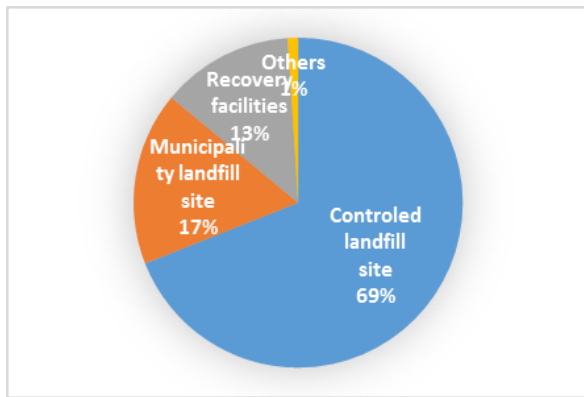


Figure 9. Distribution and change of the total amount of waste by sectors for 2018 and 2020 (Waste Statistics 2020)





(a)



(b)

Figure 10. Change and distribution and of the total amount of waste by sectors for 2018 and 2020 (Waste Statistics 2020)

For house hold wastes, the change is relatively stable (Fig 10-a). In 2020, a total of 32.3 million tons of municipal waste was collected by 1,387 municipalities. Apart from this, approximately 0.4% was disposed of through other methods such as open burning, burial and dumping into rivers/land. The MSW collection area characteristics and recovery shares produced wastes are given in the Figure 9-b.

The waste disposal and recovery facilities and the amounts processed are given in Table 3. When the table is examined, it is seen that although it is positive that the amount of MWS processed has reached 127400 tons in proportion to the increase in the facility, a large part of the collected waste is still stocked in controlled waste areas.

The change in waste amounts according to production sectors for 2018 and 2020, given in Table 4, indicated that larger shares in the distribution consist of basic and fabricated metal products, chemicals, and chemical products, basic pharmaceuticals, rubber and plastic and electronic waste, respectively. It is clear that increasing the precautions to reduce the amount of waste in these

sectors in practical applications will make significant contributions to reducing the total amount of industrial waste

Table 3. Waste disposal and recovery facilities in Turkey

	2018	2020	Total amount of waste treated tons
Waste disposal and recovery facilities	2223	2752	
Controlled landfill site	159	174	77762
Incineration plant	7	10	570
			Total 78333
Waste recovery facilities	2057	2568	
Composting plant	8	9	
Co-incineration plant	40	50	
Other recovery facilities	2009	2509	
			49067

The amounts of manufacturing industry waste by treatment methods, for 2018 and 2020 (tons) is presented at Table 5. Compared to 2018, the amount of waste generated increased by approximately 5% in 2020.

Table 4. Generated waste according the sectors

	2018 tons	2020 tons
Manufacturing Indy	22 881 144	23 867 886
Food beverage and tobacco	1 599 234	1 192 000
Textiles	614739	642514
Wood	455474	190157
Pulp and paper	806156	1 112 229
Manufacture of coke and refined petroleum product	49450	51582
Chemicals, chemical products, basic pharmaceutical, rubber and plastic	4 592 012	5 565 587
Non-metallic products	1 317 365	1 205 416
Basic and fabricated metal products	11 689 737	12 075 949
Electronics	1 607 510	1 588 996
Furniture and insulation	149468	243815

Approximately 57% of the waste produced is sent to licensed treatment facilities while 24% of total waste is sent to controlled land sites. When the composition of waste stored in controlled waste sites is examined, it is seen that it reach to 3 474 185 tons, up from 2 436 308 tons stated for 2018. This increase, which corresponds to approximately 42%, is remarkable when compared to the total increase.

### 3.1. Hazardous Wastes:

There is no doubt that the disposal of hazardous wastes without harming nature and human health is the most fundamental issue of waste management. The Basel Convention on "Control of Transboundary Movements and Disposal of Hazardous Wastes", which was adopted on 22 March 1989 and officially entered into force on 5 May 1992, is undoubtedly an important milestone for the sustainable management of HW's without harming the environment and human health (Basel Convention, 1992). In Turkey, the Basel Convention was accepted in 1989 and came into force in 1992. The main purpose of this contract is; to eliminate the dangers that may arise from the cross-border transportation, disposal and recycling of hazardous and other wastes. The transportation of waste from industrialized countries to developing countries is the most important element that the Convention focuses on (Waste Management in Turkey, 2007). In order to maintain compliance with both the requirements of the Basel Convention and the EU acquis and to establish international standards, important steps have been taken in this regard by publishing/modifying many acquis and implementation plans, with the work carried out with the contributions of relevant organizations. However, the disposal of HW often requires the use of special technologies.

The high costs of these technologies, in some cases, this results in being stockpiled in landfills along with other types of waste, despite legal sanctions. Following establishment of legal framework affords for implementation, various plants have been built and introduced to meet the demand for processing capacity.

Currently, there are 5 main HW treatment facility outlets in Turkey for the disposal of both own waste and off-site waste; these:

- İZAYDAŞ
- PETKİM
- TUPRAS
- ERDEMİR
- İSKEN

In these plants, İZAYDAS is the biggest HW disposal plant in Turkey with a capacity of 65,000 tons of controlled landfills and 35,000 tons of incineration. Other plants, such as PETKİM, have a capacity of 7,750 tons/year, TUPRAS (17,500 tons /year respectively. ERDEMİR and İSKEN have land-filling capacity of 6,084 tons/year, and 11,000 tons /year (Akkoyunlu et.al. 2017)

Table 5. Amounts of manufacturing industry waste by treatment methods, 2018, 2020 (tons)

	2018			2020		
	Total	Hazardous	Non-Hazardous	Total	Hazardous	Non-Hazardous
Amount of waste generated	22 881 164	3 667 320	10 203 824	23 867 866	4 597 274	19 270 593
Amount of waste by treatment methods						
Recovery within facility	2 100 077	776	2 099 300	1 677 695	12 324	1 665 371
Solid sent to licensed treatment facility	13 109 284	1 187 410	11 921 873	13 438 779	1 055 755	12 383 025
Used as filling material	93 038	-	93 038	97 535	-	97 555
Co-incinerated/incinerated	465 615	45 010	420 605	400 955	47 481	353 474
Collected by municipality/organized industrial zones	1 023 502	3 613	1 019 888	763 534	1 073	662 481
Sent to controlled land sites	4 794 790	2 436 308	2 358 482	5 776 936	3 474 185	2 302 751
Stored within the establishment	1 257 265	4 202	1 253 063	1 693 288	6 456	1 686 831
Disposed with other methods	37 575	-	37 575	19 124	-	19 124

**3.2. Used Batteries and Accumulators:**

Although there has been a rapid increase in Turkey in recent years, battery usage per capita in 2018 is below the European average (110 g/year) (Yeşiltepe and Sesen, 2019). Legislation on “Battery Use and Collection” is controlled within the scope of the Regulation on the Control and Control of Waste Batteries (Regulation, 2019). According to 2018 statistical data, battery usage in Turkey is 110 grams/person per year (Eurostat 2018, Directive, 2019). However, it is clear that the consumption rate will increase, especially in recent years, with the increase in the use of other technological equipment, especially in the electric automotive industry, and the contribution of new initiatives initiated to meet the battery demand from domestic sources. This situation indicates the need for a more stringent and effective recycling action plan. Currently, the legislation on battery use and collection is regulated by the Regulation on the Control of Waste Batteries and Accumulators (Regulation, 2019).

On the other hand, the annual amount of accumulators put on the market in Turkey is 74,000 tons. The amount

of waste batteries collected is approximately 67% of the batteries put on the market.

**3.3 End of Life Tyres (ELT)**

One of the sectors that has shown rapid production and consumption growth in recent years is the rubber industry. These materials, whose natural disposal is quite limited due to their structural characteristics after use, are an important environmental problem for both municipalities and governments. Used tires, which are approximately 14,106 tons/year, constitute approximately 2% of the world's total solid waste production. In 2018, 27,269 tons of end-of-life tires were collected in Turkey.

ELT management in Turkey is protected by two main legal regulations. Environmental Law and Regulation on the Control of End-of-Life Tires (RCELT). These arrangements are summarized in Figure 11. In this context, relevant facilities are required to obtain a recycling license in accordance with the provisions of the regulation.

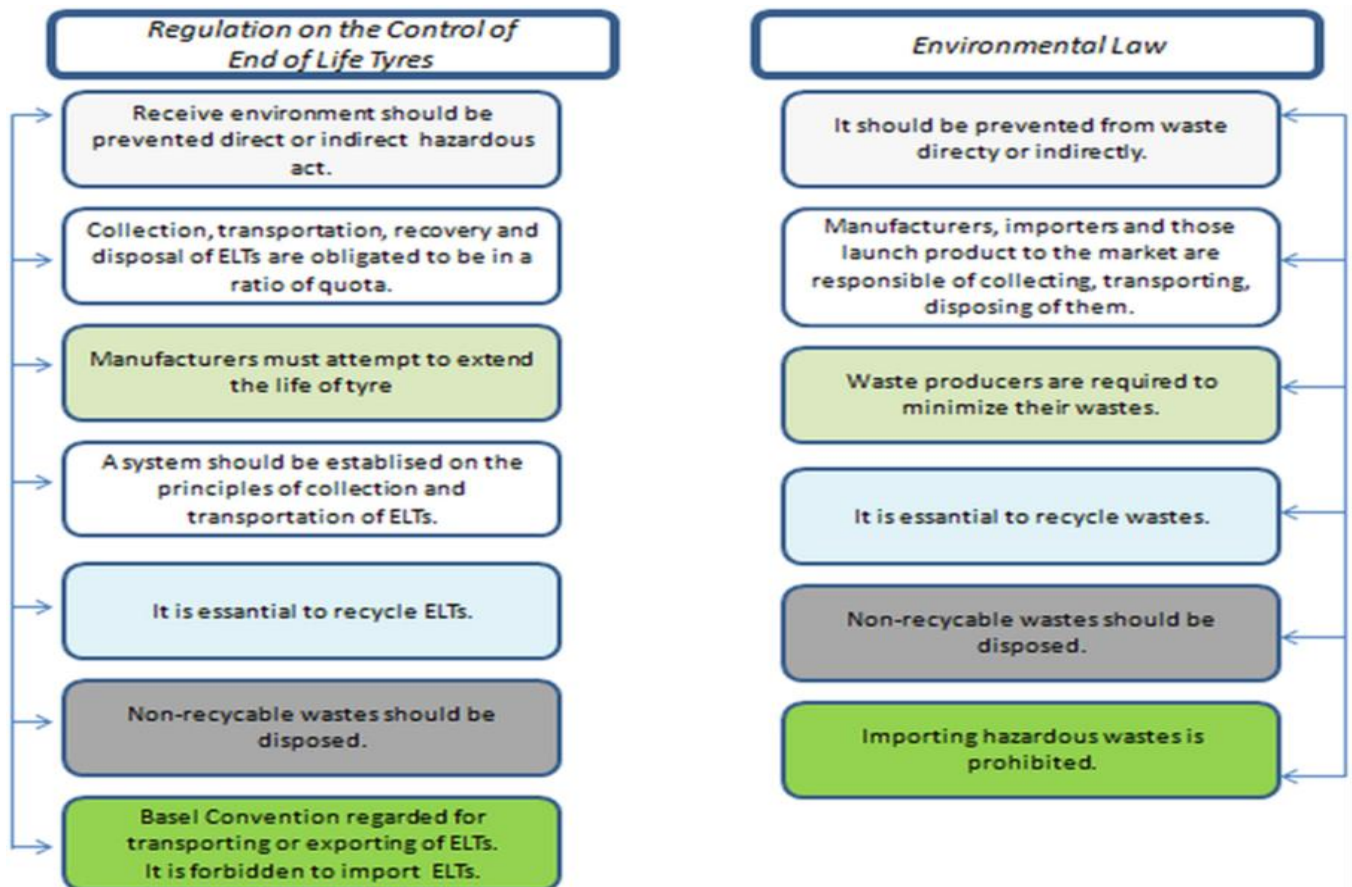


Figure 10. End-of-Life Tyres regulations (Karaagac et al., 2017)

### 3.4. Packaging / Plastic Waste

As discussed before, changing consumption habits, population growth, rising living standards cause changes in packaged product sales and, as a reflection of this, changes in the amount of plastic materials in the solid waste composition. For example, in the last 50 years, the role of plastic in the EU economy has greatly increased. 58 million tons of plastic are produced every year in European countries, and 40% of this consists of packaging. Therefore, under the European Green Deal and the new Circular Economy Action Plan, a new European Plastics Strategy for the revision of Directive 94/62/EC on Packaging and Packaging Waste was launched in 2018 for products used, produced and recycled in the EU. This regulation mainly aims to strengthen the basic requirements for packaging to ensure the reuse and recycling of packaging, the receipt of recycled content and to improve its applicability (...). Similar to EU countries, the solid waste composition has been changing in Turkey in conjunction with the changing consumption patterns. In general, Packaging waste constitutes 30% of the waste by weight and 50% by volume. The principles regarding the collection, transportation, separation and recycling of packaging waste within a specific management system are determined by the "Packaging Waste Control Regulation" prepared by the Ministry of Environment and Urbanization. This Regulation was published in the Official Gazette No. 30283 dated 2017 and entered into force on 1/1/2018.

Material Based Recycling Rate of Turkey was 54 % in 2019. The distribution of this ratio for packaging waste is given in the Table. (6 th. State of Environment Report for Republic of Turkey, 2020, available at <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/tc-dr-2020-ng-l-zce-20210430143751.pdf>)

Table 6. Packaging waste recycling rates

Years	Glass %	Plastic %	Metal %	Paper / Cardboard %	Wood %
2018	54	54	54	54	11
2019	54	54	54	54	13

### 4. Conclusions

In fact, sustainable development is not a new concept and has been discussed since the late nineteenth century. The driving force behind these discussions/regulations is undoubtedly the pressure on managers to manage the increasing solid waste in an environmentally friendly manner due to limited natural resources, increasing production costs with increasing energy costs, and increasing urban population densities. When the approaches adopted in this regard are examined, it is seen that the solutions mainly focus on changes in production processes or new techniques, efficient production using low cost and less raw

materials, new material production and recycling. In fact, it is a huge field that brings together the concepts of sustainable development/economy, environmental management, material management, green production, renewable and clean energy technologies, and water and air management under one roof. In this context, it seems inevitable that producers and managers, as well as governments, should increase consumer responsibility through informative publications regarding solid waste management, the amount of which is expected to increase gradually according to future projections.

Implementation efforts continue to increase in Turkey, thanks to the laws, directives and action plans blended with existing EU waste management legislation and the national Zero Waste Program. According to the National Waste Management Action Plan, Turkey aims to store a maximum of 65% of municipal waste and recycle 35%.

### References

- Abubakar, I.R., Maniruzzaman, K.M.; Dano, U.L., AlShihri, F.S., AlShammari, M.S., Ahmed, S.M.S., Al-Gehlani, W.A.G., Alrawaf, T.I. (2022) Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global south. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 12717. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>
- Aggeri F., (2021) From waste to urban mines: a historical perspective on the circular economy; Field Actions. *Science Reports* [Online], Special Issue, <http://journals.openedition.org/factsreports/6530>
- Akkoyunlu A., Avşar Y., and Erguven G.O., (2017) Hazardous Waste Management in Turkey. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*, 21(4): 04017018, DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000373
- Basel Convention, available at; <https://www.basel.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.aspx>
- Criteria for the Definition of Solid Waste and Solid and Hazardous Waste Exclusions (2023) available at; <https://www.epa.gov/hw/criteria-definition-solid-waste-and-solid-and-hazardous-waste-exclusions>
- Chen, D.MC, Bodirsky, B. L, Krueger, T., Mishra, A., Popp A., (2020), The world's growing municipal solid waste: trends and impacts, *Environ. Res. Lett.* 15 074021, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8659>
- Directive of Control on Waste Batteries and Accumulators, URL <<http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.7118&MevzuatIliski=0&sourceXmlSear>>, (Accessed on. 2023)

- European Commission, Directorate-General for Environment, Being wise with waste – The EU's approach to waste management, Publications Office (2010), available at <https://data.europa.eu/doi/10.2779/93543>
- European Commission EUROSTAT Directorate E: Sectoral and regional statistics Unit E-2: Environmental statistics and accounts; sustainable development Guidance on municipal waste data collection, September 2016, available at; <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351806/Municipal-waste-statistics-guidance.pdf>
- European Commission EUROSTAT Directorate E: Sectoral and regional statistics Unit E-2: Environmental statistics and accounts; sustainable development Guidance for the compilation and reporting of data on municipal waste according to Commission Implementing Decisions 2019/1004/EC and 2019/1885/EC, and the Joint Questionnaire of Eurostat and OECD (2023), <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351811/Guidance+on+municipal+waste+data+collection/>
- Eurostat, Waste Battery Collection, (Accessed by web, URL, [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_waspb&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waspb&lang=en)
- Eurostat Waste Statistics, (2020), available at [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation)
- Fourth Status Report on European Technology Platforms Harvesting the Potential, European Commission, (2009), available at [https://ec.europa.eu/invest-in-research/pdf/download/en/etp\\_status\\_IV\\_small\\_version.pdf](https://ec.europa.eu/invest-in-research/pdf/download/en/etp_status_IV_small_version.pdf)
- Hazardous Waste New Approach Needed to Manage the Resource Conservation and Recovery Act, <https://www.gao.gov/products/rced-88-115>
- <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=WSECTOR>
- <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180328STO00751/waste-management-in-the-eu-infographic-with-facts-and-figures>
- Karaagac B., Kalkan M.E., Deniz V., (2017), End of life tyre management: Turkey case, *J Mater Cycles Waste Manag* 19:577–584, DOI 10.1007/s10163-015-0427-2
- Kaza, S., Yao, L C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., (2018), What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; © Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO.”
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R.J., Colon, J., Ponsa, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyńska, R., Lopez, I.C., Vlasopoulos, A., Spencer N., (2017), Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe, *Energy* 141, 2013e2044, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
- Mechanical Biological Treatment, available at; [https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Mechanical\\_biological\\_treatment.html](https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Mechanical_biological_treatment.html)
- Nanda, S. Berruti, F. (2021) Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review, *Environmental Chemistry Letters* 19:1433–1456, <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
- Onwosi, C.O., Igbokwe V. C., Odimba J. N., Eke I. E., Nwankwoala M. O., Iroh I. N., Ezeogu L.I., (2017), Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects, *Journal of Environmental Management* 190, 140e157, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>
- Panepinto, D.; Zanetti, M. (2021), Technical and environmental comparison among different municipal solid waste management scenarios. *Sustainability*, 13, 3167. <https://doi.org/10.3390/su13063167>
- Report of the World Commission on Environment and Development Our Common Future, United Nations, 1987, available at; file:///C:/Users/user/Downloads/our\_common\_futurebrundtlandreport1987%20(1).pdf
- Solid Waste Management, <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/solid-waste-management>
- Technical Assistance for Assessment of Türkiye's Potential on Transition to Circular Economy, (2022), available at <https://dongusel.csb.gov.tr/en>.
- Technical Assistance for Assessment of Türkiye's Potential on Transition to Circular Economy, project report, (2023) [https://ab.gov.tr/technical-assistance-for-assessment-of-turkeys-potential-on-transition-to-circular-economy-53000\\_en.html](https://ab.gov.tr/technical-assistance-for-assessment-of-turkeys-potential-on-transition-to-circular-economy-53000_en.html)

United Nations, Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development Goals, Global Sustainable Report 2023, <https://sdgs.un.org/goals>

Waste management in the EU: infographic with facts and figures, URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180328STO00751/waste-management-in-the-eu-infographic-with-facts-and-figures>

Waste to energy, <https://www.jmbaxi.com/newsletter/issue-xxvi/waste-to-energy.html>)

Waste Statistics 2020, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=37198&dil=2>

Waste Management in Turkey, 2007, available at; <https://www.savistay.gov.tr/reports/download/3521-waste-management-in-turkey-full-report>

Yeşiltepe, S., Sesen, M.K, (2019) Battery collection in Turkey, Case study of Küçükçekmece municipality, *J. Int. Environmental Application & Science*, 14(3): 116-121

Zaman, C. Z., Pal K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marlina, E., Rafique, R.F., Johan, R.B., (2017), Pyrolysis: A Sustainable way to generate energy from waste, pyrolysis, Edited by Mohamed Samer, Chapter 1, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69036>, available at <https://www.intechopen.com/chapters/56034>

6<sup>th</sup> State of Environment Report for Republic of Turkey, (2020), Ministry of Environment and Urbanization Directorate General of Environmental Impact Assessment, Permit and Inspection, ISBN: 978-625-7076-06-7, PUBLICATION NUMBER: 48/2,

**INVESTIGATION OF ENERGY - TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN ULTRA FINE GRINDING**Yakup UMUCU<sup>1\*</sup>, Vedat DENİZ<sup>2</sup>, Y. Hakan GÜRSOY<sup>3</sup><sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi University, Mining Engineering Department, Eskişehir  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-6317-4070><sup>2</sup> Hitit University, Polymer Engineering Department, Çorum  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-6317-4070><sup>3</sup> Eskişehir Osmangazi University, Mining Engineering Department, Eskişehir  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8987-7818>**Keywords**Ultra-fine Grinding  
Energy  
Grindability**Abstract**

Ultra-fine grinding refers to the process of reducing materials to extremely small particle sizes, typically in the micron or submicron range. It is commonly used in various industries such as mining, pharmaceuticals, ceramics, and chemicals, where the production of fine particles with specific properties is required.

Energy plays a significant role in ultra-fine grinding processes. The reduction of materials to such small sizes requires a considerable amount of energy input. The energy consumption in ultra-fine grinding is typically higher compared to conventional grinding methods due to the higher surface area and increased particle-particle interactions.

In the mining sector, with the depletion of high-grade ore deposits, it has become a necessity to operate very low-grade ore deposits with very small particle liberation sizes. In the enrichment of these ores, most of the energy required is spent on grinding. In micronized grinding, conventional mills (such as rod and ball mills) lose their efficiency and become uneconomical.

most of the energy spent in conventional mills is used directly in size reduction, and a significant portion is lost as heat and sound without doing any useful work (size reduction). In addition, for grinding below 75 µm, the efficiency of conventional mills is greatly reduced (energy consumption increases excessively), and grinding becomes uneconomical.

In this study, alternative fine and ultrafine grinding mills for ore dressing plants are introduced, and information about their working principles is presented. Unlike other studies, information on particle and grinding energy calculations is given. The reasons for the lack of a theory or model to perform newly developed calculations for ultrafine grinding theories are tried to be explained.

**ULTRA İNCE ÖĞÜTMEDE ENERJİ - TEKNOLOJİ GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ****Anahtar Kelimeler**Ultra-İnce Öğütme  
Enerji  
Öğütülebilirlik**Öz**

Ultra ince öğütme, malzemeleri genellikle mikron veya mikron altı aralığında son derece küçük tane boyutlarına indirme işlemi ifade eder. Madencilik, ilaç, seramik, kimya gibi belirli özelliklere sahip ince tane üretiminin gerekli olduğu çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Enerji, ultra ince öğütme işlemlerinde önemli bir rol oynar. Malzemelerin bu kadar küçük boyutlara indirgenmesi ciddi miktarda enerji girdisi gerektirmektedir. Ultra ince öğütmede enerji tüketimi, daha yüksek yüzey alanı ve artan tane-tane etkileşimleri nedeniyle geleneksel öğütme yöntemleriyle karşılaştırıldığında genellikle daha yüksektir. Madencilik sektöründe yüksek tenörlü cevher yataklarının tükenmesiyle birlikte, çok küçük tane boyutlarına sahip, çok düşük tenörlü cevher yataklarının işletilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu cevherlerin zenginleştirilmesinde ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir kısmı öğütme işlemine harcanmaktadır. Mikronize öğütmede konvansiyonel değirmenler (çubuk ve bilyalı değirmenler gibi) verimlerini kaybederek ekonomik olmaktan çıkarlar. Bilindiği üzere konvansiyonel değirmenlerde harcanan enerjinin büyük bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir kısmı ise herhangi bir faydalı iş yapılmadan (boyut küçültme) ısı ve ses olarak kaybolmaktadır.



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*Ayrıca 75 µm'nun altındaki öğütmelerde konvansiyonel değirmenlerin verimi büyük oranda düşer (enerji tüketimi aşırı artar) ve öğütme ekonomik olmaz. Bu çalışmada cevher zenginleştirme tesisleri için alternatif ince ve ultra ince öğütme değirmenleri tanıtılarak, çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak tane ve öğütme enerjisi hesaplamalarına ilişkin bilgiler verilmektedir. Ultra ince öğütme teorileri için yeni geliştirilen hesaplamaları gerçekleştirecek bir teori veya modelin bulunmamasının nedenleri açıklanmaya çalışılmaktadır.*

Derleme Makale		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 04.11.2023	Submission Date	: 04.11.2023
Kabul Tarihi	: 07.12.2023	Accepted Date	: 07.12.2023

\* Sorumlu yazar: [yakup.umucu@ogu.edu.tr](mailto:yakup.umucu@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1386158>

## 1. Introduction

Grinding operation is a unit operation that needs a significant amount of energy. In this procedure, grinding is responsible for just 2%–20% of the entire energy consumption, according to what has been indicated (Batterham, 2011; Jeswiet and Szekeres, 2016). The remaining energy disappears into the surrounding environment as heat, sound, and vibrations. In engineering projects, researchers are looking at potential solutions that can make mills more energy efficient. In this case, operational variables are used to study both new technologies and ways to improve systems that are already in place.

Important shifts in the technology were used to reduce particle size occurred in the 16th, 19th, and 20th centuries. In each instance, an influx of copious new income prompted an increase in the use of resources, investments in new plants, and the creation of new processes and machinery. As a consequence of this, there was a rise in the need for the size-reduction equipment that had higher levels of both productivity and energy efficiency.

The conventional method of grinding takes place in tumbling mills, in which the ore is fed into a horizontal mill that is then spun by a motor to cause the cylindrical body of the mill to tumble with the mill charge, which consists of the ore and various grinding media. The ore is broken down by the processes of impact, attrition, and abrasion when it is subjected to the free motion of disconnected media like steel rods, steel or ceramic balls, or coarse ore pebbles. This is known as grinding.

Ultrafine grinding, also known as ultrafine milling or ultrafine comminution, is a technique used to reduce materials to extremely small particle sizes. It is commonly used in various industries, including pharmaceuticals, chemicals, minerals, food processing, and materials science.

The primary goal of ultrafine grinding is to produce particles with a specific size distribution or to achieve a

desired level of particle fineness. By reducing the particle size, a larger surface area is exposed, which can enhance the material's reactivity, dissolution rate, and overall performance.

Calculations of the energy consumed in grinding from the past to the present have been made. In addition, models capable of calculating grain size distributions have been developed. However, no equation or model has been developed for fine grinding (-5 µm) that can calculate energy or predict particle size distribution. The main reason for this can be stated as the inability to describe the motion and behavior of very fine grains. Within the scope of this article, research has been carried out on these issues, and solutions have been discussed in detail in the conclusion part.

## 2. Equipment for Ultra-Fine Grinding

There are several methods employed for ultrafine grinding including:

- **Ball Milling:** Ball mills use rotating cylinders filled with balls as a grinding media. material is fed into the cylinder and subjected to the impact and attrition caused by the balls' movement. By controlling the milling parameters such as rotational speed and ball size, ultrafine particles can be obtained.
- **Vibratory Mills:** Vibratory mills utilize vibrations or oscillations to generate collisions between the grinding media and the material. These mills are particularly suitable for fragile or heat-sensitive materials.
- **Stirred Media Mills:** Stirred media mills, such as the famous "IsaMill," use a series of rotating discs or pins within a chamber to agitate the grinding media. This agitation generates high-energy collisions, resulting in particle size reduction. These mills are well-suited for ultrafine grinding of minerals and ores.



- **Jet Milling:** In jet milling, high-pressure gas or air is used to accelerate particles and cause them to collide with each other, resulting in particle size reduction. Jet mills can achieve particle sizes in the submicron to nanometer range.
- **Fluid Energy Milling:** Fluid energy mills, such as spiral jet mills, utilize compressed gas or superheated steam to create high-velocity streams that impact and disintegrate the particles. The fine particles are carried away by the gas stream, and the oversize particles are recirculated for further grinding.
- **Nano Milling:** Nano milling techniques provide reducing particle size to the nanometer scale, typically below 100 nm. Various methods, including high-energy ball milling and stirred media milling, are used to achieve nano-sized particles.

It is important to note that the choice of ultrafine grinding method depends on factors such as the material being processed, desired particle size, required throughput, and equipment availability. Additionally, it is essential to consider the potential challenges, such as heat generation, particle aggregation, and equipment wear, associated with ultrafine grinding processes.

### 2.1. Ball Milling

Ball milling is a technique for reducing particle size and mixing materials by grinding them together in a ball mill. The ball mill is a cylindrical device that rotates around its axis and is partially filled with grinding media such as balls made of steel, ceramic, or other materials. The material to be milled is loaded into the ball mill along with the grinding media, and as the mill rotates, the grinding media cascades and collides with the material, reducing its particle size. The process of ball milling involves the following steps:

**Loading:** The material to be milled and the grinding media are added to the ball mill. The ratio of the material to the grinding media can vary depending on the desired outcome and the properties of the materials involved.

**Milling:** The ball mill is set into motion, typically by rotating the cylinder. As the mill rotates, the grinding media cascade and impact the material, causing it to break and reduce in size. The collision and friction between the grinding media and the material result in particle size reduction.

**Mixing:** Ball milling can also be used for mixing or blending materials. In this case, multiple materials with different properties can be loaded into the ball mill together, and the milling process helps in achieving a homogeneous mixture.

**Duration:** The duration of the ball milling process can vary depending on the desired fineness and the

properties of the materials. It can range from minutes to several hours.

The advantages of ball milling include its versatility, scalability, and relatively simple operation. It can be used for both dry and wet milling processes. Ball milling is widely used in various industries such as pharmaceuticals, chemicals, minerals, paints, ceramics, and more. It is commonly used for grinding and refining materials, producing fine powders, and creating homogeneous mixtures.

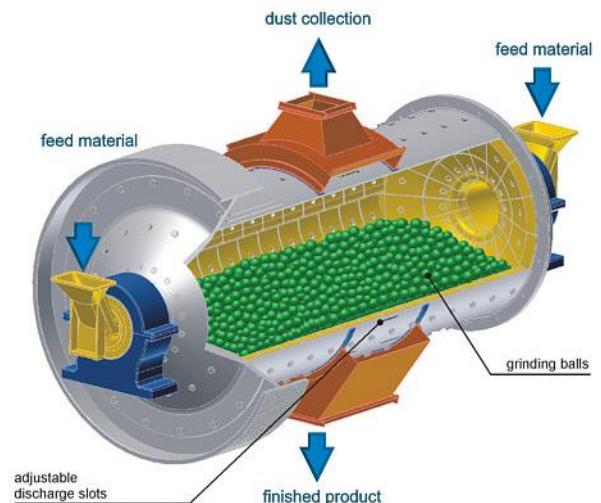


Figure 1. Ball Mills Are Used In Industry (<https://www.hiimac.com/>)

Conversion of energy given when materials undergo size reduction; It was stated by Orr (1966) that it depends on the inter-particle effects of the crushing machine and the crushed material. For inter-particle effects with a crushing machine; While friction, sound, electrical effects and kinetic energy are given, it is stated that the crushed material is due to the rearrangement of the cage structure, surface energy, elastic deformation and plastic deformation. It has been stated that heat arises due to plastic deformation, elastic deformation, friction and kinetic energy. Therefore, electrical effects can be added to the relevant section.

However, it is important to note that ball milling has certain limitations. It may generate heat during the milling process, which can affect heat-sensitive materials. It can also lead to contamination from the grinding media or the mill itself, particularly when milling reactive or abrasive materials. Care should be taken to select appropriate grinding media and milling conditions to achieve the desired results while minimizing any potential drawbacks.

### 2.2. Vibratory Mills

Vibratory mills also known as vibratory ball mills or vibratory grinding mills, are a type of milling equipment used for fine grinding and mixing of materials. These

mills utilize vibrations or oscillations generated by an eccentrically mounted shaft or an electromagnetic drive to impart energy to the grinding media and the material being processed.

Here's how vibratory mills typically work:

**Design:** Vibratory mills consist of a cylindrical or conical container that holds the grinding media and the material to be processed. The container is mounted on springs or other vibration-damping elements to isolate the vibrations from the surroundings.

