



**Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**  
**Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology**

Year (Yıl): 2024, Volume (Cilt):3, Number (Sayı):1

**Dergi İmtiyaz Sahibi / Owner**

Prof. Dr. Turhan KURŞUN

**Editör / Editor in Chief**

Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK

**Yardımcı Editörler / Associate Editors**

Prof. Dr. İbrahim CAN

Doç. Dr. Serdar MERCAN

**Teknik Editor / Technical Editor**

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat KOCA



Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi  
Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

#### Advisory Board (Danışma Kurulu)

Prof. Dr. Bilge Demir	Karabük Üniversitesi
Prof. Dr. Coşkun ÖZALP	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
Prof. Dr. Murat HOŞÖZ	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar OSMANYILMAZ	Namık Kemal Üniversitesi
Prof. Dr. Yasin VAROL	Fırat Üniversitesi

3(1):2024



**Sivas Cumhuriyet University Journal  
of Science and Technology**

Published by  
Sivas Cumhuriyet University  
<https://dergipark.org.tr/jst/olupet>  
E-ISSN: 2980-0110

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi  
Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

### Subject Editors (Alan Editörleri)

Prof. Dr. Tanju TEKER

Dr.Öğr. Üyesi Özlem POLAT

Doç. Dr. İlker Temizer

Dr.Öğr. Üyesi Cem ERTEK

Doç. Dr. Abdullah KAPICIOĞLU

Dr.Öğr. Üyesi Sibel ARSLAN

Doç. Dr. Rukiye KARAKIŞ

Dr.Öğr. Üyesi Emre ÜNSAL

Doç. Dr. Sinan AYDIN

Dr.Öğr. Üyesi Tahsin YÜKSEL

Dr.Öğr. Üyesi Nazile YILANKIRKAN

Dr.Öğr. Üyesi Yakup EMÜL

### Journal secretariat (Dergi Sekreteryası)

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat KOCA

Arş.Gör. Gökhan AZİZOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Yeliz ALNAK

Arş.Gör. Kürşat TUNCER

Arş.Gör. Fatih CİVELEK

Arş.Gör. Onur ÖRNEK



**Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi (CUJAST)** hakemli bir dergidir.

**Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi** yılda iki kez yayınlanmaktadır (Haziran ve Aralık).

**Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology (CUJAST)** is a peer-reviewed journal.).

**Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology** is published two times in a year (June and December).

Dergi İçin Yazışma Adresi / Correspondence Address

Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK (Editor in Chief)

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

e-mail: [dealnak@cumhuriyet.edu.tr](mailto:dealnak@cumhuriyet.edu.tr)

[cujast@cumhuriyet.edu.tr](mailto:cujast@cumhuriyet.edu.tr)

Web link: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cujast>



## Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

### Sivas Cumhuriyet University Journal of Science and Technology

Year (Yıl): 2024, Volume (Cilt):3, Number (Sayı):1

#### CONTENTS (İçindekiler)

Sayfalar

Kübra Sümer Haydaraslan Examining the Effect of Digital Manufacturing and Traditional Building Construction Techniques on the Building Production Process Bina İnşa Sürecinde Yeni İnşaat Teknolojileri Kullanımının İncelenmesi	1-13
Nazile Yılkıran, Dilara İsaogulları Photovoltaic System Design And Analysis: The Case Of Sivas Technology Development Zone Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Analizi: Sivas Teknoloji Geliştirme Bölgesi Örneği	14-20
Mert Uygun, Akif Yavuz, Osman Taha Sen Design And Evaluation Of Piezoelectric-Based Passive Damping For High Frequency Noise Suppression	21-29
Faruk Karaca, Engin Ünal Review Study on Electromechanically Supported Dental Implant Applications Elektromekanik Destekli Diş İmplant Uygulamaları Üzerine Derleme Çalışması	30-34
Arslan Kaptan, Serdar Mercan, Fuat Kartal Influence of Process Parameters on Kerf Width in Abrasive Waterjet Machining of GFRP Composites GFRP Kompozitlerin Aşındırıcı Su Jeti ile İşlenmesinde Proses Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	35-43



## Examining the Effect of Digital Manufacturing and Traditional Building Construction Techniques on the Building Production Process

Kübra Sümer Haydaraslan<sup>1,a,\*</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Isparta, Türkiye

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 14/02/2024

Accepted: 06/05/2024

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

### ABSTRACT

Adapting new technologies to the construction industry is slower than in other sectors. Labor productivity has remained stable relative to other industries over the last two decades. Therefore, due to rapid population growth, more housing needs is needed. The industry needs to improve its performance against current and future demands. Building production with digital fabrication techniques has the potential to speed up the building construction process. In addition, this technique is important in that it allows production with on-site and sustainable materials. The most used digital production technique in buildings is additive manufacturing technology. This study aims to examine the advantages and disadvantages of using additive manufacturing technologies in building construction compared to traditional construction techniques. At the end of the study, it was concluded that although digital production techniques have great potential in building construction, problems still need to be solved. The need to develop standards in building construction, especially with digital production techniques, is seen as the biggest obstacle to its widespread use in building construction.

**Keywords:** Building construction, Digital fabrication techniques, Digital construction, Additive manufacturing, Construction technology

## Bina İnşa Sürecinde Yeni İnşaat Teknolojileri Kullanımının İncelenmesi

### Araştırma Makalesi

#### Süreç

Geliş: 14/02/2024

Kabul: 06/05/2024

### ÖZ

Yeni teknolojilerin inşaat sektörüne adaptasyonu diğer sektörler göre daha yavaştır. İş gücü verimliliği ise diğer sektörler kıyasla son yirmi yılda sabit kalmıştır. Bu nedenle hızlı nüfus artışından kaynaklı barınma ihtiyacı karşılanamamaktadır. Sektörün şu anda ve gelecekte olan talepleri karşılayabilmesi için performansını artırması gerekmektedir. Dijital fabrikasyon teknikleri ile bina üretimi, bina inşa sürecini hızlandırma konusunda potansiyele sahiptir. Ayrıca yerinde ve sürdürülebilir malzemeler ile üretime imkan vermesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bina sektöründe kullanılan dijital fabrikasyon tekniklerinden binalarda en yaygın kullanılan teknoloji eklemeli imalat teknolojileridir. Bu çalışmada binaların daha hızlı inşa edilmesinde eklemeli imalat teknolojileri kullanımının geleneksel inşa yöntemlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumların incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, geleneksel inşa yöntemleri ile eklemeli imalat inşa yöntemleri; sürdürülebilirlik, statik, maliyet ve üretim esnekliği parametreleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda eklemeli imalat tekniklerinin, bina inşasında birçok potansiyele sahip olsa da henüz çözülmemiş sorunları bulunduğu ulaşılmıştır. Özellikle tekniğin bina inşası konusunda standartlarının gelişmemiş olması, bina inşasında yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel olarak görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Bina inşası, Dijital fabrikasyon teknikleri, Dijital inşaat, Eklemeli imalat, İnşaat teknolojisi



kubrahaydaraslan@sdu.edu.tr



0000-0003-0663-6141

**How to Cite:** Sümer Haydaraslan K (2024) Examining the Effect of Digital Manufacturing and Traditional Building Construction Techniques on the Building Production Process, Journal of Science and Technology, 3(1): 1-13.

## Giriş

Binaların ilk oluşum amacı korunaklı bir alan oluşturmaktır. Tarih boyunca teknolojinin gelişimi ile ihtiyaçlar çeşitlenmiştir. Bu durum binaların inşa tekniklerinde, boyutlarında, kullanım amacında değişimlere neden olmuştur. Bina inşası dönemlere göre farklı yapı teknolojileri kullanılarak yapılmıştır (Yergün, 2002). Bina inşasında kullanılan yapı teknolojileri genel olarak strüktür sistemi ile ilgilidir. Bu strüktür sistemleri çoğunlukla kullanılan malzemenin çeşidine, yapısal özelliğine, yapım ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bina inşa yöntemleri yapısal özelliğine göre sınıflandırıldığında yığma, iskelet, plak ve karma taşıyıcı sistem olarak sınıflandırılmaktadır (Yergün, 2002, Sümer Haydaraslan, 2023). Bugün bina inşa tekniğinde en yaygın kullanılan sistem iskelet sistemidir. Bu sistemde bina yatay ve düşey taşıyıcılar ile taşınmaktadır. Bu sistemde binaların inşa sahasında yerinde üretimi gerçekleştirilmektedir. Birçok farklı iş kaleminin bulunduğu bu inşa yöntemi günümüzde geleneksel inşa yöntemi olarak adlandırılmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan geleneksel inşaat yöntemleri, yüksek oranda kalıp ve işgücüne ihtiyaç duymaktadır (Khoshnevis, 2004). Bu durum binaların inşaat sürelerini uzatmaktadır. Özellikle barınma ihtiyacının karşılanmasında bu inşa yöntemi talebi karşılamakta yavaş kalmaktadır.

Birleşmiş Milletler tarafından yapılan çalışmaya göre dünya nüfusunun 2030 yılında 8,5 milyara, 2050 yılında ise 9,7 milyara ulaşması beklenmektedir (Şekil 1) (UN DESA, 2023). Nüfusta beklenen artış, konut ihtiyacında da ciddi artış yaşanacağına göstergesidir. Artan konut ihtiyacı talebine cevap verebilmek için, inşaat sektöründe üretimi hızlandırma konusunda çözüm arayışına gidilmektedir. Bu durum mevcut bina inşa yöntemlerinde yeni inşaat teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması konusunun önemini göstermektedir. Diğer bir yandan geleneksel inşa yönteminde bugün en yaygın kullanılan sistem betonarme iskelet sistemidir. Betonun inşa sahasına taşınması ve demir ile birleşimi sonucu binanın yatay ve düşey taşıyıcıları oluşturulmaktadır. Bu sistemde malzemelerin sahaya taşınması, binanın inşa edilmesi ve yıkım aşaması gibi parametreler inşaat sektörünün sanayi sektöründen sonra en fazla enerji tüketiminin ve CO<sub>2</sub> salınımının kaynağıdır. İklim değişikliğinin en büyük nedenlerinden biri olarak gösterilen CO<sub>2</sub> salınımının inşaat sektöründe azaltılması iklim değişikliği etkilerinin azaltılması için önemlidir (Sümer Haydaraslan ve Dikmen, 2023; Sümer Haydaraslan ve Yaşar, 2023). Yeni inşa teknolojilerinde sürdürülebilir malzeme kullanımı, yapım ve yıkım aşamasında CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması konusunda çözüm önerileri bulunmaktadır.

Endüstri devrimleri (Endüstri 1.0 (1740-1840), Endüstri 2.0 (1840-1950), Endüstri 3.0 (1950-2011) ve Endüstri 4.0 (2011-)) inşaat sektörünün yanı sıra bütün sektörlerin üretim yöntemlerini yıllar içinde değiştirmiştir. Dünya şu an Endüstri 4.0 ile büyük bir dönüşüm içindedir. Bu dönem otomasyon ve yapay zeka çağı olarak adlandırılmaktadır. Dijital fabrikasyonun ve eklemeli imalat teknolojisinin

yaygınlaşması bu dönemin bütün üretim yöntemlerinin merkezinde yer almaktadır. İçinde otomasyon ve yapay zeka barındıran endüstriyel robotların inşaatlarda kullanımının yaygınlaşmasının üretim hızının artmasına büyük katkı sağlayacağı ön görülmektedir. İnşaat sektörünün de bu teknolojik gelişmelerin kullanılması açısından ciddi potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir (Linner ve ark., 2020; Ghaffar ve ark., 2018; Brischetto ve ark., 2017).

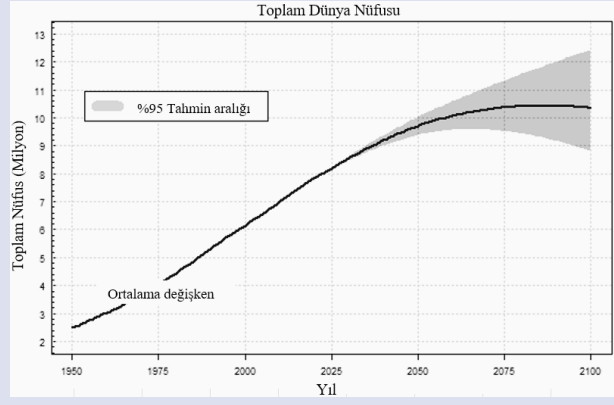
Dijital fabrikasyon bilgisayarda tasarımı yapılan bir ürünün büyük oranda makine kullanılarak üretilmesi sürecidir. Yerinde ve sürdürülebilir malzemeler ile üretime imkan vermesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca dijital fabrikasyon yöntemler, geleneksel inşa yöntemleri ile uygulanması zor olan bina tasarımlarının inşasını kolaylaştırmıştır. Her ne kadar günümüzde binaların dijital fabrikasyon teknolojileri üretimi çeşitli zorluklar içerse de ciddi bir potansiyeli de beraberinde getirmektedir. Yapılan çalışmalar bina üretiminin hızlandırılması için dijital fabrikasyon tekniklerini içeren eklemeli imalatın ya da 3D baskı yöntemlerinin inşaat sektöründe kullanımını önermektedir (Ma ve Wang, 2018; Weng ve ark., 2020). Bu kapsamda bu çalışmada binaların daha hızlı üretimine imkan veren eklemeli imalat teknolojileri kullanımının geleneksel inşa yöntemlerine göre avantajlı ya da dezavantajlı olduğu konuların incelenmesi amaçlanmıştır. Bir binanın inşasında sürdürülebilirlik, statik ve maliyet konusu inşaat yönteminin belirlenmesinde en önemli konulardır (Ma ve Wang, 2018). Çalışma için geleneksel inşa yöntemleri ve eklemeli imalat yöntemleri bu parametreler açısından karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca eklemeli imalat yöntemlerinin esnek tasarım uygulama kolaylığı sağlamasından dolayı bu parametre açısından da karşılaştırılmıştır. Çalışma için binaların daha hızlı inşa edilmesinde yeni bina inşaat tekniklerinin kullanımı incelenmiştir. Daha sonra bina sektöründe kullanılan dijital fabrikasyon tekniklerinden binalarda en yaygın kullanılan eklemeli imalat teknolojileri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada son olarak geleneksel inşa yöntemleri ve 3D yazıcılarla bina yapımı avantaj ve dezavantajları açısından incelenmiştir.

## 2. BİNA SEKTÖRÜNDE KULLANILAN İNŞA TEKNİKLERİ

### 2.1. Geleneksel İnşa Teknikleri

Barınma ihtiyacı insanlığın var olduğu tarihten bu yana en temel ihtiyaçlardan biri olmuştur. Bilinen en eski barınma birimlerinden olan mağaralar inşa tekniği olarak oymanın geliştirildiği ilk birimdir. Daha sonra barınma ihtiyacının karşılanması için yaygın olarak toprak malzeme ile farklı teknikler kullanılarak barınma birimleri oluşturulmuştur (Jaquin, 2012). Bu birimler toprak ile kaplanarak, doldurularak, bloklar oluşturularak, sıkıştırılarak, doğrudan şekillendirilerek, yığılmış olarak, kalıplanmış olarak ve toprak ile diğer yerel malzemeler karıştırılarak farklı inşaat teknikleri ile oluşturulmuştur (Şekil 2) (Pica, 2017; Dirican ve Akyol, 2019). Binaları inşa etme teknikleri teknolojinin gelişmesine bağlı olarak değişim göstermiş ve geçmişte kullanılan oyma, kaplama, vb. yöntemler neredeyse hiç kullanılmamaktadır.





Resim 1. Dünya toplam nüfus artış tahmini  
Figure 1. World total population growth forecast



Resim 2. Bina inşa teknikleri gelişimi  
Figure 2. Development of building construction techniques

Bir binayı oluşturan strüktür ve malzemeler ilgili dönemin özelliklerini yansıtmaktadır. Binanın inşa tekniğini kullanılan strüktür sistemi belirlemektedir. Binanın strüktür sistemi bina yükünü binanın temelinde daha sonra ise zeminine aktaran sistemdir (Ching, 2001). İnşaat yöntemlerinde yaşanan teknolojik gelişmeler ile binalarda kullanılan sistemler çoğunlukla malzemelerin cinsine, yapısal özelliğine, yapım tekniğine ve üretim yöntemine göre ayrılmaktadır. Bu sistemler yapısal özelliklerine göre incelendiğinde yığma sistem, iskelet sistem ve karma sistemler olarak ayrıldığı görülmektedir. Yığma sistem barınma ihtiyacının karşılanması için kullanılan en eski sistemlerden biridir. Bu inşaat tekniği taşıyıcı özelliğe sahip küçük boyutlardaki malzemelerin taşıyıcı olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Bu malzemeler taş, tuğla ya da kerpiç olabilir ve blok halde kullanılmaktadır. Çoğunlukla ise harç ile birbirine yapıştırılmaktadır. İskelet sistem ise binaya ait yüklerin birbirine bağlanan yatay ve düşey taşıyıcılar ile zemine aktarıldığı sistemdir (Yergün, 2002). Bu sistem çelik, betonarme ya da ahşap malzeme ile oluşturulmaktadır. Bu sistemlere ek olarak iki sistemin bir arada kullanıldığı karma sistem ile de binalar inşa edilmektedir (Şekil 3) (Sümer Haydaraslan, 2023; Yergün, 2002).

Bina sektöründe bugün en yaygın kullanılan teknik betonarme iskelet sistemi ile binaların inşa edilmesidir. Şekil 3'te verilen taş yığma yapı örneğinde Türkiye'de yaygın olarak bulunan kövke, pomza, küfeki vb. olarak adlandırılan taş ile yığma binanın oluşturulduğu

görülmektedir. Kerpiç yığma tekniği görselinde bölgelere göre içeriği değişkenlik gösteren harcın güneşte kurutularak oluşturulduğu tuğla formundaki kerpiç ile binanın oluşturulduğu görülmektedir. Tuğla yığma görselinde pişmiş kil esaslı topraktan oluşturulan yığma yapı görülmektedir. Ahşap, çelik ve betonarme iskelet sistem görsellerinde taşıyıcı iskelet sisteminde malzeme değişikliği ile strüktürün oluşturulduğu görülmektedir. Farklı bina inşa tekniklerinin bir arada kullanıldığı karma sistem ile de binalar inşa edilmektedir.

#### Dijital Fabrikasyon İnşa Teknikleri

Bina inşa etme yöntemleri, yaşam şartlarının değişmesi ve teknolojinin gelişmesi ile geçmişten günümüze büyük değişim göstermiştir. Binalarda yaşanan köklü değişimler; yerleşik hayata geçilmesi (Tarım Devrimi) ve beton ve çeliğin binalarda kullanımı (Endüstri 1.0) ile olmuştur. Diğer beklenen köklü değişim ise bugünlerde sıklıkla gündeme gelen Endüstri 4.0 ile binaların dijital fabrikasyon ile inşa edilme potansiyelidir. Yapılan çalışmalar otomasyon alanında gerçekleşen hızlı ilerleme ile on yıl içinde inşa etme yöntemlerinde büyük değişimler yaşanacağını ön görmektedir. Ayrıca yeni teknolojiler ile bina inşaatında kullanılan yapı bileşenlerinin ve inşaat süreçlerinin olumlu anlamda gelişeceği ön görülmektedir (Dong ve Yu, 2021; Zhu ve ark., 2021; Gebhard ve ark., 2021).