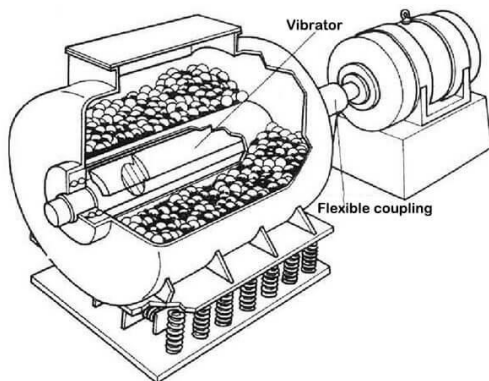


Figure 2. Vibratory Mills Are Used In Industry (<https://ballmillssupplier.com/product-center/vibration-ball-mill/>)

**Vibratory Motion:** The mill is set into vibration by an eccentrically mounted shaft or an electromagnetic drive system. The vibrations cause the grinding media and the material to move in a circular or elliptical motion within the mill.

**Grinding and Mixing:** As the mill vibrates, the grinding media, which can be balls, rods, or cylpebs, collide with the material, resulting in impact and attrition. The energy generated by the vibrations fractures and reduces the particle size of the material. The mixing action is also facilitated as the particles and grinding media move around and interact.

**Control:** The intensity and frequency of the vibrations can be adjusted to control the milling process. This allows for fine-tuning the grinding energy and optimizing the particle size distribution and mixing efficiency.

Vibratory mills offer several advantages, including:

**Efficient Grinding:** The vibratory motion provides intense and rapid grinding action, resulting in high grinding efficiency and shorter processing times compared to some other milling methods.

**Gentle Processing:** Vibratory mills are suitable for processing fragile or heat-sensitive materials that may be damaged or undergo unwanted chemical reactions under more aggressive milling conditions.

**Scalability:** Vibratory mills are available in various sizes and capacities, allowing for scale-up from laboratory-scale mills to industrial production.

**Versatility:** Vibratory mills can be used for dry or wet grinding and can handle a wide range of materials, including minerals, ores, chemicals, pigments, ceramics, and more.

Despite their advantages, vibratory mills also have some limitations. The high-energy vibrations can lead to increased wear of the mill components, necessitating regular maintenance and replacement of parts. Additionally, controlling the particle size distribution and achieving narrow size ranges can be challenging with vibratory mills.

Overall, vibratory mills are a valuable option for fine grinding and mixing applications, especially when gentle processing and efficient grinding are required.

### 2.3. Stirred Media Mills

Stirred media mills also known as stirred bead mills or stirred mills, are a type of grinding equipment used for fine and ultrafine grinding of materials. These mills utilize a rotating stirrer, typically composed of discs or pins, to agitate the grinding media and the material being processed.

Here's how stirred media mills typically work:

**Design:** Stirred media mills consist of a cylindrical or conical container that holds the grinding media and the material to be processed. The container is typically equipped with a central shaft with discs or pins attached to it. The shaft and the grinding media are driven by a motor, causing them to rotate.

**Grinding and Mixing:** As the shaft and grinding media rotate, the grinding media (beads or cylinders) move in a highly energized and agitated manner. The combination of rotational and radial movements causes intense collisions and shearing forces between the grinding media and the material, resulting in particle breakage and size reduction. The mixing action is also promoted as the particles and grinding media move around and interact.

**Size Reduction and Classification:** The grinding action in stirred media mills occurs primarily by shear and impact forces rather than by the cascading action found in ball mills. The high-energy collisions and agitation lead to efficient particle size reduction, achieving finer and more uniform product sizes. In some designs, the mills also incorporate a classification system to separate particles of the desired size from the oversized ones.

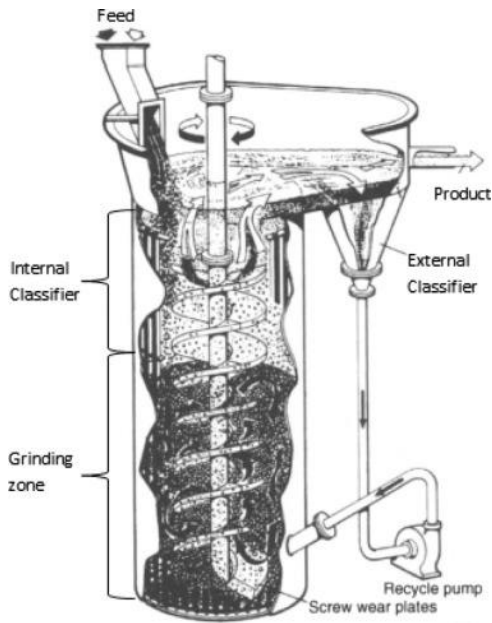


Figure 3. Stirred Media Mills Used in Industry (Mpsi Vertimill).

**Control:** The rotational speed of the stirrer and the residence time of the material in the mill can be adjusted to control the grinding process. Additionally, the size, shape, and density of the grinding media can be tailored to achieve specific grinding objectives.

Stirred media mills offer several advantages, including:

**High Efficiency:** The intense agitation and high energy imparted to the grinding media result in efficient grinding, leading to faster processing times and finer particle size distributions.

**Versatility:** Stirred media mills can handle a wide range of materials, including minerals, ores, chemicals, pigments, ceramics, and nano-sized particles. They can be used for both wet and dry grinding.

**Scalability:** Stirred media mills are available in various sizes, from laboratory-scale mills to large industrial units, allowing for scale-up and adaptation to different production requirements.

**Improved Energy Efficiency:** The grinding mechanism in stirred media mills consumes less energy compared to traditional tumbling ball mills, making them more energy-efficient.

Despite their advantages, stirred media mills also have some limitations. High-energy grinding action can lead to increased wear on the mill components, requiring regular maintenance and replacement. Additionally, the selection and optimization of the grinding media and operating parameters can be crucial to achieve the desired product quality and minimize the generation of fines.

Overall, stirred media mills are effective tools for fine and ultrafine grinding, providing efficient size reduction and mixing capabilities across a wide range of materials.

#### 2.4. Jet Milling

Jet milling also known as fluid energy milling, is a method used for reducing the particle size of materials by utilizing high-velocity jets of compressed gas or steam. It is commonly used for micronization and producing fine powders of various materials.

Here's how jet milling typically works:

**Feed Material:** The material to be milled is introduced into the jet mill through a feed inlet. This can be a dry powder or a suspension of particles in a liquid.

**Grinding Chamber:** The material enters a grinding chamber, where it encounters a high-velocity stream of gas or steam, typically air or nitrogen. The gas is accelerated to high speeds by passing through a series of nozzles or jets.

**Particle Size Reduction:** As the high-velocity gas or steam jets collide with the material, they create intense collisions and shearing forces, causing the particles to fracture and reduce in size. The particles are accelerated and dispersed within the grinding chamber, undergoing multiple collisions with each other and the gas jets.

**Classification:** After the grinding process, the fine particles are carried along with the gas or steam flow out of the grinding chamber. The gas stream containing the fine particles enters a classifier, which separates the particles based on size. The oversized particles are returned to the grinding chamber for further milling, while the fine particles are collected as the desired product.

**Collection:** The fine particles are typically collected using cyclone separators, bag filters, or other types of collection devices, depending on the application. The collected product can be further processed or used as-is.

Jet milling offers several advantages:

**Particle Size Control:** Jet milling allows precise control over the particle size distribution of the milled material. By adjusting the gas flow rate, pressure, and nozzle configuration, a wide range of particle sizes can be achieved.

**High Efficiency:** Jet milling can achieve high grinding efficiencies due to the intense collisions and impact forces generated by the high-velocity gas or steam jets.

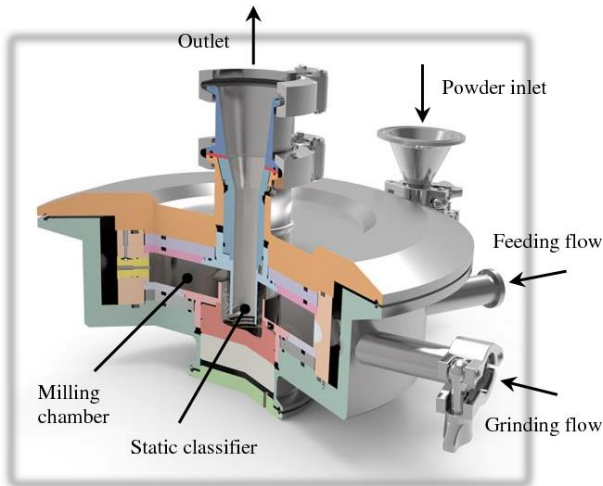


Figure 4. Modular Jet Mill (Lamartino P., Mercuri S., Murdocco A., Crivelli D., Malorgio S. and Joost B., 2018).

**Minimal Contamination:** Since jet milling does not involve mechanical grinding media, there is minimal risk of contamination from abrasive materials or wearing of grinding media. This makes it suitable for processing sensitive materials such as pharmaceuticals or food products.

**Versatility:** Jet milling can be used for various materials, including pharmaceuticals, chemicals, pigments, minerals, and ceramics. It can handle both dry and wet materials.

However, jet milling also has some limitations. It may not be suitable for materials that are heat-sensitive or prone to degradation at high temperatures. Additionally, the high-energy collisions in the jet mill can generate heat, potentially requiring cooling systems to maintain product integrity.

Overall, jet milling is a versatile and efficient method for reducing particle size, offering precise control over the final product's characteristics. It finds applications in industries such as pharmaceuticals, chemicals, cosmetics, and materials science.

### 2.5. Fluid energy milling

Fluid energy milling also known as fluid energy grinding or micronization, is a technique used for reducing the particle size of materials by utilizing high-velocity streams of compressed gas or superheated steam. It is a type of jet milling that employs gas as the grinding medium.

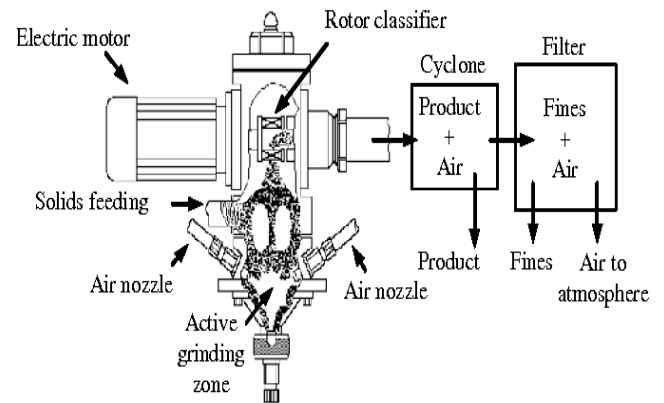


Figure 5. a) Fluid Energy Milling (Coutinho and Embiruçu, 2007).

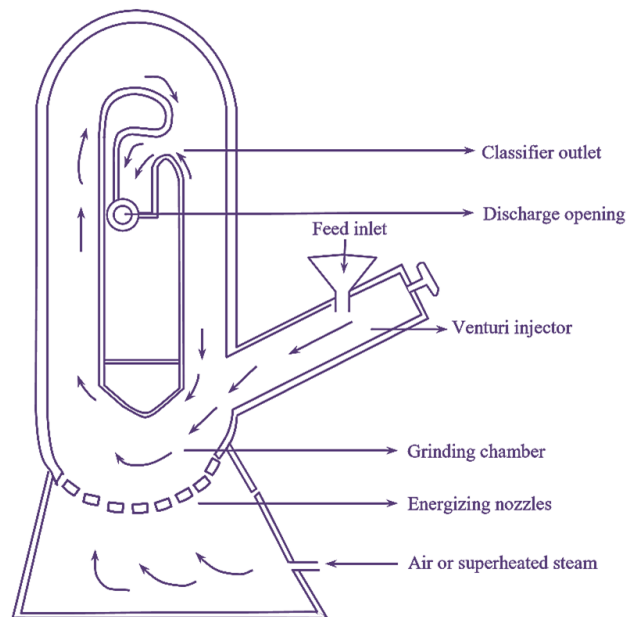


Figure 5. b) Typically Work Shape of Fluid Energy Milling (<https://electricalworkbook.com/fluid-energy-mill/>).

Here's how fluid energy milling typically works:

**Feed Material:** The material to be milled is introduced into the fluid energy mill through a feed inlet. This can be a dry powder or a suspension of particles in a liquid.

**Grinding Chamber:** The material enters a grinding chamber, where it encounters a high-velocity stream of gas or steam, typically air or nitrogen. The gas is accelerated to high speeds by passing through a series of nozzles or jets.

**Particle Size Reduction:** As the high-velocity gas or steam stream collides with the material, it creates intense collisions, impact forces, and shearing actions, causing the particles to fracture and reduce in size. The particles are accelerated and dispersed within the grinding chamber, undergoing multiple collisions with each other and the gas stream.

**Classification:** After the grinding process, the fine particles are carried along with the gas or steam flow out of the grinding chamber. The gas stream containing the fine particles enters a classifier, which separates the particles based on size. The oversized particles are returned to the grinding chamber for further milling, while the fine particles are collected as the desired product.

**Collection:** The fine particles are typically collected using cyclone separators, bag filters, or other types of collection devices. The collected product can be further processed or used as-is.

Fluid energy milling offers several advantages:

**Particle Size Control:** Fluid energy milling allows precise control over the particle size distribution of the milled material. By adjusting the gas flow rate, pressure, and nozzle configuration, a wide range of particle sizes can be achieved.

**High Efficiency:** Fluid energy milling can achieve high grinding efficiencies due to the intense collisions and impact forces generated by the high-velocity gas or steam streams.

**Minimal Contamination:** Since fluid energy milling does not involve mechanical grinding media, there is minimal risk of contamination from abrasive materials or wearing of grinding media. This makes it suitable for processing sensitive materials such as pharmaceuticals or food products.

**Versatility:** Fluid energy milling can be used for various materials, including pharmaceuticals, chemicals, pigments, minerals, and ceramics. It can handle both dry and wet materials.

However, fluid energy milling also has some limitations. It may not be suitable for materials that are heat-sensitive or prone to degradation at high temperatures. Additionally, the high-energy collisions in fluid energy milling can generate heat, potentially requiring cooling systems to maintain product integrity.

Overall, fluid energy milling is a versatile and efficient method for reducing particle size, offering precise control over the final product's characteristics. It finds applications in industries such as pharmaceuticals, chemicals, cosmetics, and materials science.

## 2.6. Nano milling

Nano milling also known as nano grinding or nanoscale milling is a process used to produce nanoparticles or nanoscale particles from materials by reducing their size to the nanometer range. It is a specialized technique employed to achieve extremely small particle sizes, typically below 100 nm.

Nano milling can be performed using various milling methods, including:

**Bead Milling:** Bead mills, also called media mills, utilize grinding media, such as beads or balls, to achieve particle size reduction. The material to be milled is suspended in a liquid or a solvent, and the milling beads are agitated within the mill, causing the particles to be ground down to the nanoscale.



Figure 6. a) Nano Milling (<https://www.root-asia.com/root-technology/>).

**High-Energy Ball Milling:** High-energy ball milling is a mechanical milling technique that utilizes high-energy collisions between balls and the material to be milled. The balls, typically made of metal or ceramics, are impacted and ground against the material, resulting in particle size reduction to the nanoscale.

**Jet Milling:** Jet milling, as mentioned earlier, can also be used for nano milling by employing high-velocity gas or steam streams to grind the material to the desired particle size. The intense collisions and shearing forces generated by the gas jets facilitate the reduction of particle size to the nanoscale.

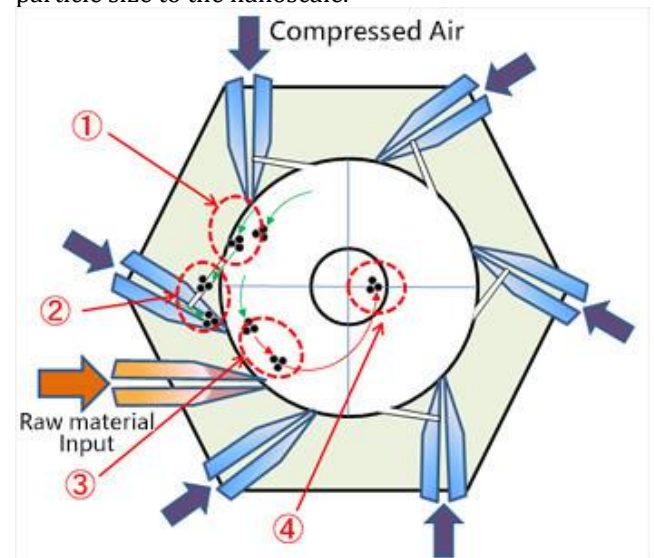


Figure 6. b) Typically Work Shape Of Nano Milling (<https://www.root-asia.com/root-technology/>).

**Planetary Ball Milling:** Planetary ball mills consist of multiple grinding jars that rotate around their axis while also making planetary motions around a central axis. This combination of rotation and revolution creates high-energy impacts between the grinding balls and the material, leading to size reduction to the nanoscale.

Nano milling offers several advantages and applications:

**Enhanced Properties:** Nanoscale particles often exhibit unique properties due to their small size and high surface area-to-volume ratio. Nano milling enables the production of nanoparticles with enhanced characteristics, such as improved reactivity, optical properties, mechanical strength, and more.

**Nanomaterials Synthesis:** Nano milling is used to produce nanomaterials for various applications, including electronics, catalysis, energy storage, coatings, pharmaceuticals, and advanced materials.

**Nanocomposites:** Nano milling is employed to disperse nanoparticles or nanofillers into a matrix material to create nanocomposites with tailored properties. This is particularly relevant in industries like polymer composites and coatings.

**Drug Delivery Systems:** Nano milling plays a crucial role in the formulation of nanoscale drug delivery systems, such as nanoparticles, liposomes, and nano emulsions. The reduced particle size allows for improved drug dissolution, bioavailability, and targeted delivery.

It is important to note that nano milling can be a challenging process due to the increased tendency of particles to agglomerate at the nanoscale. Proper milling conditions, such as appropriate milling time, speed, media size, and stabilizers, are essential to achieve well-dispersed nanoparticles.

Overall, nano milling is a vital technique for producing nanoparticles and nanoscale materials with unique properties and diverse applications in various industries.

Today, grinding mills use about 2% of the electricity generated in the world, and dry-grinding processes consume about 75% of this energy. Note that some of the major size-reduction processes that consume a great deal of energy, such as the grinding of trees to produce wood pulp cellulose, are beyond the scope of this article.

### 3. Energy Equations Used in Comminution

Scientists and inventors have long worked to develop and improve size-reduction processes and machines to solve the engineering challenges associated with grinding. Size reduction—used in every mineral-processing operation—has been a continuing field for scientific inquiry and has contributed to more efficient size-reduction processes in many areas (Beke, 1981):

- Design of better machines

- Modeling and simulation techniques to optimize circuits
- Control techniques to ensure that products meet tight specifications
- Laboratory techniques to measure material and process characteristics.

Grinding presents several difficult technical problems, and researchers and inventors have spent a significant amount of time and effort trying to design and enhance size-reduction techniques and equipment. The process of size reduction, which is used at every stage of mineral processing, has been studied for a long time. This has led to the development of more effective size-reduction methods in some fields, including (Beke, 1981):

- Development of more efficient mechanisms
- Modeling and simulation methods for optimizing circuits
- Control strategies for ensuring that products fulfill stringent standards
- Laboratory procedures for measuring the properties of materials and processes

There are several models used to estimate the energy consumed in grinding processes. Here are some commonly used models (Rhymer, Ingram, Sadler and Windows- Yule, 2022).

#### 3.1. Bond's Law

Bond's Law developed by F.C. Bond (1961) is a model used to estimate the energy required for size reduction in grinding processes, particularly in ball and rod mill grinding circuits. It is based on the concept of work index, which is a parameter that characterizes the material's grindability.

According to Bond's Law, the energy consumption (E) in kilowatt-hours per ton (kWh/ton) can be calculated using Eq. 1:

$$E = 10 \sqrt{\frac{W_i}{P_{80} - P_0}} \quad (1)$$

Where:

E is the energy consumption (kWh/ton)

W<sub>i</sub> is the work index of the material being ground (kWh/ton)

P<sub>0</sub> is the size of the product (µm) corresponding to 80% passing the feed size.

P<sub>80</sub> is the size of the product (µm) corresponding to 80% passing the final desired product size.

The work index (W<sub>i</sub>) is determined through laboratory testing using a standardized procedure. It represents

the energy required to reduce a unit mass of the material from a reference size to the desired size. The work index values for different materials can be found in reference tables or determined experimentally.

Bond's Law provides an estimate of the energy consumption based on the work index and the particle size distribution. However, it does not consider other factors that may affect energy consumption, such as mill design, operating conditions, and specific material properties. Therefore, it is important to consider the limitations of Bond's Law and validate the estimated energy consumption through experimental data or use more sophisticated models when necessary (Beke, 1981).

**3.2. Hukki's Law**

Finland's R.T. Hukki reviewed data from many industrial operations and concluded that the three energy-size reduction theories referred to different regions on the curve relating energy used to particle size produced, as shown in Figure 7 (Hukki 1961).

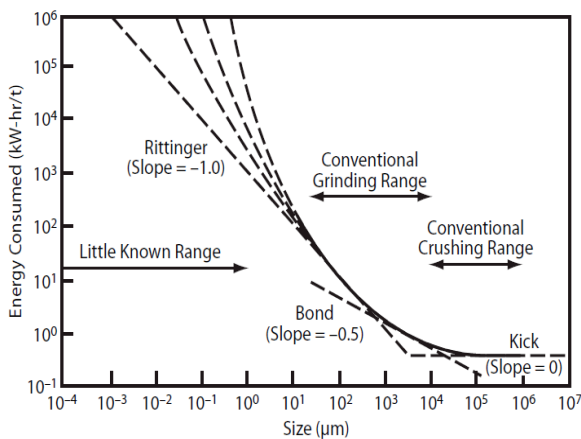


Figure 7. Relationship In The Process Of Breaking Between The Amount Of Energy And The Particle Size (Hukki 1961)

Figure 7 makes it clear why Bond's work was so successful and why it will continue to be used to design circuits that grind to about 200 µm. His work covered a product range of 25,000 to 20 µm, and most applications will continue to fall in this range. However, extending this work to products less than 5 µm is incomplete.

After Bond retired in 1964, the engineers at Allis-Chalmers continued to develop the Bond equation and publish their results. The book *Design and Installation of Comminution Circuits*, published by the Society of Mining Engineers in 1982, was dedicated to Bond.

In the days before digital computers, sizing distributions were often simplified to a single value, typically the size in microns through which 50% or 80% of the material passed.

This was good enough for Bond's work on circuit design but not good enough for understanding breakage mechanisms or identifying how problems in breakage occurred. Complete size distributions were needed, and it was Paul Rosin and Erich Rammler in Germany who showed that sieve analyses of pulverized coal could be fitted by a simple negative exponential equation (Morrell, 2004).

In a talk that he gave to the Fine Particle Society in England in 1976, Rumpf discussed some of the work that had been done at the laboratory (Rumpf 1977). During the lesson, he remarked the lines of, "In comminution, the particles will respond individually in a bigger amount than in any other process." The reason for this is because the defect and dislocation structures play a crucial role in the creation of the fracture. As a consequence of this, the behavior of breaking, for instance, will change a great deal depending on the kind of material and the particle size, but it may also change a significant amount even when using the same material and the same particle size. Only by conducting methodical testing with single particles will it be possible to ascertain the actual amount of energy that may be saved.

In his research, Rumpf and Müller (1962) studied the amounts of specific energy used by materials when they were crushed into single particles and when they were fractured in industrial comminution operations. Figure 8 illustrates his findings, which suggest that there is theoretical potential for a tenfold increase in energy efficiency (although it would be less in practice). One of the results of Rumpf's work was the invention of high-pressure grinding rollers (HPGRs), which is considered one of the most significant achievements in the creation of new grinding equipment throughout the 20th century.

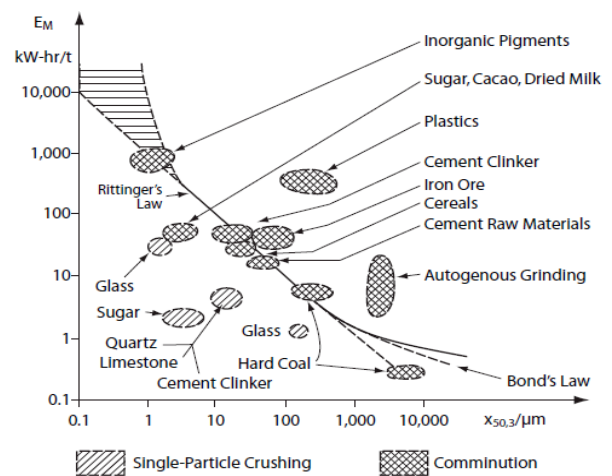


Figure 8. Specific Energy Consumption In Comminution And Single-Particle Crushing (Rumpf 1977)

### 3.3. Population Balance Models (PBM)

Population Balance Models are mathematical models used to describe and simulate the behavior of particulate systems, particularly in grinding and other particle size reduction processes. These models consider the distribution of particle sizes within a system and track the evolution of this size distribution over time.

In the context of grinding, population balance models aim to predict the changes in particle size distribution as particles are subjected to grinding forces and break into smaller sizes. These models provide insights into important parameters such as particle size distribution, residence time distribution, and breakage rates.

The general form of a population balance equation (PBE) is as follows:

$$\partial N/\partial t = \partial(B[N])/ \partial x - \partial(S[N])/ \partial x \quad (2)$$

Where:

$N(x, t)$  is the number density of particles with size  $x$  at time  $t$ .

$B[N]$  represents the breakage term, which describes the rate of particles breaking into smaller sizes.

$S[N]$  represents the source term, which describes the rate of particles being generated by breakage.

The breakage term ( $B[N]$ ) and source term ( $S[N]$ ) depend on various factors, including the properties of the material being ground, the grinding mechanism, and the specific grinding equipment employed. These terms can be defined using empirical relationships, experimental data, or theoretical models.

Solving the population balance equation provides information on how the particle size distribution changes over time during the grinding process. The PBE can be solved using numerical methods, such as finite difference or finite element techniques, to obtain the evolution of the particle size distribution.

Population balance models allow for the prediction and optimization of grinding processes, aiding in the design of more efficient grinding systems and the development of grinding circuits. They provide insights into the effects of operating parameters, such as feed rate, grinding media size and distribution, and mill residence time, on the resulting particle size distribution.

It's worth noting that population balance models can be computationally demanding, and their accuracy relies on the quality of the model parameters and assumptions. Experimental validation and calibration are often necessary to ensure the reliability of the model predictions.

### 3.4. Discrete Element Method (DEM)

Discrete Element Method (DEM) is a numerical simulation technique used to model and analyze the behavior of a collection of discrete particles. It is particularly useful for studying granular materials and particle systems in various engineering and scientific applications, including grinding, milling, powder mixing, and particle-fluid interactions (Mhadhbi, 2021; Rhymer et al., 2022).

In the context of grinding, DEM is employed to simulate the motion, interactions, and collisions of individual particles within a grinding mill. By considering the behavior of each discrete particle, DEM provides insights into the dynamic aspects of grinding, such as particle breakage, energy transfer, and the resulting particle size distribution.

Here's an overview of how DEM works in the context of grinding:

**Particle Representation:** In DEM, each particle is represented as a discrete entity with its own set of properties, such as size, shape, mass, and material characteristics. These particles interact with each other and with the surrounding environment.

**Contact Detection:** DEM algorithms determine the contacts between particles based on their positions and shapes. Contact detection algorithms consider factors such as particle overlap, shape matching, and interparticle forces to identify the interactions between particles.

**Force Calculation:** Once the contacts between particles are identified, the forces acting on each particle are calculated. These forces include normal forces (due to particle-particle contact) and tangential forces (frictional forces).

**Integration of Equations of Motion:** Using Newton's laws of motion, the equations of motion for each particle are integrated over time. This integration accounts for the forces acting on the particles and updates their positions and velocities.

**Time Stepping:** DEM simulations progress through small time steps, where the positions, velocities, and forces of the particles are updated at each time step. The simulation continues until a specified endpoint is reached or until a desired level of convergence is achieved.

By simulating the motion and interactions of individual particles, DEM provides valuable information about particle trajectories, energy transfer, and particle breakage during grinding processes. It can help optimize mill design, study the effects of operating parameters, and understand the mechanisms of particle breakage.



However, it's important to note that DEM simulations can be computationally intensive and require substantial computational resources. The accuracy of the results depends on the accuracy of input parameters, including particle properties, contact models, and material properties. Validating the DEM results with experimental data is essential to ensure the reliability of the simulations.

Overall, DEM is a powerful tool for studying the behavior of particulate systems, including grinding processes, and provides detailed insights into particle motion, interactions, and breakage that are difficult to obtain through experimental means alone (Mhadhbi, 2021; Rhymer et al., 2022).

#### 4. Grindability of Materials

As a property of the material, grindability needs to indicate whether or not it is appropriate for size reduction. The outcome of the grinding process must be reflected in its value in terms of the amount of energy that was expended per unit. Here is where we run into a problem: the procedure produces a new particle size distribution that cannot be characterized by a single value. As a result, grindability cannot be expressed as the difference between two numbers or as the quotient of two numbers. In the industrial world, however, grindability is defined as the relationship between specific surface increase (measured by the Blaine test in  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) and energy use (measured in  $\text{kWh}/\text{g}$  by the Jig). This standard was developed by Lehmann and Haese (1975).

The use of industrial experience consequently significantly simplifies the situation. The grindability of a material is measured in  $\text{kWh}/\text{t}$ , whereas the grinding resistance of a material is characterized in  $\text{kg}/\text{j}$  for a known grinding process (for example, grinding cement in a ball mill to a grinding fineness of  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  Blaine). It is hardly unnecessary to point out that the grinding equipment also affects these figures since it is so obvious. Therefore, to grind raw cement meal, various values will be achieved depending on whether the grinding takes place in a ball mill, an autogenous mill, or a roller mill (Menéndez-Aguado, Dzioba and Coello-Velázquez, 2005; Menéndez-Aguado, Coello-Velázquez, Dzioba and Diaz, 2006).

Grindability tests are standardized laboratory tests used to quantify the grindability or ease of grinding of a material. These tests provide valuable information for process optimization, equipment selection, and energy consumption estimation in grinding operations. In order to assess the  $\text{kWh}/\text{t}$  material properties, many test procedures are used in industrial practice, considering the aforementioned restrictions. All of these methodologies include the process of grinding under carefully controlled laboratory circumstances to replicate real-world commercial scenarios. The

obtained outcomes often need adjustments based on empirical evidence. The existence of three commonly used approaches in industrial practice, namely Hardgrove, Zeisel, and Bond, is well acknowledged (Beke, 1981; Deniz, 1996).

**Bond Work Index (BWI) Test:** The Bond Work Index test (1961) is widely used for determining the grindability of brittle materials, such as ores and minerals. It measures the energy required to grind a material from a specified feed size to a target product size. The test involves grinding a specified amount of material in a laboratory ball mill for a specified duration. The resulting product size distribution is measured, and the Bond Work Index is calculated based on the energy input and the size reduction achieved (Tavares, L.M., R.M., D.C., Guerrero, J.C., 2012).

**Hardgrove Grindability Index (HGI) Test:** The HGI test (Remenyi, 1966) is primarily used for assessing the grindability of coal. It measures the energy required to grind a coal sample in a standardized grinding machine, called the Hardgrove Grindability Index tester. The test involves grinding a fixed-weight of coal sample under specified conditions of grinding speed, grinding duration, and air flow. The resulting product fineness and HGI value are determined, with higher HGI values indicating better grindability.

**Zeisel Grindability Test:** The Zeisel grindability test (1953) is used for evaluating the grindability of various materials, including cement, raw materials, and solid fuels. It measures the energy required to grind a material in a tumbling mill under specified conditions. The test involves grinding a fixed amount of material for a set grinding time, followed by sieving to determine the amount of material finer than a specified size. The Zeisel index is calculated based on the energy input and the amount of fine material produced.

**SAG Grindability Index (SGI) Test:** The SAG Grindability Index test (Amelunxena, Berriosb and Rodriguezb, 2014) is specific to assessing the grindability of ores in semi-autogenous grinding (SAG) mills. It measures the energy required to grind an ore sample in a laboratory SAG mill to a specific size distribution. The test involves grinding the ore sample in a small-scale SAG mill under controlled conditions, and the resulting product size distribution is measured to determine the SGI value.

These are just a few examples of grindability tests commonly used in the industry. The specific test used depends on the material being tested and the grinding application of interest. It's important to note that grindability tests provide relative measures of grindability and are typically used for comparative purposes or as a guide in process design. The actual energy consumption and performance in industrial grinding operations may vary due to differences in equipment, scale, and operating conditions.

#### 4.1. Hardgrove grindability test

The Hardgrove Grindability Index (HGI) test (Deniz, 1996; Bilen, 2021) is a standard method used to assess the grindability of coal and lignite, particularly for pulverized coal-fired boilers. The HGI test measures the relative grindability or ease of grinding of a coal sample compared to a standard coal reference.

Here's an overview of how the HGI test is conducted:

**Sample Preparation:** A representative coal sample is collected and prepared for testing. The sample is typically crushed and sieved to obtain a particle size range suitable for testing.

**Test Equipment:** The HGI test requires a specialized grinding machine called the Hardgrove Grindability Index tester. This machine consists of a grinding bowl and a set of grinding balls. The grinding machine is designed to simulate the grinding of coal in a pulverizer.

**Grinding Procedure:** A weighed coal sample is placed in the grinding bowl of the HGI tester. A specified number of grinding balls are added to the bowl. The bowl is then rotated at a set speed for a specified duration.

**Grinding Duration:** The coal sample is ground for a predetermined period, typically 60 revolutions, to achieve the desired level of grinding.

**Sieve Analysis:** After grinding, the ground coal is sieved through a set of standard sieves to determine the particle size distribution. The sieves used typically have mesh sizes ranging from 75 to 200 mesh (200 to 75  $\mu\text{m}$ ).

**Calculation of HGI:** The HGI is calculated using formula Eq. 3:

$$HGI = 13 + 6.93 \times G \quad (3)$$

where: HGI is the Hardgrove Grindability Index,

G is the weight of the ground coal sample passing through a 200-mesh sieve, expressed as a percentage of the total sample weight.

The HGI represents the relative grindability of the coal sample, with higher HGI values indicating easier grinding. A standard reference coal with an HGI of 100 is often used for comparison.

It's important to note that the HGI test is specific to coal and cannot be directly applied to other materials. The actual grinding performance in industrial coal pulverizers may differ from the HGI results due to differences in equipment design, coal properties, and operating conditions.

The Hardgrove method can characterize only a very coarse grinding. This means that Hardgrove test results can be applied to commercial fine grinding operations only based on experimental data related to similar

materials and similar fineness. But it should not be forgotten that the Hardgrove test is a simpler and quicker method than the two others (Beke, 1981).

#### 4.2. Zeisel test

The Hardgrove mill was first designed to grind coal (Zeisel 1953). Zeisel made modifications to the equipment to accommodate hard materials, and also implemented the use of the metric system. However, the primary characteristic of his actions was that he did not cease the rotation of the mill after 60 revolutions; rather, he persisted in operating the grinding unit until the desired level of fineness was achieved. The power usage was evaluated by the measurement of torque.

The grinding of coal was the initial purpose for the creation of the Hardgrove mill. In addition to introducing the metric system, Zeisel altered the machinery to work with hard materials. The most essential thing to note, however, is that he did not stop the mill when it reached 60 revolutions; rather, he prolonged the grinding unit until it reached the desired fineness. The measurement of the torque served as the basis for calculating the power usage (Beke, 1981).

According to Zeisel, the quantity of energy required for commercial operation is twice as much as the amount indicated by the laboratory test. This conclusion was reached after extensive research was conducted using a broad variety of materials. This assertion was correct for the dry grinding that was done in ball mills back in the early 1950s.

Recent research conducted by Ellerbrock (1975) suggests that the technique was carried out using a semi-technical 0.63 m  $\times$  0.63 m laboratory ball mill rather than the Zeisel.

#### 4.3. Bond Tests

The aforementioned two approaches replicate the open grinding process. Contrary to popular belief, Bond created his system to model closed-circuit processes in conformity with the solely used business practice in the United States. The experiment is conducted using a laboratory ball mill with dimensions of 12 inches by 12 inches (305 mm  $\times$  305 mm). The procedure involves a series of phases, whereby the undersized fractions obtained through sieving are consistently replaced with an equivalent number of fresh original feed. The condition of steady equilibrium is achieved when the replacement of mass G occurs consistently throughout the subsequent phases. The substitution of the mass in question may be regarded as indicative of the grindability under actual circumstances. The work index may be determined using the empirical formula (Kannewurf, 1957; Bond, 1961; Wasmuth, 1969).

$$W_{iw} = \frac{16}{G^{0.82}} \sqrt{\frac{h}{100}} \text{ kWh/sht} \quad (4)$$

$h$  is the mesh size in microns of the test sieve.

The energy demand of the commercial operation can be calculated according to Eq. 5:

$$W = 10W_i \left( \sqrt{\frac{1}{P}} - \sqrt{\frac{1}{F}} \right) \text{ kWh/sht} \quad (5)$$

where  $P$  is the undersized 80% of the product,  $F$  is that of the feed. Bond later modified somewhat the above formulae and recommended Eq. 6:

$$W_i = 44.5/h^{0.23} G^{0.82} \left( \sqrt{\frac{10}{P}} - \sqrt{\frac{10}{F}} \right) \text{ kWh/t} \quad (6)$$

Here  $P$  is the value in microns which 80% of the last cycle sieve undersized product passes, and  $F$  is the size which 80% of the new ball mill feed passes.

Eq. 6 is equivalent to (5/2) in the case of sieve mesh 150 ( $h = 105 \mu\text{m}$ ).

The Bond test is widely regarded as the most effective method for simulating contemporary closed-circuit grinding operations in ball mills, with the size of the mill playing a crucial role in determining outcomes. Nevertheless, moving beyond contemplation. The recommended circuit coefficient of Eq. 6 corresponds to a screen oversize of around 70% in the mill, indicating a very coarse grinding fineness, particularly in closed circuit processes such as cement grinding.

The conversion of Hardgrove grindabilities to Bond's work indices may be achieved with a sufficient level of approximation by using the empirical formula proposed by Bond in 1961:

$$W_i = 435/H^{0.91} \quad (7)$$

In conclusion, it may be said that there is no singular, definitive value that can fully characterize grindability. The estimation of energy requirements for commercial grinding processes often relies on laboratory testing, which must be supplemented by adjustment factors derived from extensive practical knowledge. The feasibility of three testing procedures for the grinding of raw cement material was examined by Haese, Scheffler and Fasbender (1975).

#### 4.4. Bond Mill Used Fast Methods

##### 4.4.1. Smith and Lee Method (1968)

In 1968, Smith and Lee determined the grindability of different materials of different sizes in a standard closed-circuit Bond grindability test. Using the same Bond mill and the same grinding conditions, they determined appropriate batch grindability values for different sizes. A direct correlation between the two grindability values was found for the finer sizes of the grind, and the batch tests were performed for less than 300 revolutions of the mill. Using this form of correlation, it is possible to estimate the Bond grindability very simply. In reality, the correlation curve thus determined can be usefully used for a particular type of similar material. If an unknown sample has a different mineralogical structure or different grain size, another reference curve is needed. In addition, it requires the use of a Bond mill and similar preparation of the material as in the standard test. Therefore, the method is considered impractical (Deniz, 1996).

##### 4.4.2. Kapur Method (1970)

In 1970, Kapur created a general algorithm for the simulation of the Bond grindability test that was based on linear grinding kinetics. It is a method of estimating the Bond work index and Bond grindability in the first two cycles of a Bond test.

In addition to the disadvantage that this method requires the use of a Bond mill, which is not available in some laboratories and especially not in most plants, it is also impractical to use separate experimental equations for the determined work indices. The help of a skilled technician is needed rather than complex calculations that are not easily understood (Deniz, 1996).

As a result of Kapur's research on 19 ores, the average error between experimental and calculated work indices was found to be 9.37.

##### 4.4.3. Karra Method (1981)

In 1981, Karra modified the Kapur method. Here, a quantity of material much finer than the grinding size is fed for grindability testing. This material is discarded and replaced with the same amount of fresh feed. This mixed feed is used for the first cycle of grindability tests. Kapur's demonstration has been modified to take this special case into account. In addition, Karra is a new representation, and this representation, which takes into account the effect of the cyclic load, can also represent difficult meals of the feed material. Therefore, there is a very low rate of grinding. In this new representation, a statistical fitting method is also used to determine the value of the work index.

This method also guides for the first two periods of Bond's standard grindability in determining the values of the grinding parameters needed in the simulation.

After determining the grindability values for the first and second experimental periods, the calculation of the Bond grindability for the subsequent grinding periods up to the equilibrium state is performed according to the assumptions of the demonstration.

This method follows a similar approach to Kapur's method but also inherits the disadvantages of this method, as mentioned earlier (Deniz, 1996).

As a result of Karra's research on 15 ores, the average error value between experimental and calculated work indices was found to be 4.77.

#### 4.4.4. Magdalinovic Method (1989)

This method is based on linear grinding kinetics. It differs from the other methods in that the two-period grinding experiments are performed with a specially prepared feed material, which aims to simulate the Bond test experimentally.

The work index is calculated by substituting the grindability value (G) directly into the Bond work index equation. The fact that the calculation of the work index requires the use of an empirical equation specific to the method is another feature that distinguishes this method from others. It has also been suggested that the standard method can be shortened by using the number of cycles in the second period of this method,  $N_c$ , as the initial cycle of the standard Bond method (Deniz, 1996).

In a study conducted by Ersayın and Kırşan (1995), it was suggested that the Magdalinovic method gave the best result in the comparison of Kapur, Karra, and Magdalinovic methods.

The average error value between the experimental and calculated work indices obtained as a result of Magdalinovic's research (2012) for 4 different sizes of 3 ores was determined as 4.77.

#### 4.4.5. Köse and Koç Method (1990)

The method developed by Köse and Koç (1990) is based on the principle that determining the number of turns for the first period of the standard test based on the proportion of material finer than the test sieve in the feed can shorten the total number of periods.

As a result of the research conducted by Köse and Koç on 4 ores, the average error value between the experimental and calculated grindability was determined to be 1.22.

#### 4.4.6. Sönmez and Demirel Method (1992)

Sönmez and Demirel (1992) used a cumulative base kinetic model. In this model, there are two methods for calculating the breakage rate values. The first is to determine the particle size distributions of the product by performing batch grinding experiments at varying

grinding times, plotting the cumulative sieve top values for each particle size against time, and determining the breakage rate values from the slope of the lines obtained. The second method is the linear regression method.

The advantage of this method is that it takes much less time than the standard Bond method in terms of the number of experiments and the results that can be obtained for different size values. However, the disadvantage of this method is the need for a Bond mill.

As a result of the research conducted by Sönmez and Demirel on 3 ores, the average error value between the experimental and calculated work indices was determined to be 2.7.

### 4.5. Methods to Determine the Work Index Without a Mill

#### 4.5.1. Yashima et al. (1970-1977)

Yashima, Morohashi, Awano, and Kanda presented a completely unique, non-standard method of work index determination in 1970. Using dimensional analysis, Yashima and Fujita (1977) developed an empirical correlation relationship between work index and mechanical properties of materials with seven different hardnesses.

The method of Yashima et al. can be applied to brittle materials with hardnesses ranging from 2 to 6 mohs.

Although this method is an approach that takes into account the mechanical properties of the material, its applicability does not seem to be very practical. This is because a large part of the work goes into determining the properties needed for the correlation. This is particularly true for inhomogeneous materials such as ores. These properties, which differ from sample to sample, need to be determined for each ore.

As a result of the research conducted by Yashima et al. on seven ores, the average error value between the experimental and calculated work indices was determined to be 7.27.

#### 4.5.2. Deniz and Ozdag Approach (2003)

The method developed by Deniz and Ozdağ (2003) is a new approach that can eliminate the difficulties in determining Bond grindability and work index values, which are important parameters in the selection of crushing and grinding equipment.

The basic element of this approach is to determine the physicomaterial parameters that are thought to affect the grinding of a material and that is determined by static methods by dynamic methods, which can be obtained more easily, and to reveal the relationship with grindability.

It has been determined that the dynamic bulk modulus gives the best result between dynamic parameters and grindability. When the grindability and work index values determined experimentally and calculated from the dynamic bulk modulus are compared, the general average error value is around 9%. The most important result of this study is that, for the first time, a relationship between grindability and seismic velocities has been established.

#### 4.5.3. Deniz et al.'s Approach (1996)

The method developed by Deniz, Balta, and Yamık (1996) is an approach based on the excavation mechanics parameters in determining the Bond grindability and work index values, which are important factors in the selection of transfer media type grinding elements.

The basis of the study was to determine the relationship between Bond grindability and work index and Point Load Index (Is), Impact Strength Index (ISI), and Friability Index (FD) values obtained from point loading, impact strength, and drop tests.

These relationships show that it is possible to determine Bond grindability and work index approximately by point loading, impact strength, and drop tests used in excavating.

When the experimentally determined grindability values calculated by point loading, impact strength, and drop tests were compared, the average error values were determined as 11.46% for ISI, 6.01% for Is, and 9.27% for FD. These error values are acceptable in terms of obtaining quick and easy results from point loading, impact strength, and drop tests.

The most important result of this study is that, for the first time, a relationship between coal grindability and work index and the point loading, impact strength, and drop tests used in coal excavation has been demonstrated.

## 5. Conclusion and Suggestions

While very fine grinding cannot be realized in conventional milling equipment due to the use of coarser grinding media, the mills developed in recent years make it possible to grind economically even below 10  $\mu\text{m}$  due to the very high amount of energy released per unit time and volume.

Considering that the need for very fine-sized materials in different branches of industry such as ore dressing, plastics, ceramics, paint, food, and cosmetics will increase in the future, it is seen that the use of the latest mills will increase even more with lower energy consumption compared to conventional mills.

Grinding, one of the mineral processes, is still the most energy-intensive process stage; more than half of the

total energy used is in this area. This is why facilities must be improved, equipped with the right equipment, and implemented with energy-saving methods. In this context, the selection of an unsuitable mill is based on the properties of the ore. It is certain to increase operating costs even more. Today, depending on the properties of the ore and the desired alternative mills depending on particle size, mills have been designed and continue to be designed.

For example, with a classic ball mill, it takes both time to make milling to a micron level and an excessive increase in costs, which leads to a lot of problems. Instead, it should be stirred for a very short time in a mill to lower the cost of grinding to the level of a few microns. Similarly, for dry ingredients with a crunchy texture, such as the classic higher capacity, instead of drum mills, the use of roller mills for the operation will be in your best interest. Also, after grinding, the beneficiation method to be applied to the ore plays an important role in mill selection.

According to the findings of Mosher and Tague (2001), it was determined that enhancing the repeatability and reproducibility of Bond's grindability test could be achieved by closed-loop criteria and accurately establishing the size distributions of the feed and product.

Energy calculations can be made for very fine grinding, just as they can be made for coarser grinding processes. However, there may be specific challenges or complexities associated with energy calculations for very fine grinding that make them more difficult or less accurate compared to coarser grinding processes. Here are some reasons why energy calculations for very fine grinding may be challenging:

**Particle Size Distribution:** In very fine grinding, the particle size distribution may be close to the particle sizes of similar-sized particles. Measuring the energy required to grind particles in this size range accurately can be challenging due to the small size of particles.

**High Surface Area:** Very fine grinding often results in a high surface area of the ground material. This increased surface area can lead to increased energy consumption because of the additional surface energy that needs to be overcome during grinding.

**Particle Interactions:** Fine particles may exhibit different behaviors, such as agglomeration or surface interactions, which can affect the energy required for grinding. These interactions may not be accounted for in simplistic energy calculations.

**Equipment Limitations:** The instrumentation and equipment used to measure energy consumption during grinding may have limitations in accurately capturing fine grinding processes, especially when dealing with small quantities of material.

**Heat Generation:** Fine grinding can generate more heat due to increased friction and energy input. This heat generation needs to be accurately accounted for in energy calculations.

**Adaptive Grinding:** In some fine grinding processes, the grinding conditions may change dynamically based on the material properties and desired particle size. This adaptability makes it challenging to define a single energy consumption value.

**Data Variability:** Fine grinding can exhibit more variability in terms of energy consumption because of the sensitivity to factors like particle size, hardness, and moisture content. Gathering accurate and representative data may require more effort.

**Specific Models:** Fine grinding may require more complex and specific models to accurately predict and calculate energy consumption. These models can be computationally intensive.

Despite these challenges, energy calculations for very fine grinding are conducted in research and industrial settings. Researchers and engineers use various techniques and instruments, such as grinding mills equipped with power meters or calorimeters, to measure energy consumption accurately.

It's essential to acknowledge that while energy calculations for very fine grinding are possible, they may require more specialized methods and equipment compared to coarser grinding processes. Additionally, practical experience and empirical data from similar processes or materials can complement energy calculations to optimize very fine grinding operations.

### Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

### References

- Amelunxena, P., Berrios, P. and Rodriguez, E. (2014). The SAG grindability index test. *Minerals Engineering*, 55 / 42-51.
- Batterham, R. (2011). Trend in comminution driven by energy, *Advanced Powder Technology*, 22, 138-140.
- Beke B. (1981). The Process Of Fine Grinding, *Developments in Mineral Science and Engineering*, Martinus Nijhoff, Dr W. Junk Publishers, 150 pp.
- Bilen C. (2021). A New Chemical Method to Predict Grindability Index (HGI) for Limestones, *BSEU Journal of Science*, 9(1), 124-137.
- Bond, F.C. (1961). Crushing and grinding calculations. *Br. Chem. Eng. Part I*, 6 (6), 378-385, Part II, 6 (8), 543-548.
- Coutinho, L.F., and Embiruçu, M. 2007. On the control problem in fluid energy milling and air classification processes: approaches for experimentation and modeling of particulate systems in an industrial scale plant, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18333667>
- Deniz, V. (1996). Bond Öğütülebilirliği ve İş İndeksi ile Statik ve Dinamik Parametreler Arasındaki İlişkiler, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Deniz, V., Balta, G. ve Yamık, A. (1996). The Interrelationships Between Bond Grindability of Coals and Impact strength Index (ISI), Point Load Index (I<sub>s</sub>) and Friability Index (F<sub>D</sub>). *Proceedings of the VI. International Mineral Processing Sym*, Kuşadası, Türkiye.
- Deniz, V., and Ozdag, H. (2003). A new approach to Bond grindability and work index. *Minerals Engineering*, 16, pp.211-217.
- Ellerbrock, H. G. (1975). Über die Mahlbarkeitprüfung von Zementklinker. *Fourth European Symp. Comminution. Preprint* 197-211.
- <https://electricalworkbook.com/fluid-energy-mill/>
- <https://www.hiimac.com/>
- <https://www.root-asia.com/root-technology/>
- <https://ballmillssupplier.com/product-center/vibration-ball-mill/>
- Haese, U., Scheffler, P., Fasbender H. (1975). Mahlbarkeitsprüfung und Rohrmühlenauslegung bei Zementrohstoffen (Grindability testing and tube mill design for cement raw materials). *Cement-Kalk-Gips*, 8, 316-324.
- Hukki, R.T. (1961). Proposal for a Solomonian settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. *Transactions of SME-AIME*, 220:403-408.
- Jeswiet, J. and Szekeres, A. (2016). Energy consumption in mining comminution, *Procedia CIRP*, 48, pp. 140-145.
- Kannewurf, A. S. (1957). Research pushes Grindability Guesses into the Background. *Rock Products May* 66 ff. Ref: *Zement-Kalk-Gips*, 435.
- Kapur, P.C. Analysis of the Bond grindability test. *Trans. Inst. Min. Metall.* 1970, 79, 103-107.
- Karra, V.K. (1981). Simulation of Bond grindability tests. *CIM Bull.* 74, 195-199.

- Ersayın S., Kırşan H.İ. (1995). A Comparison of Methods For Rapid Determination Of Bond Work Index, *14th Mining Congress Of Turkey*, 157-164.
- Köse M. ve Koç M. (1990). A Simplified Method of Determining the Bond Work Index, *Proceeding of the III. International Mineral Processing Symposium*, Turkey, 44-54
- Lamartino P., Mercuri S., Murdocco A., Crivelli D., Malorgio S., Joost B. (2018). Modular spiral jet mill: an innovative tool for targeted micronization of pharmaceutical products, *Material Science*, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55653328>
- Lehmann, H. and Haese, U. (1955). Der Mahlbarkeitsprüfer, ein Gerat zur Untersuchung der Mahleigenschaften harter Stoffe. *Tonindustriezeitung* 79 / 91-94.
- Magdalinovic, N., Trumic, M., Trumic, G., Magdalinovic, S. (2012). Determination of the Bond work index on samples of non-standard size. *Int. J. Miner. Process.* 114–117, 48–50.
- Magdalinovic, N. (1989). Calculation of Energy Required for Grinding in a Ball Mill. *International Journal of Mineral Processing*, 25, 41-46.
- Menéndez-Aguado, J.M., Dzioba, R.B., Coello-Velázquez, A.L. (2005). Determination of work index in a common laboratory mill. *Miner. Metall. Process.* 22 (3), 173–176.
- Menéndez-Aguado, J.M., Coello-Velázquez, A.L., Dzioba, B.R., Diaz, M.A.R. (2006). Process models for simulation of Bond tests. *Trans. IMM, Sec. C* 115 (2), 85–90.
- Mhadhbi, M. (2021). Simulation of a Laboratory Scale Ball Mill via Discrete Element Method Modelling, *Advances in Materials Physics and Chemistry, Vol.11 No.10*
- Morrell, S. (2004). An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits. *Int. J. Miner. Process.*, 74, 133–141.
- Mosher, J.B., Tague, C.B. (2001). Conduct and precision of Bond grindability testing. *Miner. Eng.*, 14 (10), 1187–1197.
- Orr, C. 1966. Particulate Technology. *New York, NY: Macmillan*.
- Remenyi, K. (1966). Investigation on Grindability of Limestone and Rock-Salt Mixture in Hardgrove Mill. *Acta Techn. Ac. Sci. Hung.*, 56, 75-90
- Rhymer D., Ingram A., Sadler K., Windows Yule C.R.K. (2022). A discrete element method investigation within vertical stirred milling: Changing the grinding media restitution and sliding friction coefficients, *Powder Technology*, 410,117825.
- Rumpf, H., Müller W. (1962). An investigation into the mixing of powders in centrifugal mixers. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 40, pp. 272-280
- Rumpf, H. (1977). Problems of scientific development in particle technology, looked upon from a practical point of view. *Powder Technology* 18, 3–17.
- Smith, R. W. and Lee, K. H. (1968). A comparison of Data from Bond Type Simulated Closed-Circuit and Batch Type Grindability Tests. *Trans. SME-AIME*, 241, 99-101.
- Sönmez, B. ve Demirel, H. (1992). Benzetişim Kullanılarak Bond Öğütülebilirlik Testinin Basitleştirilmesi. *4. Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu*, Cilt 1, 55-56, Antalya.
- Tavares, L.M., R.M, D.C., Guerrero, J.C., 2012. Simulating the Bond Rod Mill Grindability Test. *Miner. Eng.*, 26, 99–101.
- Wasmuth, H. D. (1969). Bestimmung der Mahlbarkeit und des spezifischen Energiebedarfs bei der Mahlung von Erzen und Gesteinen mittels Bond-Test. *Aufbereitungs-Technik* 284-289
- Yashima, S., Morohashi, S., Awano, O., Kanda, Y. (1970) *Kagaku Kogaku*, 34, 210–218.
- Yashima, S., Fujita, T., *J. Soc. Powder Technol. Jpn.*, 28, 257– 266, 1991; Ushiki, K., *Powder Technology Handbook*, 2nd Ed., Macel Dekkar, New York, 1977.
- Zeisel, H. G. (1953). Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Mahlbarkeit. *Schriftenreihe der Zementindustrie, VDZ, Dusseldorf*, 14.

## ESKİŞEHİR OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Osman PARLAKTUNA<sup>1</sup>, Hasan Hüseyin ERKAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Eskişehir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2741-6455>

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Eskişehir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-3114-8393>

Anahtar Kelimeler	Öz
Elektrik Elektronik Mühendislik Eğitim Araştırma	<i>Bu derleme makalede önce Elektrik-Elektronik Mühendisliğinin kısa tarihçesi anlatılmış, elektrik-elektronik mühendislerinin çalışma alanları belirtilmiştir. Daha sonra Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bölümünün kuruluşu, gelişimi ve günümüzdeki durumu anlatılarak eğitim ve araştırma laboratuvarları hakkında bilgi verilmiştir. Elektrik-Elektronik Teknolojilerindeki son gelişmeler Gömülü Sistemler özelinde ele alınmış, ders içeriklerinin bu gelişmeleri takip edebilmek için düzenlenmesi anlatılmıştır.</i>

### ESKİŞEHİR OSMANGAZI UNIVERSITY ELECTRIC-ELECTRONICS ENGINEERING DEPARTMENT

Keywords	Abstract
Electric Electronics Engineering Education Research	<i>In this review article, first the brief history of Electrical-Electronics Engineering is explained, the diverse working areas of electrical-electronics engineers are outlined. Then the establishment, development and current situation of Electrical-Electronics Department at Eskişehir Osmangazi University is explained. Additionally, information about education and research laboratories is provided. Technological developments in embedded systems are investigated and course content adjustments to cope with these developments are explained.</i>

Derleme Makale	Review Article
Başvuru Tarihi : 13.11.2023	Submission Date : 13.11.2023
Kabul Tarihi : 14.12.2023	Accepted Date : 14.12.2023

\* Sorumlu yazar: [oparlak@ogu.edu.tr](mailto:oparlak@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1390362>

#### 1. Giriş

Elektrik-Elektronik mühendisliği, sağlam matematik ve fizik bilgisi gerektiren, farklı konularda çalışma imkânı olan ve her yıl birçok gelişmenin gerçekleştiği bir mühendislik dalıdır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü bu gerçekler çerçevesinde öğrencileri iş hayatına hazırlamak için müfredatını güncellemekte, laboratuvarlarını mümkün olduğunca yenilemektedir. Bu derleme makalede Bölüm 2'de Elektrik-Elektronik Mühendisliğinin kısa tarihçesi verilmekte, çalışma alanları anlatılmaktadır. Bölüm 3'te ise Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünün kuruluşundan günümüze gelişimi, bölüm laboratuvarları ve araştırma laboratuvarları anlatılmaktadır. Bölüm 4'te gömülü sistemler konusunda teknolojik gelişmeler anlatılmakta ve bu gelişmeler doğrultusunda bölümde yapılan

iyileştirmeler anlatılmaktadır. Sonuçlar ise Bölüm 5'te verilmiştir.

#### 2. Elektrik Mühendisliği ve Elektronik Mühendisliği Tarihçesi

Elektrik Mühendisliği elektrik ve elektromanyetizma üzerine çalışan ve bunları kullanarak çeşitli donanım ve sistemlerin tasarımı ve geliştirilmesi ile ilgilenen kapsamlı bir mühendislik disiplini. 19. yüzyıldan itibaren telefon, telgraf, elektrik enerjisinin üretimi, dağıtımı ve geniş ölçekte kullanımıyla birlikte ayrı bir disiplin olarak ortaya çıkmıştır. 20. yüzyılda yarı iletken teknolojisinin gelişimi, transistörün icadı, mikro işlemcilerin ve bilgisayarların gelişimi ile daha kapsamlı bir disiplin haline gelmiştir.

Elektriğin bilim dünyasında bir araştırma alanı olarak yer alması 17. yüzyılda gerçekleşmiştir. İlk elektroskobu



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



icat eden William Gilbert İlk elektrik mühendisi olarak kabul edilebilir (Britannica). 18. yüzyılda, elektrikle ilgili bilgiler hızla artmıştır. Benjamin Franklin'in uçurtma deneyi (1752) (Mehter, 2019), elektriğin yıldırım ile ilişkisini anlamamıza katkı sağlamıştır. Ayrıca, Luigi Galvani'nin (Kızıltan ve Dalkılıç, 2022) hayvan kasları üzerinde yaptığı deneyler, bioelektrik alanında önemli gelişmelere yol açmıştır. 19. yüzyılın başlarında, elektrik mühendisliği endüstriyel devrimle birlikte patlama yaşamıştır. Michael Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonu keşfi (Bentli, 2007), elektrik enerjisinin dönüşümüne olanak tanımıştır. Thomas Edison (Barnham, 2018) ve Nikola Tesla (Coşkun, 2010) gibi önemli kişiler, elektrik enerjisinin iletimi ve kullanımı konusunda çeşitli buluşlar yapmışlardır. Elektrik mühendisliği, 20. yüzyılda hızla gelişmeye devam etmiş ve bilgisayar teknolojisinin yükselişiyle birlikte dijital elektronik ve iletişim sistemleri gibi yeni alanlara genişlemiştir. Elektrik enerjisinin geniş ölçekli üretimi ve dağıtımı, modern toplumların vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Elektronik mühendisliğinin kökenleri, 19. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. Elektrik mühendisliği ile başlayan bu yolculuk, elektrik enerjisinin kontrolü ve iletimi konularında gelişmeleri içermiştir. Ancak, gerçek elektronik devrelerin ve bileşenlerin ortaya çıkışı, 20. yüzyılın başlarına rastlamaktadır.

20. yüzyılın başlarında, elektron tüpleri elektronik devrelerin temelini oluşturmuştur. Lee De Forest'ın 1906'da icat ettiği "triode" adlı elektron tüpü (Hijiyi, 1992), sinyalleri kontrol etme ve kuvvetlendirme konusunda büyük bir adımdı. Bu adım radyo iletişimi ve ses kuvvetlendirme gibi alanlarda önemli gelişmelere olanak tanımıştır.

1930'ların sonlarına doğru, yarı iletken teknolojisinin gelişimiyle birlikte, transistör icat edildi. Bell Labs'te çalışan William Shockley (Lojek, 2021), John Bardeen ve Walter Brattain tarafından geliştirilen bu küçük ama güçlü cihaz, elektronik mühendisliğinde devrim niteliğinde bir ilerleme sağladı. Transistörler, elektronik devrelerin daha küçük, daha dayanıklı ve daha güçlü olmasını sağlar.

1960'larda, tümleşik devre (IC) teknolojisinin ortaya çıkışı, birçok transistörü küçük bir yonga üzerine entegre etme olanağını sunarak elektronik bileşenlerin yoğunluğunu artırdı. Bu, bilgisayarlar, mikroçipler ve diğer karmaşık elektronik sistemlerin gelişimine öncülük etti.

1980'ler ve sonrasında, mikro-elektronik teknolojileri hızla evrim geçirdi ve nanoteknoloji, optoelektronik ve mikroçip tasarımı gibi alanlarda büyük ilerlemeler kaydedildi. Bugün, elektronik mühendisliği, telekomünikasyon, bilgisayar sistemleri, tıbbi cihazlar ve otomasyon gibi birçok alanda geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır.

## 2.1. Çalışma Alanları

Elektrik ve elektronik mühendisleri geniş bir yelpazede farklı alanlarda çalışabilirler. Elektrik ve elektronik mühendislerinin çalışma alanlarından bazıları aşağıda verilmiştir.

1. Enerji Sektörü: Elektrik mühendisleri enerji üretimi, iletimi ve dağıtımı konularında çalışabilirler. Yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliği çalışmaları ve elektrik şebekelerinin geliştirilmesi gibi alanlarda görev alabilirler.

2. Elektronik ve Haberleşme: Elektronik mühendisleri, bilgisayarlar, telefonlar, televizyonlar, radyolar gibi elektronik cihazların tasarımı, üretimi ve bakımıyla ilgilenirler. Ayrıca, haberleşme sistemleri, kablosuz iletişim teknolojileri ve fiber optik ağlar gibi alanlarda da çalışabilirler.

3. Otomotiv Sektörü: Elektrik ve elektronik mühendisleri, otomotiv endüstrisinde araç içi elektronik sistemlerin tasarımı, kontrol sistemleri, otomotiv güç sistemleri gibi alanlarda çalışabilirler.

4. Kontrol ve Otomasyon: Elektrik mühendisleri endüstriyel otomasyon sistemleri, kontrol sistemleri ve süreç otomasyonu gibi alanlarda uzmanlaşabilirler. Bu, üretim tesislerinde verimliliği artırmaya yönelik çalışmaları içerir.

5. Bilgisayar ve Yazılım: Elektrik ve elektronik mühendisleri, bilgisayar ve gömülü sistem donanım tasarımı ve yazılım geliştirme alanlarında çalışabilirler.

6. Tıbbi Elektronik: Elektrik ve elektronik mühendisleri, tıbbi cihazların tasarımı ve geliştirilmesi, biyomedikal teknolojiler ve sağlık sektöründeki elektronik uygulamalar gibi tıbbi elektronik alanında çalışabilirler.

7. Uzay ve Havacılık: Elektrik ve elektronik mühendisleri, savunma sanayi, uzay araştırmaları, uydu tasarımı, roket kontrol sistemleri, radar sistemleri ve havacılık elektroniği gibi uzay ve havacılık sektörlerinde görev alabilirler.

8. Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge): Yeni teknolojilerin keşfi ve geliştirilmesi, inovasyon ve patent çalışmaları, endüstriyel araştırma laboratuvarlarında çalışma imkânı bulabilirler.

Elektrik ve elektronik mühendislerinin bu geniş alanlarda çalışabilme esnekliği, teknolojinin hızla değişen doğasına uyum sağlama ve çeşitli endüstrilerde kariyer fırsatlarına erişme imkânı sağlar.