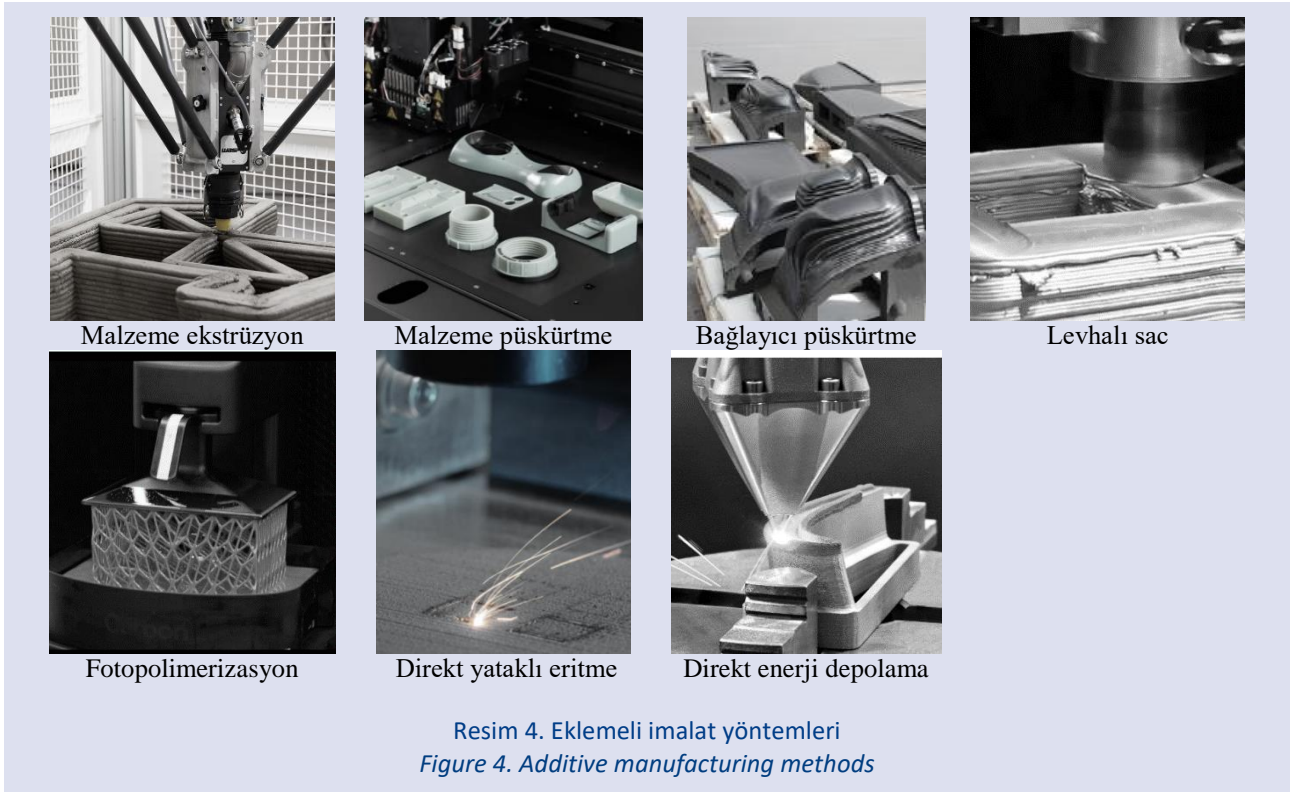
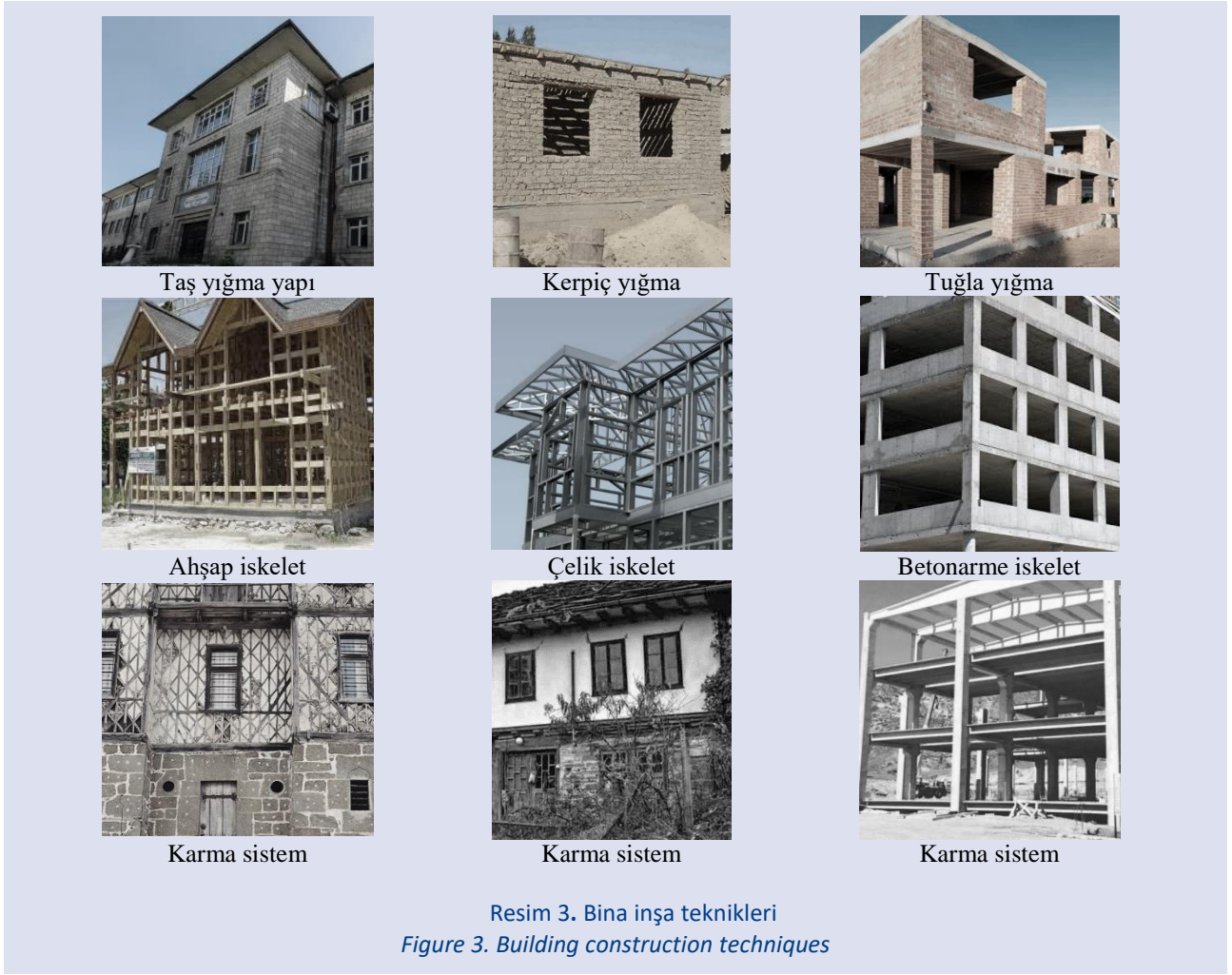
Dijital fabrikasyon en basit tanımı ile bilgisayar ortamında tasarlanan bir nesnenin bir makine kullanılarak üretilmesi temeline dayanmaktadır. Bu üretim yönteminin binalarda en yaygın kullanımı eklemeli imalat ile üretimdir. Eklemeli imalat yöntemleri ASTM International Committee F42 'Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies' e göre yedi kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler; malzeme ekstrüzyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, levhalı sac, fotopolimerizasyon, direkt yataklı eritme, direkt enerji depolama 'dır (ASTM, 2023). Yöntemlerin çalışma prensipleri şeması Şekil 4'te verilmiştir (Tofail ve ark., 2018; Gibson ve ark., 2010; Cesaretti ve ark., 2014; Will ve ark., 2008; Griffin ve ark., 1995; Wolf ve ark., 2022; Li ve ark., 2022).

Malzeme ekstrüzyon tekniği, eklemeli imalatta ekstrüzyon, erimiş bir parçanın katman katman yeniden dökülmesi ile oluşturulan işlemdir (Tofail ve ark., 2018; Gibson ve ark., 2010). Bu teknikte hammadde ısı ile sıvılaştırılmakta ve sıra halinde dökülmektedir (Crump, 1992). Bugün en yaygın kullanılan 3D baskı yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin maliyeti diğer yöntemlere kıyasla azdır (Wolf ve ark., 2022). Malzeme püskürtme tekniği ise, sıvı ya da erimiş malzemenin püskürtülerek imalat yapılması esasına dayanan bir yöntemdir. Diğer bir eklemeli imalat tekniği bağlayıcı püskürtme tekniğidir. Bu teknikte toz bileşenler ısı ya da bağlayıcı ile birleştirilmektedir. Baskı alanında toz katmana bağlayıcılar uygulanarak nesne ortaya çıkartılır (Cesaretti ve ark., 2014; Will ve ark., 2008). Levhalı sac tekniği ise, eklemeli ve çıkarmalı imalat tekniğinin ara kesitindedir. İnce levha formundaki farklı malzeme özelliği gösteren folyoların işlenmesi tekniğine dayanmaktadır (Griffin ve ark., 1995). Fotopolimerizasyon tekniğinde, polimerize olabilen reçine özellikli malzemenin farklı özellikteki ışık kaynağının etkisi ile üretim yapılmaktadır (Hull, 1986). Yöntemin ölçeği büyük olan çözümlerde yavaş kalması inşaat sektöründe kullanımını kısıtlamaktadır (Wolf ve ark., 2022). Diğer bir teknik olan direkt yataklı eritme tekniğinde, toz formdaki çeşitli malzemeler (seramik, metal vb.) lazer, elektron ışını gibi bağlayıcı kullanılarak katman katman kaynaştırılmaktadır (Deckard, 1989). Son teknik olan direkt enerji depolama tekniği ise, kullanılan malzemenin püskürtülmesi ve enerji kaynağı ile eritilerek üretim yapılması esasına dayanır (Li ve ark., 2022).

Eklemeli imalat endüstriyel imalatın yapıldığı tüm sektörlerde kullanılmaktadır (Chua ve Leong, 2014; Mohsen, 2020). Endüstride kullanılan imalat teknikleri ile kıyaslandığında eklemeli imalat tekniğinde bir ürünün üretiminde atık miktarı azdır (Jiang ve ark., 2018). Ayrıca eklemeli imalat bir ürünün yerinde üretimine imkan vermesinden dolayı üretim için taşımacılığı azaltmaktadır. Bu sayede taşımacılık kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımının azalması da ön görülmektedir (Jiang ve ark., 2017). Eklemeli imalat Endüstri 4.0 olarak adlandırılan çağın temelini oluşturmaktadır. Bu imalat tekniği tüm sektörlerin üretim hattını değiştirmektedir. İnşaat sektöründe de eklemeli imalat tekniğinin kullanıldığı birçok çalışma ve uygulama yapılmaktadır (Cesaretti ve ark., 2014). Barınma ihtiyacının en temel ihtiyaç olması, inşaat sürelerinin uzun ve çok aşamalı olmasından dolayı birçok ülke bu konuda çalışmalar yapmaktadır (Khajavi ve ark., 2021). Yapılan çalışmalar inşaat sektörünün yeni teknoloji ve tekniklerin kullanımında büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 25

yıldan daha uzun süredir eklemeli imalat konusunda yapılan çalışmalar havacılık, otomobil gibi sektörlerde olduğu gibi yeni teknoloji girdileri ile büyümeye devam etmektedir (Chua ve Leong, 2014; Mohsen, 2020; Khoshnevis, 2004). Eklemeli imalatın daha çevreci ve düşük maliyetli olması konusundaki çalışmalar inşaat sektörü için önemlidir.

Eklemeli imalat tekniği, binaların yapımında 1997 yılından bu yana kullanılmaktadır (Pegna, 1997). Eklemeli imalatın binalarda kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Eklemeli imalat konusunda yapılan bir çalışmada inşaat bu tekniğin kullanım potansiyelini incelenmiştir. Çalışma ile tekniğin çevresel sürdürülebilirlik açısından sağladığı yararları ulaşımlardır. Ayrıca açık kodlu üretim tekniklerinin mimari tasarımlarda özgür yaklaşıma katkı sağlayacağı belirtilmiştir (Ghaffar ve ark., 2018). Yapılan başka bir çalışmada eklemeli imalatta ekstrüzyon tekniğine dayanan 3D basım tekniği ile bina yapımında kullanılan harç ile ilgili çalışılmışlardır. Çalışmanın sonunda statik dayanımı yüksek bir harç elde etmişlerdir. Çalışmada geleneksel inşaat yöntemleri ile 3D basım tekniğinin bir arada kullanımının mümkün olduğunu belirtmişlerdir (Panda ve ark., 2017). Eklemeli imalatta ekstrüzyon tekniğine dayanan 3D basım tekniği en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu teknikte malzeme olarak inşaat en yaygın kullanılan beton malzeme tercih edilmektedir. Ekstrüzyon tekniğinde kullanılan harçların teknik özelliklerini ve uygulanma şekillerini inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada harçların çekme, gerilim, viskozite vb. özelliklerinin baskıya etkileri incelenmiştir (Saruhan ve ark., 2022). Ekstrüzyon tekniği ile ilgili yapılan başka bir çalışmada değişken kalınlıktaki inşaat bileşenlerin üretimi için sabit genişlikte filaman kullanılmaması konusu üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada ekstrüzyonun kontrollü kullanımını öneren bir yöntem geliştirilmiştir (Yuan ve ark., 2022). Ekstrüzyon basım tekniği ile ilgili yapılan başka bir çalışmada bu tekniğin avantaj ve dezavantaj incelemiştir. Ayrıca tekniğin potansiyelleri anlatılmıştır (Kazemian ve Khoshnevis, 2021). Eklemeli imalat 3D basım tekniğinde diğer kullanılan yöntemlerden biri püskürtme tekniğidir. Bu teknikte bağlayıcı madde püskürtülerek basım yapılır. Bu konuda yapılan çalışmada kullanılan malzemenin oranlarında değişim yapılarak basınç dayanımının artırılması için çalışılmıştır. Çalışmanın sonunda basılan ürünün basınç dayanımı artmış ve binalar için kullanım olasılığı artırılmıştır (Park ve ark., 2021). Bağlayıcı kullanılarak yapılan başka bir çalışmada beton esaslı malzemenin yaygın kullanımının artırılması amaçlanmıştır. Çalışma ile malzemenin basınç dayanımı ve 3D baskı ile basılabilirliği artırılmıştır (Xia ve Sanjayan, 2016). Literatür incelendiğinde fotopolimerizasyon ve levha laminasyon alanındaki çalışmaların inşaat sektörü dışında kaldığına ulaşılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmaların inşaatın ölçeğinin büyük olması nedeni ile bu tekniklerin kullanılmadığı belirtilmiştir (Camacho ve ark., 2018). Bir diğer eklemeli imalat tekniği olan toz yataklı füzyonun ise inşaatta kullanıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde bu tekniğin çelik strüktürde kullanıldığı görülmektedir (Rosenfield, 2023; Galjaard ve ark., 2014; Joosten, 2015). Direkt enerji depolama yönteminin inşaatta kullanımı incelendiğinde ise toz yataklı füzyonda olduğu gibi çelik parça üretimde kullanıldığı görülmektedir (Şekil 5) (Jayathilakage ve ark., 2020; Kruger ve ark., 2020; XtreeE, 2023; Ye ve ark., 2021; Feucht ve ark., 2022).





Ekstrüzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri (a)



Toz yataklı füzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri (b)

Resim 5. Ekstrüzyon tekniğine ve Toz yataklı füzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri  
Figure 5. 3D printing examples based on extrusion technique and powder bed fusion technique



(a)



(b)

Resim 6. Ekstrüzyon tekniği ile bina 3D basım örnekleri  
Figure 6. Creating 3D printing samples with extrusion technique

Ekstrüzyon tekniğine ve Toz yataklı füzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri incelendiğinde binalarda kullanımı konusunda birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ekstrüzyon tekniğinde yapılan 3D basımlarda çoğunlukla çimento esaslı malzemeler kullanılmıştır. Çalışmalarda basılan ürünlerin statik, ısıl ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Toz yataklı füzyon tekniğine ait çalışmaların son yıllarda hızlandığı

görülmektedir. Ekstrüzyon tekniğine göre daha kapsamlı olan bu teknikte binaların ara eleman parçaları, çelik köprüler ve taşıyıcı özelliği olan elemanlar üretildiği görülmektedir.



## Geleneksel ve Dijital Fabrikasyon Tekniğiyle Bina İnşasının Karşılaştırılması Olarak İncelenmesi

Binaların inşasında bugün en yaygın kullanılan teknik geleneksel inşa tekniklerinden betonarme iskelet sistemdir. Dijital fabrikasyon teknikleri ile bina inşası incelendiğinde ise en yaygın teknik, ekstrüzyon yöntemi ile 3D baskı yapılmasıdır. 3D baskı ile evlerin basılması süreci 1997 yılında geliştirilmiştir (Khoshnevis ve Dutton, 1998). Daha sonra 2007 yılında geliştirilen yöntem ile 2014 yılında 200 m<sup>2</sup> taban alanına sahip bir ev basılmıştır (Şekil 6 (a)) (Kira, 2023). Bu basımı gerçekleştiren firma 1100 m<sup>2</sup> taban alanına sahip 5 katlı bir apartmanın 3D yazıcı ile basımını gerçekleştirmiştir (Şekil 6 (b)) (Kira, 2023). 2015 yılında tasarlanan büyük ölçekli bir 3D yazıcı ile kale basımı gerçekleştirilmiştir (Rudenko, 2023). İnşaat alanında kullanımının ciddi potansiyeller taşıdığına belgelenmesi bu alandaki çalışmaları hızlandırmıştır (Ma ve Wang, 2018). İnşaat sektörünün diğer sektörlerle kıyasla nihai ürününü ortaya çıkarması daha yavaş kalmaktadır. Bu nedenle mevcut yöntemlerle binaların inşa edilme hızı barınma ihtiyacının karşılanması için yeterli değildir. 3D Baskı teknolojisi ile binaların daha hızlı inşa edilmesinin mümkün olması bu teknolojiye olan talebi artırmıştır (Zhang ve ark., 2019). Yapılan çalışmalar geleneksel inşaat yöntemine göre dörtte biri kadar zamanda bu teknoloji ile bina üretiminin gerçekleştirilebileceğini ortaya koymuştur (Ma ve Wang, 2018; Batikha ve ark., 2022). İnşaat sektöründe 3D baskı konusunda çalışmaların hızlanmasının en önemli nedenlerinden birinin hızlı inşaat süreçleri olduğu belirtilmektedir (Zhang ve ark., 2019). Ayrıca geleneksel inşa yöntemlerine göre daha hızlı üretime izin vermesi, afetlerden etkilenenlerin kısa sürede barınma birimlerinin kullanılmasına olanak sağlayabilmektedir (Robayo-Salazar ve ark., 2023). 3D baskı teknolojisi ile bir bina bütünüyle inşa edilmese bile prefabrik modüllerin inşası da zaman açısından kazanç sağlamaktadır. Çalışmada binaların geleneksel inşa teknikleri ve dijital fabrikasyon teknikleri ile üretimi sürdürülebilirlik, statik, maliyet ve üretim esnekliği açısından incelenmiştir.