## 3. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün kuruluş çalışmaları Eskişehir Devlet Mühendislik Mimarlık Akademisinde öğretim üyesi olan Dr. Atalay BARKANA tarafından 1974 yılında

başlatılmıştır. Dr. Atalay BARKANA'nın ağabeyi Dr. Atila BARKANA'nın da akademiye katılmasıyla bölümün kuruluş çalışmaları hız kazanmış ve 1979 yılında Elektrik Mühendisliği Bölümü kurulmuştur. Bölüm 1980 yılında 25 öğrenci ile Bademlik kampüsünde eğitim-öğretime başlamıştır. İzleyen yıllarda Türkiye'de yükseköğretim kurumlarının yeniden yapılandırılması sonucunda 1983 yılında Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi içine alınmıştır. İzleyen yıllarda bölümün adı izlediği müfredata uygun olarak Elektrik-Elektronik Mühendisliği olarak değiştirilmiştir. Bölüm, 1993 yılında Anadolu Üniversitesinin bölünmesiyle oluşturulan Osmangazi Üniversitesi bünyesine geçmiş, bulunduğu Bademlik yerleşkesinde eğitim-öğretim faaliyetlerine devam etmiştir. 1995 yılında da Meşelik yerleşkesine taşınmıştır.

Bölüm kurucuları Dr. Atalay BARKANA ve Dr. Atila BARKANA lisans öğrenimlerini Robert Kolej'de yapmışlar, University of Virginia'da doktora derecelerini almışlardır. Kuruluş yıllarında Elektrik ve Elektronik alanlarında mevcut Türkçe kaynak kitap kıtlığı nedeniyle ve mezunların alanlarında ortaya çıkan dünya çapındaki güncel gelişmeleri izleyebilmeleri için, müfredata çok sayıda İngilizce dil dersi konmuştur. Bu amaçla, birinci yılda haftada 20 saat, ikinci yılda ise haftada 10 saat gibi hazırlık sınıfını andırır bir program oluşturulmuştur. Dersler İngilizce kaynaklardan Türkçe olarak anlatılmış, fakat notlar tahtaya İngilizce olarak yazılmıştır. Bunun sonucu öğrenciler iyi bir düzeyde İngilizce bilerek mezun olmuşlardır. Daha sonra 1993 yılında, İngilizce ders verebilecek öğretim üyelerinin sayısının artmasıyla, Bölümde İngilizce eğitime geçilmiştir.

İlk yıllarda bazı dersler için Ankara ve Bursa'daki üniversitelerden misafir öğretim üyelerinden destek alınmıştır. Dr. Halil EYÜBOĞLU, Dr. Veli Hüsnü TOKMEN, Dr. Doğan ÇALIKOĞLU ve Dr. Ali OKTAY bu akademisyenler arasındadır. Daha sonra ODTÜ Gaziantep yerleşkesinden Dr. Hamdi ATMACA kadroya katılmıştır. Dr. Sıddık YARMAN ve Dr. Faruk YARMAN da bölümde bir süre öğretim üyesi olarak görev yapmışlardır.

1980'li yılların başında bölümde O.D.T.Ü. ve İ.T.Ü. mezunu asistanlar istihdam edilmiştir. Bu asistanlardan bir kısmı lisansüstü eğitimlerini bitirince bölümden ayrılmış, bir kısmı (Dr. Osman Parlaktuna, Dr. M. Bilginer Gülmezoğlu ve Dr. Salih Fadıl) ise halen bölümde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Bu asistanlara ilave olarak 1980'li yılların ortalarında kendi mezunlarımızdan asistanlar istihdam edilmiş ve bu asistanlar daha önce alınanlar ile yurtdışına güncel alanlarda doktora yapmak üzere gönderilmişlerdir. Bölüme doktoralı olarak dönen bu eğitimciler arasında Dr. Osman PARLAKTUNA, Dr. Atif ÇAY, Dr. Salih FADIL, Dr. Nihat ADAR ve Dr. Erol SEKE de bulunmaktadır. Aynı yıllarda kendi istekleriyle Eskişehir'e gelen Dr. Altuğ İFTAR, Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU, Dr. Hasan

Hüseyin ERKAYA, Dr. Doğan Gökhan ECE ve Dr. Odilea Rocha ERKAYA ile bölüm kadrosu zaman içinde güçlenmiştir. İzleyen yıllarda Dr. Rifat EDİZKAN, Dr. Bünyamin TAMYÜREK, Dr. Semih ERGİN, Dr. Hakan ÇEVİKALP, Dr. Hasan Serhan YAVUZ, Dr. Helin DUTAĞACI, Dr. Gökhan ÇINAR, Dr. Özge YANAZ ÇINAR, Dr. Faruk DİRİSAĞLIK, Dr. Gökhan DINDIŞ, Dr. Burak URAZEL, Dr. Kemal KESKİN, Dr. Burak KALECİ, Dr. İpek ÇETİNBAŞ, Dr. Atabak NAJAFİ, Dr. Gülin ELİBOL SEÇİL, Dr. Sezgin SEÇİL ve Dr. Kaya TURGUT akademik kadroya katılmışlardır. Zaman zaman çevre il ve üniversitelerden öğretim üyeleri bölümde ders vermeye davet edilmişlerdir.

Bölümde eğitim-öğretim modeli olarak özellikle İngilizce eğitime geçilmesiyle Amerikan mühendislik bölümleri örnek alınmıştır. Amerikan akreditasyon kuruluşu olan ABET gereksinimleri göz önünde tutulmuş, dönemlik 18 kredi civarında ders yükü esas alınmış, ikinci sınıftan itibaren her yarıyıl bir adet teknik olmayan seçmeli ders önerilmiş, dördüncü sınıf derslerinin tamamı teknik seçmeli derslerden oluşturulmuştur. Teknik seçmeli dersler sayesinde güncel teknolojik konular ve gelişmeler sınıf ortamına taşınabilmektedir. Devre analizi, lojik devreler, elektronik devreler, haberleşme ve kontrol sistemleri gibi temel laboratuvarlar oluşturulmuş ve zaman içinde laboratuvar donanımları güncellenerek teorik dersler uygulamalarla desteklenmiştir. Mezun olan öğrencilerin yüksek gerilim projelerine imza atması için gerekli SMM belgesini alabilecekleri dersler de teknik seçmeli dersler arasında bulunmaktadır.

Son sınıf öğrencilerinin daha önce aldıkları derslerde edindikleri bilgi ve becerileri kullanarak yapacakları "Mezuniyet Projesi" 3 veya 4 kişilik gruplar oluşturularak ve 2 dönemlik bir süreçte gerçekleştirilmektedir. Projenin ilk döneminde öğrenciler Design Processes dersinde yapacakları projenin bilimsel araştırmasını yapmakta, isterleri, kullanılacak metot ve malzemeleri belirleyerek ilk tasarımı yapmaktadırlar. İkinci dönem ise Electrical Engineering Design dersi içinde projenin gerçekleştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Projelere mali destek alınması amacıyla öğrencilerin TÜBİTAK proje desteklerine başvuru yapmaları teşvik edilmektedir. Birçok proje grubu TÜBİTAK proje desteğinden faydalanmıştır.

Bölümde bölümün varlık nedeninin eğitim-öğretim olduğu düşüncesiyle dersler sürdürülmektedir. Öğretim üyeleri öğrenciler tarafından kolayca erişilebilmektedirler.

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 2004-2019 yılları arasında ikinci öğretim lisans programına öğrenci kabul etmiştir.

### 3.1. Bölüm Laboratuvarları

Bölümde eğitim amaçlı olarak Elektrik Makineleri ve Güç Elektronik, Kontrol, PLC, İşaret Tanıma, Elektronik, Devre, Bilgisayar, Haberleşme laboratuvarları bulunmaktadır. Mevcut laboratuvarlar ders saatleri dışında da öğrencilerin kullanımına açıktır. Ayrıca Digital Systems Laboratory, Control Systems Laboratory, Advanced Digital Systems Design with HDL, Computer Programming ve Engineering Graphics derslerine kayıt yaptıran öğrencilerimiz uygulamalarını İleri Bilgisayar ve Yazılım Laboratuvarı ile diğer bilgisayar laboratuvarlarında gerçekleştirmektedir. Bunların dışında fakültemiz bünyesindeki bütün bölümlerde açılan Physics Lab I, Physics Lab II derslerinin laboratuvar uygulamaları, fakültenin fizik laboratuvarlarında yürütülmektedir.

#### 3.1.1. Devre Laboratuvarı

Bu laboratuvar devre analizi, sayısal devreler ve elektronik devreler laboratuvarı olarak kullanılabilir donanıma sahiptir. Laboratuvarında her birinde aynı anda iki öğrencinin çalışabileceği 10 adet deney masası bulunmaktadır. Deney masalarının her birinde, 1 adet osiloskop, 1 adet işaret üretici, 1 adet DC güç kaynağı ve uygulama devrelerinin monte edilip, gerekli giriş beslemelerinin sağlanabildiği 1 adet elektronik deney seti bulunmaktadır.

#### 3.1.2. Bilgisayar Laboratuvarı

Bu laboratuvar "Computer Programming", "Engineering Graphics", "Object Oriented Programming" ve "Numerical Methods" gibi bilgisayar üzerinde uygulamalı anlatılan derslerde kullanılmaktadır. Laboratuvarında 50 adet bilgisayar bulunmaktadır. Bilgisayarlar Intel Core i5 2320 CPU işlemcili olup; 3 GHz 4 GB RAM konfigürasyonuna sahiptir. Bu bilgisayarlara temel altyapı, güvenlik yazılımları ve eğitimde kullanılacak yazılımları yüklenmiştir.

#### 3.1.3. Elektronik Laboratuvarı

Elektronik Laboratuvarında bölümde açılan "Electronics Laboratory", "Circuits Laboratory", "Digital Systems Laboratory" derslerinin deney uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Ayrıca Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde açılan "Digital Systems Laboratory" dersi de bu laboratuvarında yürütülmektedir. Laboratuvarında her birinde aynı anda iki öğrencinin çalışabileceği 10 adet deney masası bulunmaktadır. Aktif olarak kullanılan 9 adet deney masasının her birinde, 1 adet dijital osiloskop, 1 adet sinyal üretici, uygulama devrelerinin monte edilip, gerekli giriş beslemelerinin sağlanabildiği 1 adet elektronik deney seti ve 1 adet DC güç kaynağı bulunmaktadır. Ayrıca laboratuvarında diğer çalışmalarda kullanılmak üzere osiloskoplar, sinyal üreteçleri, elektronik deney setleri, dijital ve analog multimetreler

ile havya setleri, baskı devre el matkabı, el aletleri vb. teçhizat da bulunmaktadır.

#### 3.1.4. Haberleşme Laboratuvarı

Bu laboratuvar, "Communications Laboratory" dersinde kullanılmaktadır. Laboratuvarında genlik modülasyonu (AM), frekans modülasyonu (FM), darbe genlik modülasyonu (PWM) vb. temel analog ve sayısal haberleşme konularını içeren deneyler yapılmaktadır. Haberleşme laboratuvarında her birinde aynı anda bir öğrencinin çalışabileceği 25 adet deney masası bulunmaktadır. Aktif olarak kullanılan bu 25 adet deney masasının her birinde, 1 adet dijital osiloskop ve 1 adet modüler elektronik deney seti mevcuttur. Bu deney setlerinin her biri için, yapılacak uygulamaya göre gerektiğinde takılıp çıkarılabilecek şekilde üretilmiş, 6'şar adet modül bulunmaktadır.

#### 3.1.5. Kontrol Sistemleri Laboratuvarı

Kontrol sistemleri Laboratuvarı "Control Systems Laboratory", "Linear Control Systems Laboratory" ve "Digital Control Systems Laboratory" derslerinde kullanılmaktadır. Laboratuvarında, kontrol sistemlerinde kullanılan temel bileşenlerin anlaşılmasına dönük 6 adet DIGIAC 1750 kontrol deney seti, ölçüm cihazları ve 1 adet ters sarkaç deney seti bulunmaktadır. Ayrıca 10 adet top-yüzey denge deney düzeneği ve 10 adet tek serbestlik dereceli helikopter düzeneği ile denetleyici tasarımı ve deneme deneyleri yapılmaktadır. Deneylerin bazılarında MATLAB ve SIMULINK tabanlı uygulamalar yapılmaktadır.

#### 3.1.6. PLC Laboratuvarı

PLC Laboratuvarında "PLC Automation Systems Laboratory" dersi deneyleri gerçekleştirilmektedir. Bu laboratuvarında öğrencilerin PLC ile yapılan kontrol uygulamaları konularında pratik deneyim kazanmaları amaçlanmaktadır. Bu deneyimi öğrencilere kazandırabilmek için çeşitli laboratuvar uygulamalarında kullanılmak üzere, Siemens S7-200 CPU 212, CPU 222 ve CPU 1212C PLC'ler, EM235 analog digital çevirici modüller, Siemens TD200 metin ekranı, Simatic HMI Panel, çeşitli cisim sensörleri ve diğer envanterler laboratuvarında öğrencilerin kullanımına sunulmuştur. Bu laboratuvarında bir bölüm biyomedikal alanında sinyal toplama, sinyal işleme, örüntü tanıma çalışmaları için tahsis edilmiştir. Ayrıca öğrenciler dönem sonu projelerinde de bu laboratuvarından faydalanmaktadırlar.

#### 3.1.7. Mikroişlemciler ve Sayısal Tasarım Laboratuvarı

Mikroişlemciler Laboratuvarında, 24 adet PIC 877 Eğitim Kiti, 10 adet Texas Instruments C2000 Microcontrollers Development Tools donanımı, 40 adet Xilinx Spartan III Geliştirme kitleri bulunmaktadır. PIC kitleri

“Microcomputer Laboratory” dersinde kullanılmaktadır. “DSP System Design” dersinde öğrenciler, DSP donanım özelliklerini öğrenmekte ve bu donanım üzerinde çeşitli sayısal işaret işleme yöntemlerinin gerçek zamanlı gerçekleşmesi üzerinde pratik çalışma yapmaktadırlar. FPGA kitleri “Introduction to VHDL-FPGA” dersinin laboratuvar uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu derste öğrenciler VHDL ile tanımlanan sayısal devreleri FPGA donanımı üzerine yüklemeyi ve test etmeyi öğrenmektedir. Ayrıca dersin dönem projeleri için, yine öğrencilerce kullanılmak üzere birer adet, Virtex-7, Basys-2-Spartan, Basys-3-Artix, Mercury-FPGA, Altera-DE2 ve UmTRx-SDR eğitim kitleri bulunmaktadır.

### 3.1.8. Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Laboratuvarı

Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Laboratuvarı kapsam olarak Energy Conversion, Electric Machinery ve Power Electronics derslerinin pratik çalışma gereksinimlerini karşılayacak şekilde bir donanıma sahiptir. Laboratuvarında üç adet Elektrik Makineleri Test seti, bu testlerde kullanılacak çeşitli tiplerde DC ve bir ve üç-fazlı AC motorlar, mekanik ve elektriksel yükler bulunmaktadır. Ayrıca Güç Elektroniği laboratuvarında kullanılmak üzere çeşitli motor sürücüler ve darbe genişlik modülasyon (PWM) eviriciler de mevcuttur.

### 3.1.9. Gömülü Sistemler Laboratuvarı

Günümüzde genel amaçlı kişisel bilgisayar sistemlerini ve sunucuları bir kenara koysak bile, programlanabilir teknolojiler hemen hemen tüm elektronik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu programlanabilir ve ayrıca sınırsız büyütülebilir esnekliği sağlayan sayısal elektronik sistemleri Gömülü Sistemler olarak adlandırılmaktadır. Elektrik Makinelerinde, güç elektroniğinde, haberleşme sistemlerinde, kontrol sistemlerinde ve sayabileceğimiz birçok teknolojide hem kolay kullanılabilir ara yüzleri hem de uzaktan algılama ve müdahale imkanları sunmaktadır. Sinyal işleme ve son günlerin popüler konusu olan yapay zekâ sistemlerinde bile en azından sinyalin eldesi ve doğru tekniklerle sayısallaştırılarak işlenecek veriye dönüştürülmesi yine gömülü sistemlerle rahatlıkla gerçekleştirilmektedir. İnternetin hayatımızda her türlü algılama ve kontrol işlemlerinde kullanılabilmesi de yine gömülü sistemler sayesinde mümkün olabilmektedir.

Gömülü sistemler laboratuvarında bulunan 15 adet ARM STM32F4 eğitim kartları kullanılarak temel donanımsal ve yazılımsal mimari yapılar üzerine deneysel çalışmalar, elektrik ve elektronik proje örnekleri üzerine uygulamalar yapılmaktadır.

## 3.2. Araştırma Laboratuvarları

Eğitim-öğretim yanında bölümde çeşitli alanlarda araştırma ve yayın faaliyetleri de yapılmaktadır.

Bölümde elektromanyetik ve akustik dalgalar, kontrol sistemleri, robotik, işaret işleme, görüntü işleme, biyomedikal sistemler, elektronik malzemeler ve aygıtlar, güç elektroniği, enerji sistemleri optimizasyonu, karma enerji sistemleri, mikro şebekeler, elektrik makinaları ve fotovoltaik sistemler alanlarında araştırmalar yapılmaktadır.

### 3.2.1. Yapay Zekâ ve Robotik Araştırma Laboratuvarı

Yapay Zekâ ve Robotik Araştırma Laboratuvarı lisans programlarında seçmeli derslerin uygulamalarında ve bitirme projesi çalışmalarında; yüksek lisans ve doktora programlarının uygulama ve ileri robotik araştırmalarında, gezgin robot ve insansız hava araçları konularında kullanılmaktadır. Laboratuvarında, çeşitli algılayıcılar (lazer, sonar, elektronik pusula, yüksek çözünürlüklü kamera, vb.) ve yerleşik bilgisayar ile donatılmış 3 adet Pioneer 3-DX ve 1 adet Pioneer 3-AT gezgin robot sistemi, tüm laboratuvarı görece şekilde yerleştirilmiş 3 adet kamera, robotlar ile kablosuz haberleşme imkânına sahip masaüstü bilgisayarların bulunduğu çalışma odaları, projeksiyonlu sunum ve toplantı yapılabilecek alan bulunmaktadır. Robotik uygulamalarının, görüntü işlemeden dağıtık sistemlere kadar çeşitli araştırma konularını kapsamı nedeniyle, laboratuvar farklı konulara ilgi duyan öğrenciler tarafından ortak kullanılabilir. Araştırma grubu hâlihazırda 5 öğretim üyesi, doktora ve yüksek lisans öğrencilerinden oluşmaktadır. Kurulduğu 2004 yılından bugüne kadar 6 doktora ve 20’den fazla yüksek lisans mezunu verilmiştir. Laboratuvarında bulunan robotlar Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Yapay Zekâ ve Robotik Laboratuvarında Bulunan Robotlar

### 3.2.2. Biyomedikal Teknolojiler Araştırma Laboratuvarı

Bu laboratuvarında, biyomedikal teknolojiler konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar; fizyolojik sinyaller kullanılarak sürücülerin sağlık durumlarının izlenmesi, mamogram görüntülerinde meme kanseri için



### 3.2.6. Yaşam Bilimleri için Görüntü İşleme Laboratuvarı

Yaşam Bilimleri için Görüntü İşleme Laboratuvarı, 2022 yılında kurulmuştur. Laboratuvarın odaklandığı alanlar 2B renkli imgeleri ve 3B nokta bulutlarını içeren bilgisayarla görü problemleridir. Laboratuvar ekibi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'ndeki Makine Öğrenmesi ve Bilgisayarla Görü Laboratuvarı ve Ziraat Fakültesi'nden Bahçe Bitkileri uzmanları ile iş birliği içinde çalışmaktadır. Laboratuvardaki güncel araştırma ilgi alanı botanik ve tarım uygulamaları için bilgisayarla görü çözümleri üretmektir. Yürümekte olan projeler, bitki modelleme, bitki nokta bulutlarının bölütlenmesi, renkli imgelerden meyve tespiti ve ağaç nokta bulutlarından meyve tespiti problemlerini konu almaktadır. Şekil 5'te nokta bulutu formunda 3B bitki modelleri gösterilmektedir. Laboratuvarında bu tür bitki modellerinin karakteristiklerinin otomatik olarak çıkarılması için bilgisayarla görü ve makine öğrenmesi teknikleri geliştirilmektedir. Belirtilen konularda bir Tübitak 1001 projesi tamamlanmaktadır ve bu konuda 1 doktora tezi tamamlanmıştır.



Şekil 5. Üç boyutlu bitki modelleri

### 3.2.7. Akıllı Kontrol Sistemleri Laboratuvarı

Laboratuvarında yürütülen araştırma faaliyetlerinin temel ilkesi, karmaşık dinamik sistemler için güncel ve orijinal tanımlama ve kontrol çözümlerinin geliştirilmesine yönelik analitik ve akıllı araçların etkin bütünleşmesidir. Geleneksel kontrol yöntemleri, zorlu ve kötü tanımlanmış durumların etkili bir şekilde üstesinden gelmek için genellikle yetersizdir. Yapay zeka tekniklerini büyük tasarlanmış sistemlere uygulamak ve test etmek için gereken matematiksel titizlik eksiktir. Endüstri tarafından kabul edilen performans gerekliliklerine uygun olarak performans gösterilebilen algoritmalar oluşturmak için her iki stratejinin güçlü yanlarını birleştirilmektedir. Çalışılan araştırma konuları aşağıda belirtilmiştir.

- Akıllı Ulaşım Sistemleri
- Demiryolu Çekiş Kontrolü
- Trafik Sinyal Kontrolü
- Enerji verimli Ulaşım Uygulamaları
- Otonom Araç Uygulamaları
- Su Dağıtım Sistemleri

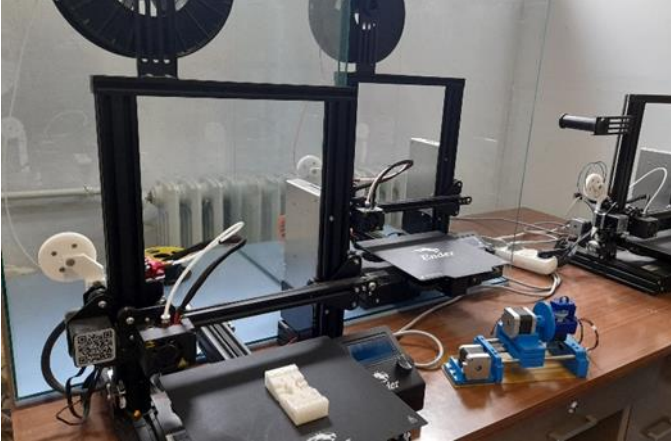
- Pompa Programlama
- Su Dağıtım Şebekesinin Analizi ve Kontrolü
- Ekonomik Yük Dağıtımı, Mikro Şebeke, Optimal Güç Akışı
- Süreç kontrolü

### 3.2.8. Mekatronik Laboratuvarı

Mekatronik Laboratuvarı lisans programlarında seçmeli derslerin uygulamalarında ve bitirme projesi çalışmalarında; yüksek lisans ve doktora programlarındaki uygulamalı araştırma-geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Sabit ve hareketli mekatronik sistemler üzerine programlanabilir, yarı-otonom, otonom ve uzaktan kumandalı elektromekanik tasarım ve gerçekleştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu kapsamda laboratuvarında sabit olanlarının yanısıra hareketli kara, hava ve su robotları çalışılan konulardır. Mekatronik sistemler üzerine yapılan çalışmalar konsept ve detaylı tasarım aşamalarıyla başlayıp, test ve prototip geliştirme gibi aşamalar ile devam edebilmektedir. Algılayıcılar konusunda olduğu kadar eyleyiciler konusunda da çalışmalar içerildiğinden her türlü elektronik ve özellikle gömülü elektronik konuları, arayüz geliştirme ve kontrol yazılımları da laboratuvarında yapılan yaygın çalışmalar arasındadır. Laboratuvar farklı konulara ilgi duyan öğrenciler tarafından kullanılabilir. Laboratuvarında çeşitli amaçlara yönelik elektronik güç kaynakları ve ölçü aletlerinin yanısıra CNC freze (Şekil 6) ve 3B yazıcılar (Şekil 7) bulunmaktadır.



Şekil 6. CNC Freze



Şekil 7. 3B Yazıcılar

### 3.3. Lisansüstü Eğitim

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 1980'li yıllardan beri Fen Bilimleri Enstitüsü'nün bir anabilim dalı olarak Elektronik, Haberleşme, Kontrol ve Kumanda, Enerji, Elektromanyetik Alanlar, Sinyal İşleme, Biyomedikal dallarında yüksek lisans ve doktora eğitimi de vermektedir. 2022 yılında Türkçe lisansüstü programlara ek olarak İngilizce yüksek lisans ve doktora programları da açılmıştır.

### 3.4. Akreditasyon

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün eğitim-öğretim programı 2012-2020 yılları arasında MÜDEK tarafından akredite edilmiştir. İzleyen yıllarda akreditasyon için başvurama kararı alınmıştır. İhtiyaç duyulduğunda bölümün eğitim-öğretim programı güncellenmekte ve gelişen teknoloji yakından takip edilmektedir.

### 3.5. Mezun sayısı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü kuruluşundan 2023 Kasım ayına kadar 3505 lisans, son 24 yılda da 195 yüksek lisans ve 46 doktora öğrencisi mezun etmiştir. Türkiye'de pek çok firmada çalışan mezunlar olduğu gibi dünyanın pek çok ülkesinde de çalışan mezunlar bulunmaktadır.

## 4. Teknolojik Gelişmelerin Takibi ve Müfredatın Gelişmelere Uyarlanması Çalışmaları

Elektrik Elektronik mühendisliği sürekli teknolojik gelişmeler olduğu bir mühendislik dalıdır. Bölümümüz güncel teknolojik gelişmeleri izlemekte ve öğrencilerimizin bu gelişmelerden bilgi sahibi olması için gerekli müfredat değişikliklerini yapmakta, ders içeriklerini güncellemekte ve laboratuvarlar oluşturmaktadır. Bu bölümde gömülü sistemler özelinde teknolojik gelişmeler anlatılmakta, bu konuyla ilgili müfredat değişiklikleri ve laboratuvar çalışmaları anlatılmaktadır.

Günümüzde elektrik-elektronik mühendislerinin önemli bir çalışma sahası gömülü sistem tasarımı ve yazılımıdır. Gömülü sistemler, genellikle bir cihazın veya makinenin içine entegre edilmiş, cihaz/makine için gerekli görevlerin bazıları ya da tümünü yerine getirmek üzere tasarlanmış çoğunlukla işlemci içeren sistemlerdir. Bu sistemler genellikle kullanıcı tarafından fark edilmezler. Örneğin, ev aletleri, otomobiller, dijital termostatlardan tıbbi cihazlara kadar birçok farklı alanda gömülü sistemler kullanılabilir. Bu sistemler genellikle enerji verimliliği, performans ve özel görevlere odaklanarak tasarlanır. Gömülü sistemlerin, işlemci içeriyorlarsa, programlanmasında genellikle C/C++ ve Python programlama dilleri kullanılmaktadır. Bir gömülü sistem elektronik ve bilgisayar mühendisliği disiplinlerine ek olarak makine mühendisliği ve kontrol mühendisliği disiplinleri de içeriyorsa bu durumda mekatronik sistem olarak da isimlendirilmektedir (Alciatore ve Histan, 2011).

Gömülü sistemlerde kullanılan bilgisayarlar, genellikle mikrodenetleyiciler veya mikroişlemciler olarak adlandırılır. Mikrodenetleyiciler, genellikle bir işlemci, bellek, giriş/çıkış birimleri ve zamanlayıcı gibi temel öğeleri içerir. Mikrodenetleyiciler, düşük güç tüketimi, küçük boyut, düşük maliyet ve özel bir uygulama için optimize edilmiş özellikler gibi avantajlara sahiptir. Arduino ve Raspberry Pi tek kart bilgisayar platformlarına örnek olarak verilebilir. Bu platformlar günümüzde gömülü sistem geliştiricileri arasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gömülü sistemlerde sıkça kullanılan işlemci türlerinden bazıları aşağıda belirtilmiştir.

1. ARM İşlemciler: ARM mimarisi, düşük güç tüketimi, küçük boyut ve yüksek performans kombinasyonu nedeniyle birçok gömülü sistemde tercih edilir. Özellikle mobil cihazlardan IoT cihazlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılır.

2. PIC ve AVR Mikrodenetleyiciler: Microchip Technology tarafından üretilen PIC ve Atmel tarafından üretilen AVR serisi, özellikle hobi elektroniği, otomasyon ve gömülü sistem uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

3. Intel Atom ve Celeron: Düşük güç tüketimi ve yüksek entegrasyon özellikleriyle bilinen Intel Atom ve Celeron işlemcileri, gömülü sistemlerde özellikle yüksek bellek kapasitesi, kapsamlı çevre elemanları ve zenginleştirilmiş bir arayüz içeren endüstriyel uygulamalarda tercih edilebilir.

4. Raspberry Pi ve Arduino: Raspberry Pi, ARM tabanlı bir mikroişlemci içeren tek kart bilgisayar platformudur. Arduino ise genellikle ATmega serisi mikrodenetleyiciler içeren bir geliştirme kartı platformudur. Her ikisi de özellikle öğrenme amaçlı gömülü sistem projelerinde popülerdir.

5. TI MSP430 ve STM32: Texas Instruments'ın MSP430 serisi ve STMicroelectronics'in STM32 serisi gibi

mikrodenetleyiciler, enerji verimliliği ve geniş bağlantı seçenekleri nedeniyle IoT ve taşınabilir cihazlarda tercih edilir.

6. NXP/Freescale i.MX: NXP Semiconductors tarafından üretilen i.MX serisi, genellikle medya oynatma ve grafik performansı gerektiren gömülü uygulamalarda kullanılır.

7. DSP (Digital Signal Processors): Gerçek zamanlı sayısal sinyal işleme uygulamalarında tercih edilmektedir (Doğan İ. Ve Davies A, 2019). Bu işlemciler telekomünikasyon, motor kontrol, güç elektroniği, hassas ölçme ve algılama, yenilenebilir enerji, aydınlatma ve diğer elektronik sistemlerde uygulamalarında kullanılmaktadır. DSP'lerde sayısal işlemler sabit-noktalı (fixed-point) veya kayan noktalı (floating-point) formata göre yapılabilmektedir. Sabit-noktalı DSP işlemcilerinin boyutları küçüktür ve daha az güç harcarlar. Sabit-noktalı işlemciler, kayan-noktalı işlemcilere göre daha ucuzdur. Bu işlemciler özellikle yüksek miktarda üretim yapılan ürünlerde tercih edilmektedir. Uygulama alanlarına özelleştirilmiş DSP'ler bulunmaktadır. Analog Device, Texas Instruments, Cirrus Logic ve Infineon DSP işlemcisi üreten firmalardan bazılarıdır.

Endüstride gömülü sistem uygulamaları oldukça çeşitlidir ve birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Bu sektörlere örnekler aşağıda verilmiştir.

1. Ev Aletleri: Mikrodalga fırınlar, çamaşır makineleri, buzdolapları gibi ev aletleri genellikle gömülü sistemleri içerir.
2. Otomotiv Sektörü: Otomobil motor kontrol sistemleri, fren sistemleri, güvenlik sistemleri, bilgi ve eğlence sistemleri gibi birçok gömülü sistem içerir.
3. Tıbbi Cihazlar: EKG cihazları, tansiyon ölçerler, tomografi makineleri gibi tıbbi cihazlar gömülü sistemlerle çalışır.
4. Enerji Yönetimi: Akıllı şebekeler, enerji sayaçları, güneş enerjisi invertörleri gibi enerji yönetimi uygulamalarında gömülü sistemler kullanılır.
5. Endüstriyel Otomasyon: Fabrika otomasyon sistemleri, robot kontrol sistemleri, otomasyon kontrol panoları gibi uygulamalarda gömülü sistemlere sıkça rastlanır.
6. Telekomünikasyon: Baz istasyonları, yönlendiriciler, modemler ve diğer telekomünikasyon ekipmanları gömülü sistemleri içerir.
7. Taşıma Araçları: Uçaklar, trenler, gemiler ve diğer taşıma araçları, gömülü sistemleri kontrol ve iletişim amaçları için kullanır.
8. Askeri Uygulamalar: Askeri araçlar, güvenlik sistemleri ve iletişim ekipmanları gibi birçok askeri uygulama gömülü sistemleri içerir.

9. Akıllı Ev Teknolojileri: Akıllı termostatlar, güvenlik kameraları, akıllı aydınlatma sistemleri gibi akıllı ev uygulamalarında gömülü sistemler kullanılır.

10. Tarım Teknolojileri: Otomatik sulama sistemleri, tarım makineleri kontrol sistemleri gibi tarım uygulamalarında gömülü sistemlere rastlanır.

Bu örnekler, gömülü sistemlerin geniş bir yelpazede uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir.

Eskişehir Osmangazi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü olarak öğrencilerimizin gömülü sistemler konusunda uzmanlaşması amacıyla müfredatımızda düzenlemeler yapılmıştır.