### Sürdürülebilirlik

İnşaat sektörü toplamda tüketilen enerjinin %40'ını tüketmektedir. Avrupa genelinde yapılan çalışmalara göre ise inşaat sektöründe tüketilen enerji oranının %60 olduğu ve bu oranın %50'sinin binaların ısıtma ve soğutması için kullanıldığına ulaşılmıştır (IEA, 2023). Ayrıca atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının %38'i inşaat sektörü kaynaklıdır (De Schutter ve ark., 2018). 3D baskıya uygun geliştirilen malzemeler ve dijital fabrikasyon yöntemleri geleneksel inşaat tekniklerine göre enerji tüketimi daha az ve sürdürülebilir olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada cüruf, silikat bazlı aktivatör ve ince kumdan oluşan bir malzeme geliştirilmiştir. Çalışmada bu malzemenin bina yapımına uygun sürdürülebilir bir malzeme olduğuna ulaşılmıştır (Xia ve Sanjayan, 2016). 3D baskıya uygun geliştirilen harçlar, binaların enerji tüketimini azaltacak karışımlar ile ısı transferi azaltılıp geleneksel inşa yönteminde kullanılan ısı yalıtımı gibi davranış sergileyebilmektedir (Pessoa ve ark.,

2021). Yapılan başka bir çalışmada bir banyo biriminin prefabrik olarak inşa edilmesi ve 3D baskı ile basılmasının etkileri karşılaştırılmıştır. 3D ile basım yapıldığında maliyetin %34.1 daha düşük olduğuna, CO<sub>2</sub> salınımının prefabrik inşaya göre %85.9 daha az olduğuna ve enerji tüketiminin de %87.1 daha az olduğuna ulaşılmıştır (Weng ve ark., 2020). İnşaat katı atık üretiminde de önde olan sektörlerden biridir (Marzouk ve Azab; 2014). Çevreye verilen zararın azaltılması sektör açısından önemlidir. Artan nüfus, kentleşme oranı ve sanayinin büyümesi ile katı atık ciddi bir sorun haline gelmiştir (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012). Yapılan çalışmalar atık miktarı konusunda önlem alınmazsa bu atık miktarının 2050 yılına kadar %70 oranında artış göstereceğini tahmin etmektedir (World Bank, 2018). 3D yazıcılar ile bina üretiminde yaygın olarak harcın direkt basılması tekniğine dayanması, daha az atık oluşturmaktadır. Ayrıca ömrünü tamamlayan binaların yapı söküm süreçlerine ilişkin atık miktarları incelendiğinde 3D yazıcı ile basılan binaların Agenda 2030'a göre Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine uygun olduğu belirtilmiştir (UN, 2023).

### Statik

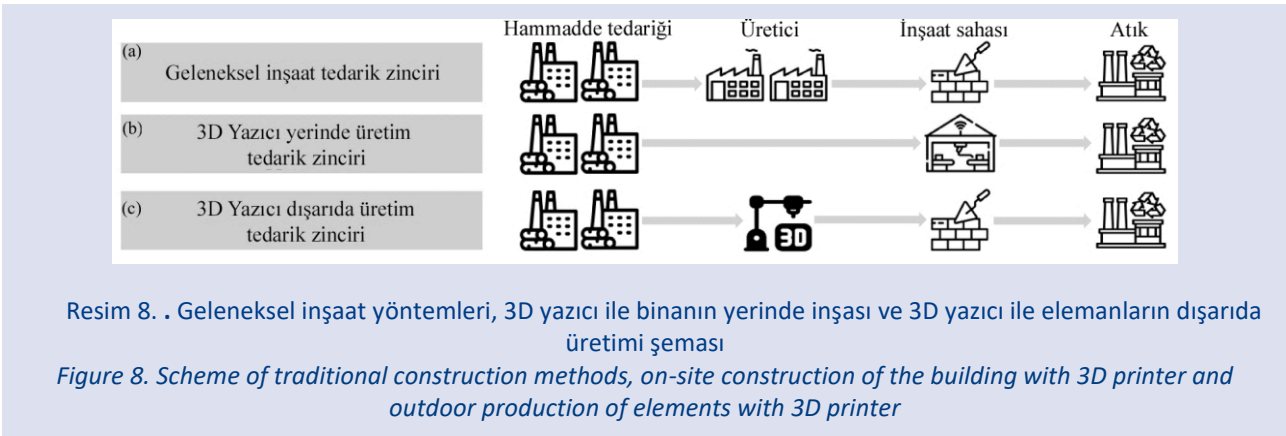
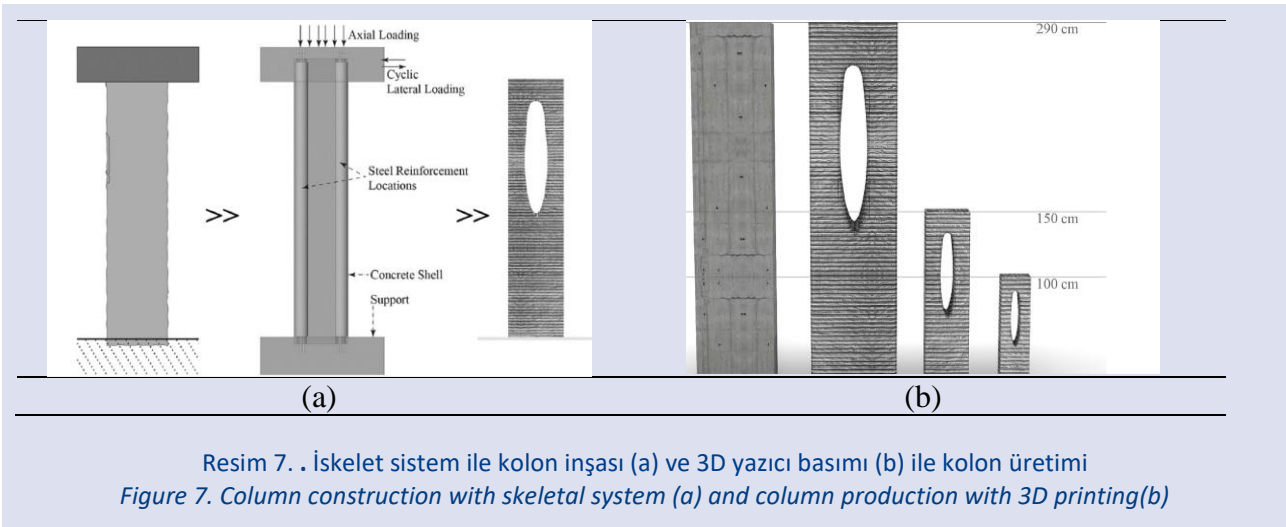
Binaların 3D yazıcı ile üretiminde uyumlu malzeme karışımlarının oluşturulması basım ve statik dayanım için en önemli parametrelerden biridir. Baskıda kullanılacak malzemelerin içerik özelliklerinin optimize edilmesi gerekir. Özellikle büyük ölçekli binalar için 3D basıma uygun malzeme içeriğinin hazırlanması karmaşık bir süreçtir (Ma ve Wang, 2018). 3D baskı için farklı özellikteki birçok malzeme ve bu malzemelerin bir araya getirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Nerella ve ark., 2016; Lim ve ark., 2012; Feng ve ark., 2015; Gosselin ve ark., 2016). Ancak 3D baskıda malzeme seçimi, tasarımı ve bileşenleri açısından evrensel bir standart bulunmamaktadır. Standartın bulunmaması harç içeriği belirlenmesinde ve döküm sonucu statik sorunların oluşmasına neden olmaktadır (Yuan ve ark., 2022). Binada kullanılan kolonların iskelet sistem ve 3D baskı ile üretiminin karşılaştırıldığı bir çalışma yapılmıştır (Şekil 7) (Alabbasi ve ark., 2023). Çalışmanın sonunda 3D basım teknolojisi ile daha az malzeme kullanılarak yapısal sağlamlığı daha güçlü olan kolonların üretilebileceğine ulaşılmıştır (Alabbasi ve ark., 2023). Ancak 3D basım teknolojisi ile daha fazla çalışmanın yapılması ve testlerin geliştirilmesi vurgusu yapılmıştır.

### Maliyet

Bina inşaatında bugün en yaygın kullanılan malzeme betondur. Beton maliyeti yüksek bir malzemedir. Bina inşaatında kullanılan malzeme miktarı konusunda yapılan çalışmalar geleneksel yöntem ve 3D baskıda kullanılan malzeme miktarlarını incelemiştir (Weng ve ark., 2020; Alabbasi ve ark., 2023). 3D yazıcı ile basılan duvarın maliyet açısından %78 daha avantajlı olduğuna ulaşılmıştır. Ayrıca bir konut maliyetinin %20 oranında düşülmesinin mümkün olabileceğine ulaşılmıştır (Ma ve Wang, 2018). İnşaat sektörüne 3D yazıcıların kullanımının girmesi ile inşa sahasına ekipmanın taşınması konusu gündeme gelmiştir. Lojistik 3D yazıcıların kullanımında en

zayıf noktalardan biri olarak gösterilmektedir. İnşaat sektöründe lojistik maliyetlerinin analizi için farklı bileşen kombinasyonları bulunmaktadır (Munir ve Karki, 2021; Said ve El-Rayes, 2011; Engblom ve ark., 2012). Çalışmalar çoğunlukla lojistik süreç simülasyonları (Vidalakis ve Tookey, 2006), lojistik maliyetini oluşturan parametreler (Amornsawadwatana, 2005) ve tedarik zincirinin lojistiği (El Moussaoui ve ark., 2021) konularını incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda inşaatta kullanılan malzeme maliyetinin %14,7'sinin lojistik maliyeti olduğuna ulaşılmıştır (Besklubova ve ark., 2023). Bu çalışmalarda bina inşasında kullanılacak malzemelerin inşaat alanına taşınması konusunda çalışılmıştır. Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmalarda yerinde baskı yapılan 3D yazıcıların boyutlarının küçülmesi ve inşası yapılan binanın da küçülmesinin nedeninin 3D yazıcıların

lojistiği olduğu belirtilmiştir (Chen, 2016; El-Sayegh ve ark., 2020). Diğer bir yandan geleneksel inşa tekniklerinde atık girdilerinin lojistiği dikkate alındığında 3D baskı teknolojilerinin bu konuda öne çıktığı görülmektedir. Yapılan bir çalışmada aynı uzaklıktaki hammadde ile bir binanın inşa süreci geleneksel inşaat yöntemleri, 3D yazıcı ile binanın yerinde inşası ve 3D yazıcı ile elemanların dışarıda üretimi maliyet açısından incelemesi yapılmıştır (Şekil 8) (Besklubova ve ark., 2023). Çalışma sonucunda tek katlı bina üretimi için 3D yazıcı ile yerinde üretimin daha avantajlı olduğuna ulaşılmıştır (Besklubova ve ark., 2023). Bu alanda yapılan çalışmalar 3D yazıcılarının lojistiğinin iyileşme potansiyelinin yüksek olduğunu ve geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Craveiroa ve ark., 2019; Despeisse ve ark., 2017; Kietzmann ve ark., 2015).



### Üretim Esnekliği

3D ile basılan binalarda geleneksel inşa tekniğine göre daha az nitelikli iş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Zhang ve ark., 2019). Bu durum insan kaynağına olan ihtiyacı azaltmasının yanı sıra iş kazalarının önüne de geçmektedir (Şekil 9). Böylelikle geleneksel inşaat tekniklerine göre daha güvenli bir üretim yöntemi olarak görülmektedir (Graser ve ark., 2023). Ancak 3D basımın uygulanmasında kullanılacak yazıcının nozul boyutları, ekstrüzyon basıncı,

basımın hızı gibi parametrelerin bir standardının olmaması her ne kadar geleneksel inşaat yöntemlerine göre iş gücü açısından kolaylık potansiyeli de olsa da daha fazla deneysel çalışmanın yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geleneksel inşa yönteminde kalıba ve iş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 9 (a)) (Liv d., 2022). Bu durum inşaatta üretimin zorlaşmasına, iş gücü ve kalıp ihtiyacı kaynaklı maliyet artışına neden olmaktadır. Kalıbın seçimi, tasarım, statik ve istenilen görsel tasarım

açısından önemlidir. Özellikle kompleks tasarıma sahip geometrilerde halihazırda kullanılan kalıp sistemlerinden sonuç alma süreci zor ve uzun olmaktadır. Mevcut kalıp sistemlerinin esnek tasarıma uyumluluğu azdır. Bu konuda yapılan bir çalışmada dijital fabrikasyon tekniklerinin kalıp imalatı konusunda oldukça yararlı olduğuna ulaşılmıştır. Özellikle kompleks geometrilerde zaman, iş gücü ve maliyet açısından dijital fabrikasyon teknikleri öne çıkmaktadır (Şekil 9 (b)) (Liv d., 2022). Örneğin Şekil 10'da kompleks tasarıma sahip bir çatı formu için ahşap kalıp oluşturulması ile çatı formu inşa edilmekte iken (Bösiger, 2011) dijital fabrikasyon tekniği ile geliştirilmiş polistiren sert köpük (eps) oyularak (Dombernowsky ve Sandergaard, 2012) kalıp oluşturması görülmektedir. Şekil

10 (a)' da beton kompleks çatı formunun betona aktarılabilmesi için oluşturulan ahşap kalıbı ve çatı üzerinde en az 3 kişinin çalıştığı görülmektedir. Şekil 10 (b)'de ise dijital fabrikasyon teknikleri ile eps'in oyularak üzerine beton dökümü için hazırlandığı ve insan gücü olmadığı görülmektedir (Dombernowsky ve Sandergaard, 2012). Oyulan köpük kalıba harç dökümü yapıp nihai form elde edilebilmektedir. Daha sonra inşa alanına taşınması ve montajı yapılmaktadır. Bu durum dijital fabrikasyon tekniğinin üretim esnekliği konusunda avantajını ortaya koymaktadır.



Resim 9. (a) Geleneksel betonarme sistem bina inşası ve (b) 3D Baskı ile bina üretimi  
Figure 9. (a) Traditional reinforced concrete system building construction and (b) building production with 3D Printing



Resim 10. (a) Kompleks çatı formu ahşap kalıp oluşturulması, (b) EPS köpüğün oyularak kalıp oluşturulması  
Figure 10. (a) Creating a complex roof form wooden mold, (b) Creating a mold by carving EPS foam

### Araştırma Bulguları

Bu çalışmada binaların inşasında yeni inşaat teknolojilerinin kullanımı incelenmiştir. Bu kapsamda geleneksel inşa teknikleri ve dijital fabrikasyon inşa tekniklerinin avantaj ve dezavantajları sürdürülebilirlik, statik, maliyet ve üretim esnekliği açısından ele alınmıştır (Tablo 1). Sürdürülebilirlik; CO<sub>2</sub> salınımı, ısı yalıtımı, katı atık ve yapı söküm olarak değerlendirilmiştir. Dijital fabrikasyon teknikleri

sürdürülebilir malzeme kullanımına olanak sağlaması ve yerinde üretim tekniği ile daha az atık çıkarmasından dolayı CO<sub>2</sub> salınımı açısından avantajlıdır. Geleneksel inşa tekniklerinde yaygın olarak betonarme sistem ile binaların inşa edilmesi ve ısı bölgelerine göre üzerine ısı yalıtım uygulanması yapılmaktadır. Dijital fabrikasyon tekniğinde ise harcın ısı yalıtım özelliği artırılarak ayrıca bir yalıtım uygulamasına gerek kalmadan uygulama yapılabilmektedir (Pessoa ve ark., 2021). Dijital fabrikasyon tekniklerinde bina yapımında kullanılan en

yaygın teknik olan 3D basım tekniği ile binaların yerinde üretimi yapılmaktadır. Bu yöntemde malzemenin tamamı kullanılmakta ve atık miktarı minimum olmaktadır. Ayrıca sürdürülebilir malzeme kullanımı yapı söküm yapıldığında geri dönüşüme olanak vermektedir. Ancak geleneksel inşaat yönteminde standartların gelişmiş olması, bu yöntem sürdürülebilirlik açısından dezavantajlı olsa bile uygulama kolaylığı ile öne çıkmaktadır.

Geleneksel inşaat teknikleri statik açıdan incelendiğinde dijital fabrikasyon tekniğine göre avantajlıdır. Betonarme iskelet sistem çok katlı binaların depreme dayanımı yüksek olarak inşa edilmesine imkan vermektedir. 3D basım tekniğinde ise yaygın olarak tek kat inşası gerçekleştirilmektedir. Ancak betonarme sistemde kalıp kullanımı gerekliliği malzeme ve iş gücü ihtiyacını artırmaktadır. Diğer bir yandan geleneksel inşaat yöntemi için statik açıdan da standartların geliştirilmiş olması uygulayıcı açısından tercih

sebebi olmaktadır. Geleneksel inşaat yöntemlerinin ekipman ihtiyacı fazladır. Ayrıca kalıp kullanımı maliyeti artırmaktadır. Diğer bir yandan nitelikli insan gücüne olan ihtiyaç geleneksel inşaat tekniklerinde maliyeti artırmaktadır. Ancak geleneksel inşaat yöntemleri uzun yıllardır kullanılıyor olmasından dolayı az gelişmiş ekipmanlar kullanılarak da bina inşası yapılabilmektedir. Dijital fabrikasyon teknikleri ise yüksek ar-ge kapsamındadır. Dijital fabrikasyonda ar-ge'nin tamamlanması ile işlerin maliyeti azalır uygulama kolaylığı artıyor olsa da ilk yatırım maliyeti yüksektir. Geleneksel inşaat tekniklerinde rasyonel formların dışında kalan formların üretimi çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Bu zorlukların başında esnek kalıp oluşturulmasının zor olması gelmektedir. Esnek kalıp oluşturulması tasarımcıların bina inşaat aşamasını planlamalarını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca dijital fabrikasyon teknikleri kalıba ihtiyaç duyulmadan da 3D basım ile binaların üretilmesi avantaj sağlamaktadır.

Tablo 1. Geleneksel ve dijital fabrikasyon tekniği ile bina inşaat yöntemlerinin karşılaştırılması

Table 1. Comparison of construction method with traditional and digital manufacturing techniques

		Geleneksel İnşaat Teknikleri	Dijital Fabrikasyon İnşaat Teknikleri
Sürdürülebilirlik	CO <sub>2</sub> Salınım	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yenilenemez malzeme,</li> <li>Daha fazla enerji tüketimi,</li> <li>Atık miktarının fazla olması.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sürdürülebilir malzeme kullanım imkanı,</li> <li>Daha az enerji tüketimi,</li> <li>Atık miktarının az olması.</li> </ul>
	Isı Yalıtımı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ek ısı yalıtım köpüğü uygulanması,</li> <li>Standart ürünlerin geliştirilmiş olması,</li> <li>Ürünler ulaşımın kolay olması.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Malzeme içinde ısı yalıtım karışımı ve boşluklu yapı ile ek yalıtıma ihtiyaç olmaması,</li> <li>Daha fazla deneysel çalışma ihtiyacı,</li> <li>Standart ürün olmaması.</li> </ul>
	Katı Atık	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atık miktarı fazla,</li> <li>Doğal çevreye daha fazla zarar vermesi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Malzemenin tamamı kullanılıyor daha az atık miktarı,</li> <li>Doğal çevreye zararı daha az olması.</li> </ul>
	Yapı Söküm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geri dönüşüm oranı az,</li> <li>Doğal çevreye zararı fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geri dönüştürülebilir malzeme kullanım imkanı fazla,</li> <li>Doğal çevreye zararı daha az olması.</li> </ul>
Statik	Dayanım	<ul style="list-style-type: none"> <li>Harç karışımı standardı var,</li> <li>Statik dayanımı fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Harç karışımı standardı yok,</li> <li>Statik dayanımı fazla,</li> <li>Daha fazla deneysel çalışma ihtiyacı.</li> </ul>
	Ekipman	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ekipmana ulaşmak kolay,</li> <li>Ekipman ihtiyacı fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ekipmana ulaşmak zor,</li> <li>Ekipman ihtiyacı az.</li> </ul>
	Kalıp	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalıp ihtiyacı fazla,</li> <li>Esnek tasarıma uygun kalıp yok,</li> <li>Nitelikli insan ihtiyacı fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalıp gerekli değil,</li> <li>Esnek tasarıma uygun kalıp yapılabilir,</li> <li>Nitelikli insan ihtiyacı az.</li> </ul>
	Kat sayısı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çok katlı bina inşasına uygun.</li> <li>Standartların gelişmiş olması.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En fazla 5 kata kadar bina inşa edilebilir,</li> <li>Daha fazla deneysel çalışma ihtiyacı,</li> </ul>
	Standart	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standart var.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standart yok.</li> </ul>
Maliyet	Ekipman	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çok fazla ekipman ihtiyacı.</li> <li>ArGe ihtiyacı az.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Az sayıda ekipman ihtiyacı,</li> <li>Yüksek ArGe ihtiyacı fazla.</li> </ul>
	Kalıp	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalıp maliyeti fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalıp gerekli değil.</li> </ul>
	Lojistik	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lojistik maliyeti fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lojistik maliyeti fazla.</li> </ul>
	İş gücü	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nitelikli insan gücü ihtiyacı fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nitelikli insan gücü ihtiyacı az.</li> </ul>
	Malzeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>Malzeme kullanımı fazla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Malzeme kullanımı az.</li> </ul>

## Sonuç

Dünya nüfusunun artışı barınma ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanmasında inşaat sektörü yetersiz kalmaktadır. Geleneksel inşaat yöntemleri ile bina inşasında binaların inşaat süreleri uzundur. Diğer bir yandan tüketilen toplam enerjinin yüksek oranda binalarda kullanılıyor olması ve enerji kaynağı olarak çoğunlukla

yenilenemez kaynakların kullanımı bu konudaki çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Binaların yeni inşaat teknikleri ile inşası sürdürülebilirlik, zaman ve maliyet açısından olumlu gelişmeler sunmaktadır. Bu çalışmada binaların daha hızlı inşa edilmesinde eklemeli imalat teknolojileri kullanımının geleneksel inşaat yöntemlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumların incelenmesi amaçlanmıştır. Binaların inşasında yeni inşaat tekniklerinin kullanımı incelenmiştir.



Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Geleneksel inşa yöntemleri son yüzyılda yaygın kullanımda olmasından dolayı bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar bu yöntemin uzun dönem kullanımından kaynaklı üzerine çalışılmış ve yöntemin geliştirilmiş olmasıdır.
- Dijital fabrikasyon teknikleri, binaların geleneksel inşaat yöntemlerine göre daha düşük maliyetli olması, daha az iş gücü ihtiyacı, iş kazalarını azaltması, sürdürülebilirliğe katkı sağlaması, kompleks formlardaki mimari tasarımların uygulanmasına olanak sağlaması açısından inşaat sektörü açısından umut vericidir.
- Dijital fabrikasyon teknikleri inşaat sektöründe ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.
- Dijital fabrikasyon teknikleri ile bina inşasında birçok potansiyele sahip olsa da henüz çözülmemiş sorunları bulunmaktadır. Basımda kullanılacak malzemelerin bir standardının olmaması tercih edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Kullanılacak malzemenin içeriği, dayanımı, erişilebilirliği gibi konuların tekniğin yaygınlaşması için daha fazla akademik ve endüstriyel ölçekte araştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak dijital fabrikasyon ile bina inşaat tekniklerinde malzeme, ekipman ve standartların geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmaların farklı disiplinlerin ortak çalışması ile gelişime ihtiyacı vardır. Yöntem gelişiminin olumlu yönde ilerlemesi ile kullanımının yaygınlaşması konut ihtiyacının azaltılmasında umut vadecidir. Çalışma yeni inşaat teknolojilerinin gelişimi ve kullanım potansiyelinin ortaya koyulması açısından yol gösterici olmuştur.

## Kaynaklar

- Alabbasi, M., Agkathidis, A., Chen, H. 2023. Robotic 3D printing of concrete building components for residential buildings in Saudi Arabia. *Automation in Construction*, 148: 104751, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104751>.
- Amornsawadwatana, S. 2005. Logistics costs evaluation in building construction Project. 5th Industrial-Academic Annual Conference on Supply Chain and Logistics Management, June 24, 2005, Bangkok, Thailand, Book of Proceedings, 77-82.
- ASTM International Committee F42. 2023. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. <https://www.astm.org/committee-f42> (Erişim Tarihi: 01.11.2023).
- Batikha, M., Jotangia, R., Baaj, M. Y., Mousleh, I. 2022. 3D concrete printing for sustainable and economical construction: a comparative study. *Automation in Construction*, 134: 104087, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104087>.
- Besklubova, S., Tan, B. Q., Zhong, R. Y., Spicak, N. 2023. Logistic cost analysis for 3D printing construction projects using a multi-stage network-based approach. *Automation in Construction*, 151: 104863, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104863>.
- Bösiger H. 2011. The building of Isler shells. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Madrid.
- Brischetto, S., Maggiore, P., Ferro, C. G. 2017. Special issue on additive manufacturing technologies and applications. *Technologies*, 5(3): 58, DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies5030058>.
- Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S. 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, DOI: 110-119, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., Pambaguian, L. 2014.

- Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing Technology. *Acta Astronautica*, 93: 430-450, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.
- Chen, Z. 2016. Research on the impact of 3D printing on the international supply chain. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016: 1-16, DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/4173873>.
- Ching, F.D.K. (2001). Çizimlerle bina yapım rehberi. Yapı Yayın. ISBN 9758599720.
- Chua, C.K., Leong, K. F. 2014. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (With Companion Media Pack) of Rapid Prototyping. World Scientific Publishing Co Inc. ISBN: 978-981-4571-40-1.
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., Bartolod, P. J. 2019. Additive manufacturing as an enabling Technology for digital construction: a perspective on construction 4.0. *Automation in Construction*, 103: 251-267, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>.
- Crump, S.S. 1992. Apparatus and method for creating three dimensional objects. U.S. Patent 5121329.
- Deckard, C.R. 1989. Method and apparatus for producing parts by selective sintering, US Patent 4863538A.
- De Schutter, G., 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>.
- Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S.J., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T., Mortara, L., Reed-Tsochas, F. 2017. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: a research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 115: 75-84, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>.
- Dirican, T., Akyol, A. A. 2019. Anadolu'da Kerpiç Duvar Yapımı Yöntemlerine Ait Bir Derleme Çalışması. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 23: 117-126, DOI: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sanatvetasarim/issue/46013/578632>.
- Dombrowsky, P., Søndergaard, A. 2012. Design, analysis and realisation of topology optimized concrete structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 53(4): 209-216, DOI: 10.1007/978-3-319-92294-2\_36.
- Dong, S., Yu Y. 2021. Numerical and experimental studies on capturing behaviors of the inflatable manipulator inspired by fluidic origami structures. *Engineering Structures*, 245: 112840, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112840>.
- El Moussaoui, S., Lafhaj, Z., Leite, F., Fl'echard, J., Lin'eatte, B. 2021. Construction logistics centres proposing kitting service: organization analysis and cost mapping. *Buildings*, 11(3): 105, DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11030105>.
- El-Sayegh, S., Romdhane, L., Manjikian, S. 2020. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2): 1-25, DOI: 10.1007/s43452-020-00038-w.
- Engblom, J., Solakivi, T., Töyli, J., Ojala, L. 2012. Multiple-method analysis of logistics costs. *International Journal of Production Economics*, 137(1): 29-35, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.007>.
- Feng, P., Meng, X., Chen, J. F., Ye, L. 2015. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction & Building Materials*, 93: 486-497, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>.
- Feucht, T., Waldschmitt, B., Lange, J., Erven, M. 2022. Additive manufacturing of a bridge in situ. *Steel Construction*, 15(2): 100-110, DOI: 10.1002/stco.202100045.
- Galjaard, S., Hofman, S., Ren, S. 2014. New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. In: *Advances in Architectural Geometry*. Block, P., Knippers, J., Mitra, N. J., Wang, W. (eds.), Springer, Berlin, 79-93.

- Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., Kaufmann, W. 2021. Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures*, 240: 112380, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112380>.
- Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M. 2018. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93: 1-11, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2010. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer, ISBN 978-1493921126.
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., Morel, P. 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete-a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100: 102-109, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- Graser, K., Walzer, A. N., Hunhevicz, J., Jähne, R., Seiler, F., Wüst, R., Hall, D. M. 2023. Qualitative technology evaluation of digital fabrication with concrete: Conceptual framework and scoreboard. *Automation in Construction*, 154: 104964, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104964>.
- Griffin, C., Daufenbach, J., McMillin, S. 1995. Solid freeform fabrication of functional ceramic components using a laminated object manufacturing technique. *International Solid Freeform Fabrication Symposium, 1995, Texas, USA, Book of Proceedings*, 17-25.
- Hoorweg, D., Bhada-Tata, P. 2012. *What a waste: A global review of solid waste management*. World Bank, ISBN **978-1464813290**.
- Hull, C.W., UVP, Inc. 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US Patent 4575330. 46.
- International Energy Agency (IEA) 2023. *Energy Technology Perspectives 2023*. [www.iea.org/reports/](http://www.iea.org/reports/) (Erişim Tarihi: 20.12.2023).
- Jayathilakage, R., Rajeev, P., Sanjayan, J. 2020. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*, 240: 117989, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117989>.
- Jaquin, P. 2012. History of earth building techniques. In: *Woodhead Publishing Series in Energy*, Hall, M.R., Lindsay, R., Krayenhoff, M. (eds.), Woodhead Publishing, Sawston, UK, 307-323, DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.307>.
- Jiang, R., Kleer, R., Piller, F.T. 2017. Predicting the future of additive manufacturing: a Delphi study on economic and Societal implications of 3d printing to 2030. *Technological Forecasting & Social Change*, 117: 84-97, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.006>.
- Jiang, J., Xu, X., Stringer, J. (2018). Support structures for additive manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4): 64, DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>.
- Joosten, S. 2015. *Printing a stainless steel bridge: an exploration of structural properties of stainless steel additive manufactures for civil engineering purposes*. MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Kazemian, A., Khoshnevis, B. 2021. Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3d printing. *Construction and Building Materials*, 303: 124520, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124520>.
- Khajavi, S.H., Tetik, M., Mohite, A., Peltokorpi, A., Li, M., Weng, Y., Holmstrom, J. 2021. Additive manufacturing in the construction industry: the comparative competitiveness of 3d concrete printing. *Applied Sciences*, 11 (9): 3865, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093865>.
- Khoshnevis, B., Dutton, R. 1998. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*, 13(2): 53-63, DOI: <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>.
- Khoshnevis, B. 2004. Automated construction by contour crafting - related robotics and information Technologies. *Automation in Construction*, 13 (1): 5-19, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.
- Kietzmann, J., Pitt, L., Berthon, P. 2015. Disruptions, decisions, and destinations: enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. *Business Horizons*, 58(2): 209-215, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005>.
- Kira, B. 2023. WinSun China builds world's first 3d printed villa and tallest 3d printed apartment building. *3d-expo.ru/en/article* (Erişim Tarihi: 02.06.2023).
- Kruger, J., Cho, S., Zeranka, S., Viljoen, C., Zijl, G. V. 2020. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse. *Composites Part B: Engineering*, 183: 107660, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107660>.
- Li, W., Lin, X., Bao, D. W., Xie, Y. M. 2022. A review of formwork systems for modern concrete construction, *Structures*, 38: 52-63, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., Thorpe, T. 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21: 262-268, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- Linner, T., Pan, W., Hu, R., Zhao, C., Iturralde, K., Taghavi, M., Trummer, J., Schlandt, M., Bock, T. 2020. A technology management system for the development of single-task construction robots. *Construction Innovation*, 20: 96-111, DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-06-2019-0053>.
- Ma, G., Wang, L. 2018. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12: 382-400, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11709-017-0430-x>.
- Marzouk, M., Azab, S. 2014. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system Dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 82: 41-49, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015>.
- Mohsen, A. 2020. *Design to manufacture of complex building envelopes*. Springer, ISBN 978-3-658-30203-0.
- Munir, Q., Karki, T. 2021. Cost analysis of various factors for geopolymer 3d printing of construction products in factories and on construction sites. *Recycling*, 6(3): 60, DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6030060>.
- Nerella, V. N., Krause M., Nather M. 2016. Studying printability of fresh concrete for formwork free concrete on-site 3D printing Technology (CONPrint3D). In: *3D Concrete Printing Technology*. Sanjayan, J. G., Nazari, A., Nematollahi, B. (eds.), Springer. Berlin, 13-24.
- Panda, B., Paul, S., Hui, L.J., Tay, Y.W.D., Tan, M.J. 2017. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*, 167: 281-288, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>.
- Park, K., Min, K., Lee, B., Roh, Y. 2021. Proposal for enhancing the compressive strength of alkali-activated materials-based binder jetting 3D printed outputs. *Construction and Building Materials*, 303: 124377, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124377>.
- Pegna, J. 1997. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5 (5): 427-437, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5).
- Pessoa, S., Guimaraes, A. S., Lucas, S. S., Simoes, N. 2021. 3D printing in the construction industry - a systematic review of the thermal performance in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141: 110794, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794>.
- Pica, V. 2017. *Traditional Earth Architecture in the Euro-Mediterranean Region. From Conservation to Knowledge for Sustainable Use*.

- Proceedings of 5th INTBAU International Annual Event, 2004, Milano, Italy, Book of Proceedings, 1241–1252.
- Robayo-Salazar, R., de Gutiérrez, R. M., Villaquirán-Cacedo, M. A., Arjona, S. D. 2023. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, 146: 104693, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>.
- Rosenfield, K. 2023. Skanska and Foster + Partners Collaborate on World's First 3D Concrete Printing Robot. [www.archdaily.com/572156](http://www.archdaily.com/572156) (Erişim Tarihi: 06.09.2023).
- Rudenko, A. 2023. 3d printed concrete castle is complete, 3d concrete house printer. [www.designboom.com/technology/](http://www.designboom.com/technology/) (Erişim Tarihi: 06.09.2023).
- Said, H., El-Rayes, K. 2011. Optimising material procurement and storage on construction sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(6): 421-431, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000307](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000307).
- Saruhan, V., Keskinates, M., Felekoğlu, B. 2022. A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications. *Construction and Building Materials*, 337: 127629, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127629>.
- Sümer Haydaraslan, K., Dikmen, N. 2023. Binalarda giydirmeye cephe açısının enerji tüketimine etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1): 315-326, DOI: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1089497>.
- Sümer Haydaraslan, K., Yaşar, Y. 2023. Evaluation of building design strategies according to the effects of climate change by simulation-based optimisation: a case study for housing in different climate regions. *International Journal of Global Warming*, 30(1): 33-59, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJGW.2023.130492>.
- Sümer Haydaraslan, K. 2023. Isparta'nın çağdaş yapılarında strüktür ve malzeme. In: Isparta'nın 1950 Sonrası Çağdaş Yapıları. Şimşek, S., Gökarslan, A.B., Çelik, Ş., Çetin, S. (eds), Isparta'nın 1950 Sonrası Çağdaş Yapıları, Akademisyen Yayınevi, Ankara, 561-570, ISBN 9786253992644.
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., Odoghue, L., Charitidis, C. 2018. Additive Manufacturing: Scientific and Technological Challenges, Market Uptake and Opportunities. *Materials Today*, 21(1): 22-37, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- United Nations (UN), 2023. 2030 agenda for sustainable development of the united nations general assembly. [www.un.org/sustainabledevelopment](http://www.un.org/sustainabledevelopment) (Erişim Tarihi: 12.10.2023).
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). 2022. World Population Prospects 2022: Summary of Results. <https://population.un.org/wpp/Publications/> (Erişim Tarihi: 03.06.2023).
- Vidalakis, C., Tookey, J. E. 2006. Conceptual functions of a simulation model for construction logistics. *Joint International Conference on Computing and Decision Making Civil and Building Engineering*, June 14, 2006, Montreal, France, Book of Proceedings, 906-915.
- Weng, Y., Li, M., Ruan, S., Wong, T.N., Tan, M.J., Ow Yeong, K.L., Qian, S. (2020). Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. *Journal of Cleaner Production*, 261: 121245, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>.
- Will, J., Melcher, R., Treul, C., Travitzky, N., Kneser, U., Polykandriotis, E., Horch, R., Greil, P. 2008. Porous ceramic bone scaffolds for vascularized bone tissue regeneration. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19: 2781-2790, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10856-007-3346-5>.
- Wolf, A., Rosendahl, P. L., Knaack, U. 2022. Additive manufacturing of clay and ceramic building components. *Automation in Construction*, 133: 103956, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103956>.
- World Bank 2018. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. [openknowledge.worldbank.org](http://openknowledge.worldbank.org) (Erişim Tarihi: 04.12.2023).
- Xia, M., Sanjayan, J., 2016. Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications. *Materials & Design*, 110: 382-390, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.136>.
- XtreeE 2023. 3D printed wall with integrated window frame. [vimeo.com/248368954](https://vimeo.com/248368954) (Erişim Tarihi: 15.04.2023).
- Ye, J., Kyvelou, P., Gilardi, F., Lu, H., Gilbert, M., Gardner, L. 2021. An end-to-end framework for the additive manufacture of optimized tubular structures. *IEEE Access*, 9: 165476-165489, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3132797.
- Yergün, U. 2002. Batılılaşma dönemi mimarisinde, yapım teknolojisindeki değişim ve gelişim. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Yuan, P. F., Zhan, Q., Wu, H., Beh, H. S., Zhang, L. 2022. Real-time toolpath planning and extrusion control (RTPEC) method for variable-width 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 46: 103716, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103716>.
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B. 2019. A review of the current progress and application of 3d printed concrete. *Composites Part A*, 125: 105533, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>.
- Zhu, Z., Dutta, A., Dai F. 2021. Exoskeletons for manual material handling – A review and implication for construction applications. *Automation in Construction*, 122: 103493, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103493>.



## Photovoltaic System Design And Analysis: The Case Of Sivas Technology Development Zone

Nazile Yılkırkan<sup>1,a,\*</sup>, Dilara İsaogulları<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas/Turkey

<sup>2</sup>Sivas Republic University Institute of Science Sivas Cumhuriyet University, Sivas /Türkiye

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 04/04/2024

Accepted: 10/06/2024

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

### ABSTRACT

Greenhouse gases caused by fossil fuel consumption lead to global warming, which adversely affects life on earth. In order to first slow down and then prevent global warming, it is aimed to reduce fossil fuel consumption worldwide. For this reason, the importance of energy production from renewable energy sources and the share of the energy produced in the total amount of energy is increasing day by day. In this context, studies and investments in the field of solar energy, which is one of the leading renewable energy sources, continue to increase in Turkey. In this study, the rooftop application of solar energy systems was simulated using PV\*SOL software program. In the simulation, a solar power plant (SPP) with a total power of 108,29 kWp was designed using 238 modules of 455 Wp. The SPP design was made for both south facade and north facade and the payback period of the designed systems was calculated as 2,9 years for the south facade and 3,1 years for the north facade.