Birince yarıyılıda açılan "Introduction to Electrical and Electronics Engineering" dersinde öğrencilere Arduino veya Raspberry Pi kullanabilecekleri projeler verilerek mikrodenetleyicilerle eğitim hayatlarının başlangıcında tanışma imkânı sağlanmaktadır.

Birinci ve ikinci yarıyılıda açılan "Introduction to Programming" ve "Computer Programming" dersleri ve laboratuvarları çerçevesinde programlamanın temelleri C dili kullanılarak öğretilmektedir.

Dördüncü yarıyılıda açılan "Logic Design" ders ve laboratuvarında sayısal tasarımın temelleri anlatılmaktadır. Beşinci yarıyılıda açılan "Introduction to Microcomputers" dersi ve laboratuvar dersinde öğrenciler mikrobilgisayar iç yapısını ve çevre elemanlarını, entegre geliştirme ortamı (IDE: Integrated Development Environment) üzerinde kod geliştirmeyi ve hata ayıklamayı ve geliştirme platformu üzerinde çevre elemanlarını kullanmayı öğrenmektedir.

Bölümümüzde DSP eğitimi 2001 yılında açılan "DSP Fundamentals" dersi ile DSP başlanmıştır. Bu eğitime "DSP System Design" dersi ile devam edilmektedir. Ders kapsamında öğrencilere Texas Instruments TMS320F28335 DSC(Digital Signal Controller) ile gerçek zamanlı sayısal işaret işleme uygulamalarının nasıl geliştirildiği, bunun için hangi donanım ve yazılım araçlarının kullanıldığı gösterilmektedir. Laboratuvar ve proje çalışmaları ile öğrencilerin teorik bilgileri pekiştirmeleri ve DSP'lerin kullanımı hakkında beceriler kazanmaları sağlanmaktadır. TMS320F28335, C2000 DSP ailesinden olup 32-bit sayısal mikrodenetleyicidir. Bu işlemci hem DSP hem de mikrodenetleyicide olan özelliklere sahiptir. TMS320F28335 ile 32-bit hem sabit noktalı hem de kayan-noktalı sayısal işlemler yapılabilmektedir. TMS320F28335 kontrol, güç elektroniği, yenilenebilir enerji, motor kontrolünde ve askeri elektronik devre uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bölümümüzde "Introduction to Embedded Systems" dersi kapsamında ST Microelectronics tarafından üretilen 32-bit mikrodenetleyiciler anlatılmaktadır. Öğrenciler tarafından ders ve hobi kapsamlarında yaygın olarak kullanılan Microchip Technology tarafından üretilen PIC ve ATMEL tarafından üretilen Atmega328 serisi 8-bit



mikrodenetleyiciler ile donanımsal ve yazılımsal karşılaştırmalar yapılmaktadır. Sayısal ve analog çevre elemanları, zamanlama ve denetim donanımları incelenmekte, ardışıl ve çok görevli yazılımsal mimariler ile üretilebilecek çözümler anlatılmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında STM32F103/STM32F407 deney setleri ile örnek uygulamalar yaptırılmaktadır.

Ayrıca "Object Oriented 1" ve "Object Oriented 2" dersleri ve laboratuvarlarında nesne tabanlı programlama kavramı Python dili kullanılarak öğretilmektedir.

Gömülü sistemler konusunda bölümde işlenen konulardan biri de FPGA (Field-Programmable Gate Array) ve VHDL (VHSIC Hardware Description Language) dir. FPGA gömülü sistemlerde kullanılan ancak geleneksel mikroişlemcilerle benzemeyen bir tür tümleşik devre (IC) teknolojisidir. FPGA'lar, kullanıcıların özel mantıksal devreleri tasarlamak ve bu devreleri programlamak için esnek bir platform sağlar. Bu nedenle FPGA'lar içine kapasitesinin elverdiği sayıda işlemci ve/veya mikrodenetleyici ve ilgili çevre elemanları tasarım ile gömülebilir. SoC (System on Chip) hedefli FPGA'lar bu amaca oldukça uygundur. Böylelikle farklı tümleşik devrelerin bir kart üzerinde birleştirilmesiyle oluşturulacak sistemlerden çok daha yüksek bir performans gösterirler. FPGA'lar genellikle donanım tabanlı paralel işleme için uygundur ve geniş bir uygulama yelpazesi için özelleştirilebilir. VHDL (VHSIC Hardware Description Language) ise bir donanım tanımlama dilidir. FPGA'lar gibi programlanabilir mantık cihazları için tasarım yapmak için kullanılır.

Bölümümüzde açılan "Introduction to VHDL-FPGA" dersinde HDL mantığı anlatılmakta, VHDL öğretilmekte ve uygulama kısmında öğrencilerin bizzat FPGA üzerinde istenilen sayısal devreleri VHDL ile tasarlaması/test etmesi sağlanmaktadır. Her hafta yapılan uygulamalara ilave olarak küçük gruplara farklı dönem projeleri atanmaktadır. Bu projelerde öğrenciler problem-çözüm-tasarım-test-sonuç-raporlama olarak belirlenen süreçleri öğrenmekte ve bu süreçlere uygun olarak projelerini yapmaktadırlar.

## 5. Sonuç

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 43 yılı aşan bir süredir Eskişehir yerinde eğitim-öğretim ve araştırma yapmakta, tüm Türkiye'de ve dünyanın pek çok ülkesinde hizmet üreten mühendisler yetiştirmektedir. Bölümümüzde öğrencilere elektrik, elektronik, haberleşme, enerji ve kontrol alanlarında güncel konular seçmeli dersler aracılığı ile aktarılmaktadır. Mesleki dersler yanında öğrencilere proje çalışmaları yaptırılarak iş hayatına hazır olmaları sağlanmaktadır.

## Kaynaklar

- Alciatore, D.G, ve Histan M.B. (2011) Introduction to Mechatronics and Measurement Systems, 4th edition, Barnham, K. (2018) Bilim İnsanlarının Yaşam Öyküleri, Thomas Edison, Tübitak Yayınları.
- Bentli, F. (2007) Bilime Yön Verenler, Evrensel Deha Michael Faraday, Elektrik Mühendisliği, 430. Sayı, 147-150.
- Britannica.<https://www.britannica.com/biography/Wil-liam-Gilbert>. Erişim 3.11.2023
- Coşkun, A. (2010) Elektriğin Unutulmuş Babası, Bilinmeyen Dahi Nikola Tesla, Bilim ve Teknik, Temmuz 2010, 104-106.
- Doğan, İ ve Davies A. (2019) The Evolution of Digital Signal Processors, 6th IEEE History of Electrotechnology Conference, 25-29, 18-19 Sept 2019, Glasgow, UK.
- Hijiya, J. A. (1992) Lee De Forest and the Fatherhood of Radio, Lehigh University Press.
- Kızıltan E. Dalkılıç N. (2022). Elektrofizyolojinin Tarihsel Serüveni: Galvani Dönemi, *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 12(1), 24-38, DOI: 10.31020/mutfd.992710. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1963382>
- Lojek, B. (2021) William Shockley: The Will to Think, Springer Biographies
- Mehter, U. (2019) Bilimin Devleri Benjamin Franklin, Kathleen Krull'un kitabından çeviri, Martı Yayınları.
- Seke E. (2017) VHDL Örnekleriyle Sayısal Haberleşmeye Giriş, Kavram – Teori – Uygulama – Sonuç, Seçkin Yayınevi.

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ GÜNCEL ÇALIŞMA ALANLARI**Hüseyin SENDİR<sup>1\*</sup>, Didem YASİN<sup>2</sup>, Volkan KARABACAK<sup>3</sup><sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7252-7117><sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-3063-9916><sup>3</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2581-7984>

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Jeoloji, Jeoloji Mühendisliği, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü</i>	<i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi özel sayısı kapsamında Cumhuriyetimizin kuruluşunun 100. Yıl Dönümü nedeni ile hazırlanan bu derleme makalesinde, Jeoloji Mühendisliği'nin geçmişten günümüze gelişimi, çalışma alanları ve geleceği ile ilgili bilgiler derlenmiştir.</i>

**CURRENT RESEARCH INTERESTS IN GEOLOGICAL ENGINEERING**

Keywords	Abstract
<i>Geology, Geological Engineering, Eskişehir Osmangazi University Department of Geological Engineering</i>	<i>In this review article, information about the development of Geological Engineering from past to present, its research interests and its future has been compiled for the special issue of Eskişehir Osmangazi University Faculty of Engineering and Architecture Journal, within the scope of the 100th Anniversary of the founding of our Republic.</i>

Derleme Makale	Review Article
Başvuru Tarihi : 04.12.2023	Submission Date : 04.12.2023
Kabul Tarihi : 07.12.2023	Accepted Date : 07.12.2023

\* Sorumlu yazar: [hsendir@ogu.edu.tr](mailto:hsendir@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1399848>

**1.Giriş: Jeoloji Bilimine Genel Bir Bakış**

“Çekiç, pusula ve harita ile arazi üzerinde dolaşan jeolog, ferah ve sevinçli bir ömür sürer. Onun gözlem kuvveti kendisini her an tazeler, doğa sevgisini gittikçe kökleştirir ve çeşitli buluşları, keşifleri onun heyecan dolu yüreğinde daima bir alev gibi yanar” ifadesi ile anlatır Jeoloji tutkusunu Arthur Holmes (1890-1965 yıllarında yaşayan ünlü İngiliz Jeolog). Jeoloji, yerküreyi anlamaya çabalayan bir bilimdir. Jeolojik çalışmaların büyük bir bölümü arazide yürütülen ölçümler, gözlemler ve deneylere dayanmaktadır (Şekil 1a-1e). Odak noktasında yerkürenin gelişimi olmakla birlikte, evrendeki bir mineral tanesinden gezegenlere kadar değişik ölçeklerdeki bileşenlerin özelliklerini, gelişimini ve dinamizmini inceler. Buradan elde ettiği verileri göz önünde bulundurarak, yeryüzündeki hayatın gelişimini keşfetmeyi hedefler.

James Hutton 1700'lü yılların sonlarında yayınladığı “Dünya'nın Teorisi” adlı eserinde, günümüzde jeolojinin

temel dayanağı olan üniformitarianizm (tek örneklilik) ilkesini ortaya koymuştur. Modern jeolojinin en ünlü ve temel ilkelerinden biri olan “bugün, geçmişin anahtarıdır” ilkesi, jeolojik geçmişteki olayların modern olaylarla aynı etkiye sahip olduğu kabulü ile yola çıkar ve birkaç milyar yıllık geçmişe yanıt sağlamaya çalışır.

Jeologlar çok uzun zaman aralıkları ile ilgilenirler. 100 milyon yıl önce meydana gelen bir olay, Dünya'nın 4,6 milyar yıllık geçmişi göz önüne alındığında, bir jeolog tarafından “yakın tarihli” olarak tanımlanabilir, jeolojik süreçlerin çoğunda önemli değişikliklerin oluşmasında uzun zamana ihtiyaç olduğundan, jeoloji eğitiminde jeolojik zamanın büyüklüğünün farkında olmak çok önemlidir (Güngör, 2014). Radyoaktivitenin keşfi ile Dünya'nın yaşını doğru olarak saptamaya yarayacak yöntemler ancak 1826 yılında başlamış ve ilk kez 1905 yılında radyoaktivite yaş analizlerinde kullanılmıştır (Güngör, 2014). 19. yüzyıl boyunca, güvenilir sayısal yaş verilerinin saptanmasına olanak veren radyoaktivitenin keşfinden uzun süre önce, göreceli yaş tayini ile jeolojik



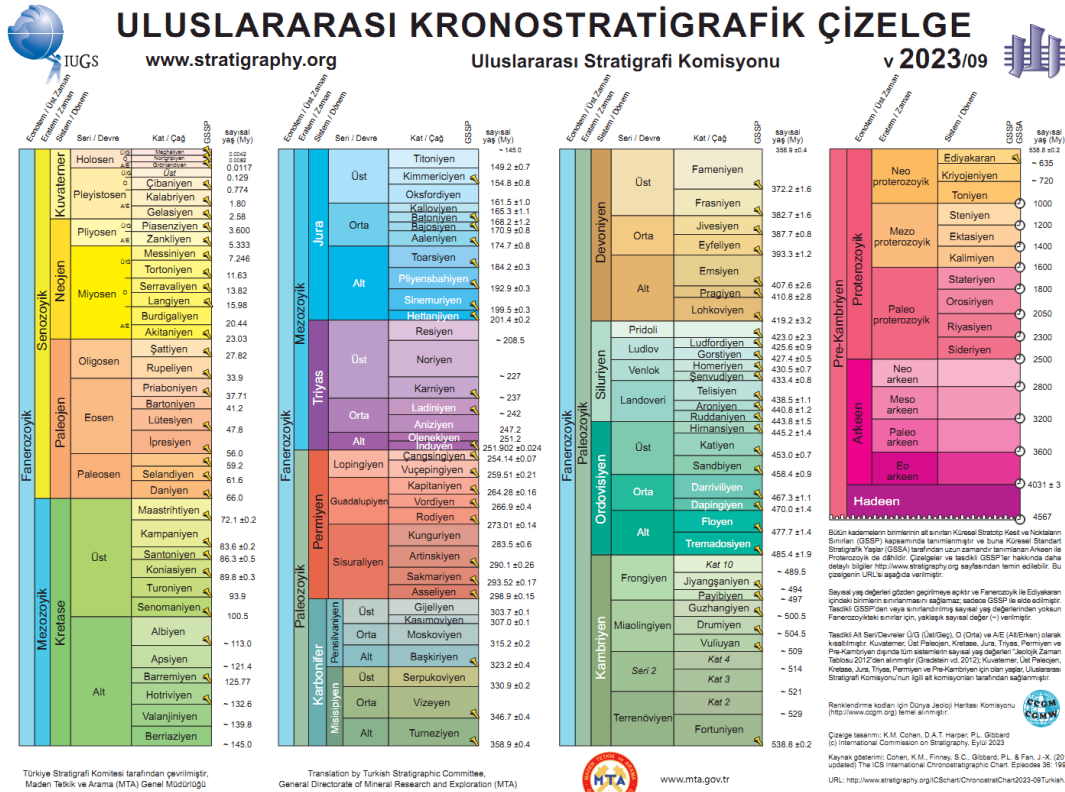
Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

zaman çizelgesi geliştirilmiştir (Şekil 2). Göreceli yaş, olayların doğru sırada ve düzende belirlenmesi prensibine dayanarak yaşların yıl olarak bilinmeden tespitidir. Bu prensip basitçe en genç katmanın üstte ve en yaşlı katmanın en altta olduğunu belirtmektedir. Bu dizilimde herhangi bir zaman dilimi fosil içeriği ile tanımlanabilmektedir. Jeolojik zaman çizelgesi sayısız kaya katmanlarından fosiller toplanarak oluşturulmuştur.



Şekil 1. Jeolojik Saha Çalışmalarına Örnekler. Bir Antiklinoryum Yapısı Üzerinde (a) ve Tabakalı Kayaçalarda Konum Ölçümleri (b). Mikrotopografik Haritalama Çalışmaları (c). Göl Tabanında Paleoklim Kayıtları İçin Karot Alımı (Ocakoglu, Tunoğlu, Dönmez ve Açıklın, 2011) (d).



Şekil 2. Jeolojik Zaman Çizelgesi (www.stratigrafi.org.)

## 2. Mühendislik Dalı Olarak Jeoloji

Genel olarak ifade etmek gerektiğinde, Jeoloji Mühendisliği ise, jeolojik verileri toplumsal hizmete sunmayı amaçlayan mühendislik dalıdır. Yerkürenin başlangıcından günümüze kadar geçirdiği yapısal değişimleri, yerkabuğunun yüzeyini ve altının bugünkü durumunu inceleyen, yerleşim alanları ve her türlü mühendislik yapılarının yer seçimi, yer altı zenginliklerinin kazanılması ve doğal afet tehlike ve risk çalışmalarının yürütülmesi ile ilgilenmektedir. Tüm bu alanlarda eğitim uygulanırken ihtiyaçlar doğrultusunda birçok alt uzmanlık dalları oluşmuştur. Bu dallar, Genel Jeoloji, Maden Yatakları ve Jeokimya, Mineraloji-Petrografi ve Uygulamalı Jeoloji olarak sınıflandırılabilir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile Jeoloji Mühendisliği çalışma konuları oldukça genişlemiştir. Doğal kaynaklar, endüstriyel hammaddeler, çevre ve afet yönetimi, metalik madenler, enerji hammaddeleri, soğuk ve sıcak su kaynaklarının aranması, kaya düşmesi, sivilaşma, heyelan, deprem, arazi kullanım planlarının hazırlanması, su baskını afet tehlike ve risk değerlendirmeleri, jeolojik - jeoteknik etütler, kütle hareketleri analizleri, yer seçimi kararları, tıbbi jeoloji çalışmaları, baraj, demiryolu, tünel, kara yolu, boru hattı, enerji santrallerinde Jeoloji Mühendisleri aktif görevler almaktadır.

## 3. Türkiye’de Jeoloji Eğitimi ve Özelinde ESOĞÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Ülkemizdeki jeolojik bilgileri içeren yayınlar 19. Yüzyıla dayanmaktadır. 4 ciltlik Mecmua-yı Ulum-ı Rizaziye (1834) adlı “Hoca İshak Efendi”nin eserinde jeolojik değerlendirmeler yer almıştır. İlk jeoloji dersleri Mekteb-i Tıbbiye-i Şahane’de verilmeye başlanmıştır. Darülfünunu Şahane içinde Ulum-ı Tabiiye ve Riyaziye (Doğa ve Matematik Bilimleri) bölümünün kurulması ile üniversitede jeoloji eğitimi ilk adımlar atılmış, İlm-i Arz ve Maadin (Yer ve Maden Bilimi) dersi okutulmaya başlanmıştır (Erguvanlı, 1978). Bir süre Balkan Savaşı nedeni ile ara verilen eğitim, İstanbul Darülfünunu (1933’ten sonra İstanbul Üniversitesi) Fen Fakültesi bünyesindeki Jeoloji Enstitüsü’nde ve İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesinde jeoloji eğitimi devam edilmiştir. Bugün yaklaşık 28 farklı ilde 32 fakültede Jeoloji Mühendisliği Bölümü eğitimi sürdürmektedir.

18 Ekim 2006 tarihli 26323 sayılı Resmî Gazete de yayımlanan Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Jeoloji Mühendisleri Odası (JMO) serbest jeoloji mühendislik ve müşavirlik hizmetleri uygulama, büro tescil ve mesleki denetim yönetmeliğine göre Jeoloji mühendisleri aktif görev aldığı çalışma alanları şu şekilde belirtilmektedir: Genel jeoloji ve saha jeolojisi, jeolojik harita alımı, jeotermal kaynak jeolojisi,

paleontoloji, sedimantoloji-stratigrafi, tektonik, jeolojik kesit hazırlanması, mineraloji-petrografi, jeokimya, amaca yönelik olarak jeolojik modelleme, endüstriyel hammaddeler, değişik ölçeklerde jeolojik harita üretimi, maden jeolojisi, kömür jeolojisi, petrol ve doğalgaz jeolojisi, hidrojeoloji, mühendislik jeolojisi, jeoteknik çalışmalar kapsamındaki jeoloji mühendisliği hizmetleri, kıyı ve deniz jeolojisi, çevre jeolojisi, tıbbi jeoloji, doğal afetler/doğal tehlikeler, süs taşları jeolojisi, jeo-sit, jeolojik miras, jeoarkeoloji, sondaj uygulamalarında jeoloji mühendisliği hizmetleri, jeoloji eğitimi, laboratuvar hizmetleri, iş riski, güvenliği ve yönetimi, eğitim, araştırma-geliştirme ve müşavirlikler (https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/10/20/061018.htm).

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü 1994-1995 eğitim-öğretim yılında kurulmuş ve aynı yıl Yüksek Lisans öğretimine başlamıştır. 1997-1998 öğretim yılında 1 Profesör, 1 Doçent ve 2 Yardımcı Doçent kadrosu ile ilk lisans öğrencilerini kabul etmiştir. Bölümün, 2023 yılı sonu itibarıyla, 700'e ulaşan mezunu bulunmaktadır. ESOGÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nün akademik performansı ve eğitim seviyesi oldukça yüksektir. En dikkat çekici yanı, butik yapısına rağmen bilimsel araştırma performansı yönünden bölüm öğretim elemanlarının başarılı bir grafik çizmesidir. 2023 yılı sonu itibarıyla öğretim elemanı kadrosu 5 Profesör, 1 Doçent, 2 Doktor Öğretim Üyesi ve 4 Araştırma Görevlisinden oluşmaktadır. Ülkemizdeki Jeoloji Mühendisliği Bölümleri arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Bölüm, ana bina ve laboratuvar binasından oluşmaktadır.

#### 4. Geleceğe Yönelik Yaklaşımlar ve Öneriler

Gelecek perspektifinde bir öngörü yapıldığı takdirde Jeoloji Mühendisliği mesleğinin evrileceği alanlar giderek artmaktadır. Bu alanlardan birkaçı şöyle özetlenebilir:

##### 4.1. Dijital Dönüşüm ve Yapay Zekâ

Modern Jeoloji Mühendisliği uygulamalarında yapay zekâ aktif olarak kullanmaya başlanmıştır. Bu durum, yeraltı kaynaklarının daha etkili bir şekilde keşfedilmesi, zemin özelliklerinin daha hızlı analiz edilmesi ve risk değerlendirmelerinin daha doğru yapılabilmesi için kullanılmaktadır (Zhang, Feng, Long, Karagiannidis ve Nallanathan (2019)). Yapay zekâ analizleri ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) yazılımları kullanarak farklı jeolojik problemlere çözüm bulunmaktadır (Süner, 2020).

##### 4.2. Jeotermal Enerji Araştırmaları

Jeotermal enerji yenilenebilir enerji kaynaklarının önem kazanması ile birlikte önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Özellikle, ısının etkili bir şekilde yenilebilir enerji kaynağı olarak kullanılması için

günümüz teknolojileri ile yeni teknikler ve yöntemler geliştirilmiştir. Jeotermal kaynak aramalarında toprak gazı ölçümleri (Şekil 3), termal uydu görüntülerinin kullanılması bu tekniklere örnek olarak verilebilir.

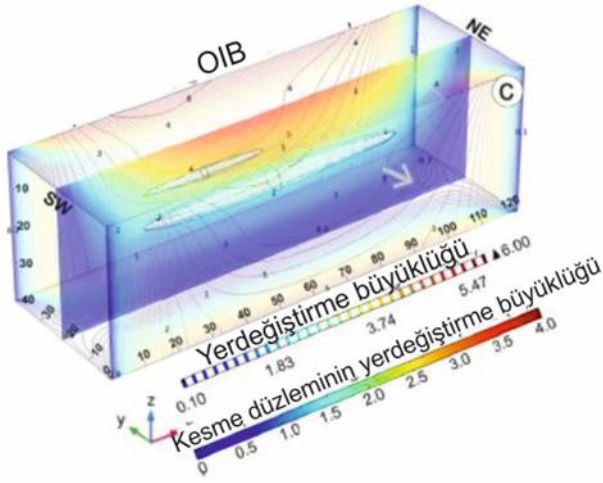


Şekil 3. Toprak Gazı Ölçümleri

#### 4.3. Sayısal Modelleme Çalışmaları

Sayısal modelleme çalışmaları son 50 yıl içerisinde mühendislik tabanlı çalışmalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmaların günümüzde jeolojide önemi giderek artmaktadır. Fay mekaniği, metamorfizma, magmatizma, sığ ve derin yer yapılarının statik ve dinamik kuvvetler altındaki davranışlarının incelenmesi, güncel ve zamana bağlı olarak tanımlanması, mühendislik çalışmalarında aktif biçimde kullanılmaktadır (Türkiye Jeoloji Bülteni, Yerbilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı (https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/page/15084)).

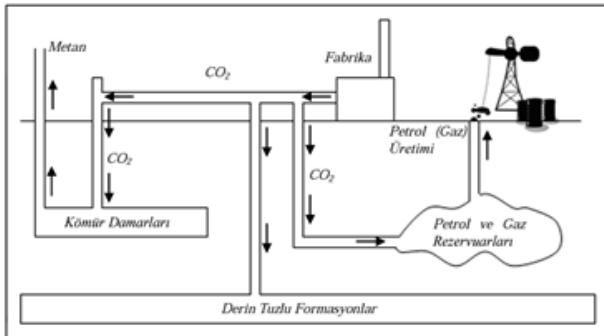
Jeoloji, jeofizik ve mühendislik çalışmalarına ilaveten sayısal modelleme yaklaşımları yer bilimlere problemlerine anlamlı ve kapsamlı çözümler sağlamaktadır. Örneğin son teknolojik ilerlemelerle birlikte 3D yeraltı modellemesi daha doğru ve detaylı bilgiler sağlamaktadır ki bu durum mühendislik projelerini daha güvenilir ve etkili hale getirmektedir (Berg, Olivier ve Hâvard (2017)). Jeoloji mühendisleri için doğal kaynakların keşfedilmesi, yeraltı sularının yönetimi, madencilik faaliyetleri gibi alanlarda çalışırken genellikle üç boyutlu yeraltı modellemesi önem kazanmıştır. Bu modelleme, bir bölgenin jeolojik yapısını, kayaç tiplerini, katmanların derinliklerini, su kaynaklarını ve diğer yeraltı bileşenlerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olan bir tekniktir. Bunlara ek olarak, modelleme çalışmaları, doğrudan gözlemeleme imkânı bulunmayan ve jeolojik zamanda uzun dönemlerle ifade edilen jeodinamik ortam ve olayların yorumlanmasında da önemli bir yöntem niteliği kazanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Volkanik Bölgelerde, Kabuk İçerisinde Yerleşmiş Magma Odalarının Modellenmesi (Karaoğlu, Erkül, Erkül ve Lustrino 2022)

#### 4.4. Karbondioksit Depolama (CCS)

Karbondioksit depolama, iklim değişikliği ile mücadele etmek ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, sanayi tesislerinden salınan karbondioksit gazı yeraltına enjekte edilmekte ve jeolojik formasyonlarda kalıcı olarak depolanmaktadır. Jeoloji Mühendisleri, bu işlemi gerçekleştirmek için uygun formasyonları belirlemekte, jeolojik ve hidrolik özelliklerini analiz etmekte ve enjeksiyonun güvenli bir şekilde gerçekleştirilebileceği yöntemleri geliştirmektedir. Küresel ısınmanın etkilerini azaltma çabaları doğrultusunda, karbondioksitin yeraltına depolanmasına yönelik çalışmalar artmıştır. Bu teknoloji, atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarını azaltmayı amaçlamaktadır (Benson ve Cole, 2008). CO<sub>2</sub>, yerin derinliklerinde yer alan tuz içeriği yüksek olan formasyonlar, işletilemeyen kömür damarları, petrol ve doğal gaz rezervuarları gibi jeolojik yapılarda depolanabilmektedir (Şekil 5) (Karakurt, Aydın ve Aydın, 2009).



Şekil 5. CO<sub>2</sub> Depolama Seçenekleri (Karakurt ve diğ., 2009)

#### 4.5. Uzaktan Algılama Teknolojileri

Yeni uzaktan algılama teknolojileri (jeodezik, fotogrametrik ve jeofizik), jeoloji mühendisliğindeki araştırmalarda sıklıkla başvurulan teknolojik yöntemlerden birini oluşturmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde, yer yüzeyi ve yeraltı yapıları hakkında daha detaylı bilgilere ulaşılabilmektedir (Mushore, 2018). Örneğin jeolojik yapı kontrolünde gelişen yüzey özelliklerinin kantitatif olarak belirlenmesi, ilgili yapının karakteristik özelliklerine ait veriler sağlamaktadır. Bu amaçla, sahada yersel ölçme yöntemleri ve hava fotogrametrisi gibi geleneksel yöntemler kullanılarak jeoloji kontrolünde gelişen fizyografik özellikler ortaya konulmaktadır. Gelişen teknoloji ile aktif uzaktan algılama sistemleri ise (RADAR, LİDAR, SONAR gibi) genellikle daha karmaşık alanlardan, geleneksel yöntemlere göre çok daha yüksek hız ve çözünürlükte veri üretilmesini sağlamaktadır. Böylece, dijital ortamda sayısal yüzey görüntüsü oluşturulabilmekte ve noktaların sınıflandırılması yolu ile sayısal yüzey modelinden (DSM) sayısal arazi modeline (DTM) geçiş sağlanabilmektedir (Gümüş ve Erkaya, 2007; Petrie ve Toth, 2009). Topografik haritalar, yönlü kesitler, temel yer değiştirme ölçümleri, üç boyutlu yüzey modelleri gibi veriler elde edilen nokta bulutundan sağlanmaktadır.

#### 4.6. Derin Deniz Madenciliği

Okyanusların derinliklerindeki madencilik potansiyeli üzerine çalışmalar hızlanmıştır (Hein, Mizell, Koschinsky ve Conrad, 2013). Derin deniz madenciliği, okyanus tabanında yer alan minerallerin çıkarılması için yapılan işlemleri kapsamaktadır. Jeoloji Mühendisleri, derin deniz madenciliği projelerinde minerallerin araştırılması, depolama alanlarının seçimi, çevresel etkilerin değerlendirilmesi, deprem, heyelan veya diğer jeolojik olaylara karşı çalışmalar yaparak, jeolojik risklerin değerlendirilmesinde görev almaktadır.

#### 4.7. Uzay Madenciliği ve Araştırmaları

Uzay madenciliği çalışmaları, uzayda bulunan asteroidlerin, Ay'ın veya diğer gezegenlerin kaynak potansiyellerini incelemeyi kapsamaktadır. Asteroidlerden ve diğer gök cisimlerinden değerli minerallerin çıkarılması konusunda çalışmalar hızlanmaya başlamıştır (Lewis, 1996)

#### 4.8. Doğal Afetler ve Kentsel Dirençlilik

Birleşmiş Milletler tarafından "afetlere karşı kentsel dirençlilik", yerleşimlerin sürdürülebilirliğinin sağlanması ve iklim değişikliği gibi küresel olaylar karşısında uyum sağlanması yönünde tedbirler alınması ile tanımlanmaktadır (<https://www.jmo.org.tr>).

Heyelan, taşkın, deprem, yangın, kuraklık gibi doğa olayları sonucunda meydana gelen afetler, ülkemizde ve

Dünya'da son yıllarda önemli ekonomik, sosyal ve çevresel zararlara sebep olmaktadır. Örneğin; 18. yüzyılın ortalarından günümüze hızla artmakta olan CO<sub>2</sub> emisyonunun temel kaynağını oluşturduğu küresel iklim değişikliği artan sıcaklık, yağış miktarı ve deniz seviyesi değişimi gibi faktörler ile doğal afetlerin sıklığı ve şiddeti üzerinde etkili olmaktadır. Jeoloji mühendisleri, bu değişikliklerin nedenlerini ve sonuçlarını inceleyerek, insan yaşamına etkileri anlamında ilgili riskleri belirlemeye çalışmaktadır (IPCC, 2018).

Ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından, bilimsel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak risk değerlendirme, afet yönetimi ve afet zararlarının azaltılmasına dayalı çalışmalar hız kazanmıştır. Buna rağmen gelişmişlik seviyelerine bağlı olarak, mevcut uygulamalar eşit şekilde paylaşılamamakta ve afet zararları istenilen düzeyde azaltılamamaktadır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri bunun somut örneklerindedir (Şekil 6). 2023 yılı içerisinde Türkiye'nin güneydoğusunda ve Suriye'nin kuzeybatısında meydana gelen yıkıcı bir deprem dizisi ile karşı karşıya kalınmıştır. Bölgedeki Neotektonik yapılar son yüzyılda kıtasal kabukta meydana gelen en

yıkıcı depremlerden birini de içeren bir dizi yüzey kırığını oluşturmuştur. Doğu Akdeniz Coğrafyasının bir kez daha karşı karşıya kaldığı bu katastrofik yıkım, gelecek nesillerimize güvenli yaşam alanları bırakabilmek adına öncelikli olarak afete dirençli kentler oluşturmamız gerekliliğinin önemini göstermiştir. Bu nedenlerden dolayı jeoloji tabanlı çalışmaların önemi bir kez daha gündeme gelmiştir.

#### 4.9. Sürdürülebilirlik ve Çevre Bilinci

Jeoloji mühendislerinin çevresel etkileri azaltma ve sürdürülebilir yöntemlerle doğal kaynakların kullanımı konusunda daha bilinçli ve etkili olmaları beklenmektedir (Banga, Klingelhöfer ve Wolkersdorfer 2018). Jeoloji mühendisleri, yeraltı ve yerüstü kaynaklarının korunması, yeraltı suyu ve yüzey suyu kaynaklarındaki kirlilik, atık yönetimi ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi konularda da çalışmalar yapmaktadır. Sürdürülebilir bir çevre için, jeolojik risklerin analiz edilmesi ve bu risklere karşı önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır.