**Keywords:** Photovoltaic, PV\*SOL, Rooftop SPP, Technology Development Zone

## Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Analizi: Sivas Teknoloji Geliştirme Bölgesi Örneği

### Araştırma Makalesi

#### Süreç

Geliş: 04/04/2024

Kabul: 10/06/2024

### ÖZ

Fosil yakıt tüketiminin sebep olduğu sera gazları küresel ısınmaya yol açmakta olup, bu durum dünya üzerindeki canlı yaşamını olumsuz etkilemektedir. Küresel ısınmanın öncelikle yavaşlatılabilmesi devamında ise önlenmesi amacıyla dünya genelinde fosil yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin önemi ve üretilen enerjinin toplam enerji miktarı içerisindeki payı her geçen gün artmaktadır. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi alanında Türkiye’de de çalışmalar ve yatırımlar artarak devam etmektedir. Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinden çatı tipi uygulamasının, PV\*SOL yazılım programı kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonda, 238 adet 455 Wp gücünde modül kullanılarak toplamda 108,29 kWp gücünde güneş enerjisi santrali (GES) tasarlanmıştır. GES tasarımı hem güney cephe hem de kuzey cephe için yapılmış olup tasarlanan sistemlerin geri ödeme süresi güney cephe için 2,9 yıl kuzey cephe için 3,1 yıl olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik, PV\*SOL, Çatı Tipi GES, Teknoloji Geliştirme Bölgesi

<sup>a</sup> nyilankirkan@cumhuriyet.edu.tr

<sup>b</sup> 0000-0002-8274-186X

<sup>a</sup> disaogullari@gmail.com

<sup>b</sup> 0000-0002-5048-1055

**How to Cite:** Yılkırkan N, İsaogulları D (2024) Photovoltaic System Design And Analysis: The Case Of Sivas Technology Development Zone, Journal of Science and Technology, 3(1): 14-20.



## Giriş

Dünya'da olduğu gibi Türkiye'de de yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önem artmakta, bireysel yatırımların yanında devlet teşvik ve destekleri ile bu temiz enerji kaynaklarından enerji üretimi yaygınlaşmaktadır. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi önemli bir paya sahiptir. Türkiye, coğrafik konumu nedeniyle güneş enerjisinden yararlanma potansiyeli yüksek bir ülkedir. Enerji ihtiyacını karşılama hususunda ithal kaynaklara bağımlı olan Türkiye'nin bu potansiyeli değerlendirmesi ekonomik açıdan önemlidir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ve termal enerji üretimi amacıyla yararlanılmakta olup özellikle elektrik enerjisi üretimine her geçen gün ilgi artmaktadır.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi projeleri maliyeti, geri ödeme süreleri ve üretilecek enerji miktarının önceden belirlenebilmesi amacıyla bazı paket programlar kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan programlardan biride PV\*SOL programıdır. Literatürde, PV\*SOL programı kullanılarak Türkiye'nin farklı bölgelerinde güneş enerjisi santralleri tasarlanmış, bu santrallerde üretilecek enerji miktarları, geri ödeme süreleri önlenen CO<sub>2</sub> emisyonu gibi hususların hesaplandığı çalışmalar mevcuttur.

Gündoğdu R. Bursa Gemlik bölgesinde alışveriş merkezi ile aynı araziyi kullanan bir binanın çatısına, enerji ihtiyacı olduğunda şebekeden ihtiyacı karşılayan, üretim fazlası olduğunda ise şebekeyi besleyen çatı tipi güneş enerjili elektrikli şarj istasyonu sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin simülasyonu PV\*SOL programında gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik (PV) modül enerjisi 219,6 kWh, yıllık özgül kazanç 1.132,95 kWh/kWp olarak, önlenen karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu ise 116.934 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre toplam tüketimin %67,9 kadarının güneş panellerinden sağlandığı görülmüştür (Gündoğdu R.2022).

Çatı tipi güneş santrali ile beslenen elektrikli şarj istasyonu tasarımı yapılan tez çalışmasında ise güneş sistemini tek eksenli takip eden motorlu ve motorsuz olmak üzere iki farklı sistemde inceleme yapılmıştır. Tezin tasarımında PVsyst, PV\*SOL, AutoCAD, ETAP, SAP2000, Probing ve Excel programları kullanılmıştır. Aylık üretimlerine göre sabit sistem 33.893,90 kWh/yıl, ayarlanabilir sistem 36.898,82 kWh/yıl, takip sistemi ise 40.710,61 kWh/yıl enerji üreteceği hesaplanmıştır (Boytekin T.2020).

Yapılan başka bir çalışmada, bir endüstriyel binada çatı üstü güneş enerjisi üretim sisteminin uygulanabilirliğini PV\*SOL yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Simülasyon çalışmasında 375 Wp gücünde 1.530 adet fotovoltaik panel seçilmiştir. Binanın çatısına 573,75 kWp güneş enerjisi sistemi kurulması planlanmıştır. Sistemin yıllık 874.183 kWh enerji üretmesi hesaplanmış olup yıllık elektrik maliyetinin %22,34 oranında azalmasının beklenildiği ifade edilmiştir. Amortisman süresi 3,4 yıl olacağı sonucuna varılmıştır (Sürücü B. ve ark 2022).

Bağrıaçık ve arkadaşları tarafından Muğla'da bir evin çatısına kurulması planlanan güneş enerjisi sisteminin simülasyonu PV\*SOL programında gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonda Monokristal, polikristal ve yarım kesilmiş monokristal hücreler kullanılmış ve bunların enerji üretimi karşılaştırılmıştır. Evin günlük enerji ihtiyacı 6,4 kWp olarak hesaplanmış olup bu panellerden Mono-c'nin üretimi; 10.639 kWh, Poly -c' üretimi;

10.607 kWh ve Half-cut'ın üretimi ise: 10.932 kWh olarak bulunmuştur. Bu PV'lerin enerji üretiminden oluşan önlenen CO<sub>2</sub> emisyonları ise sırasıyla CO<sub>2</sub>: 5.000 kg/yıl, CO<sub>2</sub>: 4.964 kg/yıl ve CO<sub>2</sub>: 5.138 kg/yıl olarak hesaplanmıştır (Bağrıaçık N. ve ark 2024).

Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin çatısına PV\*SOL programı kullanılarak güneş enerjisi santrali tasarlanan çalışmada, PV sisteminin yılda 138.054 kWh enerji üreteceği ve önlenen CO<sub>2</sub> emisyonunun yıllık 65.105 kg olacağı sonucuna varılmıştır. Bu sistemin geri ödeme süresi yaklaşık 7,1 yıl olarak bulunmuştur (Altinkök S. Ve ark 2022).

PV\*SOL programı kullanılan başka bir çalışmada ise şebeke bağlantısı olan ve olmayan güneş panelleri kullanılarak bir evin ortalama enerji tüketimi incelenmiştir. Aylık bazda ortalama 594 kW elektrik üretimi gerçekleştirileceği ve maliyetin 67.449,79 TL olacağı sonucuna varılmıştır (Çakmak E. ve ark.2023).

Bursa'da bulunan hayvan barınağının dört farklı yönde fotovoltaik paneller yerleştirilmesiyle elektrik enerji ihtiyacını karşılaması planlanan çalışmada PV\*SOL programı kullanılmıştır. PV panel kapasitesi 320 kWp güç olarak ele alınmış olup, enerji ihtiyacı tüm aylar için sabit 25.200 kWh olarak kabul edilmiştir. En yüksek üretim Kuzey-Güney yöneliminden elde edilmiş olup amortisman süresi 11 yıl olarak bulunmuştur (Delice H. ve ark. 2021).

Bu çalışmada ise Sivas Teknoloji Geliştirme Bölgesi Kurucusu ve İşletici A.Ş. (Cumhuriyet Teknokent) binasının çatısına yine PV\*SOL programı kullanılarak çatı tipi güneş enerjisi santrali tasarımı yapılmıştır. Simülasyonda 238 adet modül kullanılmış, 108,29 kWp gücünde bir GES elde edilmiştir. GES'in geri ödeme süresi güney ve kuzey cepheler için sırasıyla 2,9 ve 3,1 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmanın amacı, günlük ortalama ışınım süresi 7,2 saat olan Sivas ilinde yapılacak güneş enerjisi yatırımlarının projelendirmeden önce ne kadar mal olacağı, geri ödeme süresi ve elde edilecek elektrik enerjisi gücünün önceden hesaplanabileceğinin görülmesidir.

### Fotovoltaik Teknolojisi

Fotovoltaik etki, fotovoltaik bir hücre tarafından güneş ışınımının elektrığe dönüştürüldüğü temel bir fiziksel işlemidir. Güneş ışınımındaki fotonların, silikon gibi yarı iletken malzemelerin yüzeyine çarparak, atomlardan elektronları serbest bırakmaları ile ortaya çıkar. Güneşten gelen ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarına bağlı olarak, farklı miktarda enerji içerirler. Fotonlar, fotovoltaik bir hücre üzerine geldiğinde; bir kısmı hücre tarafından soğrulur, bir kısmı yansıtılır, kalan kısmı da hücre içerisinden geçer. Fotovoltaik hücre tarafından soğrulan fotonlar elektrik üretir. Fotonun enerjisi, yarı iletken bir malzemenin atomundaki elektrona transfer edilir (Öztürk vd. (2013:59)).

Elektron, yeni kazandığı bu enerji sayesinde, bir elektrik devresindeki akımın bir parçası olabilmek için yarı iletken malzemedeki bir tek atomun normal durumundan kurtulma yeteneği kazanır. Bir elektrik alanındaki PV hücrenin belirli elektriksiz özellikleri, dış bir yükten gelen akımı karşılamak için gerekli gerilimi sağlar.

Fotovoltaik paneller yapısında bulunan fotovoltaik hücreler yardımıyla güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan panellerdir. Normal şartlarda fotovoltaik hücreler düşük gerilim ve akımda elektrik enerjisi üretirler. Ürettikleri

elektrik enerjisini kullanılabilir hale getirebilmek için, fotovoltaik hücreler birbirleri arasında paralel ve seri bağlantılar yapılarak modüller, modüllerden PV panelleri, PV paneller ise yapılan seri, paralel bağlantılar sonucu dizileri oluştururlar (EO, 2024). Şekil 1'de PV hücre yapısı görülmektedir.

### Güneş enerjisi sistemleri

Güneş panellerinin endüstriyel ve evsel uygulamaları, şebekeye paralel (on-grid), ve şebekeden bağımsız (off-grid) olmak üzere iki ana başlık altında toplanır. Şebekeye paralel sistemler (şebekeye bağlı) depolama gerektirmeyen sistemler olup maksimum güç elde etmek için tasarlanırlar.

Şebekeden bağımsız sistemler ise şebekenin olmadığı veya şebekenin getirilmesi için alt yapı masraflarının olacağı yerler için kullanılmaktadır. Ayrık sistemlerin tasarımı belirli bir güce göre yapılmaktadır ve depolama gerektirir (Ceylan vd. (2018:91-97)).

Şebekeye bağımlı sistemler ise dünyada en popüler fotovoltaik elektrik üretimi uygulamasıdır. Binaların çatılarındaki ve cephelerindeki PV panellerden elde edilen güç elektrik şebekesine aktarılır. Bu uygulamada fotovoltaik elektrik üretim sistemi adeta bir mini elektrik santrali gibi çalışır. Fotovoltaik panellerden üretilen elektrik ayrı bir sayaç üzerinden ayrı bir tarife ile şebekeye satılır. Şebeke bağlantılı sistemlerin konut gibi olanları, çift saat ya da yönlü sayaç ile şebekeye bağlanılır. Çatılarda PV panellerin yerleştirilmesinde gerekli alan hesabının yapılması gerekir (Yiğit vd. (2018:192)).

### Materyal -Metot

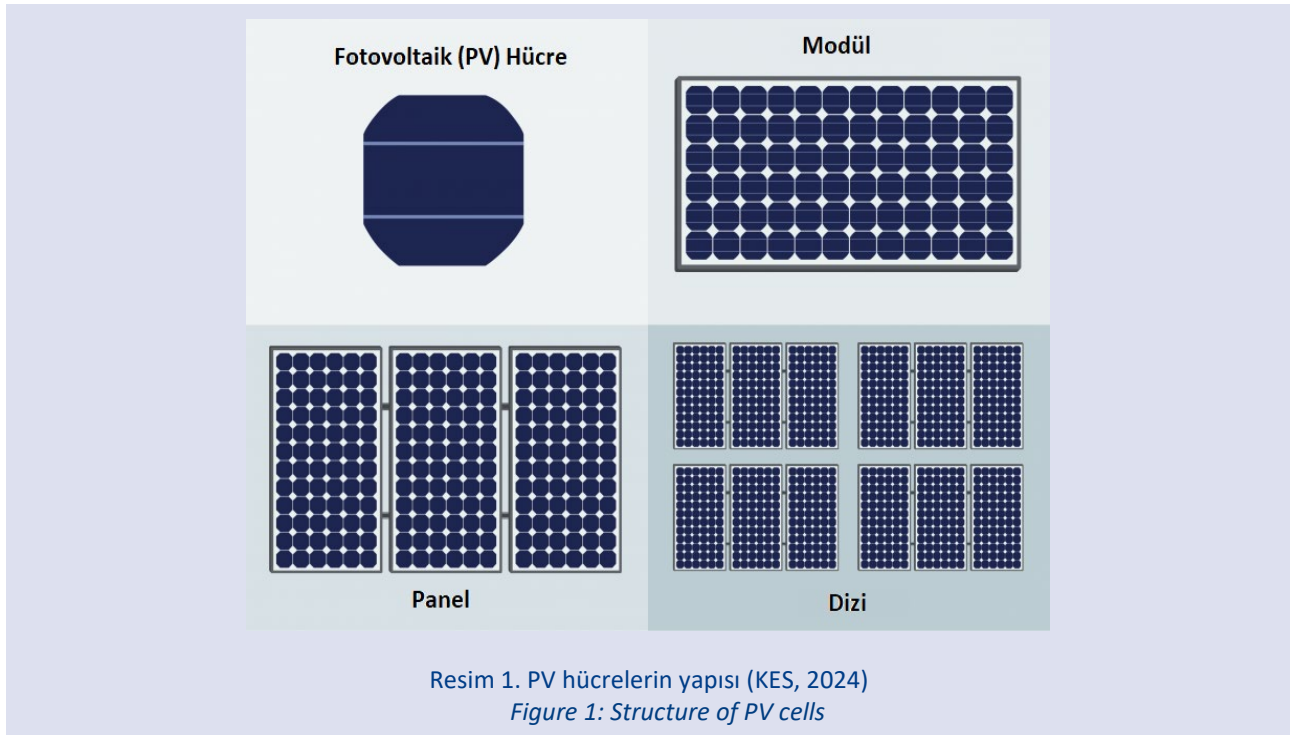
Bu çalışma kapsamında Sivas ilinde faaliyet gösteren Cumhuriyet Teknokent binasının çatısına PV\*SOL programı kullanılarak çatı tipi GES tasarımı yapılmış, mevcut fiziksel tasarım verileri ile kıyaslanarak yapılacak yeni tasarımların verimliliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında programda Sivas ili coğrafik ve güneş ışınım verileri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Sivas ili Türkiye'nin güneşlenme süresi ve ışınım miktarı açısından değerlendirildiğinde kaydadeğer miktarda güneş enerjisi potansiyeli olan bir şehirdir. Sivas ilinin aylara göre küresel ışınım değerleri Şekil 2'de, aylara göre güneşlenme süreleri ise Şekil 3'te görülmektedir.

Güneş enerjisi sistemleri tasarımlarında yazılım programları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan biriside PV\*SOL programıdır. PV\*SOL Fotovoltaik sistemler için tasarım ve simülasyon yazılımıdır. Fotovoltaik sistemlerin cihazlar, batarya sistemleri ve elektrikli araçlarla birlikte tasarımı ve optimizasyonu için dinamik bir simülasyon programıdır. Programa, sistemde kullanılan PV modül alanı, kapasitesi, jeneratör bilgileri, sistemin kurulacağı bölgenin konum bilgisi gibi veriler girilerek sistemin gücü, sistemin kullanım oranı ve önlenecek CO<sub>2</sub> emisyonu miktarı gibi veriler elde edilmektedir.

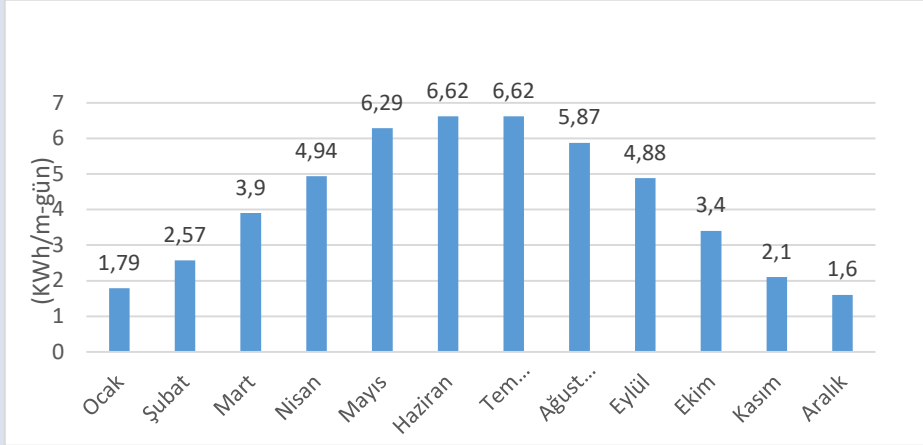
Çalışma kapsamında öncelikle güneş paneli tasarımı yapılacak olan Cumhuriyet Teknokent'in lokasyonunun Google hybrid uydu görüntüsü belirlenmiştir. Şekil 4'te verilen söz konusu görüntü PV\*SOL programına yüklenmiştir. Cumhuriyet Teknokent'in çatısının güney cephesinde bir güneş enerjisi kurulumu mevcuttur. Bu çalışmada, hem güney cepheye hem de kuzey cepheye olmak üzere iki ayrı güneş enerjisi sistemi tasarımı yapılmış ve mevcut sistemle kıyaslanması amaçlanmıştır. PV\*SOL programında panel yerleşimi hem güney cepheye hem de kuzey cepheye olacak şekilde uygulanmıştır. Güney cephe için yapılan tasarım Şekilde 5'te verilmiştir.

Güneş ışınımı miktarının yanı sıra, üretilecek elektrik enerjisinin hesaplanmasında en önemli faktör fotovoltaik modülün karakteristiğidir. Simülasyonda kullanılan fotovoltaik modül, yazılımın veri tabanında yer alan bir modeldir. Güneş paneli olarak CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti markasının CWT455-144PM-V modülü kullanılmıştır. Şekil 5'te seçilen güney cepheye 238 modülün yerleşimi gösterilmektedir. Kullanılan PV modülün teknik bilgileri Çizelge 1'de mekanik özellikleri de Çizelge 2'de verilmiştir.

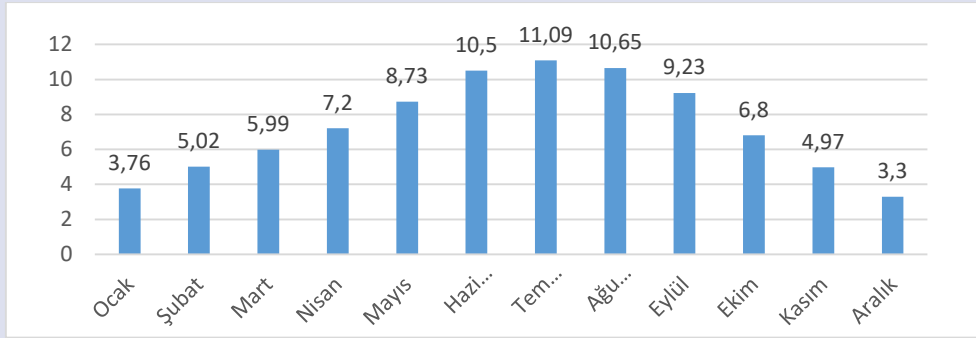


Resim 1. PV hücrelerin yapısı (KES, 2024)

Figure 1: Structure of PV cells



Resim 1. Sivas ilinin aylara göre küresel ışınlımı (EİGM, 2024)  
Figure 1: Global radiation of Sivas province by months

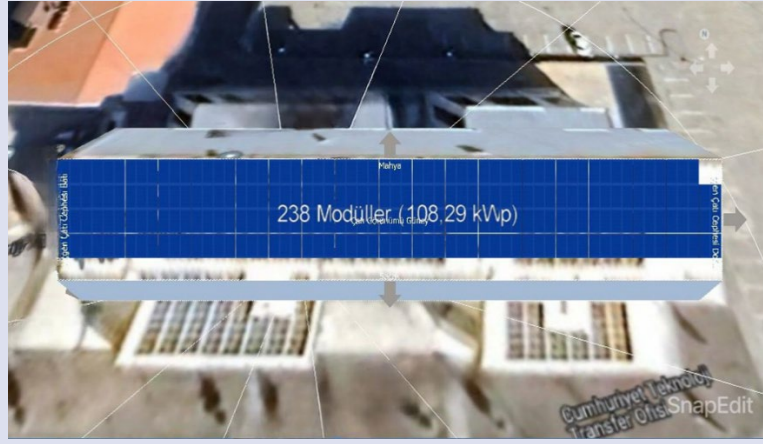


Resim 2. Sivas ilinin aylara göre güneşlenme süreleri (EİGM, 2024)  
Figure 3: Sunshine hours of Sivas province by months



Resim 4. Seçilen lokasyonun Google hybrid uydu görüntüsü  
Figure 4: Google hybrid satellite image of the selected location





Resim 5. Güney cephe modül yerleşimi  
Figure 5: South facade module layout

Çizelge 1: CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti, model CWT455-144PM-V teknik bilgileri  
Table 1: CW Ener En. Trade and San. Ltd. Şti, CWT455-144PM-V technical information

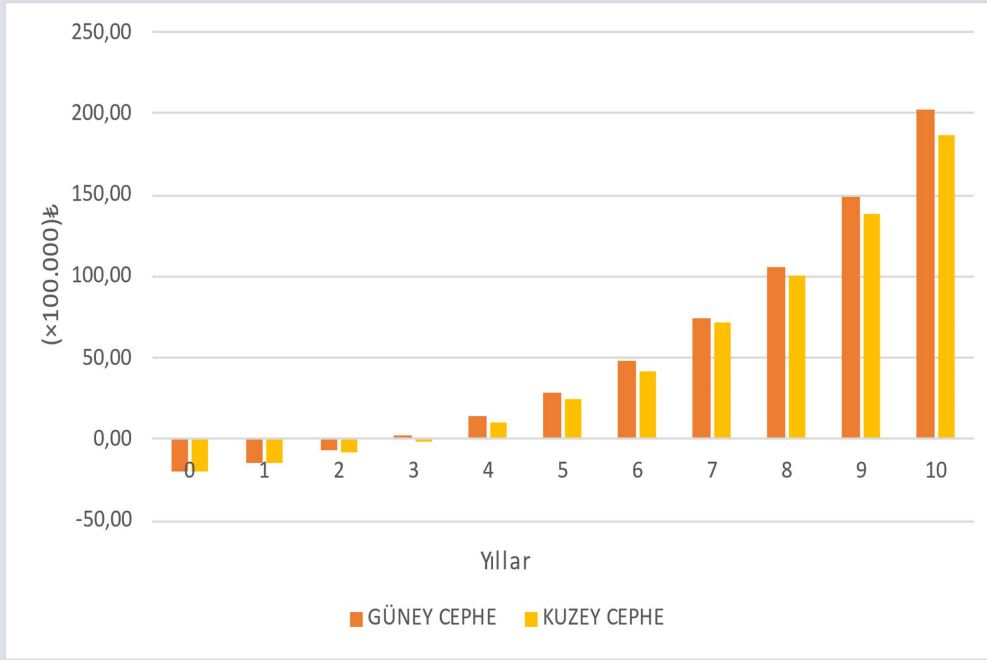
PV Modül Teknik Bilgiler	Değerler
Maksimum Güç (Pmax)(Wp)	455
Modül Verimliliği (%)	20,90
Maksimum Güç Gerilimi (Vmp)	41,60
Güç Akımı (Imp)	10,94
Açık Devre Gerilimi (V)	49,4
Kısa Devre Akımı (A)	11,67
Güç Toleransı (W)	0+5
Maks. Sistem Anma Gerilimi (V DC)	1000/1500
Çalışma Sıcaklık Aralığı (°C)	-40 +85
Güvenlik Sınıfı Maks	C
Maks. Seri Sigorta Akımı (A)	15/20

Çizelge 2: PV Panel CWT455-144PM-V Mekanik özellikleri  
Table 2: PV Panel CWT455-144PM-V Mechanical properties

Mekanik özellikleri	Değerler
Hücre Boyutu (mm)	166x83
Hücre Sayısı (adet)	144 (24x6)
Ağırlık (kg)	24,5
Panel Boyutu (mm)	2095x1039x40
Maks. Rüzgâr/Kar Yüğü Dayanımı (Pa)	2400/5400
Bağlantı Kutusu Koruma Sınıfı	IP68
Bağlantı Kutusu Kablo Boyu (mm)	350-1200

Çizelge 3: Mevcut kurulum ve simülasyon verilerinin karşılaştırılması  
Table 3: Comparison of existing installation and simulation data

Karşılaştırılan Değerler	Teknokent GES	Güney GES	Kuzey GES
PV jeneratör çıkışı (kWp)	108,01	108,29	108,29
Eğim	33°	33°	33°
Yerleşim Yönü	Güney	Güney	Kuzey
Kullanılan PV modül sayısı (adet)	238	238	238
Yıllık Özgül Kazanç (kWh/kWp)	126.020	126.000	113.400
Sistem kullanım oranı (%)	90,9	90,3	89,4
Önlenen CO <sub>2</sub> emisyonu (kg/yıl)	85.750	85.750	85.750
Amortisman süresi (yıl)	4,6	2,9	3,1



Resim 5. Güney ve Kuzey Cephelerin Amortisman Süreleri  
Figure 6: Depreciation Periods of South and North Facades

Bu sistemlerde panelden sonra en önemli bileşen invertördür. İntertörlerin daha verimli çalışabilmesi için kurulacak olan fotovoltaik sistemin gücüne yakın güçte bir invertör seçilmesi gerekmektedir. Kurulması tasarlanan sistem için Huawei Technologies SUN2000-60KTL-M0 model 480Vac invertör tercih edilmiştir.

### Bulgular ve Tartışma

PV\*SOL programı kullanılarak Cumhuriyet Teknokent binasının çatısında fotovoltaik sistemin simülasyonu için gerekli ekipmanlar belirlenerek fotovoltaik modül, invertör gibi sisteme uyumlu proje tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımda kullanılan bazı veriler ve elde edilen sonuçlarla yapılan hesaplamaların bulguları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3'te, PV sisteminin yıllık özgül kazancı güney cephe için 126.000 kWh/kWp, kuzey cephe için 113.400 ve sistemin kurulması ile önlenebilecek CO<sub>2</sub> emisyonunun 85.750 kg/yıl olacağı görülmektedir. Tasarlanan sistemin finansal analizi yapıldığında geri ödeme süreleri güney cephe için 2,9 yıl kuzey cephe için ise 3,1 yıl olarak hesaplanmıştır. Söz konusu çizelge incelendiğinde mevcut sistemin geri ödeme süresinin 4,6 yıl olduğu görülmekte olup, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumunun ve kullanımının son yıllarda çok hızlı yaygınlaşması ile birlikte sistem bileşenlerinin(özellikle PV'lerin) maliyetlerindeki düşüşün geri ödeme sürelerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Şekil 6'da güney ve kuzey cepheler için tasarlanan sistemlerin geri ödeme süreleri verilmiştir. Sistemlerin yaklaşık 3 yıl gibi bir sürede kendisini amorti ettiği görülmektedir.

### Sonuç

Bu çalışmada, Sivas Teknoloji Geliştirme Bölgesinde yer alan Cumhuriyet Teknokent binasının çatısına PV\*SOL programı yardımıyla güneş enerjisi santrali tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, uygun çatı alanı, panel ve invertör türü belirlenerek simülasyon yapılmış olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Güneş enerjisi santralının 108,29 kWp gücünde olması ve güney cephe için 126.000 kWh/kWp, kuzey cephe için ise yıllık 113.400 kWh/kWp enerji üretmesi beklenmektedir.
2. Tasarlanan sistemle yaklaşık olarak yıllık 85.750 kg CO<sub>2</sub> emisyonunun önlenebileceği görülmektedir.
3. Sistemin kendini güney ve kuzey cepheler için sırasıyla 2,9 ve 3,1 yılda geri ödeyeceği hesaplanmıştır. Güneş enerjisi sistemleri ekonomik açıdan maliyetli olmalarına rağmen, uzun ömürlü olmaları nedeniyle ilk yatırım maliyetlerini ilk birkaç yılda karşılayabildikleri görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma oranına büyük katkı sağlayan güneş enerjisi sistemlerinin kullanımının yaygınlaşması açısından yapılan yatırımların ekonomik ve çevre dostu olmasının önemi büyüktür. Bu çalışmada tasarlanan, çatı tipi güneş enerjisi santralının üreteceği enerji miktarı, önleyeceği CO<sub>2</sub> emisyonu ve geri ödeme süresi incelendiğinde, tasarlanan sistemin ekonomik ve çevre dostu olduğu görülmektedir.

PV\*SOL programı bir binanın enerji ihtiyacının, önlenebilecek CO<sub>2</sub> emisyonu miktarının ve geri ödeme süresinin belirlenmesi için kullanılacak bir program olduğu görülmüş olup bundan sonraki çalışmalarda binaların enerji ihtiyaçlarının belirlenmesinde PV\*SOL programı ile birlikte başka güneş enerjisi yazılım programları da kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.

## Kaynakça

Altınkök S. ve ark 2022. Photovoltaic System Design And Analysis At Faculty Scale Journal of Naval Sciences and Engineering 2022, Vol. 18, No. 1, pp. 91-120.

Bağrıaçık N. ve ark 2024. Design and Simulation of a Solar Powered House in Muğla: Roof Decorated with Half Cut Cells OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(2): 485-499.

Boytekin T. 2020. Çatı tip güneş enerjisi santrali ile beslenen elektrikli araç şarj istasyonu, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Ceylan İ., Gürel E. 2018. Güneş Enerjisi Sistemleri ve Tasarımı. Bursa: Dora Yayınları. ISBN:978-975-2447-80-6.

Çakmak E. ve ark. 2023. Meeting Electric Scooter and Home Energy Demand with Renewable Energy Source Journal of Studies in Advanced Technologies, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, Jun 2023, doi: 10.5281/zenodo.8074770 e-ISSN: 2980-2695.

Delice H. ve ark. 2021. The Effect of Building Orientation on Utilization of Solar Energy in Dairy Cattle Barns Journal of Tekirdag Agricultural Faculty 2021, 18(3) DOI: 10.33462/jotaf.799558.

EİGM, 2024. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) şu adresten erişebilirsiniz: <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-yenilenebilir-enerji> [Erişim Tarihi 29 Mart 2024]

EO, 2024. Elektrik Otomasyon Şu adresten erişilebilir: <https://www.elektricotomasyon.com.tr/blogdetay/pv-fotovoltaik-panellerin-yapisi> [Erişim Tarihi 14 Mart 2024]

Gündoğdu R. 2022. Elektrikli Araçlar İçin Güneş Enerjisi Kullanan Hızlı Şarj İstasyonu Tasarımı Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.

KES, 2024. Kut Enerji Sistemleri, Güneş Enerji Sistemleri şu adresten erişebilirsiniz: <https://www.kutenerjisistem.com/projelerimiz/ges/> [Erişim Tarihi 8 Mart 2020]

Öztürk H.H., Kaya D. 2013. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji Kocaeli: Umuttepe Yayınları .ISBN:978-605-5100-00-1

Sürücü B. ve ark 2022. Software-based solar energy potential assessment for an industrial facility: a case study from Aegean Region of Turkey Int J Energy Studies 2022; 7(2): 99-111 DOI: 10.58559/ijes.1160477 e-ISSN: 2717-7513 (ONLINE).

Yiğit A., Atmaca İ. 2018. Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları. Bursa: Dora Yayınları. ISBN:978-605-247-038-1



## Design And Evaluation Of Piezoelectric-Based Passive Damping For High Frequency Noise Suppression

Mert Uygun<sup>1,a</sup>, Akif Yavuz<sup>2,b,\*</sup>, Osman Taha Sen<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 23/05/2024

Accepted: 06/06/2024

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

### ABSTRACT

This study focuses on developing a piezoelectric-based passive damper to mitigate high-frequency brake noise. The research investigates different designs of piezoelectric transducer elements to convert mechanical energy into electrical energy using a mass sliding belt test system that simulates real disc brake noise mechanisms. Integration of these electrical elements into the existing mass-sliding belt system is investigated. Five distinct piezoelectric transducer designs (Design-1, Design-2, Design-3, Design-4 and Design-5), each with unique technical specifications, boundary conditions, and scaling, are developed to suppress high frequency noise from friction-induced vibrations. To facilitate effective selection, a scoring method is employed, identifying Design-5 with a cylindrical model as the most efficient transducer design. Evaluation criteria include energy generation, compressive strength, operating temperature, weight, ergonomic usability, cost, and safety. In the scoring process, the designs respectively received 65, 56, 27, 44, and 89 points. Analyses are performed to assess potential stress-induced damage to the piezoelectric material resulting from the selected design. This study aims to contribute a novel perspective to noise reduction techniques and successfully demonstrates the integration of a piezoelectric transducer and an RLC circuit into a functional system.

**Keywords:** Piezoelectric-based passive damper, high-frequency noise suppression, transducer design, piezoelectric damping

<sup>a</sup> uygunme16@itu.edu.tr

<sup>ID</sup> 0000-0002-7420-3877

<sup>b</sup> yavuz15@itu.edu.tr

<sup>ID</sup> 0000-0002-9447-7306

<sup>c</sup> senos@itu.edu.tr

<sup>ID</sup> 0000-0002-8604-3962

**How to Cite:** Uygun M, Yavuz A, Sen OT (2024) Design And Evaluation Of Piezoelectric-Based Passive Damping For High Frequency Noise Suppression, Journal of Science and Technology, 3(1): 21-29.

## Introduction

Research in the area of energy damping of piezoelectric transducers has been ongoing for more than the last four decades. The ability of piezoelectric materials to convert mechanical energy into electrical energy has been particularly studied in the conversion of energy from mechanical vibrations into electrical energy. It is important to analyze how the electrical energy obtained in this conversion process can be effectively distributed to an RLC circuit [1]. Detailed studies in the literature revealed the existence of the energy damping potential of piezoelectric transducers. Forward's inductor experiments in 1979 and Hagood and Von Flotow's contributions to analytical formulas for resistive and inductor (RL) circuits in 1991 was notable [2]. As research progressed,

the concept of damping was differentiated and Hollkamp's work on the RLC circuit in 1994 and Wu's work on the use of resonant circuits (LC) in 1998 also attracted attention [3, 4]. Studies on energy dissipation of piezoelectric transducers through RLC circuits revealed practical applications of the piezoelectric material's capacity to convert its mechanical energy into electrical energy. Moreover, the structural behavior of R and RL shunts has also been studied in detail in the literature [5-7]. Studies on vibration damping methods have demonstrated the effectiveness of using piezoelectric passive vibration damping. It has been observed that piezoelectric transducers can be integrated into electrical RL circuits to provide passive vibration damping [3]. Various studies have been conducted, ranging from conceptual designs to applied tests. Structural tests were conducted using

RC and LRC circuits in a piezoelectric damper weighing 0.5 kg in a structure weighing 5000 kg to absorb vibration in the test system of the ASTREX space structure, aiming at improving vibration in designs through piezoelectric passive energy damping [2]. The use of R and RLC circuits in this study demonstrates the potential applicability of a similar approach within the scope of design projects. Focused on mitigating excessive vibrations in turbomachinery blades, this study examined passive vibration damping methods implemented using piezoelectric transducers, particularly investigating the feasibility of resonance damping control through the use of piezoelectric materials in plate geometries, employing both passive and active control techniques. The results obtained indicate that, with passive damping circuits, bending resonance vibration at the third highest energy point could be reduced by 50%, and with the most suitable inductive circuits, this vibration could be reduced by 90% [8]. Neubauer and Oleskiewicz pioneered the development of a controller utilizing piezoceramic networks, wherein piezoactuators are autonomously controlled and operate concurrently employing a straightforward proportional and derivative feedback signal [9,10]. Park et al. introduced an active noise control system incorporating piezoelectric patches, deploying said system within the practical context of a vehicle's braking mechanism. Notably, this endeavor encompassed simultaneous management of active actuators and damping through a passive resonance shunt methodology [11]. Furthermore, Jearsiripongkul and Hagedorn advanced distinct methodologies for the active modulation of brake noise

[12,13]. Literature review indicates that the application of a piezoelectric-based passive damping element to a mass-spring test system for suppressing high-frequency noise can play an effective role in passive damping applications of piezoelectric transducers. Therefore, this study demonstrates the effective utilization of designs through passive damping with piezoelectric transducers.

This study focuses on the design of a piezoelectric-based passive damper for the suppression of high frequency brake noise. Piezoelectric-based passive damping design studies are carried out on a mass-sliding belt test system that can mimic the high-frequency noise generation mechanism of the real disc-brake test system. Various designs of piezoelectric transducer elements which are used to convert mechanical energy into electrical energy and their integration into the current mass-scale tape system are performed. In this study, 5 different piezoelectric transducer designs with different technical specifications, boundary conditions and scaled are developed. These designs aim to provide damping by transmitting friction-induced vibrations to the transducers. In order to make an effective selection between the designs, a scoring method is applied and the most effective transducer design is identified. These 5 designs are evaluated in terms of energy generation, compressive strength, operating temperature, weight, ergonomic use, cost and safety criteria. This study aims to add a new aspect to the research on noise reduction techniques and demonstrates the successful implementation of a system combining a piezoelectric transducer and an RLC circuit.

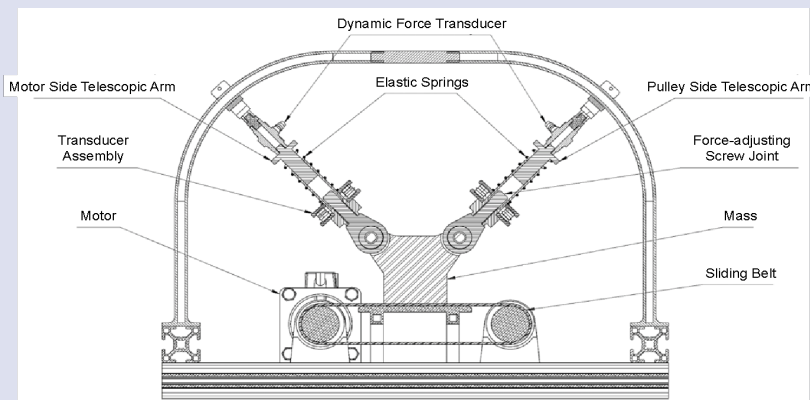


Figure 1. Mass-sliding belt test setup.