Şekil 6. 06 Şubat 2023 Depremlerinde Oluşan Afetin Boyutları ve Kentsel Etkilerine Örnekler. Adıyaman Gölbaşı İlçesinden Zemin Sıvılaşmasına Bağlı Bir Yapı Hasarı (a). Kahramanmaraş Şekeroba Tren Yolunun Fay Tarafından Ötelenmesi (b). Gaziantep Nurdağı İlçesinde Deprem Sırasında Çöken Bir Otoyol Üst Geçiti (c). Hatay Döver Köyünde Kaya Düşmeleri (d).

## 5. Sonuç ve Öneriler

İnsanoğlunun eski çağlarda çevresi ile olan merakıyla başlayan jeoloji bilimi binlerce yıldan beri önemini korumuş ve beş temel bilim arasında yer almıştır. Jeoloji bilimi sanayileşme, kentleşme ve modernleşme süreçlerinde uygulamaya aktarılması anlamında sonrasında mühendislik nosyonu kazanmıştır. Jeoloji Mühendisliği, gelecek perspektifinde doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı, doğal afetlerin yönetimi ve çevre koruma gibi önemli alanlarda tüm dünyada artan bir öneme sahiptir. Teknolojiye dayalı yeniliklerle birlikte sürekli olarak gelişen bir alandır. Bu anlamda ülkemiz, gelişmiş dünyada söz sahibi olmak için Jeoloji Mühendisliği eğitimini stratejik olarak ön planında tutmalıdır.

## Teşekkür

Makale incelemesindeki değerli yorum ve yönlendirmelerinden dolayı Prof. Dr. Azad Sağlam Selçuk, Doç. Dr. Ökmen Sümer ve Doç. Dr. Taylan Sançar'a teşekkürü borç biliriz.

## Araştırmacıların Katkısı

Araştırmacılar makale hazırlanmasındaki tüm aşamalarda ortak katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

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

## Kaynaklar

- Banga, C. M., Klingelhöfer, H. E. & Wolkersdorfer, C. (2018). Sustainability Management Accounting Techniques for Acid Rock Drainage Management. *A Literature Review*.
- Benson, S. M., Cole, D.R. (2008). CO<sub>2</sub> sequestration in deep sedimentary formations. *Elements* 4.5, 325-331.
- Berg, C. F., Olivier L, & Håvard, B. (2017). Industrial applications of digital rock technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 157: 131-147.
- Erguvanlı, K. (1978). Türkiye de Jeoloji Konusunda İlk Yayınlar. *Yeryuvarı ve İnsan Dergisi*, Cilt 3 ve 4.
- Gümüş, K., Erkaya, H., (2007). TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- Güngör, T. (2014). Jeolojiye Giriş. *Genel Jeoloji Temel Kavramlar*, Ed: Cahit Helvacı, s:1-35.
- Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A. & Conrad, T. A. (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of

critical metals for high-and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1-14.

<http://www.dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/page/15084>

<http://www.stratigrafi.org>

<http://www.jmo.org.tr>

<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/10/20061018.htm>

IPCC, (2018). Special Report: Global Warming of 1.5 °C. 2018.

Karakurt, İ., Aydın, G. & Aydın, K. (2009). Yeraltı Jeolojik Rezervuarlarında Karbondioksitin Depolanması. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 2(2), 175-184.

Karaoğlu, Ö., Erkül, F., Erkül, S.T. & Lustrino M. (2022). 3-D numerical constraints for the Triassic mafic igneous system of Antalya (SW Turkey): Magma generation associated with southern Neotethyan slow seafloor spreading. *Tectonophysics*, 826.

Lewis, J. S. (1996). Mining the sky: untold riches from the asteroids, comets, and planets. Reading, Mass.

Mushore, T. D., Mutanga, O., Odindi, J. & Dube, T. (2018). Determining extreme heat vulnerability of Harare Metropolitan City using multispectral remote sensing and socio-economic data. *Journal of Spatial Science*, 63(1), 173-191.

Ocaoğlu, F., Tunoğlu, C., Dönmez, O.E. & Açıkalin, S. (2011). Çubuk Gölünün (Bolu, KB Anadolu) Sedimentolojik, Jeokimyasal ve Paleokolojik Araçlarla Paleoklimsel İncelemesi. TUBİTAK 109Y353 nolu proje sonuç raporu.

Petrie G., Toth C. (2009). Airborne and Space borne Laser Scanners. Topographic Laser Ranging and Scanning Principles and processing. *Taylor & Francis Group*, 2985.

Süner, E. (2020). Jeoloji Uygulamalarında Büyük Veri, Yapay Zekâ, Makine Öğrenimi ve Derin Öğrenme Uluslararası Katılımlı 73. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara.

Zhang, H., Feng, M., Long, K., Karagiannidis, G. K., & Nallanathan, A. (2019). Artificial intelligence-based resource allocation in ultradense networks: Applying event-triggered Q-learning algorithms. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(4), 56-63.



## TEKNOLOJİK GELİŞMELER IŞIĞINDA ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİNİN GELECEĞİ

Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ<sup>1\*</sup>, MÜJGAN SAĞIR<sup>2</sup>, Şerafettin ALPAY<sup>3</sup>, N. Fırat ÖZKAN<sup>4</sup>, Servet HASGÜL<sup>5</sup>, Aydın SİPAHİOĞLU<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ESKİŞEHİR

<sup>1</sup>ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-3762-6256>

<sup>2</sup>ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-2781-658X>

<sup>3</sup>ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-7055-9588>

<sup>4</sup>ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-4464-7052>

<sup>5</sup>ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-9329-6335>

<sup>6</sup>ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8743-2911>

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Üretim ve Servis Sistemleri Yöneylem Araştırması Kalite Yönetimi Ergonomi Bilgi Sistemleri ve Yapay Zekâ Endüstri Mühendisliği'nin tarihçesi</p>	<p>Endüstri Mühendisliği insan, makine ve malzemeden oluşan bütünleşik sistemlerin tasarımı, kurulması ve geliştirilmesi ile ilgilidir. Kaynakların verimli kullanımının gittikçe daha önemli olduğu küresel dünyada, tesislerin yer seçimi ve yerleşiminden, hammadde ve diğer girdilerin tedariğine, üretim süreçlerinin planlanması ve çizelgelenmesinden stok ve lojistik süreçlerinin yönetimine, standart süre ve kapasitelerin belirlenmesinden ürün, süreç ve hizmet kalitesinin iyileştirilmesine kadar pek çok aşamada eniyi kararların verilmesinde rol oynamaktadır. Çok çeşitli çalışma alanlarına sahip olan Endüstri Mühendisliği, son yıllarda hızla gelişen Yapay Zekâ teknikleri ve diğer teknolojik gelişmelerden oldukça etkilenmektedir. Bu makalede, son yıllarda Endüstri Mühendisliği alanındaki gelişme ve yenilikler, içerdiği bilim dalları temelinde literatüre dayandırılarak açıklanmaktadır. Çalışmanın bulguları Cumhuriyetimizin 100. yılında yeni mezun olan Endüstri Mühendisleri ve mühendis adayları için de bir farkındalık oluşturacaktır.</p>

## THE FUTURE OF INDUSTRIAL ENGINEERING WITH KNOWLEDGE OF TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS

Keywords	Abstract
<p>Production and Service Systems Operations Research Quality Management Ergonomics Information Systems and Artificial Intelligence History of Industrial Engineering</p>	<p>Industrial Engineering is concerned with the design, installation, and improvement of integrated systems comprising human, machine, and materials. In a globalized world where efficient resource utilization is increasingly crucial, Industrial Engineering plays a pivotal role in decision-making at various stages, from site selection and layout of facilities to procurement of raw materials and other inputs, planning and scheduling of production processes, management of inventory and logistics processes, determination of standard times and capacities, and enhancement of product, process, and service quality. With diverse areas of application, Industrial Engineering has rapidly evolved in recent years, significantly influenced by emerging artificial intelligence techniques and other technological advancements. This article explores the developments and innovations in the field of Industrial Engineering in the context of various scientific disciplines, relying on literature-based evidence. The findings of this study aim to create awareness for newly graduated Industrial Engineers and engineering candidates, particularly in the centennial year of Republic of Turkey.</p>

Derleme Makale	Review Article
Başvuru Tarihi : 08.12.2023	Submission Date : 08.12.2023
Kabul Tarihi : 14.12.2023	Accepted Date : 14.12.2023

\* Sorumlu yazar: [ektar@ogu.edu.tr](mailto:ektar@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1401960>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Endüstri Mühendisliği, kökeni 19. yüzyılın sonlarına dayanan bir mühendislik disiplindir. Disiplin, başlangıçta sanayideki üretim süreçlerini, sistemleri ve kaynakları daha etkili ve verimli hale getirmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Endüstri Devrimi ve üretim süreçlerinin karmaşıklığının artmasıyla ivme kazanmıştır.

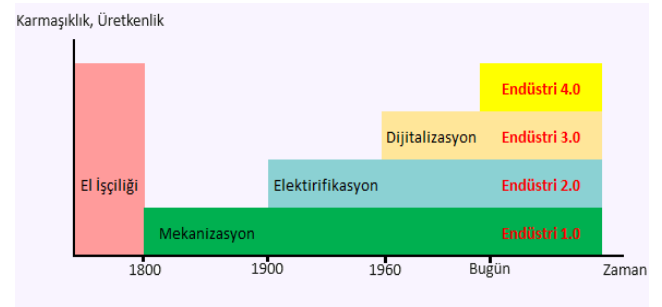
İlk olarak Amerika'da gelişen Endüstri Mühendisliği, zamanla dünya genelinde yayılmış ve evrimleşmiştir.

Endüstri Mühendisliği, Frederick Taylor'un öncülük ettiği bilimsel yönetim hareketiyle (Scientific Management) etkileşime girmiş, bahsedilen dönemde iş süreçlerinin analitik bir şekilde incelenmesi ve eniyelenmesi önem kazanmıştır. Sonrasında, Frank ve Lillian Gilbreth çifti, işçilerin hareketlerini inceleyerek (Motion Study) iş süreçlerini eniyemeye çalışmıştır. Bu çalışmalar, Ergonomi ve İş Güvenliği konularında Endüstri Mühendisliği'ne katkıda bulunmuştur. İkinci Dünya Savaşı sırasında, istatistiksel yöntemlerin üretim süreçlerinde kalite kontrolünde ve operasyonel problemlerin çözümünde kullanılmasıyla birlikte Endüstri Mühendisliği daha da gelişmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısında bilgisayar teknolojisinin gelişimi, Endüstri Mühendisliği'ni büyük ölçüde etkilemiş, Benzetim, modelleme ve eniyeme gibi konular, süreçlerin daha etkili bir şekilde yönetilmesine olanak tanımıştır. 1980-1990'larda, kalite odaklı yönetim anlayışı ve Toplam Kalite Yönetimi (Total Quality Management-TQM) anlayışıyla birlikte Endüstri Mühendisliği süreçlerin sadece verimliliği değil, aynı zamanda kalitesini de artırmaya odaklanmıştır. Son yıllarda görülen karmaşık tedarik zinciri yapıları, süreçleri küresel düzeyde yönetmeyi zorunlu kılmıştır. Günümüzde Endüstri Mühendislerinin en çok ilgilendiği konulardan biri de Tedarik Zinciri Yönetimi ve Lojistik alanıdır (Kula, Torkul ve Taşkın, 2006).

Aynı zamanda, Yapay Zekâ (YZ), büyük veri analizi, nesnelerin interneti gibi teknolojik gelişmeler, Endüstri Mühendisliği'ni akıllı ve otomatize edilmiş süreçleri yönetmeye yönlendirmiştir. Endüstri 4.0 kavramı, üretim süreçlerinde dijital dönüşümü temsil etmektedir. Endüstri Mühendisliği, zaman içinde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi, veri analizi yöntemlerinin ilerlemesi ve YZ gibi yeni teknolojilerin kullanımı ile büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Bu gelişmeler, daha karmaşık süreçlerin yönetilmesi, üretim hatlarının otomasyonu ve karar alma süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi gibi alanlarda endüstri mühendislerinin rolünü genişletmiştir (Öztemel, 2020).

İlk bilgisayarların üretilmesinden bu yana gelişen bilgi teknolojilerinin, YZ temelli yaklaşımların da etkisiyle, günümüzde artık her alandaki uygulama örneklerinin otonomi kazanarak çok daha zeki ve insan gibi davranış gösterebilir hale dönüştüklerini gözlemlemekteyiz. Her

geçen gün farklı bir uygulama alanında yeni bir örneğinin hayata geçtiğine şahit olduğumuz bu zeki yaklaşımlar, Endüstri 4.0 ile birlikte, tasarımından geliştirilmesine, planlanmasından uygulamasına, gözlemlenmesinden kontrolüne, iyileştirilmesinden eniyelenmesine kadar üretim ve servis sistemlerinin her alanında da yer bulmaktadır. El işçiliğine dayanan emek yoğun üretim ve servis faaliyetlerinin, otonom robotların ve yüksek teknolojiye zeki donanımların kullanıldığı ortamlara devredilmesi ve insansız çalışma ortamlarının hayata geçirilmesi çabaları tarihsel açıdan farklı endüstri devrimleri ile ifade edilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Endüstri Devrimleri (Gomez, Guardia, Mantari, Coronado ve Reddy, 2022)

### 1.1. Birinci Endüstri Devrimi

18. yüzyılda buhar gücünün kullanılması ve üretimin makineleşmesiyle başlamıştır. O dönemde buhar gücü zaten bilinmekteydi. Endüstriyel amaçlarla kullanılması, el işçiliğine ve insan gücüne dayalı insan üretkenliğini arttırmada en büyük atılım olmuştur. Örneğin kas gücüyle çalışan dokuma tezgâhları yerine, güç için buhar motorları kullanılabilir hale gelmiş, daha önce üzerinde iplik üretilen basit çıkırıkların mekanize hale getirilen versiyonlarıyla aynı anda sekiz kat daha fazla üretim hacmine ulaşılabilmıştır. Zaman içinde buhar enerjisi ile çalışan gemi ve buharla çalışan lokomotif gibi gelişmeler de hem günlük hayatta hem de çalışma hayatında çok büyük değişikliklere yol açmıştır. Böylece hem insanların hem de malların daha kısa sürelerde çok daha uzun mesafeler kat edebilmesi mümkün hale gelmiş, ulaştırma, taşımacılık ve servis hizmetlerinde çok büyük katkılar sağlanmıştır (Desoutter, 2023).

### 1.2. İkinci Endüstri Devrimi

19. yüzyılda elektriğin keşfi ve buhar enerjisinin elektrik enerjisi ile yer değiştirmesi ile başlamıştır. Bu dönemde Henry Ford'un (1863-1947) seri üretim fikrini otomobil üretimine taşımasıyla birlikte, elektrik motorlarının üretimde kullanılması ve montaj hatları kavramı hayata geçmiş ve üretim hacimlerinde, üretim sürelerinde ve üretim maliyetlerinde dramatik katkılar elde edilmiştir. Öncesinde her bir iş istasyonunda bir otomobilin tamamının montajı yapılırken, artık montaj hatları ile

araçlar taşıma bandı üzerinde hareket ettirilerek farklı iş parçalarının yerine getirildiği farklı iş istasyonlarında üretilmeye başlanmış ve seri üretim kavramı klasik üretime bakış tarzını baştan sona değiştirmiştir (Swamidass, 2000).

### 1.3. Üçüncü Endüstri Devrimi

20. yüzyılın ikinci yarısında 1970'lerde başlayan Endüstri 3.0 ile insanlık sadece transistörler ve mikroişlemciler ile elektroniğin yükselişine değil, aynı zamanda telekomünikasyon ve bilgisayarların yükselişine de tanık olmuştur. Bu devrim, iki büyük buluş sayesinde üretimde yüksek düzey otomasyon çağını doğurmuştur: Otomatlar (programlanabilir mantıksal kontrolörler-PLC) ve Robotlar. Bu teknolojilerin kullanılması ile sağlanan otomasyon süreçleri hızla gelişen Bilgi ve iletişim teknolojileriyle birlikte insana olan bağımlılığı azaltmış, Endüstri 4.0'a giden yolda, kısmi insansız çalışan üretim ve servis sistemlerinin temellerini de oluşturmuştur (CoReceptionist, 2023).

### 1.4. Dördüncü Endüstri Devrimi

İlk kez 2011 yılında Almanya'da dile getirilen Endüstri 4.0 kavramı, hâlihazırda bilgisayar teknolojilerine sahip olan üretim sistemlerinin, lojistik sistemlerini de içine alarak, ağ bağlantılarıyla genişletilmesi ve otonom olarak birbirleriyle haberleşebilen Siber-Fiziksel Üretim Sistemlerinin (CPPS) ortaya çıkartılmasını ifade etmektedir (Gomez ve diğ., 2022). Nesnelerin İnterneti (IOT) ve Servislerin İnterneti (IOS) kavramlarıyla da anılan bu ileri düzeyde gelişmiş yapı Verinin İnterneti (IOD) ile birlikte nerdeyse tüm üretim ortamının kendi kendini yönetebilmesini hedeflemektedir (Siskon, 2023).

Günümüz konvansiyonel üretim ve servis sistemleri, baş döndürücü bir şekilde gelişme kaydeden YZ ve teknolojilerinin de etkisiyle, Endüstri 4.0 kavramıyla hedeflenen, tamamıyla insansız ve otonom çalışan üretim ve hizmet sistemlerine doğru kaçınılmaz bir şekilde yol almaktadır. Bu gerçeğe paralel olarak her alandaki araştırmacı ve uygulamacılar da zeki ve otonom sistemlerin tasarlanması, geliştirilmesi ve hayata geçirilmesi çabalarına katkı sağlamak adına araştırmalarına hız vermişlerdir. Bu kapsamda, izleyen bölümlerde, üretim ve servis sistemlerindeki son gelişmelere değinilmektedir.

Endüstri Mühendisliği'nin gelişim süreci ve geleceği ile ilgili eserlerden daha detaylı bilgilere erişmek mümkündür (Öztemel, 2020; Davenport ve Short, 2003; Bhambri ve Rani, 2024 ).

Çalışmanın ikinci ve üçüncü bölümünde Üretim ve Servis Sistemleri ile Yöneylem Araştırmasındaki (YA) gelişmeler ve YZ etkileşiminden bahsedilmiştir. İzleyen bölümlerde ise Üretim ve Servis Sistemlerinin alt dalı

olan Kalite Yönetimi, Ergonomi ve İnsan Faktörleri alanlarındaki gelişmelerden ve YZ uygulamalarından söz edilmiş olup sonuç bölümünde Endüstri Mühendisliği disiplininin bugünü ve yarını genel hatlarıyla değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada Araştırma ve Yayın Etiğine uyulmuştur.

## 2. Üretim ve Servis Sistemlerindeki Gelişmeler

Endüstri Mühendisliği, üretim ve servis sistemlerinin değişen ihtiyaçlarını karşılamak için sürekli gelişen ve uyarlanan bir alandır. Geleneksel olarak üretim ve servis sektörlerinde karmaşık süreçlerin veya sistemlerin eniyilenmesi ile ilgilenmektedir. Sistemlerin daha verimli ve etkili hale getirilmesi için tasarım, planlama, kontrol ve yönetim fonksiyonlarında görev alır. Ancak YZ uygulamalarının kullanıma sunulmasıyla birlikte bu görevler yeniden tanımlanmakta ve şekillenmektedir.

YZ'nin verilerden öğrenme, örüntüleri belirleme ve minimum insan müdahalesiyle karar verme yeteneği, endüstri mühendislerinin işlerine yaklaşımını da değiştirmektedir. YZ, kurumların ve işletmelerin veriye dayalı etkili ve akıllı kararlar almasına, karmaşık süreçleri otomatikleştirmesi ve iyileştirmesi sonucunda operasyonel maliyetleri azaltmasına olanak tanır (Panda, Mishra, Balamurali ve Elngar, 2021).

YZ, Endüstri Mühendisliği çalışma alanlarının çeşitli yönlerini geliştirmek için büyük veri analizinden, Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenmeden (DL), Meta-Sezgisel algoritmalarından yararlanan bir dizi teknik ve araç sunar. YZ'nin Endüstri Mühendisliği karar verme sürecine yardımcı olabileceği bazı alanlar şunlardır:

- **Kestirimci Bakım:** YZ, ekipman arızalarını ve bakım ihtiyaçlarını proaktif bir şekilde tahmin etmek için sensör verilerini ve geçmiş bakım kayıtlarını analiz edebilir. Bu yaklaşım, bakım programlarının optimize edilmesine, arıza sürelerinin azaltılmasına ve makinelerin ömrünün uzatılmasına yardımcı olur.
- **Süreç Eniyileme:** YZ algoritmaları, verimsizlikleri, darboğazları ve süreç değişikliklerini belirlemek için üretim verilerini analiz edebilir. YZ, iş akışlarını ve kaynak tahsisini optimize ederek üretkenliği artırabilir ve operasyonel maliyetleri azaltabilir.
- **Tedarik Zinciri Yönetimi:** YZ, tedarikçilerden, müşterilerden ve çeşitli tedarik zinciri düğümlerinden gelen verileri analiz ederek envanter seviyelerini, talep tahminini ve lojistiği optimize edebilir.
- **Kalite Kontrol:** YZ, üretilen ürünlerdeki kusurları ve anormallikleri belirlemek için görüntüleri veya sensör verilerini analiz ederek denetim ve kalite kontrol süreçlerini otomatikleştirebilir. Böylece,

ürün kalitesinin artması ve israfın azalması sayesinde verimlilik artar.

- **Planlama ve Kontrol:** YZ algoritmaları, üretim teslim sürelerini ve işçilik maliyetlerini en aza indirmek için çeşitli kısıtlamaları ve hedefleri hesaba katarak üretim programlarını ve iş gücü planlamasını optimize edebilir.
- **İnsan-Robot İş Birliği:** YZ, fabrika ortamındaki insanlar ve robotlar arasında daha güvenli ve daha verimli iş birliğine olanak sağlayabilir. YZ destekli robotlar tekrarlayan veya tehlikeli görevlerde yardımcı olabilirken, insanlar daha karmaşık karar alma süreçlerine odaklanabilir.
- **Benzetim ve Modelleme:** YZ tabanlı benzetim araçları, karmaşık sistemleri ve süreçleri modelleyebilir, mühendislerin farklı senaryoları denemesine ve gerçek üretim sürecini aksatmadan bilinçli kararlar almasına olanak tanır.
- **Karar Destek Sistemleri:** YZ, kapasite planlamasından ekipman bakım stratejilerine kadar çeşitli karar verme süreçleri için veriye dayalı içgörüler ve öneriler sağlayarak endüstri mühendislerine yardımcı olabilir.
- **Sürekli İyileştirme:** YZ destekli analitik, devam eden süreçleri izleyebilir ve gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak endüstriyel ortamlarda sürekli iyileştirme girişimlerini kolaylaştırabilir.

YZ'nin Endüstri Mühendisliğinde karar alma sürecine büyük ölçüde yardımcı olma potansiyeli olmasına rağmen, insan uzmanlığının ve yargısının yerini alamayacağını belirtmek önemlidir. Bu hayati görevi yerine getirmesi için bir bilgisayara güvenmek için gereken güven düzeyini oluşturmak biraz zaman alacaktır. YZ, alan bilgisini, deneyimini ve sezgisini YZ algoritmalarından elde edilen veri odaklı içgörülerle birleştirmek için insan karar vericilerle entegre edildiğinde en iyi şekilde çalışır. YZ, büyük miktarda verideki örüntüleri insanlardan çok daha hızlı tespit etme yeteneği nedeniyle üretimde daha yaygın ve önemli hale gelse de, YZ'nin bir uzman insan ile işbirliği, daha bilinçli ve etkili karar alma süreciyle sonuçlanarak Endüstri Mühendisliği uygulamalarında üretkenliğin, verimliliğin ve genel performansın artmasına yol açar.

Endüstri Mühendisleri problemleri çözmek için benzetim, karar verme araçları, algoritmalar, eniyileme teknikleri ve yazılımları kullanırken, Yöneylem araştırmacıları bu araçların arkasındaki yöntembilimi üzerinde çalışır, yeni algoritmalar geliştirir, yeni eniyileme yöntemleri tasarlar, sistemleri analiz etmek için etkili araçlar tasarlarlar.

## 2.1. Üretim Sistemlerindeki Güncel Çalışmalar

YZ temelli algoritmalar, birçok alanda olduğu gibi üretim sistemlerinin yönetiminde ve karar

problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Verilerin analiz edilmesi ile üretim sistemlerinde talep tahminleme, planlama ve çizelgeleme, kaynak tahsisi, stok yönetimi, süreç otomasyonu, gerçek zamanlı üretim süreçlerinin gözlemlenmesi ve denetlenmesi, kalite kontrol, kestirimci bakım, araç rotalama, aktarma ve lojistik, tedarik zincirinin eniyilenmesi gibi faaliyetlerin yerine getirilmesinde, YZ teknikleri ile artık daha kârlı, daha verimli ve maliyet etkin çözümlerin çok daha kısa sürelerde üretilmesine imkân sağlanabilmektedir. İzleyen kısımda yukarıda sıralanan üretim faaliyetlerinde, özellikle son yıllarda, yapılan çalışmalara değinilmektedir.

Esteso, Peidro, Mula ve Díaz-Madroñero (2023) kaynak planlaması, kapasite planlama, satın alma ve tedarik yönetimi, üretim planlama ve stok yönetimi konularında takviyeli öğrenme tekniklerinin kullanımı ve uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Castañé, Dolgui, Kousi, Meyers, Thevenin, Vyhmeister ve Östberg (2023) uyarlanabilir (adaptive) üretim ortamları için karar desteği sağlamak üzere üretim planlaması ve kontrolü ile bütünleşik ve YZ tabanlı dijital ikizlerin geliştirilmesine odaklanmışlardır. Dehghan Shoorkand, Nourelfath ve Hajji (2023) DL ve matematiksel programlamayı kullanarak, entegre kestirime dayalı, bir bakım ve üretim planlama çerçeve modeli geliştirmişlerdir. Amaçları, gelecekteki tüm ürünlere yönelik talebi karşılarken, bakım, kurulum, bekletme, ön sipariş ve üretim maliyetlerinin toplamını en aza indirmek şeklindedir. Singh ve Mishra (2023) yeşil yatırım teknolojisi kapsamında bozulan ürünleri ele almak amacıyla ML tekniklerini birleştirerek stok yönetimine yönelik Bulanık Mantığa dayalı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Jiang (2023) ML ile geliştirilmiş katmanlı üretim teknolojilerinin mevcut durumuna ilişkin kapsamlı bir araştırma sunmuştur. Bai, Chen, Chen, Cui, Gong ve Zhang (2023) Araç rotalama probleminin modellenmesi ve eniyilenmesinde ML algoritmalarının analitik tekniklerle bir arada kullanıldığı hibrit yaklaşımları araştırmışlardır. Çalışmaları, analitik tekniklerin ML araçlarıyla birleştirildiği hibrit yöntemlerin ilk ve kapsamlı incelemesini sunmaktadır. Abualsaud (2023) ML kullanarak zeki imalat endüstrisinde hata tespiti ve kalite kontrol yönetimi için yeni bir teknik önermiştir. Girdi verileri nesnelerin interneti (IoT) modülü tarafından üretim hatası geçmiş verileri olarak toplanmıştır. Bu veriler gürültünün giderilmesi, normalleştirilmesi ve düzgünleştirilmesi için işlenmiş ve işlenen verinin özellikleri de, çekirdek temel vektör bileşen analizi kullanılarak çıkarılmıştır. Carl May, Nestroy, Overbeck ve Lanza (2023) üretimde karmaşık atölye üretim sistemleriyle uğraşmanın getirdiği zorlukları, zaman ve maliyet kayıplarını ortadan kaldırmak amacıyla üretim sistemlerinin malzeme akışı benzetimine yönelik otomatikleştirilmiş bir model (ASMG) çerçevesi sunmuşlardır. Bu çerçeve, olaya

dayalı verilerden yönlendirme, kontrol ve zamansal hususları çıkarmak için süreç madenciliği (PM) ve ML yöntemleri kullanılmaktadır. Maiti ve Muthuswamy (2023) Evrimsel Sinir Ağı (CNN) ve Destek Vektör Makinesi (SVM), Karar Ağaçları ve k-En Yakın Komşu gibi ML ve görüntü işleme tekniklerini kullanarak takım tezgâhlarının bilişsel yeteneklerini geliştirmek amacıyla malzeme tanımlama ve sınıflandırma görevini otomatikleştirmeye yönelik genel bir yöntem önerisinde bulunmuşlardır. Feizabadi (2022) ML ve sinir ağı temelli hibrit talep tahmin yöntemi geliştirmiştir. Yöntem çelik üreten bir firmada uygulanmış ve değerlendirilmiştir. Yamamura, Santana, Masiero, Quintanilha ve Berssaneti (2022) geniş eğitim veri kümelerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmak amacıyla bir uzmanın alan bilgisini kullanarak, ürün geliştirme faaliyetlerini desteklemeye ve pazar payını tahmin etmeye yönelik uzman alan bilgisini ve ML'yi birleştiren karmaşık artımlı yeni bir yöntem önerisinde bulunmuşlardır. Yasir ve diğ. (2022) tekstil endüstrisi için, içsel ve dışsal göstergeleri kullanan, ML temelli bir talep tahmin yöntemi önerisinde bulunmuşlardır. Zhang, Zhu, Tang, Zhou ve Gui (2022) dinamik atölye tipi üretim ortamlarının çizelgelenmesi için, kendi kendine organizasyon mekanizması ile kendi kendine öğrenme stratejisini birleştiren derin takviyeli öğrenmeye (DRL) dayalı çok ajanlı bir yapı önerisinde bulunmuşlardır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin, çeşitli performans ölçütlerini karşılayan planlama çözümlerini üretmesinin yanı sıra, faaliyet kesilmeleriyle de, verimli ve otonom bir şekilde başa çıkabildiğini göstermiştir. Sharma, Zhang ve Rai (2021) imalatta ML için yorumlayıcı bir çerçeve imalat modeli geliştirmişlerdir. Lolli, ve diğ. (2019) kesikli talep durumunda uygulanacak çok kriterli envanter sınıflandırmasına yönelik bir ML yaklaşımında bulunmuşlardır. Çalışma sonuçları ML sınıflandırıcılarının gelişmiş envanter sınıflandırma sistemlerinde uygulanabilirliğini onaylamıştır. Priore, Ponte, Rosillo ve de la Fuente (2019) hızla değişen tedarik zinciri ortamlarında stok yenileme politikalarının dinamik seçimine yönelik ML algoritmalarını uygulamışlardır. Sonuçlar statik seçim alternatiflerine göre işletim maliyetlerini önemli ölçüde düşürebileceğini göstermiştir. Kousi, Dimosthenopoulos, Matthaiakis, Michalos ve Makris (2019) montaj hatlarında, insan operatörler ve robot kaynakları arasında dinamik iş dengelemeyi hedefleyen YZ tekniklerine dayalı çok seviyeli bir karar verme çerçevesi sunmuşlardır. Sonuçlar önerilen yaklaşımın, kaynak tahsisi dengesini gözetirken aynı zamanda verimli görev çizelgeleri oluşturmaya da olanak sağladığını göstermiştir.

## 2.2. Servis Sistemlerindeki Güncel Çalışmalar

Clark-Fisher hipotezinde belirtildiği üzere, endüstri sonrası toplumlarda, servis sistemlerinin ülke ekonomisine katkısı imalat sistemlerine kıyasla çok

daha fazladır (Clark, 1957). Bu yönüyle değerlendirildiğinde yeni gelişen teknolojilerin servis faaliyetlerinde de kullanılması ve servis hizmetlerindeki kalitenin, müşteri tatmininin, etkinliğin ve verimliliğin bu teknolojilerle artırılması çabaları da kaçınılmaz olarak ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar YZ temelli teknolojilerin ilk somut örnekleri imalat sistemlerinde ortaya çıkmış olsa da artık sağlık sektöründen, turizme, finans sektöründen eğitime, pazarlama sektöründen ulaşıma, bankacılık sektöründen iletişime, yiyecek sektöründen sigorta hizmetlerine, güvenlik hizmetlerinden lojistik yönetimine kadar servis sektörünün neredeyse her alanında YZ temelli uygulamalara rastlamaktayız. İzleyen kısımda servis faaliyetlerinde özellikle son yıllarda yapılan YZ temelli çalışmalara değinilmektedir.