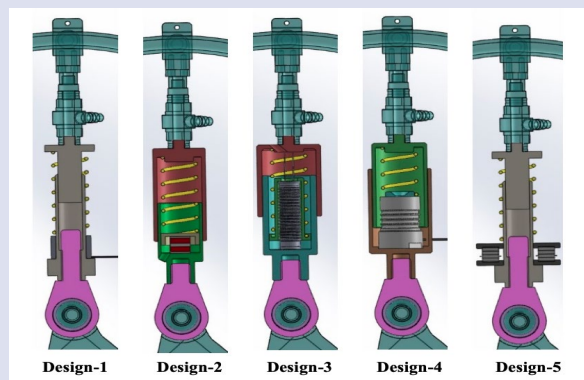


Figure 2. Transducer designs.



## Design Options and Selection Criteria

The study focuses on resolving resonance problems caused by mechanical vibration on a specific design. The design, representing a real disc-brake test system, involves a sliding belt in contact with an angularly positioned telescopic cylinder between a mass and a spring creating pressure on top. This test system investigated the noise generated by the mass representing the pad on the sliding band representing the disc at various forces and speeds [14]. The mass-sliding belt test system is demonstrated in Figure 1. The preferred piezoelectric method for vibration damping in the study examined three fundamental methods for damping mechanical vibrations using transducers. These methods can be listed as active vibration damping, piezoelectric energy harvesting, and passive vibration damping. Active vibration damping involves applying counter vibrations with piezoelectric transducers to prevent the system from resonating. However, prior knowledge of the system's natural frequency is required for this process. The control system intervenes when the natural frequency of the system approaches a certain level and prevents resonance formation. This active vibration damping method involves electrical, electronic, and automation system circuits. The cost of hardware and software design is higher compared to others.

Vibrations generated in piezoelectric energy harvesting are converted into electricity and stored through piezoelectric transducers. Energy losses in this system negatively affect the energy storage efficiency of the system. Electrical and electronic auxiliary products are used to convert the high voltage and low current generated in the transducers from alternating current to direct current for storage. In passive vibration damping, the resistance to vibration generated through transducers allows vibration to be converted into heat and dissipated into the environment using inductor and capacitor circuits. This method aims to convert mechanical energy into thermal energy while minimizing automation and storage needs. In the comparison, mechanical energy is converted to thermal energy using RLC circuits as the fastest and most economical solution.

When these three methods are considered, passive vibration damping emerges as a more optimal solution, as active vibration damping and piezoelectric energy harvesting methods require more control systems and integrations. With passive vibration damping, vibration is converted into heat using transducers without the need for complex control algorithms and energy management systems. With this feature, it has the advantage of dealing

with less complexity and lower costs in the design process. Parameters such as dimensions, voltage, capacitance, resonant frequency, compression force and temperature are critical in selecting the preferred transducers for the chosen passive vibration damping method for design implementation.

Industry brands such as Kemet, Noliac, PI, Piezosystem Jena and Thorlabs are identified for transducer brand selection. To better observe the differences between each brand's products and make appropriate choices, a material library has been created using technical information obtained from shared datasheets. The listing includes 1250 transducers with different specifications.

Geometric shapes play a significant role in transducer selection. Transducers can have various geometries such as stacked single-piece, rectangular prism, cube, cylinder, and hollow cylinder. In the design, transducers can be positioned both inside and outside the telescopic cylinder. The selected transducer designs (Figure 2) are respectively modeled as Design-1, Design-2, Design-3, Design-4, and Design-5.

In the modeling of **Design-1** in Figure 3, Kemet AER20x15.4x13.5DF model ring-stack transducer is utilized. The transducer is chosen for external mounting according to its geometric structure. The outer diameter, inner diameter, and height dimensions of the transducer are 20 mm, 15.4 mm, and 13.5 mm, respectively. The operation is carried out with two cable connections for positive and negative voltage outputs on the transducer. The accessibility of the design from the outside facilitates the control of connection accents. The operation of R and RLC circuits, which will convert electrical energy into heat, can be observed. This positively affects the operational safety of the system. Being exposed to the external environment enhances heat transfer, enabling rapid cooling at ambient temperature. The transducer, with a capacity of 5300 nF and a voltage output of 150 V, is able to facilitate the transfer of high wattages. The PZT piezo material used is highly resistant to impact, capable of withstanding compression strength up to 4200 N. The mass value on a single piston in the design is 7.65% heavier than the default design. This change in weight may result in a variation in the natural frequency of the design. Despite the shocks that cause vibrations in the mechanism, the transducer resonates at a frequency of 102 kHz. It can suppress friction induced vibrations at frequencies below 102 kHz. The transducer can effectively operate within a temperature range of -25°C to 85°C. Exceeding these temperature values may lead to the loss of strength properties of the PZT material inside and render it unusable.

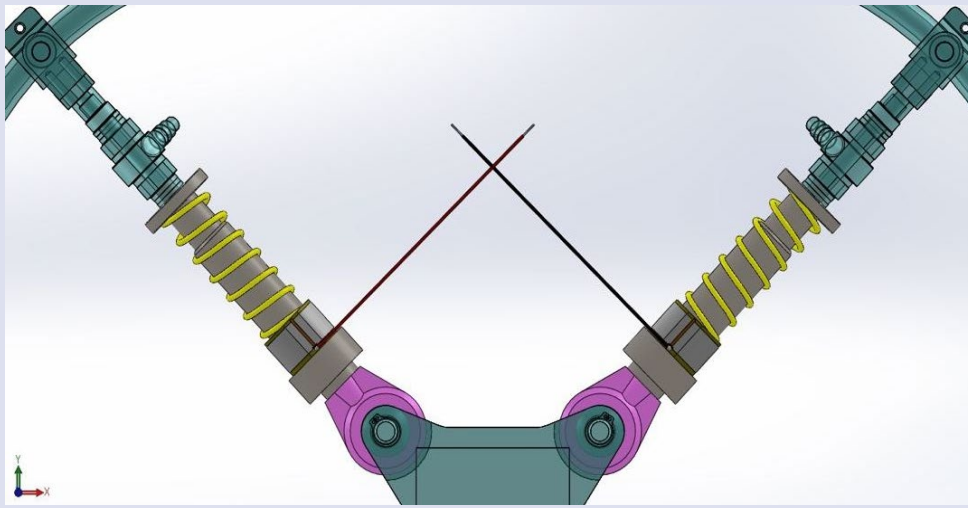


Figure 3. Design-1

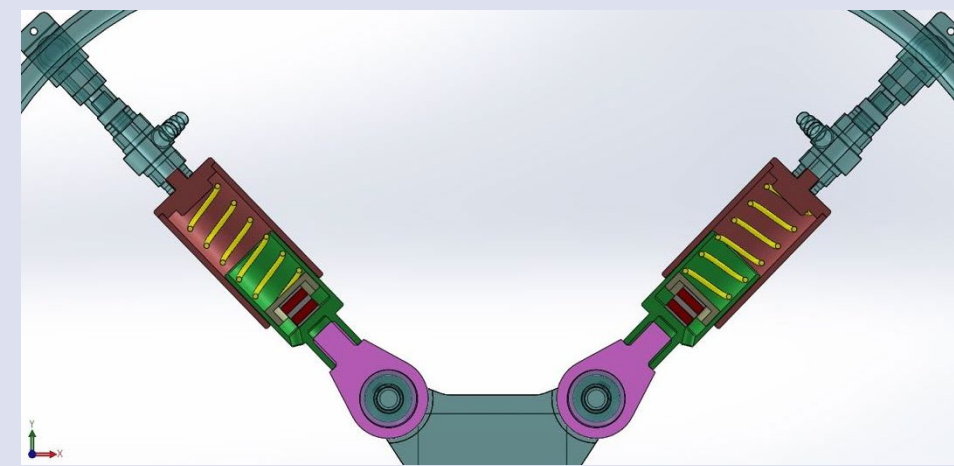


Figure 4. Design-2

In the modeling of **Design-2** in Figure 4, Noliac NAC2015-H08 model stack transducer is selected. The transducer has a cubic geometric shape. The stack is formed by soldering transducer parts, each 2 mm thick, in parallel layers. The dimensions of Design-2 transducer are 10 x 10 x 10 mm for width, length, and height, respectively. The design is made according to the closed inner part based on the geometric shape of the transducer. To enable a healthy comparison of analyses, the design is made based on the dimensions of the springs used in the default design. A sleeve is used as an intermediate support to ensure the pressure of the spring on the transducer. The compression spring, sleeve, and transducer are located inside the inner-outer telescopic bodies. To reduce mass and avoid obstruction to the transducer, the threaded portion of the ball joint connection is shortened by cutting. The telescopic outer body, shown in red, is planned to be welded to a seamless steel drawn tube using a welded disc for connection to facilitate production. After welding, slag will be turned to obtain a clean surface and reduce mass. The telescopic inner body, shown in green, is aimed to be produced from

a single piece without any welding process. The cable input and output for the transducer are made through the hole drilled at the fixing end of the green part. Design-2 has a 20.07% higher mass difference compared to the default design. The transducer, with electrical properties of 150 volts and 2740 nF capacitance, can operate up to 150 degrees Celsius. It withstands a compression strength of 4200 N. It is the transducer with the highest resonant frequency, 248 kHz.

In **Design-4** depicted in Figure 6, Piezosystem Jena brand P18-S22 model transducer is housed in a large cylindrical volume. The transducer, placed in the brown outer telescopic body, has a diameter of 22 mm and a length of 30.5 mm. To prevent displacement of the spring during vibration and to ensure better grip, a special washer with a hexagonal head screw is attached to the M4 guide hole located at the top of the transducer. The inner and outer telescopic bodies of the transducer, with large dimensions, are constructed by welding flanges to seamless steel drawn tubes according to DIN2448 standard. The cable connection of the transducer is routed outside through a hole drilled in the outer body. The energy generated by the transducer, with a maximum applied force of 130 volts and 5400 nF capacitance in the



enclosed volume, is 45.63 mJ. Assuming the system operates at 10 kHz frequency, the theoretical heat generated would be 456.3 J/s. Despite this performance, the recommended operating temperature range for the transducer is  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $80^{\circ}\text{C}$ , and using it above or below this range may cause permanent damage. It is 88.28% heavier compared to other designs. The inconsistency in natural frequency resulting from the volumetric differences in the design significantly affects the validity of the design. However, a sleeve design was not preferred due to the transducer diameter being larger than the compression spring. The reduction in distance between the transducer and the inner telescopic body due to this aspect increases the force applied by the spring, potentially hindering the achievement of the appropriate compression force for testing in the experiment. The compression strength of design-4 is 3400N.

In **Design-5** depicted in Figure 7, the transducer used is the cylindrical model PK25LA2P2 from Thorlabs. It is a design with two transducers placed between two plates. The transducers have a diameter of 8.2 mm and a length of 9.2 mm. The compression force between the spring and the body is transmitted to the transducers through the black metal plate. The transducers are planned to be used by adhering them to the metal plate used as a transmitter

without being glued to it and can be glued with Thorlabs' recommended epoxy, 353NDPK. Since the transducers in the design are positioned externally, they contribute to increased heat dissipation, aiding in the cooling of the transducers. The recommended operating temperature range for the transducers is between  $-25^{\circ}\text{C}$  and  $130^{\circ}\text{C}$ . Their compressive strength is 1800 N. As two transducers are used on a telescopic arm, this compression strength value is considered as 3600 N. Although the capacitance value of a single transducer is the lowest in the comparison, at 2200 nF, it has the highest voltage value of 200 volts, enabling it to operate at the highest voltage. These values result in a higher energy value compared to other designs when evaluated as two transducers on a single telescopic arm. Designed externally, it is 17.90% heavier than the default design, allowing for the use of fewer parts.

The developed designs have different advantages and disadvantages in terms of their ability to dissipate heat. Transducer selections and designs were made with simplicity and ease of use in mind. Among these options, the most suitable one will be evaluated and chosen. The transducers used in the designs discussed in terms of their technical specifications are listed in Table 1.

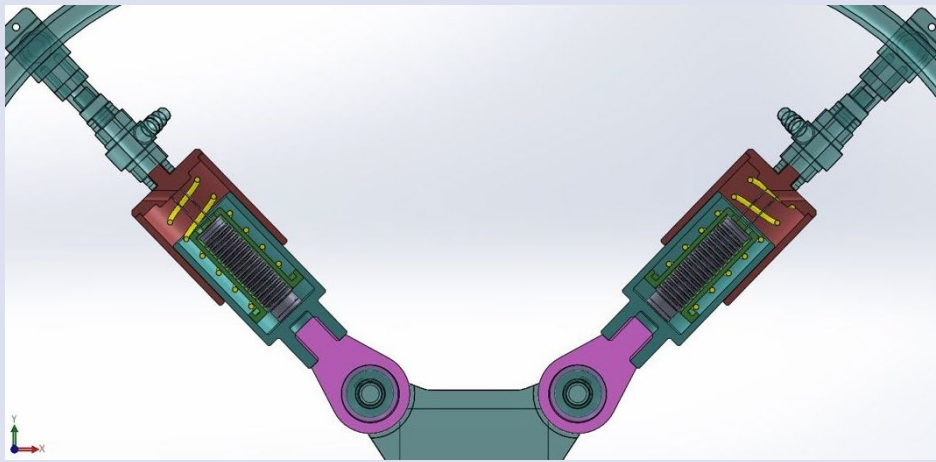


Figure 5. Design-3

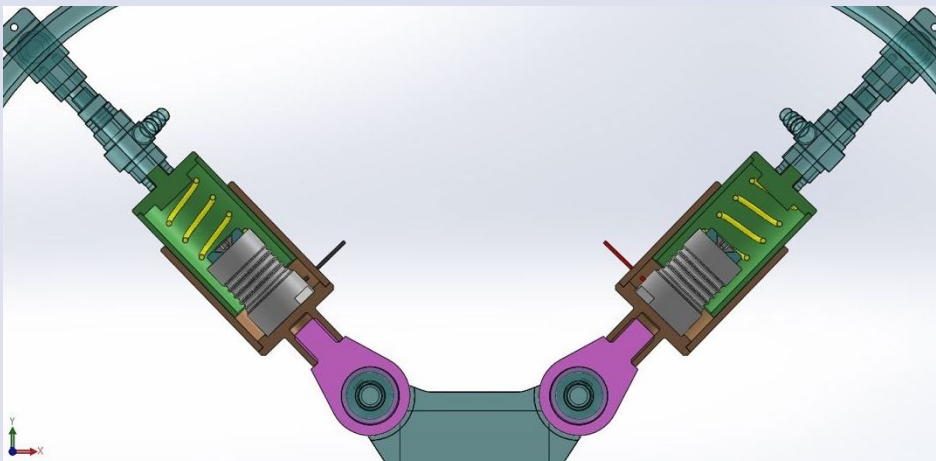


Figure 6. Design-4

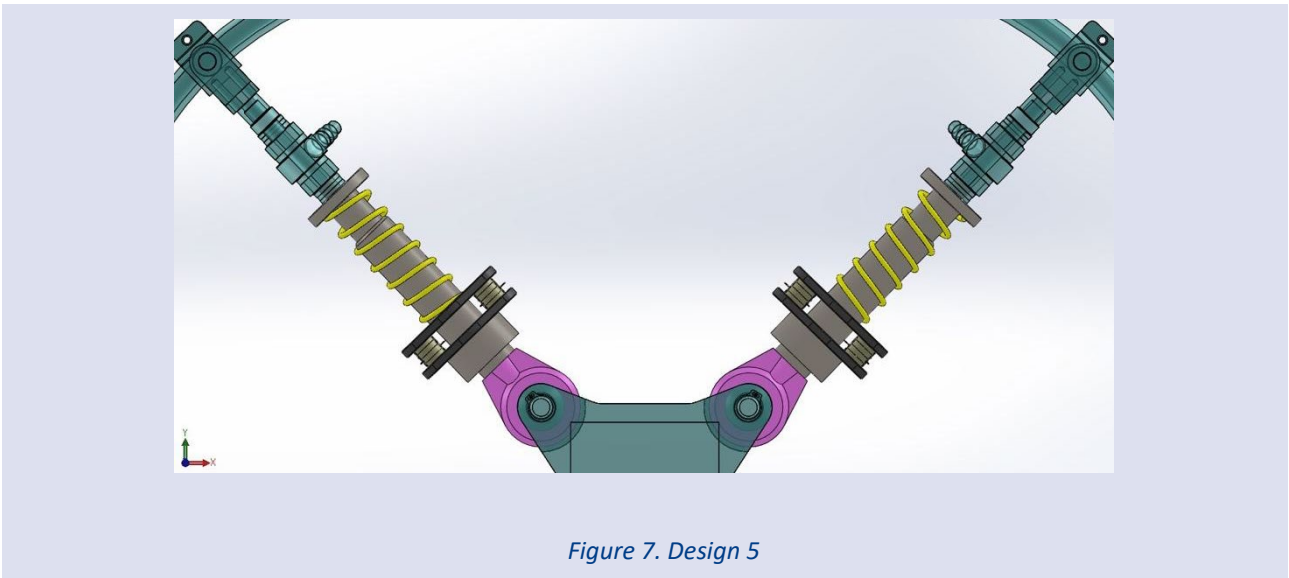


Figure 7. Design 5

Table 1. Transducer specifications used in the designs.

	Design-1	Design-2	Design-3	Design-4	Design-5
<b>Brand</b>	Kemet	Noliac	Physik Instrumente	Piezosystem Jena	Thorlabs
<b>Model</b>	AER 20x15.4 x13.5DF	NAC2015- H10	P-885.95	P18-S22	PK25LA2P2
<b>Location</b>	Outer	Inner	Inner	Inner	Outer
<b>Geometry</b>	Hollow Cylinder	Cube	Cylinder	Cylinder	Cylinder
<b>Dimensions</b>	ØD20 x Ød15.4 x 13.5 mm	10 x 10 x 10 mm	ØD11.2 x 40.5 mm	ØD22 x 30.5 mm	ØD8.2 x 9.2 mm
<b>Voltage</b>	150 VDC	150 VDC	120 VDC	130 VDC	200 VDC
<b>Capacitance</b>	5300 nF	2740 nF	3100 nF	5400 nF	2200 nF
<b>Resonance Frequency</b>	102 kHz	248 kHz	35 kHz	24 kHz	125 kHz
<b>Compression Strength</b>	4200 N	4200 N	900 N	3400 N	3600 N
<b>Operating Temperature</b>	-25/85°C	150°C	-40/150°C	-20/80°C	-25/130°C

### Determination Of Optimal Design With Appropriate Selection Criteria

The criteria for the designs vary internally. These designs need to be evaluated by eliminating them based on the established criteria to select the best one. The time involved in the production and procurement of designs is a significant factor that can affect a study. The transducers used in the designs are not widely available in the market, making it difficult to find the products. Suppliers do not maintain product inventory and instead source them from abroad based on the orders they receive. This situation may prolong the process in case of product purchase or malfunction, necessitating an evaluation of the timing of design production and procurement. The prolongation of the process and additional tax payments affect its cost. The difficulty in finding the product adversely affects its cost due to the supply-demand relationship. It is necessary to classify the preferred products economically. It is important for the designs to be user-friendly. The

difficulty of part replacement during maintenance and repair reduces the preference for the design. Simple and ergonomic designs are preferred for user and performance aspects.

Considering that the aim of the study design is to convert existing vibration into heat, the transducers and the associated R and RLC circuits should have a design model that allows heat conduction. Thus, the ability to dissipate heat into the surroundings will significantly affect the system's performance. Therefore, open systems will always be more effective. The information in Table 1 provides details about the positions of transducers on the assembly. The position boundaries are examined in two categories: internal and external. If the transducers are positioned internally, it adversely affects heat conduction. Transducers positioned externally are more advantageous in dissipating heat to the outside environment compared to internal positioning due to being in an open environment.