Norzelan, Mohamed ve Mohamad (2024) Planlı Davranış Teorisi (TPB) ve Birleşik Teknoloji Kabulü ve Kullanımı Teorisi'ni (UTAUT) kullanarak, paylaşımlı hizmet sektöründeki finans ve muhasebe birimlerinin başkanları arasında YZ'nin teknoloji kabulünü araştırmayı amaçlamışlardır. Bulgular, işletmelerin özellikle finans ve muhasebe alanlarında YZ'yi kullanırken önceliklendirilmesi gereken önemli alanlar hakkında fikir verdiğini göstermiştir. Rasheed, Chen, Khizar ve Safeer (2023) konaklama sektöründe Pakistanlı müşteriler arasında YZ hizmetlerinin benimsenmesini etkileyen faktörlerin anlaşılması amacıyla davranışsal nedenlerin ve duygusal zekânın rolünü araştırmışlardır. Boff Medeiros, Fogliatto, Karla Rocha ve Tortorella (2023) kaynak kullanımına ilişkin karar verme sürecine yardımcı olmak amacıyla hastanelerdeki pediatrik hastaların hastane kalış sürelerini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Toplam pediatrik hasta kalışlarına ait veri setlerinin modellenmesindeki zorlukları aşmak ve daha yüksek tahmin doğruluğu elde etmek amacıyla ML algoritmalarını kullanmış ve yeni bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Balasubramanian, Shukla, Islam, Upadhyay ve Duong (2023), ML'den bilgisayarlı görmeye (Computer Vision) kadar farklı YZ tekniklerini ve bu tekniklerle beslenen çeşitli veri girişi türlerini kapsayan çalışmalarında, sağlık hizmetleri için kapsamlı bir YZ çerçevesi önerisinde bulunmuşlar ve bunun Birleşik Arap Emirlikleri sağlık sektörü içindeki etkinliğini değerlendirmişlerdir. Tseng ve diğ. (2023) merkezi olmayan rejeneratif tıp tedarik zincirlerinde dinamik kapasite planlaması için derin takviyeli öğrenme yaklaşımı önermişlerdir. Önerilen yaklaşımda, etkili kapasite planlama politikasını öğrenmede, bir üretim benzetim modeli ve DRL yöntemi kullanılmaktadır. Adhikari, Joshi ve Basu (2023) YZ inovasyonuna yatırım yaptığı varsayılan bir sağlık ürünü üreticisi, bir dağıtıcı ve bir satın alma ajansından oluşan üç seviyeli bir tedarik zinciri yapısını birleştirerek çok seviyeli, YZ destekli bir sağlık hizmeti tedarik zinciri tasarlamışlardır. Giudici ve Raffinetti

(2023) finans alanındaki YZ uygulamalarının güvenilirliğini ölçmek amacıyla, Lorenz Zonoidlerine dayalı ölçüm metriklerini kullanmışlardır. Du ve diğ. (2023) akıllı bir ulaşım sistemi için özelleştirilmiş ürünlerin teslim süreleri boyunca lojistik İHA'ların toplam enerji maliyetini en aza indirmeyi hedeflemiştir. Lojistik İHA'ların rotasını ve hizmet tahsisini ortaklaşa eniyileyen işbirlikçi bir yol planlama formülasyonu önermiştir. İlgili formülasyonda İHA'ların enerji tüketimi değişimini, müşterilerin karışık zaman pencerelerini ve eşzamanlı teslimat ve teslim almayı dikkate almışlardır. Xia, Muskat, Li ve Prayag (2023) turizmde, cihaz, işlem ve kullanıcı tarafından devasa hacimlerde üretilen büyük verinin, turizmle ilgili sosyal olguları daha iyi anlamak ve daha iyi kararlar almak amacıyla, YZ algoritmalarını kullanarak analizini yapmışlar ve turizm literatüründeki potansiyel nedensel ilişkileri ortaya çıkarmak için yeni bir yöntem önerisinde bulunmuşlardır. Tamasiga, Onyeaka, Bakwena, Happonen ve Molala (2023) gıda kesintileriyle mücadele etmek için küresel değer zincirindeki aksaklıkları tahmin etmede ve yönetmede YZ'nin rolünü incelemişlerdir. Ortaya çıkan araştırma eğilimlerini, etkili yayınları, önde gelen kurumları, iş birliklerini, temaları, politika sonuçlarını ve gelecekteki araştırma yollarını keşfetmek için Scopus ve Web of Science'taki kapsamlı verileri kullanarak bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Yaiprasert ve Hidayanto (2023) Gıda dağıtım işinde dijital pazarlama stratejilerini geliştirmek için, müşteri verilerini analiz etmek, müşteri tercihlerini belirlemek, müşteri davranışını tahmin etmek ve YZ tabanlı öneriler sunmaya yönelik farklı ML algoritmalarını kullanmışlardır. Doumpos, Zopounidis, Gounopoulos, Platanakis ve Zhang (2023) son on yılda bankacılık sektörüne yönelik YA ve YZ tabanlı çalışmalara ilişkin kapsamlı ve yapılandırılmış bir bibliyografik araştırma sunmuşlardır. Yapılan çalışmalar banka verimliliği, risk değerlendirme, performans değerlendirme, birleşme ve satın almalar, bankacılık düzenlemeleri, müşteri ile ilgili çalışmalar ve teknik analiz konularını içermektedir. Liu, He, Wang ve Shen (2022) YZ destekli hizmet robotlarının, yavaş yavaş sağlık sektöründe popüler araçlara dönüşmekte olduğundan hareketle, hastaların hastanelerde YZ destekli hizmet robotlarını kullanmaya devam etme niyetlerini hastaların özellikleri açısından değerlendirmişlerdir. Ahmed, Alshater, El Ammari ve Hammami (2022) finans alanındaki YZ ve ML literatürünü gözden geçirmişlerdir. Bibliyometrik bir yaklaşım kullanarak Scopus veritabanında indekslenen dergilerden 2011-2021'de yayınlanan 348 makaleyi inceleyerek bir derleme çalışması yapmışlardır.

### 3. Yöneylem Araştırması, Gelişmeler ve Yapay Zekâ Etkileşimi

YA, sibernetik, sistem mühendisliği, çevre bilimleri, sistem bilimleri gibi II. Dünya Savaşı'ndan sonra doğup

gelişen bir bilimdir (Ackoff, 1972). Bütünleşik yaklaşım, bilimsel yöntem ve disiplinlerarası yaklaşım olarak sıralanan üç temel özelliğiyle, gerçek hayat problemlerine eniyi çözümler arar (Kara, 1985). Endüstri Mühendisliğinin temel disiplinlerinden olan YA yıllardır, üretim planlama, malzeme ve stok yönetimi, üretim çizelgeleme, ulaştırma ve atama, proje yönetimi, işgücü planlama, yatırım planlama, tesis yer seçimi ve tesis yerleşimi, benzetim ve stokastik süreçler gibi örneklenebilecek pek çok problem ile ilgilenir. Matematiksel modeller yardımıyla belirli bir amaç ya da amaçlar için eniyi çözümü bulmaya dönük binlerce bilimsel çalışmaya konu olmuştur. Temel olarak problemleri deterministik (problemden yer alan parametrelerin değerlerinin bilindiği) ya da stokastik (problemden yer alan parametrelerin değerlerinin olasılıklı olarak bilindiği) olarak iki ana kategoride incelemektedir. Problem alanlarının yukarıdaki gibi çok geniş kapsamlı olması ve disiplinlerarası yaklaşımı, YA'nın diğer Endüstri Mühendisliği temel alanları ile ve diğer temel bilim dalları ile her zaman içiçe olmasını gerektirmektedir.

Günümüzde hızla üretilen yığın ve değişken veriler, YA problem alanlarında da kararların hızlı ve doğru olmasına yönelik sürekli artan bir ihtiyaç yaratmış, bu durum yeni bilişim sistem ve tekniklerinin gelişimini zorunlu kılmıştır (Gupta, Modgil, Bhattacharyya ve Bose, 2022). Artık sistemler, bulut yapıları (*cloud*), çeşitli internet platformları ve kapsamlı veri oluşturma araçları ile karşı karşıya kalarak oldukça karmaşıklaşmıştır. YA tekniklerinin bu yeni alanlara hızlı entegrasyon zorunluluğu doğmuş, bilgisayar tabanlı karar verme mekanizmaları, YZ teknolojisi ile birlikte bu alanda da yaygınlaşmıştır.

YZ'nin tahmin ve akıl yürütme (*reasoning*) alanlarındaki teknikleri YA için oldukça yardımcıdır. YZ tekniklerinin, geçmişte yaygın kullanılan Prolog, Lisp, Bayesian gibi kural tabanlı yaklaşımlar ile karşılaştırıldığında, mantıksal akıl yürütme, fonksiyonel ve betimleyici programlama gibi oldukça zengin ve yetenekli, bilgi tanımlama, görselleştirme ve kodlama kapasitesi bulunmaktadır (Gupta ve diğ., 2022). Ancak bu zengin gösterimlerin bazı açılardan esnekliği azalttığı ve gerçek problemlere çok uygun olmadığı durumlar ortaya çıkabilmektedir. YA ise iyi tanımlanmış bir problem uzayında eniyi çözümleri belirleyebilen ve doğrusal programlama yapılarında olduğu gibi daha izlenebilir olan gösterimleri kullanmaktadır. Bu nedenle YZ ve YA bütünleşmesinin gerçek hayat problemlerinin yeterli düzeyde ve güçlü gösterimlerle temsil edildiği ve böylece hızlı ve rekabet edebilen çözümlerin üretilmediği durumlarda oldukça başarılı olacağı görülmektedir. Swarnkar ve Swarnkar (2020) yapmış oldukları literatür taraması çalışmasında 1975-2020 yılları arasında, YZ tekniklerinin YA çalışmalarındaki kullanımlarını derlemiş ve bu kapsamda Genetik Algoritmalar, Karınca Kolonisi Algoritmaları, Parçacık

Sürüsü Optimizasyonu ayrıca son yıllarda geliştirilen Fil Sürüsü Algoritması, BAT Algoritması gibi yeni sezgisel tekniklerle gerçekleştirilen çok sayıda YA uygulamalarına yer vermiştir.

YZ teknolojilerindeki ilerleyişe paralel olarak YA alanındaki mevcut çözümlerde de gelişmeler ortaya çıkmış, ticari çözümlerin maliyetli olmaları ve lisans gereksinimleri, açık kaynak kodlu çözümlerin gelişmesine olanak sağlamıştır. Ticari çözümler arasında XPRESS, CPLEX ve GUROBI, açık kaynak kodlu çözümler arasında ise CLP, LP\_SOLVE ve GLPK örnek gösterilebilir. Hemen hemen tüm açık kaynak kodlu çözümler herhangi bir yazılım ürünü ve bir çözümler arasında veri alışverişi için kullanılabilir bir çeşit yapılandırılmış API'ye bir başka deyişle iki uygulamanın birbiriyle konuşmasına olanak tanıyan bir yazılım aracı olan uygulama programlama arayüzüne sahip olmaktadır.

Bu kapsamda kullanılan araçlar arasında yer alan Python; veri bilimi, ML ve DL gibi konularla ilgili araştırma ve endüstri projelerinde tercih edilen bir programlama dili haline gelmiştir (Blanc ve Deb, 2020). Dinamik alt yapısı ve anlaşılır sade dili kullanım kolaylığı sağlamaktadır. YA, bağlı olarak eniyileme bu araştırma alanlarının doğal bir parçası olduğundan, Python-YA ilişkisi güçlenerek devam etmektedir. Python'un modülleri, paketleri, kütüphaneleri ve çatıları bulunmaktadır. Bir modül basitçe, bir konuda yazılmış ve .py uzantısı ile kaydedilmiş bir dizi koddur. Paketlerin (*packages*), büyük bir uygulama programı geliştirirken, yönetmesi zor birden fazla modül olduğunda bunların bir arada toplandığı modüllerin birleşiminden oluştuğu, kütüphanelerin (*libraries*) belirli bir problem alanına dönük olarak bir araya getirilmiş paket ve yine modüllerden oluştuğu söylenebilir. Çatılar (*frameworks*) ise kütüphanelere benzer şekilde paket ve modüllerden oluşmakla birlikte, program geliştirme sürecinin daha hızlı izlenmesi için kullanılan ve kütüphanelere göre daha karmaşık olan yapılardır.

Bu kısımda YA çalışmalarında sıkça kullanılması nedeniyle Python kütüphanelerine kısaca değinilmektedir. Python'un oldukça çok sayıda kütüphanesi bulunmakta olup her kütüphane farklı bir işlev için geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan kütüphaneleri arasında, ML gibi pek çok uygulama öncesi verilerin analizi, işlenmesi ve uygulamaya hazır hale getirilmesi için kullanılan *Pandas* gelmektedir. *Pandas*'a alternatif olarak kullanılabilir, özellikle çok büyük veri setlerinin analizinde aynı amaçla tercih edilen *Polars* bir diğer kütüphanedir. ML modellerinin oluşturulması için kullanılan ve sınıflama, regresyon analizi, kümeleme gibi yaygın makine öğrenmesi işlemlerini yapabilen *Scikit-Learn* de sık kullanılan kütüphanelerdendir.

Eniyileme alanında gerek yukarıda anlatılan çözümlerde gerek programlama dillerindeki gelişmeler,

bunların birlikte uygulanmalarına olanak sağlayan çeşitli kütüphaneler ya da bütünleşik yapıları da beraberinde getirmiştir. Örneğin bu kapsamda *Gurobipy*, Gurobi ile kolayca arayüz oluşturabilecek modelleri tanımlayan bir Python çerçevesidir (Yildirim, 2023).

YZ tekniklerinin YA alanındaki uygulamalarını kısıtlı bir dökümanda örneklemek ya da sınıflamak neredeyse imkansızdır, çünkü YA alanına girebilecek sadece tek bir problem türünde yapılmış çalışmalar için bile literatür taraması makalelerine erişmek mümkündür. Örnek verilecek olursa Ciccone, Bacciaglia ve Ceruti (2023) üretim sektöründeki, Zhang, Ge ve Tong (2022) araç rotalama alanındaki, Bahroun, Tanash, As'ad ve Alnajjar (2023) proje çizelgeleme alanındaki YZ uygulamaları için literatür taraması çalışmalarıdır. Hatta YZ teknikleri YA alanında o kadar hızlı kullanılmaya başlanmıştır ki, bu tür literatür çalışmalarına daha eski yıllardan beri rastlanmaktadır (Charalambous ve Hindi,1991; Wiers, 1997)

Ancak Tablo 1'de örnek olması açısından, son yıllarda YA alanında gerçekleştirilen ve YZ tekniklerinin kullanıldığı birkaç çalışmaya yer verilmektedir.

Tablo 1. YA Çalışmalarında YZ Kullanımına Örnekler

YZ Tekniği	Kullanım Alanı	Yazarlar
Parçacık Sürüsü	Araç rotalama problemi	Hsieh, You ve Chen (2021)
Genetik Algoritmalar	Araç rotalama problemi	Hsieh ve diğ. (2021)
Derin Öğrenme	Planlama ve Çizelgeleme	Hatami ve Franz (2021)
Parçacık Sürüsü	Tedarik Zinciri Yönetimi	Hassouna, El-henawy ve Haggag (2022)

YA, kıt kaynakların gittikçe tükenmekte olduğu küresel dünyada, en çok ihtiyaç duyulan kavramlar olan düşük maliyet, yüksek verimlilik, sürdürülebilirlik gibi konuların yanında, çevre ve insan sağlığı, hızla gelişmeye devam eden teknolojik ilerlemeler arasında önemli yerini korumaya devam edecek bir bilim dalıdır.

#### 4. Dünyada ve Ülkemizde Kalite Alanındaki Gelişmeler ve Yapay Zekâ Uygulamaları

İşletmeler, üretim planlama, iyileştirme ve kalite kontrol faaliyetlerinde YZ teknolojilerini kullanarak verimliliklerini artırmayı ve mevcut sorunlara hızlı çözümler üretmeyi hedeflemektedir (Buchmeister, Palcic ve Ojstersek, 2019). YZ destekli kalite yönetim sistemlerinin endüstrilerde yaygın olarak tasarlanması ve uygulanması, kaliteye yönelik faaliyetlerin iyileştirilmesine olanak tanır. Bu sayede hataların erken

tespiti ve ortadan kaldırılması ile kalite maliyetleri azaltılabilir (Ever ve Demircioğlu, 2022).

Endüstri 4.0, robotlar ve YZ kullanarak veri toplayan ve tekrarlı işlemleri otomatikleştiren farklı teknolojik araçları teşvik etmektedir (Souza, Corsi, Pagani, Balbinotti ve Kovaleski, 2021). YZ teknolojileri, üretim ve hizmet sektöründe kaliteyi ve verimliliği artırmak amacıyla uygulanmaktadır (Lee, Lee ve Kim, 2019). YZ, Uzman Sistemler (US), Genetik Algoritmalar (GA), Bulanık Mantık (BM), Yapay Sinir Ağları (YSA), ML ve DL gibi yöntemleri içerir (Stancheva-Todorova, 2018). ML, programlanmış algoritmalar ve istatistiksel modeller aracılığıyla verilerden öğrenmeyi içerirken, derin öğrenme, çok katmanlı sinir ağları içeren bir sistemdir (Du-Harpur, Watt, Luscombe ve Lynch, 2020). YZ, uzmanlık bilgisinden yoksunluk, karar verme süreçlerindeki belirsizlik ve karmaşıklık gibi birçok zorluğun üstesinden gelmeyi kolaylaştırır (Buchmeister ve diğ., 2019).

Kalite 4.0 ise Endüstri 4.0 tekniklerini kalite yönetimine uygulayan bir yaklaşım olarak tanımlanır (Bolatan, 2020). Makine Öğrenmesi, büyük veri, bulut bilişim, artırılmış gerçeklik gibi teknolojileri kullanarak Kalite Yönetimi sürecini dijitalleştirmeyi ifade eder (Chiarini, 2020; Gümüsoğlu, 2018). Üretimde YZ kullanımı ile üretim hataları, ekipman arızaları ve hammadde değişiklikleri önceden tahmin edilip önlemler alınarak üretim süreçleri iyileştirilir.

YZ teknolojileri, işletmelerin rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olabilir. Kaliteli ürünlerin düşük maliyetle ve müşteri taleplerine uygun bir şekilde üretilmesini hedefleyen işletmeler, kalite ve süreç iyileştirmelerine odaklanmalıdır (Kesici ve Yıldız, 2016). YZ, işletmelere yüksek verimlilik, düşük maliyet, çevre dostu üretim ve rekabet gücü kazandırabilir (Li, Hou, Yu, Lu ve Yang, 2017). Bu teknoloji, kalite kontrol faaliyetlerini kolaylaştırabilir, tasarım süreçlerini kısaltabilir, malzeme israfını azaltabilir ve operasyonel maliyetleri en aza indirebilir.

Son yıllarda, kalite alanındaki gelişmeler ve YZ uygulamaları, Kalite İyileştirme ve Süreç Eniyileme, Kestirimci Bakım ve Ekipman Yönetimi, Anomali Tespiti olmak üzere üç ana başlık altında ele alınmıştır.

#### 4.1. Kalite İyileştirme ve Süreç Eniyileme

Günümüzde BM, GA, YSA ve US'un yanısıra (Kaya ve Engin, 2005), ML ve DL algoritmaları da kalite iyileştirme ve süreç eniyileme yaygın olarak kullanılan araçlar haline gelmiştir. Kontrol Grafikleri (KG) ve İstatistiksel Süreç Kontrol (İSK), Deney Tasarımı (DT) teknikleri (Taguchi, Yanıt Yüzey Metodolojisi, Tam/Kesirli Faktöriyel Tasarım, Plaket Burman Tasarımı vb.) ile parametre eniyileme, Kabul Örneklemesi, Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Kalite Fonksiyon Yayılımı (KFY) araştırmacıların YZ

tekniklerini uygulandığı kalite başlıkları olarak sıralanabilir.

BM, GA ve YSA'nın yanısıra, ML ve DL algoritmalarını kalite iyileştirme süreçlerinde kullanan çalışmalardan bazıları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te konu temelinde kronolojik olarak örneklenmiştir. Çalışmalar tablodakiler ile sınırlı değildir.

Tablo 2. Bulanık Mantığın Kalite İyileştirme Sürecinde Kullanımı

YZ Tekniği	Kullanım Alanı	Yazarlar
Bulanık Mantık	HTEA	Testik ve Ünlü (2023), Behnia, Ahmadabadi, Schuelke-Leech, Mirhassani (2023), Ivancan ve Lisjak (2021), Geremian ve Abraham (2021), Murad ve diğ. (2020), Geramian, Abraham ve Ahmadi Nozari (2019), Hassan, Purnomo ve Anugerah (2019), Geramian, Shahin, Minaei ve Antony (2020), Gholizadeh, Javadian ve Fazlollahtabar (2020), Reda ve Dvivedi (2022), Mariajayaprakash, Senthilvelan ve Gnanadass (2015)
	KFY	Reda ve Dvivedi (2022), Beseiso ve Kumar (2021), Singh ve Kumar (2021), Aouag, Soltani ve Mouss (2021), Jafarzadeh, Akbari ve Abedin (2018)
	KG ve İSK	Kaya, İlbahar ve Karışan (2023), Al-Refaie, Abbasi ve Ghanim (2021), Decker, Leite, Giommi ve Bonacorsi (2020), Geremian ve diğ. (2020), Cisar ve Maravic-Cisar (2019), Aslam, AL-Marshadi ve Khan. (2019), Teksen ve Anagun (2018)
	Parametre Optimizasyonu	García-Alcaraz ve diğ. (2022), Mariajayaprakash ve diğ. (2015)
	Kabul Örneklemesi	Chukhrova ve Johannssen (2018)



Tablo 3. Genetik Algoritmaların Kalite İyileştirme Sürecinde Kullanımı

YZ Tekniği	Kullanım Alanı	Yazarlar
Genetik Algoritmalar	HTEA	Gholizadeh ve diğ. (2020), Mariajayaprakash ve diğ. (2015), Gojković, Đurić, Tadić, Nestić ve Aleksić, (2021)
	KFY	Beseiso ve Kumar (2021)
	KG ve İSK	Wan (2020)
	Parametre Optimizasyonu	Wan, Chen ve Zhu (2023), Nitnara ve Tragangoon (2023), Mariajayaprakash ve diğ. (2015)

Tablo 4. Yapay Sinir Ağları, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenmenin Kalite İyileştirme Sürecinde Kullanımı

YZ Tekniği	Kullanım Alanı	Yazarlar
Yapay Sinir Ağları, Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme	HTEA	Na'amnh, Salim, Husti ve Daróci (2021), Ma ve Wu (2019)
	KFY	Patil, Husain ve Halegowda (2018), Kang ve Wang (2022)
	KG ve İSK	Yeganeh, Abbasi, Shongwe, Malela-Majika ve Shadman (2023), Sabahno ve Niaki (2023), Azmat ve diğ. (2023), Yeganeh, Johannssen, Chukhrova, Abbasi ve Pourpanah (2023), Alwan, Ngadiman, Hassan, Saufi ve Mahmood (2023), Kurt (2022)
	Parametre Optimizasyonu	Chaouch, Ben Khalifa, Zitoune ve Zidi (2023), Yoo ve diğ., (2023), Nitnara ve Tragangoon (2023), García-Alcaraz ve diğ. (2022)

#### 4.2. Kestirimci Bakım ve Ekipman Yönetimi

Geçmişte insanlar tarafından yürütülen kalite kontrol ve önleyici bakım faaliyetleri, YZ ve bilgi teknolojilerinin gelişmesi ile kestirimci bakıma dönüşmüştür (Lee ve diğ., 2019). Kestirimci bakım, üretim tesislerinin ve ekipmanlarının durumunu nesnelere interneti aracılığıyla gerçek zamanlı olarak izler; sinyal işleme, büyük veri analitiği ve akıllı sensörler gibi teknolojileri kullanarak kalan faydalı ömrü tahmin eder ve yeni bakım döngüsünü belirler. Bu sayede, ekipmanların kalan kullanım ömürlerini uzatırken plansız duruşları engeller (Lee ve diğ., 2019). Ayrıca zorunlu bakım durumlarında, bakım teknisyenleri, YZ temelli sistemlerin öngörüsüne dayanarak önceden bilgilendirilir ve devre dışı kalan ekipman yerine ikame ekipmanla üretimin sürekliliği sağlanır. Bu yaklaşım, sıfır hata hedefi doğrultusunda arıza sürelerini, bakım maliyetlerini ve üretim kayıplarını en aza indirmeyi amaçlar (Gürsoy, Çolak, Gökçe, Akkulak ve Ötleş, 2019).

Kalite yönetiminde, "kestirimci" bakım, "önleyici" bakımdan farklılık gösterir. Önleyici bakım, gelecekte ortaya çıkabilecek sorunları tanımlamaya ve önlemeye odaklanırken, kestirimci bakım, gelişmiş dijital teknolojileri kullanarak bir ürünün parçalarının tam olarak ne zaman sorunlara neden olabileceğini belirleyip, tam zamanında değiştirme veya onarım yaparak maliyet düşürmeye ve arızaların oluşumunu önlemeye odaklanır (Lee ve diğ., 2019). Kestirimci bakımın periyodik bakımdan farkı, bakımın zaman değil durum temelli olmasıdır (Gürsoy ve diğ., 2019). Önde gelen teknoloji şirketleri, üretim hattındaki ani duraksamaların, makine arızalarının ve üretim süresindeki gecikmelerin, YZ destekli yazılımlar sayesinde kolayca tespit edilebileceğini ve YZ tarafından oluşturulan raporlar sayesinde önceden müdahale edilebileceğini belirtmektedir (Ever ve Demircioğlu, 2022).

#### 4.3. Anomali Tespiti

Günümüzde, ürün kalite denetimi alanında yaygın olarak kullanılan bir teknik olan Anomali Tespiti, verideki aşırı uçları ve beklenmeyen istisnai durumları belirlemeyi sağlar (Zhang, Peng, Liu ve Zhang, 2019). Aynı zamanda, üretim sürecindeki hataları veya anormallikleri tespit etmek için de kullanılabilir (Şahan, 2020). Büyük boyutlu ve dengesiz dağılıma sahip ürün verilerinin işlenmesinde ortaya çıkan zorluklar göz önüne alındığında, ürün kalite denetimi sürecinde önemli bir rol oynar (Zhang ve diğ., 2019). Anomali tespit tekniği, teknik aksaklıkları, makine arızalarını, tüketici davranışındaki değişiklikleri belirleyerek ürün kalitesini artırmaya, kestirimci bakım uygulamalarını geliştirmeye ve kullanıcı deneyimini iyileştirmeye yönelik birçok farklı alanda kullanılabilir. Anomali tespiti, genellikle ML algoritmalarını içeren bir alan

olarak öne çıkar (Bayraktar ve Gökçen, 2020; Chandola, Banerjee ve Kumar, 2009).

Yoğunluk tabanlı algoritmalar (örneğin KNN-K-Nearest Neighbour, DBSCAN), kümeleme tabanlı algoritmalar (örneğin K-Means) anomali tespitinde yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasındadır (Chandola ve diğ., 2009). Ayrıca Destek Vektör Makineleri, Bayes Ağları, Markov Modelleri, YSA ve BM de anomali tespitinde kullanılabilir. Cisar ve Maravic-Cisar (2019), bulanık mantık ve EWMA kontrol grafiklerini anomali tespitinde kullanmıştır. Decker ve diğ. (2020), anomali tespiti ve kestirimci bakım için bulanık kural tabanlı sınıflama ve kontrol grafiklerinden yararlanmıştır. Apaydın-Özkan (2022), ev aleti güç profillerini anormallik tespiti için kullanan çalışmalara katkıda bulunmak amacıyla YSA tabanlı kontrol grafiklerini kullanarak yeni bir Ev Aleti İzleme ve Anormallik Tespit Sistemi (AM-ADS) önermiştir. AM-ADS, bir ana kontrol birimi, bir veritabanı, Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı iletişim birimleri, ev aletleri ve aletlere monte edilmiş güç ölçüm birimlerinden (akıllı prizler veya özel ölçüm ekipmanları) oluşmaktadır.

## 5. İnsan Faktörlerinin Bugünü ve Geleceği

Endüstri Mühendisliği, sistemlerin tasarımı, geliştirilmesi ve iyileştirilmesiyle ilgilenen bir disiplindir. Teknolojinin hızla evrim geçirdiği günümüzde, sistemlerin etkili bir şekilde tasarlanması ve yönetilmesi açısından önemli bir role sahiptir. Bu süreçte insan faktörleri, özellikle işgücü verimliliğine odaklanması yönüyle Endüstri Mühendisliğinin temel taşlarından birini oluşturur.

İnsanlık var olduğundan beri kendi rahatını, güvenliğini ve kolay iş görebilmesini önceliklendirmiştir. Endüstri mühendisleri, ergonomik prensipleri kullanarak işçi performansını artırır, hataları en aza indirir ve iş süreçlerini iyileştirir. İnsan odaklı yaklaşımlarla yükseltilecek iş gücü verimliliği ve çalışan performansı sayesinde kaynak tüketimleri düşer, maliyetler azalır ve işletmeler rekabet avantajını yakalar. Dolayısıyla sanayi devrimiyle hız kazanan insan faktörleri çalışmaları her yeni dönemde, her yaygınlaşan yeni teknolojiyle ilgi alanını genişleterek günümüze kadar gelmiştir. Yeni teknolojiler yeni üretim yaklaşımlarını, yeni yaklaşımlar da insanların çalışma performansı ile ilgili yeni fırsatları beraberinde getirmektedir. Bu fırsatların bir bedeli olarak da elbette yeni riskler ve çözülmesi gereken problemler doğmaktadır.

Başlangıçta özellikle insanın fiziksel limitlerine odaklanan insan faktörleri zamanla; özellikle de bilgisayar teknolojilerinin yaygınlaşması sonucu insanın bilişsel limitlerine de odaklanmaya başlamıştır. Hatta nöroergonomi alt disipliniyle insanların beyin dalgalarının bile çalışma performanslarına etkisini incelemektedir.

İnsanı ve organizasyonlarındaki insan faktörlerini makro (yönetimsel) ve mikro (kişi bazında fiziksel ve bilişsel) şekilde ele almaya devam eden insan faktörlerinin başlangıç noktası özellikle kaza ve kayıp önleme yaklaşımlarına odaklanan; gözlemlenebilir ve veri toplama dayalı çeşitli yöntemlerin uygulandığı bir alan olmasıdır. Zamanla müşterilerin, son kullanıcıların ve bütün olarak organizasyonların Ergonomisi de öne çıkmaya başlamıştır. Doğanın ve teknolojinin evriminin getirdiği doğal gelişmelerden payını alan insan faktörleri günümüzde, gözleme dayalı yaklaşımların yerine yavaş yavaş sensörlerle toplanan verilere dayalı yaklaşımlara kaymaktadır. Benzetim ve modelleme platformlarıyla da desteklenen; hızlı ve çok sayıda veri toplama avantajını getiren bu yeni yaklaşımlar elbette verilerin analiz imkânlarını da genişletmektedir.

Bu noktada insan faktörleri ile YZ'nin yolları kesişir. ML algoritmaları ve Görüntü İşleme teknikleriyle daha hızlı, tutarlı ve sürekli veri toplanabilmekte ve kişi bazında anlık analizler yapılabilmektedir. Risk analizleri gibi insan faktörleri açısından önem arz eden konularda daha doğru öngörülerde bulunabilmek ve yüksek sapmalara sahip olan insan performansına dair tahminleri tutarlılığı açısından bu gelişmeler oldukça kritiktir.

Yakın gelecekte insan faktörlerinin dijital ikiz uygulamaları ile de yollarının kesişmesi beklenmektedir. Tıpkı makineler gibi insanların da dijital ikizlerinin oluşturulmasıyla modelleme ve benzetimde yeni bir çağa geçilecek ve başta sağlık sektörü olmak üzere her sektör insan odaklı olarak bu teknolojiyi de kullanmaya başlayacaktır.

İnsan faktörleri ve YZ ilişkisine bakıldığında, özellikle son on yılda bilimsel araştırma ve yayınlarda dikkat çekici bir artış görülmektedir. Petrat (2021) YZ ile insan faktörleri ilişkisinin akademik yönünü 3 sınıf ve 7 düzeyde ele almayı önermiştir. İlgili düzeyler ve anahtar kelimeler maddeler halinde sıralanmıştır:

Sınıf 1- Düzey 1-3: YZ ve Fiziksel Ergonomi

Sınıf 2- Düzey 4-5: YZ ve İnsan Makine Etkileşimi

Sınıf 3- Düzey 6-7: YZ ve Endüstriyel Yönetim

Bu yaklaşıma göre birinci sınıftaki çalışmalar, YZ ve özellikle ML aracılığıyla fiziksel zorlanmaların ele alındığı çalışmaları; ikinci sınıf YZ ile insan-bilgisayar ve insan-robot iş birliğinin etkinliğini inceleyen çalışmaları; üçüncü sınıf ise YZ ile verimlilik, kârlılık ve yönetimsel kararlar arasındaki etkileşimi inceleyen çalışmaları kapsamaktadır.

Birinci sınıfta yer alan çalışmaların arasında öne çıkanlardan bir tanesi Wang, Li, Chen, Diekel ve Jia, (2018) tarafından yapılan çalışmadır. İlgili çalışmada bir robotun insanlarla iş birliği içerisinde çalışırken onların çalışma yöntemini ve tarzını nasıl öğrenebildiği irdelenmiştir. Bu çalışmada kelime işleme yaklaşımı

kullanılarak insanın robota öğrenme verisini sözlü olarak iletmesi insan faktörleri ve YZ ilişkisi açısından önemli bir adımdır. Aynı sınıfın bir diğer önemli çalışması ise sağlık sektöründe yapılmıştır. Ameliyatlarda esnasında; kızıl ötesi işaretçiler aracılığıyla insan vücudunun hareketlerinin robotlar tarafından öğrenilmesi sağlanarak insana özgü tecrübe, birikim ve alışkanlıklar robotlara aktarılmaya çalışılmıştır (Cavallo, Sinigaglia, Megali, Pietrabissa, Dario, Mosca ve Cuschieri, 2014).

İkinci sınıfta yer alan çalışmalar özellikle dördüncü sanayi devriminin bir getirisi olarak iş gücü eğitimi ve çalışanın psikolojik beklentilerinin YZ ile tespitine odaklanmaktadır. Bu sayede motivasyon ve verimlilik artırmanın düşük maliyetli yolları keşfedilmeye çalışılmıştır (Ghislieri, Molino ve Cortese, 2018).

Üçüncü sınıfta yer alan çalışmalar ise daha çok makro problemlere ve yönetsel kararlara odaklanmaktadır. Özellikle bilgi teknolojileri alanında yeni pazarlama araçları bulmaya ve mevcut araçlarda insan ile dijital süreçlerin iş birliğini en iyilemeye odaklanan çalışmalar, çeşitli sektörler için insan ve YZ'nin bütünleşik katkısını arttırmayı hedeflemektedir (Majumder, 2016).

## 6. Sonuçlar

Bu makalede Endüstri Mühendisliği'nin dünü, bugün ve yarını hakkında okuyucuyu, mesleğe yeni başlayan genç mühendisleri ve mühendis adaylarını bilgilendirmek amaçlanmıştır. Anabilim dalları temelinde teknolojik gelişmelerin Endüstri Mühendisliği disiplinine etkilerini ele alan kapsamlı bir literatür çalışmasıdır. Çalışmada ifade edildiği gibi, teknolojik gelişmeler ışığında Endüstri Mühendisleri için gerekli beceriler sürekli değişmekte ve güncellenmektedir. Gelecekte, Endüstri Mühendisliği eğitimi, daha fazla dijital beceri, analitik düşünme ve problem çözme odaklı olacağı öngörülmektedir.

Endüstri Mühendisliği, süreçleri eniyileme, verimliliği artırma, maliyetleri azaltma ve kaliteyi iyileştirme gibi hedeflere odaklanan bir mühendislik disiplindir. Gelecekte Endüstri Mühendisliğinin nasıl evrilip değişeceğini kesin olarak öngörmek zor olmakla birlikte teknolojideki gelişmeler ışığında potansiyel gelişmeler alt maddeler halinde özetlenmeye çalışılmıştır:

**Dijital Dönüşüm:** Endüstri Mühendisliği, dijital teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesiyle daha fazla entegre olacaktır. Büyük veri analitiği, YZ, IoT (Nesnelerin İnterneti) ve gelişkin bilgi sistemlerinin tasarımı ile birlikte, karar alma süreçleri daha etkin ve otomatik hale getirilecektir.

**Akıllı Üretim ve Fabrikalar:** Endüstri 4.0 kavramı, üretim süreçlerini dijitalleştirme ve akıllı fabrikalar oluşturma fikrini içerir. Sensörler, otomatik kontrol

sistemleri ve bağlantılı cihazlar sayesinde üretim sistemleri daha esnek, verimli ve özerk hale gelebilir.

**YZ ve Otomasyon:** YZ ve otomasyon, Endüstri Mühendisliği alanında daha fazla kullanılacaktır. ML ve DL Algoritmaları, Meta-Sezgisel Algoritmalar ve diğer YZ algoritmaları ile tahminleme, planlama, çizelgeleme, süreç kontrolü ve eniyilenmesinde daha etkin çalışmaların yapılacağı öngörülmektedir.

**Sürdürülebilirlik Odaklı Çözümler:** Gelecekte endüstri mühendisleri, çevresel etkileri azaltmaya yönelik sürdürülebilirlik odaklı çözümler geliştirmeye daha fazla odaklanabilir. Atık azaltma, enerji verimliliği ve çevre dostu üretim süreçleri gibi konular önemli hale gelebilir. Bu çerçevede tedarik zinciri yönetimi ve lojistik yönetiminin önemini giderek artıran çalışma alanlarından biri olacağı öngörülmektedir.

**İnsan-Makine/Robot İş Birliği:** Her yeni teknolojik devrimde olduğu gibi insan faktörleri YZ çağına da adapte olmaya başlamıştır. Bu sayede iş gören performanslarında, sağlık, güvenlik ve refahında artış beklenmektedir. İnsanlar arasındaki iş birliğinin yanı sıra, Endüstri Mühendisliğinde insan-makine iş birliği de artabilir. İnsanlar ve robotlar, birlikte çalışarak daha karmaşık görevleri gerçekleştirebilirler. Özellikle giyilebilir teknolojilerin geliştirilmesi ve sanal gerçeklik ortamının kullanılması ile Ergonomi, İş Sağlığı ve Güvenliği, İş öncesi eğitim ve uyumlandırma alanlarında gelişmelerin olacağı öngörülmektedir.

Bu öngörüler, genel eğilimleri temsil etmektedir ve Endüstri Mühendisliğinin geleceği, teknolojik gelişmeler, ekonomik faktörler ve kültürel değişimler gibi birçok etkene bağlı olarak şekillenecektir. Endüstri mühendisleri, bu değişimlere uyum sağlamak ve yeni teknolojilere adapte olmak için sürekli olarak güncellenen becerilere sahip olmalıdır.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; YAZAR 6, YAZAR 3 ve YAZAR 1, birinci bölümün; YAZAR 5 ve YAZAR 3 ikinci bölümün, YAZAR 2, üçüncü bölümün, YAZAR 1 dördüncü bölümün, YAZAR 4 beşinci bölümün, YAZAR 6 ve YAZAR 1 altıncı bölümün oluşturulması aşamalarında katkı sağlanmıştır.

## Teşekkür

Bölümdeki tüm öğretim üyelerimize olumlu katkıları ve destekleri için teşekkür ederiz. Ayrıca, Araş. Gör. Mehmet Erol KARA'ya makalenin düzenlenmesi aşamasındaki katkılarından ötürü teşekkürlerimizi sunarız.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Kaynaklar**

- Abualsauod, E. H. (2023). Machine learning based fault detection approach to enhance quality control in smart manufacturing. *Production Planning & Control*, 1-9. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2175736>
- Ackoff, R., 1972, A Note on Systems Science, *Interfaces*, 2,4. doi: <https://doi.org/10.1287/inte.2.4.40>
- Adhikari, A., Joshi, R., & Basu, S. (2023). Collaboration and coordination strategies for a multi-level AI-enabled healthcare supply chain under disaster. *International Journal of Production Research*, 1-27. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2252933>
- Ahmed, S., Alshater, M. M., El Ammari, A., & Hammami, H. (2022). Artificial intelligence and machine learning in finance: A bibliometric review. *Research in International Business and Finance*, 61, 101646. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2022.101646>
- Al-Refaie, A., Abbasi, G., & Ghanim, D. (2021). Proposed  $\alpha$ -cut CUSUM and EWMA control charts for fuzzy response observations. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 28(02), 2150012. doi: <https://doi.org/10.1142/S0218539321500121>
- Alwan, W., Ngadiman, N. H. A., Hassan, A., Saufi, S. R., & Mahmood, S. (2023). Ensemble Classifier for Recognition of Small Variation in X-Bar Control Chart Patterns. *Machines*, 11(1), 115. doi: <https://doi.org/10.3390/machines11010115>
- Aouag, H., Soltani, M., & Mouss, M. D. (2021). Enhancement of value stream mapping application process through using fuzzy DEMATEL and fuzzy QFD approaches: a case study considering economic and environmental perspectives. *Journal of Modelling in Management*, 16(3), 1002-1023. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/JM2-01-2020-0007>
- Apaydin-Özkan, H. (2022). Appliance-Level Anomaly Detection by Using Control Charts and Artificial Neural Networks with Power Profiles. *Sensors*, 22(17), 6639. doi: <https://doi.org/10.3390/s22176639>
- Aslam, M., AL-Marshadi, A. H., & Khan, N. (2019). A new X-bar control chart for using neutrosophic exponentially weighted moving average. *Mathematics*, 7(10), 957. doi: <https://doi.org/10.3390/math7100957>
- Azmat, S., Sabir, Q. U. A., Tariq, S., Shafqat, A., Rao, G. S., & Aslam, M. (2023). Monitoring Air Quality using the Neural Network based Control Chart. *MAPAN*, 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12647-023-00663-9>
- Bahroun, Z., Tanash, M., As'ad, R., & Alnajjar, M. (2023). Artificial Intelligence Applications in Project Scheduling: A Systematic Review, Bibliometric Analysis, and Prospects for Future Research. *Management Systems in Production Engineering*, 31(2), 144-161. doi: <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0017>
- Bai, R., Chen, X., Chen, Z. L., Cui, T., Gong, S., He, W., ... & Zhang, H. (2023). Analytics and machine learning in vehicle routing research. *International Journal of Production Research*, 61(1), 4-30. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.10012>
- Balasubramanian, S., Shukla, V., Islam, N., Upadhyay, A., & Duong, L. (2023). Applying artificial intelligence in healthcare: lessons from the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Research*, 1-34. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2263102>
- Bayraktar, C., & Gökçen, H. (2020). Yüksek raflı depolama sistemlerinin enerji optimizasyonunda anomali tespiti için sınıflama algoritmalarının karşılaştırılması, *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 4(2), 89-109. doi: <https://doi.org/10.33461/uybisbbd.790369>
- Behnia, F., Ahmadabadi, H. Z., Schuelke-Leech, B. A., & Mirhassani, M. (2023). Developing a Fuzzy Optimized Model for Selecting Maintenance Strategy in Paper Industry: An Integrated FGP-ANP-FMEA approach. *Expert Systems with Applications*, 120899. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120899>
- Beseiso, M., & Kumar, G. (2021). A fuzzy computational approach for selecting interdependent projects using prioritized criteria. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(6), 11341-11354. doi: <https://doi.org/10.3233/IIFS-202506>
- Bhambri, P., & Rani, S. (2024). Challenges, Opportunities, and the Future of Industrial Engineering with IoT and AI. *Integration of AI-Based Manufacturing and Industrial Engineering Systems with the Internet of Things*, 1-18.
- Blanc, J., & Deb, K. (2020), Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python, 2020, *IEEE Access*, 8, 89497-89509. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990567>
- Boff Medeiros, N., Fogliatto, F. S., Karla Rocha, M., & Tortorella, G. L. (2023). Predicting the length-of-stay of pediatric patients using machine learning

- algorithms. *International Journal of Production Research*, 1-14. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2023.2235029>
- Bolatan, G. İ. S. (2019). Kalite 4.0. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21, 437-454. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2154486>
- Buchmeister, B., Palcic, I., & Ojstersek, R. (2019). Artificial intelligence in manufacturing companies and broader: an overview. *Chapter 07 in DAAAM International Scientific Book*, 081-098. doi: <http://dx.doi.org/10.2507/daaam.scibook.2019.07>
- Carl May, M., Nestroy, C., Overbeck, L., & Lanza, G. (2023). Automated model generation framework for material flow simulations of production systems. *International Journal of Production Research*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2284833>
- Castañé, G., Dolgui, A., Kousi, N., Meyers, B., Thevenin, S., Vyhmeister, E., & Östberg, P. O. (2023). The ASSISTANT project: AI for high level decisions in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 61(7), 2288-2306. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2069525>
- Cavallo, F., Sinigaglia, S., Megali, G., Pietrabissa, A., Dario, P., Mosca, F., & Cuschieri, A. (2014). Biomechanics-machine learning system for surgical gesture analysis and development of technologies for minimal access surgery. *Surgical Innovation*, 21(5), 504-512. doi: <https://doi.org/10.1177/1553350613510612>
- Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 41(3), 1-58. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1541880.1541882>
- Chaouch, F., Ben Khalifa, A., Zitoune, R., & Zidi, M. (2023). Modeling and multi-objective optimization of abrasive water jet machining process of composite laminates using a hybrid approach based on neural networks and metaheuristic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. doi: <https://doi.org/10.1177/09544054231191816>
- Charalambous O., & Hindi, K. S. (1991). A Review of Artificial Intelligence Based Job Shop Scheduling Systems, *Information and Decisions Technologies*, 17,3,189-202.
- Chiarini, A. (2020). Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research. *The TQM Journal*. 32(4), 603-616. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/TQM-04-2020-0082>
- Chukhrova, N., & Johannssen, A. (2018). Inspection tables for single acceptance sampling with crisp and fuzzy formulation of quality limits. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 35(9), 1755-1791. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/IJQRM-03-2017-0034>
- Ciccione, F., Bacciaglia, A., & Ceruti, A. (2023). Optimization with Artificial Intelligence in Additive Manufacturing, a systematic review. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences of Engineering*, 45, 6. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04200-2>
- Čisar, P., & Maravić-Čisar, S. (2019). EWMA statistics and fuzzy logic in function of network anomaly detection. *Facta universitatis-series: Electronics and Energetics*, 32(2), 249-265. doi: <http://dx.doi.org/10.2298/FUEE1902249C>
- Clark, C. (1957). *The Conditions of Economic Progress*, 3.Edition, London, Macmillan.
- CoReceptionist (2023), Industry 4.0-What is it? History and Current Applications & Future. Retrieved from <https://coreceptionist.co/industry-4-0-what-is-it-history-current-applications-future>
- Davenport, T. H., & Short, J. E. (2003). The new industrial engineering: Information technology and business process redesign. *Operations management: critical perspectives on business and management*, 97-123.
- Decker, L., Leite, D., Giommi, L., & Bonacorsi, D. (2020, July). Real-time anomaly detection in data centers for log-based predictive maintenance using an evolving fuzzy-rule-based approach. In *2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pp. 1-8. IEEE. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/FUZZ48607.2020.917762>
- Dehghan Shoorkand, H., Noureifath, M., & Hajji, A. (2023). A deep learning approach for integrated production planning and predictive maintenance. *International Journal of Production Research*, 1-20. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2022.2162618>
- Desoutter (2023), Industrial Revolution - From Industry 1.0 to Industry 4.0. Erişim adresi: <https://www.desouttertools.com/your-industry/news/503/industrial-revolution-from-industry-1-0-to-industry-4-0>

- Doumpos, M., Zopounidis, C., Gounopoulos, D., Platanakis, E., & Zhang, W. (2023). Operational research and artificial intelligence methods in banking. *European Journal of Operational Research*, 306(1), 1-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.04.027>
- Du, P., He, X., Cao, H., Garg, S., Kaddoum, G., & Hassan, M. M. (2023). AI-based energy-efficient path planning of multiple logistics UAVs in intelligent transportation systems. *Computer Communications*, 207, 46-55. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2023.04.032>
- Du-Harpur, X., Watt, F. M., Luscombe, N. M., & Lynch, M. D. (2020). What is AI? Applications of artificial intelligence to dermatology. *British Journal of Dermatology*, 183(3), 423-430. doi: <https://doi.org/10.1111/bjd.18880>
- Esteso, A., Peidro, D., Mula, J., & Díaz-Madroñero, M. (2023). Reinforcement learning applied to production planning and control. *International Journal of Production Research*, 61(16), 5772-5789. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2022.2104180>
- Ever, D., Demircioğlu, E. N. (2022). Yapay Zekâ Teknolojilerinin Kalite Maliyetleri Üzerine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 31(1), 59-72. doi: <https://doi.org/10.35379/cusosbil.1023004>
- Feizabadi, J. (2022). Machine learning demand forecasting and supply chain performance. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(2), 119-142. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/13675567.2020.1803246>
- García-Alcaraz, J. L., Díaz Reza, J. R., Villalon Turrubiates, I. E., Lopez Herrera, R., Soto Cabral, A., Ganzalez Lalalde, I., & Rodriguez Alvarez, J. L. (2022). A Non-Invasive Method to Evaluate Fuzzy Process Capability Indices via Coupled Applications of Artificial Neural Networks and the Plackett-Burman DOE. *Instituto de Ingeniería y Tecnología*. doi: <https://doi.org/10.3390/math10163000>
- Geramian, A., Abraham, A., & Ahmadi Nozari, M. (2019). Fuzzy logic-based FMEA robust design: a quantitative approach for robustness against groupthink in group/team decision-making. *International Journal of Production Research*, 57(5), 1331-1344. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471236>
- Geramian, A., Shahin, A., Minaei, B., & Antony, J. (2020). Enhanced FMEA: An integrative approach of fuzzy logic-based FMEA and collective process capability analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 71(5), 800-812. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01605682.2019.1606986>
- Ghislieri, C., Molino, M., & Cortese, C. G. (2018). Work and organizational psychology looks at the fourth industrial revolution: how to support workers and organizations? *Frontiers in psychology*, 9, 2365. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02365>
- Gholizadeh, H., Javadian, N., & Fazlollahtabar, H. (2020). An integrated fuzzy-genetic failure mode and effect analysis for aircraft wing reliability. *Soft Computing*, 24, 13401-13412. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-020-04757-3>
- Giudici, P., & Raffinetti, E. (2023). SAFE artificial intelligence in finance. *Finance Research Letters*, 104088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.104088>
- Gojković, R., Đurić, G., Tadić, D., Nestić, S., & Aleksić, A. (2021). Evaluation and selection of the quality methods for manufacturing process reliability improvement—Intuitionistic fuzzy sets and genetic algorithm approach. *Mathematics*, 9(13), 1531. doi: <https://doi.org/10.3390/math9131531>
- Gomez, C., Guardia, A., Mantari, J. L., Coronado, A. M., & Reddy, J. N. (2022). A contemporary approach to the MSE paradigm powered by Artificial Intelligence from a review focused on Polymer Matrix Composites. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(21), 3076-3096. doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1886379>
- Gupta, S., Modgil, S., Bhattacharyya, S., & Bose, I. (2022). Artificial intelligence for decision support systems in the field of operations research: review and future scope of research. *Annals of Operations Research*, 1-60. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-020-03856-6>
- Gümüşoğlu, Ş. (2018). Bilimsel yaklaşımlarla değişim, dönüşüm ve kalite 4.0. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33(2), 543-568. doi: <https://doi.org/10.24988/deuibf.2018332773>
- Gürsoy, M. Ü., Çolak, U.C., Gökçe, M. H., Akkulak, C., & Ötleş, S. (2019). Endüstri için kestirimci bakım. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(1), 56-66. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/706015>

- Hassan, A., Purnomo, M. R. A., & Anugerah, A. R. (2020). Fuzzy-analytical-hierarchy process in failure mode and effect analysis (FMEA) to identify process failure in the warehouse of a cement industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(2), 378-388. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/JEDT-05-2019-0131>
- Hassouna, M., El-henawy, I., & Haggag, R. (2022). A Multi-Objective Optimization for supply chain management using Artificial Intelligence (AI), *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13,8, 140-149. doi: <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130817>
- Hatami, M., & Franz, B. (2021), Using Deep Learning Artificial Intelligence Foresight Method in the Optimization of Planning and Scheduling of Construction Processes, *Computing in Civil Engineering*, 1171-1178. doi: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784483893.143>
- Hsieh, Y. C., You, P. S., & Chen, C. S. (2021). Scheduling the periodic delivery of liquefied petroleum gas tank with time window by using artificial intelligence approaches: An example in Taiwan. *Science Progress*, 104(3\_suppl), 00368504211040355. doi: <https://doi.org/10.1177/00368504211040355>
- Ivančan, J., & Lisjak, D. (2021). New FMEA risks ranking approach utilizing four fuzzy logic systems. *Machines*, 9(11), 292. doi: <https://doi.org/10.3390/machines9110292>
- Jafarzadeh, H., Akbari, P., & Abedin, B. (2018). A methodology for project portfolio selection under criteria prioritisation, uncertainty and projects interdependency-combination of fuzzy QFD and DEA. *Expert Systems with Applications*, 110, 237-249. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.05.028>
- Jiang, J. (2023). A survey of machine learning in additive manufacturing technologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-23. doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2177740>
- Kang, X., & Wang, N. (2022). A hybrid model to develop aesthetic product design of customer satisfaction. *Concurrent Engineering*, 1063293X221138650. doi: <https://doi.org/10.1177/1063293X221138650>
- Kara, İ. 1985, Yöneylem Araştırmasının Yöntembilimi, *Anadolu Üniversitesi Yayınları* 96, Anadolu Üniversitesi Basımevi, 117 s.
- Kaya, İ., ve Engin, O. (2005). Kalite İyileştirme Sürecinde Yapay Zekâ Tekniklerinin Kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 103-114. Erişim adresi:
- <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/191103>
- Kaya, İ., İlbahar, E., & Karaşan, A. (2023). A design methodology based on two dimensional fuzzy linguistic variables for attribute control charts with real case applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106792. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106792>
- Kesici, B. ve Yıldız, M. S. (2016). Kalite kontrol faaliyetlerinde Yapay Zekâ kullanımı ve bir otomotiv yan sanayisinde uygulanması. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(12), 307-323. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/272287>
- Kousi, N., Dimosthenopoulos, D., Matthaiakis, A. S., Michalos, G., & Makris, S. (2019). AI based combined scheduling and motion planning in flexible robotic assembly lines. *Procedia CIRP*, 86, 74-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.041>
- Kula, U., Torkul, O. ve Taşkın, H. (2006). *Endüstri ve sistem mühendisliğine giriş*. Sakarya: Değişim Yayınları.
- Kurt, R. (2022). Control of system parameters by estimating screw withdrawal strength values of particleboards using artificial neural network-based statistical control charts. *Journal of Wood Science*, 68(1), 64. doi: <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02065-y>
- Lee, S. M., Lee, D., & Kim, Y.S. (2019). The quality management ecosystem for predictive maintenance in the Industry 4.0 era. *International Journal of Quality Innovation*, 5(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1186/s40887-019-0029-5>
- Li, B. H., Hou, B. C., Yu, W. T., Lu, X. B., & Yang, C. W. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18(1), 86-96. doi: <http://dx.doi.org/10.1631/FITEE.1601885>
- Liu, X., He, X., Wang, M., & Shen, H. (2022). What influences patients' continuance intention to use AI-powered service robots at hospitals? The role of individual characteristics. *Technology in Society*, 70, 101996. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101996>
- Lolli, F., Balugani, E., Ishizaka, A., Gamberini, R., Rimini, B., & Regattieri, A. (2019). Machine learning for multi-criteria inventory classification applied to intermittent demand. *Production Planning &*

- Control*, 30(1), 76-89. doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1525506>
- Ma, G., & Wu, M. (2019). A Big Data and FMEA-based construction quality risk evaluation model considering project schedule for Shanghai apartment projects. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 37(1), 18-33. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/IJQRM-11-2018-0318>
- Maiti, C., & Muthuswamy, S. (2023). Classification of materials in cylindrical workpieces using image processing and machine learning techniques. *International Journal of Production Research*, 1-18. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2219344>
- Majumder, M. (2016). Technology as work and work as technology. *International Journal of Human Capital and Information Technology Professionals (IJHCITP)*, 7(1), 20-34. doi: <https://doi.org/10.4018/IJHCITP.2016010102>
- Mariajayaprakash, A., Senthilvelan, T., & Gnanadass, R. (2015). Optimization of process parameters through fuzzy logic and genetic algorithm—A case study in a process industry. *Applied Soft Computing*, 30, 94-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.01.042>
- Murad, C. A., Melani, A. H. D. A., Michalski, M. A. D. C., Caminada Netto, A., de Souza, G. F. M., & Nabeta, S. I. (2020). Fuzzy-FMSA: Evaluating Fault Monitoring and Detection Strategies Based on Failure Mode and Symptom Analysis and Fuzzy Logic. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 6(3), 031001. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4045974>
- Na'amnh, S., Salim, M. B., Husti, I., & Daróczy, M. (2021). Using artificial neural network and fuzzy inference system based prediction to improve failure mode and effects analysis: A case study of the busbars production. *Processes*, 9(8), 1444. doi: <https://doi.org/10.3390/pr9081444>
- Nitnara, C., & Tragangoon, K. (2023). Simulation-Based Optimization of Injection Molding Process Parameters for Minimizing Warp by ANN and GA. *International Journal of Technology*, 14(2). doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i2.5573>
- Norzelan, N. A., Mohamed, I. S., & Mohamad, M. (2024). Technology acceptance of artificial intelligence (AI) among heads of finance and accounting units in the shared service industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 123022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123022>
- Öztemel, E. (2020). *Yapay Zekâ ve İnsanlığın Geleceği*, Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi. doi: <https://doi.org/10.53478/TUBA.2020.011>
- Panda, S. K., Mishra, V., Balamurali, R., & Elngar, A. A. (Eds.). (2021). *Artificial Intelligence and Machine Learning in Business Management: Concepts, Challenges, and Case Studies (1st ed.)*. CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003125129>
- Patil, C. K., Husain, M., & Halegowda, N. V. (2018). Study of quality function deployment model based on artificial neural network with optimization techniques. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 17(01), 119-136. doi: <https://doi.org/10.1142/S0219686718500087>
- Petrat, D. (2021). Artificial intelligence in human factors and ergonomics: an overview of the current state of research. *Discover Artificial Intelligence*, 1(1), 3. doi: <http://doi.org/10.1007/s44163-021-00001-5>
- Priore, P., Ponte, B., Rosillo, R., & de la Fuente, D. (2019). Applying machine learning to the dynamic selection of replenishment policies in fast-changing supply chain environments. *International Journal of Production Research*, 57(11), 3663-3677. doi: <http://dx.doi.org/doi:10.1080/00207543.2018.1552369>
- Rasheed, H. M. W., Chen, Y., Khizar, H. M. U., & Safeer, A. A. (2023). Understanding the factors affecting AI services adoption in hospitality: The role of behavioral reasons and emotional intelligence. *Heliyon*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16968>
- Reda, H., & Dvivedi, A. (2022). Decision-making on the selection of lean tools using fuzzy QFD and FMEA approach in the manufacturing industry. *Expert Systems with Applications*, 192, 116416. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116416>
- Sabahno, H., & Niaki, S. T. A. (2023). New Machine-Learning Control Charts for Simultaneous Monitoring of Multivariate Normal Process Parameters with Detection and Identification. *Mathematics*, 11(16), 3566. doi: <https://doi.org/10.3390/math11163566>
- Sharma, A., Zhang, Z., & Rai, R. (2021). The interpretive model of manufacturing: a theoretical framework and research agenda for machine learning in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 59(16), 4960-4994. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1930234>
- Singh, A., & Kumar, S. (2021). Picture fuzzy set and quality function deployment approach based novel



- framework for multi-criteria group decision making method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104, 104395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104395>
- Singh, R., & Mishra, V. K. (2023). Machine learning based fuzzy inventory model for imperfect deteriorating products with demand forecast and partial backlogging under green investment technology. *Journal of the Operational Research Society*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2239868>
- Siskon (2023), Endüstri Devriminin Tarihsel Gelişimi. Erişim adresi: <https://www.siskon.com.tr/haberler/endustri-devriminin-tarihsel-gelisimi>
- Souza, F. F., Corsi, A., Pagani, R. N., Balbinotti, G., & Kovaleski, J. L. (2021). Total quality management 4.0: adapting quality management to Industry 4.0. *The TQM Journal*, 1-21. doi: <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2020-0238>
- Stancheva-Todorova, E.P. (2018). How artificial intelligence is challenging accounting profession. *Journal of International Scientific Publications Economy & Business*, 12, 126-141. Erişim adresi: <https://www.scientific-publications.net/get/1000031/1536783976137495.pdf>
- Swamidass, P.M. (Ed.), (2000), Moving assembly line, *Encyclopedia of production and manufacturing management*. Springer Science & Business Media, Boston, MA. doi: [https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8\\_596](https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8_596)
- Swarnkar, A., Swarnkar, A. (2020). Artificial Intelligence based optimization techniques: A Review. *Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems*, 95-103. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0214-9\\_12](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0214-9_12)
- Şahan, A.N. (2020). *Stratejik yönetim perspektifinden sigortacılık sektöründe Makine Öğrenmesi algoritmaları ile anomali tespiti* [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Tamasiga, P., Onyeaka, H., Bakwena, M., Happonen, A., & Molala, M. (2023). Forecasting disruptions in global food value chains to tackle food insecurity: The role of AI and big data analytics—A bibliometric and scientometric analysis. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100819. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100819>
- Teksen, H. E., & Anagün, A. S. (2018). Type 2 fuzzy control charts using likelihood and defuzzification methods. In *Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017: Proceedings of: EUSFLAT-2017—The 10th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, September 11-15, 2017, Warsaw, Poland IWIFSGN'2017—The Sixteenth International Workshop on Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets, September 13-15, 2017, Warsaw, Poland, Volume 3 10* (pp. 405-417). Springer International Publishing. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-66827-7\\_37](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-66827-7_37)
- Testik, O. M., & Unlu, E. T. (2023). Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories. *Quality and Reliability Engineering International*, 39(2), 575-589. doi: <http://doi.org/10.1002/qre.3198>
- Tseng, C. Y., Li, J., Lin, L. H., Wang, K., White III, C. C., & Wang, B. (2023). Deep reinforcement learning approach for dynamic capacity planning in decentralised regenerative medicine supply chains. *International Journal of Production Research*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2262043>
- Wan, (2020). Economic-statistical design of integrated model of VSI control chart and maintenance incorporating multiple dependent state sampling. *IEEE Access*, 8, 87609-87620. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993024>
- Wan, Q., Chen, L., & Zhu, M. (2023). A reliability-oriented integration model of production control, adaptive quality control policy and maintenance planning for continuous flow processes. *Computers & Industrial Engineering*, 176, 108985. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108985>
- Wang, W., Li, R., Chen, Y., Diekel, Z. M., & Jia, Y. (2018). Facilitating human-robot collaborative tasks by teaching-learning-collaboration from human demonstrations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(2), 640-653. doi: <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2840345>
- Wiers, V. C. S. (1997), A Review of the Applicability of OR and AI scheduling techniques in Practice, *OMEGA-International Journal of Management Science*, 25,2,145-153. doi: [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(96\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(96)00050-3)
- Xia, H., Muskat, B., Li, G., & Prayag, G. (2023). Ai-based counterfactual reasoning for tourism research, 101, 103617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.annals.2023.103617>
- Yaiprasert, C., & Hidayanto, A. N. (2023). AI-driven ensemble three machine learning to enhance digital marketing strategies in the food delivery

- business. *Intelligent Systems with Applications*, 18, 200235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200235>
- Yamamura, C. L. K., Santana, J. C. C., Masiero, B. S., Quintanilha, J. A., & Berssaneti, F. T. (2022). Forecasting New Product Demand Using Domain Knowledge and Machine Learning: A proposed method uses machine learning and an expert's domain knowledge to enhance the accuracy of new product predictions. *Research-Technology Management*, 65(4), 27-36. doi: <https://doi.org/10.1080/08956308.2022.2062553>
- Yasir, M., Ansari, Y., Latif, K., Maqsood, H., Habib, A., Moon, J., & Rho, S. (2022). Machine learning-assisted efficient demand forecasting using endogenous and exogenous indicators for the textile industry. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-20. doi: <https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2100334>
- Yeganeh, A., Abbasi, S. A., Shongwe, S. C., Malela-Majika, J. C., & Shadman, A. R. (2023). Evolutionary support vector regression for monitoring Poisson profiles. *Soft Computing*, 1-25. doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09047-2>
- Yeganeh, A., Johannssen, A., Chukhrova, N., Abbasi, S. A., & Pourpanah, F. (2023). Employing machine learning techniques in monitoring autocorrelated profiles. *Neural Computing and Applications*, 1-20. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08483-3>
- Yildirim, S. (2023), Python Libraries You Need to Know in 2023. Erişim adresi: <https://learnpython.com/blog/python-libraries/>.
- Yoo, S. D., Kim, J. Y., Han, S. K., Lee, B. H., Choi, D. H., & Park, E. S. (2023). Development of prediction model with machine learning in continuous twin screw granulation. *Journal of Pharmaceutical Investigation*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1007/s40005-023-00625-y>
- Zhang, HF., Ge, HW., Tong, YB. (2022). Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29,1 195-221. doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09574-x>
- Zhang, Y., Peng, P., Liu, C., & Zhang, H. (2019). Anomaly detection for industry product quality inspection based on Gaussian restricted Boltzmann machine. *Ekim 2019, IEEE International Conference On Systems, Man And Cybernetics*, 1-6. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=8914524>
- Zhang, Y., Zhu, H., Tang, D., Zhou, T., & Gui, Y. (2022). Dynamic job shop scheduling based on deep reinforcement learning for multi-agent manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, 102412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102412>