Table 2. Weights of parts required for transducer connection (grams)

	Default	Design-1	Design-2	Design-3	Design-4	Design-5
Transducer	-	14.75	7.80	26.27	77.10	10.90
Outer Body	42.99	42.99	88.06	93.99	121.35	42.99
Inner Body	59.40	59.40	46.79	97.58	80.75	59.40
Spring	8.52	8.52	8.52	8.52	8.52	8.52
Sensor	31.24	31.24	31.24	31.24	31.24	31.24
Joint Connection	50.20	50.20	39.17	39.17	39.17	50.20
Bolts	-	-	-	-	4.03	-
Hive	-	-	9.38	23.79	-	-
Plate	-	-	-	-	-	23.54
TOTAL	192.35	207.10	230.96	320.56	362.16	226.79
Difference [%]	-	7.67	20.07	66.65	88.28	17.90

Table 3. Natural frequency change of telescopic arm mounting in designs.

Design Name	Natural Frequency [Hz]	Natural Frequency Change [%]
Default	1623.72	-
Design-1	1564.81	3.63
Design-2	1481.68	8.75
Design-3	1257.64	22.54
Design-4	1183.28	27.13
Design-5	1495.22	7.91

Table 4. Energy calculation in transducers exposed to vibration at a frequency of 10kHz

	Design-1	Design-2	Design-3	Design-4	Design-5
Voltage (V)	150	150	120	130	200
Capacitance (nF)	5300	2740	3100	5400	2200
Energy (Joule)	0.0596	0.03083	0.02232	0.04563	0.0880
Power (Watt)	596.25	308.25	223.20	456.30	880.00

Table 5. The scores of the designs.

	Design-1	Design-2	Design-3	Design-4	Design-5
Energy Generation	20	5	1	13	35
Compression Strength	20	20	1	15	17
Operating Temperature	2	6	6	2	5
Weight	10	9	3	1	9
Ergonomics	4	2	1	2	3
Supply Time	4	2	3	1	4
Cost	1	7	6	3	10
Safety	4	5	6	7	7
Total Score	65	56	27	44	89

Advantages of Selected Design 5

Changes in the mass of the designs will result in differences in the natural frequency of the default system; therefore, it is important to select a design with minimal weight variation to ensure that the experiment can be conducted accurately again. The weight values are shown in Table 2, where the total weights of the designs are listed along with their percentage differences in the bottom row.

The value of the natural frequency is one of the fundamental calculation parameters for all systems. In this study, the aim is to minimise mass changes so that the natural frequency remains unchanged. Any change in the natural frequency could lead to discrepancies in the data compared to previous experiments. There could be many variables involved, but the vibration in the design should be limited to ensure that the weight at the point of measurement remains constant. The calculated natural frequencies of the system are shown in Table 3.

The ergonomic design of the system allows for easy observation during experiments and access to cables due to the positioning of the transducers. While the likelihood of any risk of ignition in the system is low, there should be effective intervention in case of a short circuit that could disrupt the operation of the system. The ability to observe the system from the outside allows for intervention and observation in possible situations. The safety of the system is evaluated based on these limitations.

Considering the purpose of the design to expel heat, it is important to consider the data of the transducers that will be connected to the R and RLC circuits. The energy produced by the transducers determines the performance of the design. The calculation in the Table 4 is based on the power (Watt) value corresponding to the 10 kHz vibration frequency in the mechanism.

The maximum theoretical energy production achievable through passive vibration damping in the designs is provided in the table above. The use of two transducers in Design 5 allows for higher energy production compared to other designs, making it considered as the design with the highest energy output. The energy generated by the designs is crucial in terms of the intended usage of the design. The operational temperature value is important for the effective operation of the design. Since it needs to generate heat for energy conversion, the use of heat-resistant transducers is more critical.

Compression strength comparison is an important part. Since each transducer has its own material and structure, it can withstand different force values. These strength values were taken from the datasheets shared by the manufacturers and evaluated. For scoring, the lowest score was given to the one with the lowest strength, while the highest score within the determined limit was given to the one with the most durability.

Evaluations will be based on energy production, compression strength, operating temperature, weight, ergonomic usage, supply time, cost, and safety. The designs are evaluated based on a total score out of 100. The highest score is given to the value showing the best performance in comparison. The product with the lowest performance receives a score of 1. The scoring of technical specifications with intermediate values is done according

to the established linear equation. A comparison of the scores of the 5 different designs is provided in Table 5. As a result, Design-5 received the highest score of 89, followed by Design-1, Design-2, Design-4, and Design-3, with scores of 65, 56, 44, and 27 respectively. Design-5, with a score of 89, achieved the highest score. In the final, work continues with Design-5, which is made with the Thorlabs brand PK25LA2P2 model transducer for noise reduction through passive vibration damping.

In accordance with the established criteria, the design made with Thorlabs transducers has been identified as the most effective model with a score of 89. The prominent features of the design include the positioning of the transducers in an open configuration and their advantageous mass properties. Among the designs, this is the only one that utilizes two transducers. It has been observed that this system generates a high level of energy, as shown in Table 4. The dimensions of the transducers, with a diameter of 8 mm and a length of 9 mm, contribute to a lightweight product. This lightness helps maintain an acceptable level of change in the system's natural frequency. Being in an open environment facilitates the temperature regulation, maintenance, and potential interventions of the transducers. It is the transducer model with the lowest cost among the designs. The specifications of Design-5 made with Thorlabs transducers are listed in Table 6.

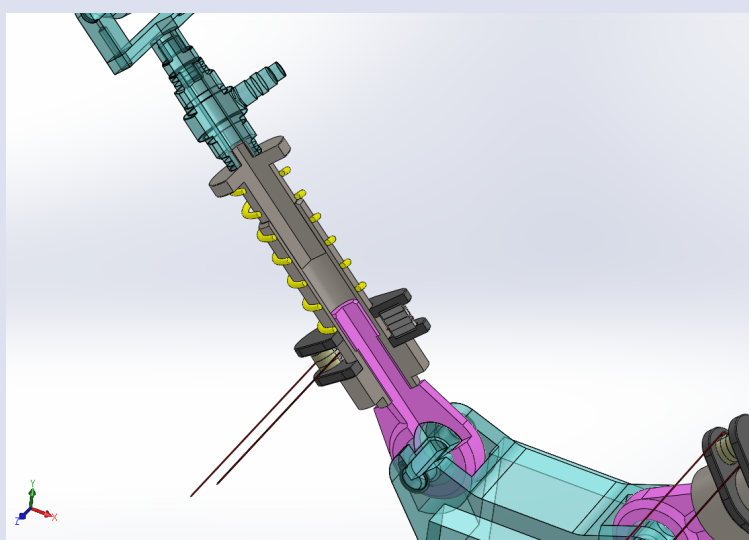


Figure 8. Half-section perspective view of Design-5

Table 6. Characteristics that make the choice of Design-5 important

Parameters	Design-5
Weight	226.79 grams
Natural frequency change	7.91%
Maximum energy that can be collected	880 W
Temperature resistance	-20°C/150°C
Compression Strength	3600 N

## Conclusion

In this study, various passive vibration damping methods have been proposed to attenuate the high-frequency noise induced by friction-induced vibration. Within this scope, five different piezoelectric transducer designs are suggested. The mass-spring test system used in the study is modified for the purpose of converting mechanical energy into heat energy using different piezoelectric transducer designs. A market survey is conducted by listing five different products selected from existing transducer brands. Various designs are made with five different transducers in accordance with the dynamics of the mass-spring test system. Through a comparative scoring method, designs are eliminated, and the most suitable model, Design 5, was selected. Following the selection of Design 5, development analyses aimed at increasing efficiency within the boundaries of the design are applied.

This study aims to provide a new dimension to research on noise reduction techniques and demonstrates the successful applicability of a system involving a piezoelectric transducer and an RLC circuit. The results obtained have the potential to shed light on further research in acoustic control systems.

The application area of this study focuses on experimental studies aimed at reducing vibration-induced noise by dissipating vibration as heat energy. It contributes to research aimed at eliminating noise associated with vibration. The design developed in the study contributes particularly to research aimed at effectively controlling friction-induced noise in environments such as laboratories and research centers.

Friction-induced noise can be ubiquitous in human surroundings. This design aims to convert vibration-induced noise into electricity using passive vibration damping methods. According to experimental results, the areas of application for this design may include machines that produce noise from vibration. This study has opened a door towards reducing noise originating from friction using piezoelectric transducers. In the future, providing an applicable solution for noise elimination through further analysis and examination of parametric values is planned.

## References

- [1] Koziński, M. S., & Koftowski, B., 2011. Comparison of Active and Passive Damping of Plate Vibration by Piezoelectric Actuators - FEM Simulation. *Acta Physica Polonica A, [s. I.]*, 119, 1005–1008.
- [2] Hagood, N. W., & von Flotow, A., 1991. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *Journal of Sound and Vibration*, 146(2), 243-268.
- [3] Hollkamp, J. J., & Starchville Jr, T. F., 1994. A self-tuning piezoelectric vibration absorber. *Journal of intelligent material systems and structures*, 5(4), 559-566.
- [4] Bellar, M. D., Wu, T. S., Tchamdjou, A., Mahdavi, J., & Ehsani, M., 1998. A review of soft-switched DC-AC converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(4), 847-860.
- [5] Hariri, H., Bernard, Y., & Razek, A., 2011. Finite element model of a beam structure with RL shunt circuits. In *AC2011*, 124-131.
- [6] De Marneffe, B., & Preumont, A., 2008. Vibration damping with negative capacitance shunts: theory and experiment. *Smart materials and Structures*, 17(3), 035015.
- [7] Casadei, F., Beck, B. S., Cunefare, K. A., & Ruzzene, M., 2012. Vibration control of plates through hybrid configurations of periodic piezoelectric shunts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(10), 1169-1177.
- [8] Min, J.B., Duffy, K.P. & et al., Shunted Piezoelectric Vibration Damping Analysis Including Centrifugal Loading Effects. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 12-15 April 2010, Orlando, United States.
- [9] Neubauer, M., & Oleskiewicz, R. 2006. Brake squeal suppression with shunted piezoceramics-a control formalism. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(16), 520-525.
- [10] Neubauer, M., & Oleskiewicz, R. 2008. Suppression of brake squeal using shunted piezoceramics.
- [11] Park, J., Jung, T. H., Kim, J. K., & Park, G. 2017. Automobile brake squeal noise suppression using piezoelectric-based devices. *J. Automobile Eng.*, 222(7), 1141-1151.
- [12] Jearsiripongkul, T., & Hagedorn, P. 2006. Active Control of Disk Brake Squeal. In *Proceedings of the 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 1-5.
- [13] Jearsiripongkul, T., & Hochlenert, D. 2006. Disk brake squeal: modeling and active control. In *2006 IEEE conference on robotics, automation and mechatronics*, 1-5.
- [14] Yavuz, A., Sen, O.T., 2023. Stability Analysis of a Mass-Sliding Belt System and Experimental Validation as Motivated by the Brake Squeal Problem. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00849-0>





## Review Study on Electromechanically Supported Dental Implant Applications

Faruk Karaca<sup>1,a,\*</sup>, Engin Ünal<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Firat University, Elazığ/Turkey

<sup>2</sup>Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Firat University, Elazığ/Turkey

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 27/05/2024

Accepted: 14/06/2024

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

### ABSTRACT

In recent years, the use of electromechanical systems in dental implant applications has become widespread as an alternative to traditional dental surgery. Electromechanical systems include electronically controlled mechanisms. Such applications include methods developed to minimize important factors that directly affect the quality of the procedure, such as the physician's personal dexterity and sensitivity. Electromechanical systems enable physicians to perform more accurate operations thanks to their advanced sensitivity and accuracy capabilities. In particular, the process of precisely determining and preparing the place where the implant will be installed is extremely important for patient health and operation success. In this regard, the electromechanical system works together with the physician and supports the physician in the control and application of the system. This study presents a review of the scope and nature of recent available studies.

**Keywords:** Dental implant, electromechanics, robot, artificial intelligence.

## Elektromekanik Destekli Diş İmplant Uygulamaları Üzerine Derleme Çalışması

### Araştırma Makalesi

#### Süreç

Geliş: 27/05/2024

Kabul: 14/06/2024

### ÖZ

Son yıllarda geleneksel diş cerrahisine alternatif olarak dental implant uygulamalarında elektromekanik sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Elektromekanik sistemler elektronik kontrollü mekanizmaları ihtiva etmektedir. Bu tür uygulamalar, hekimin kişisel el becerisi ve hassasiyeti gibi işlem kalitesini doğrudan etkileyen önemli faktörleri minimize etmek için geliştirilen yöntemleri içermektedir. Elektromekanik sistemler gelişmiş hassasiyet ve doğruluk yetenekleri sayesinde hekime daha doğru operasyon yapma olanağı sağlar. Özellikle implantın monte edileceği yerin hassas bir şekilde belirlenmesi ve hazırlanması süreci, hasta sağlığı ve operasyon başarısı için son derece önemlidir. Bu bakımdan elektromekanik sistem hekimle birlikte çalışarak sistemin kontrolünde ve uygulamasında hekime destek olur. Bu çalışmada, yakın zamandaki mevcut çalışmaların kapsamı ve niteliği hakkında bir derleme sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Diş implantı, elektromekanik, robot, yapay zeka.

<sup>a</sup> fkaraca@firat.edu.tr

<sup>id</sup> 0000-0003-1874-9274

<sup>b</sup> enginunal@firat.edu.tr

<sup>id</sup> 0000-0002-0501-3690

**How to Cite:** Karaca F, Unal E (2024) Review Study on Electromechanically Supported Dental Implant Applications, Journal of Science and Technology, 3(1): 30-34

## Giriş

Diş implantlarıyla tedavi yöntemi çeşitli nedenlerle dişlerini kaybetmiş hastalar için protez uygulamalarına alternatif/destek olması amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda gelişen implant teknolojisi sayesinde özellikle tekil diş kayıplarında hızla protez uygulamalarının yerini almıştır. Ancak burada karşılaşılan en büyük sorun implantın çene kemiğine doğru bir şekilde yerleştirilmesidir. İmplantın olması gereken yere yerleştirilmesi hem çene kemiğinin mekaniğini hem de hasta konforunu doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra vücudun diğer iskelet sisteminde olduğu gibi implantın kullanım ömrünü uzatmaktadır. Diğer taraftan bu işlemin doğru yapılmaması durumunda uzun vadeli implantın kullanılmasını engellemekte ve cerrahi işlem yapılan bölgede kanama, nekroz, sinir harabiyeti ve inflamasyona neden olmaktadır (Bahrami et al., 2024).

Geleneksel diş implant uygulamalarında, implantın yer seçimi ve pozisyonunun ayarlanması tamamen hekimin bilgi, beceri ve yeteneğine kalmıştır. Bu durum hastanın kendisini tedavi edebilecek doğru hekim arayıp bulması için ekstra zaman harcayacağı süreci doğurmaktadır. Oysaki gelişen elektromekanik teknoloji hayatın her alanında olduğu gibi diş implant tedavisinde de kullanılabilir.

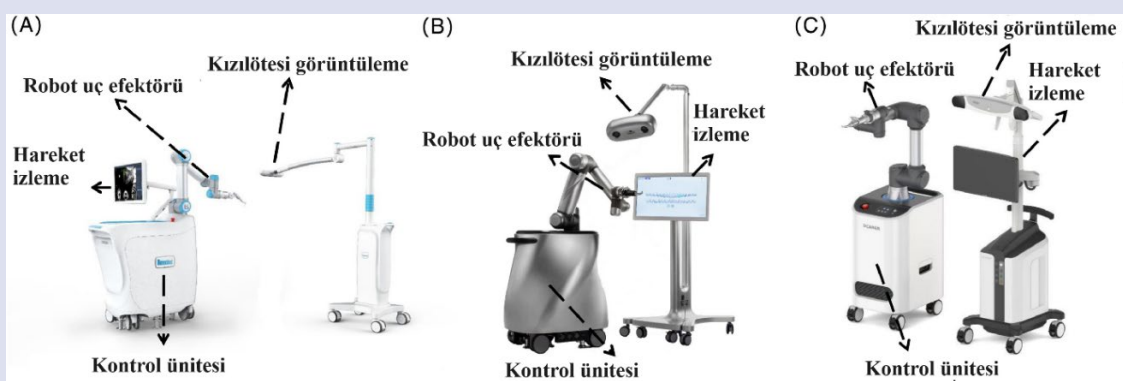
Dental implant işlemleri için tasarlanan elektromekanik sistemler üç ana kısımdan oluşur. Bunlar; elektromekanik bir işletim platformu, bir görsel sistem ve bir merkezi kontrol sistemidir. Bu elemanlar sırasıyla diş hekiminin ellerine, gözlerine ve beyne benzer işlevleri yerine getirir (Wu et al., 2019). Ameliyat yapılırken merkezi kontrol sistemi, dişsiz alanın mevcut konumunu belirlemek için görsel sistemi kullanır. Daha sonra implant alanını hazırlamak ve implantı ameliyat öncesi plana göre yerleştirmek için elektromekanik kola kılavuzluk eder (Tao et al., 2022). Dental implant elektromekanik sistem, manuel prosedürlerle karşılaştırıldığında hassas, etkili ve stabil cerrahi işlem açısından büyük bir kolaylık sağlar. Bu kolaylık, implant yerleştirmede doğruluğun artmasını ve cerrahi risklerin azalmasını sağlar (Liu et al., 2023; Wu et al., 2019). Elektromekanik yardımcı implant yerleştirmenin doğruluğunu ve güvenliğini artırmak için çeşitli ilerlemeler kaydedilmiştir.

İlk olarak robotik kol, implantı konumlandırırken problemler yardımcı ile fiziksel kılavuzluğu sağlar. İkinci olarak, hastanın çene hareketini izlemek ve ekranda eş zamanlı geri bildirim sağlamak için robotik sisteme bir hasta izleme cihazı entegre edilmiştir.

Son olarak, bu sistem operatör tarafından kontrol edilir ve çalıştırılır. Bu da tedavi planında esnek değişiklikler yapılmasına ve gerektiğinde cerrahi işlemin durdurulabilmesine olanak tanır (Cheng et al., 2021; Tao et al., 2022).

Son zamanlarda diş hekimi ile robot arasındaki etkileşimin düzeyine bağlı olarak aktif, pasif ve yarı aktif sistemler gibi farklı tipte dental implant robotları kullanıma sunulmuştur (Şekil 1) (Wu et al., 2019; Xu et al., 2023; Yan & Jia, 2022). Ayrıca bir takım çalışmalar, robot destekli implant yerleştirmede robotunun doğruluğunu değerlendirmiştir (Bolding & Reebye, 2022; Cheng et al., 2021; Shi et al., 2024; Tao et al., 2022; Xu et al., 2023). Dental implant robotları, cerrahi riskleri azaltırken implant yerleştirmenin verimliliğini, stabilitesini ve doğruluğunu artırma yetenekleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Ancak şu anda dental implant robotlarının cerrahi verimlilik (hazırlık ve operasyon süresi) ve farklı robotik sistemlerde implant yerleştirme doğruluğu üzerindeki etkilerini değerlendiren kapsamlı bir inceleme bulunmamaktadır.

Çene kemiği rekonstrüksiyonunda robot teknolojisinin uygulanması, yirmi yılı aşkın bir süredir kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Robot destekli diş cerrahisi, diş implantı tedavisinde öne çıkan bir konu olarak ortaya çıkmıştır (Wu et al., 2019). Diş cerrahisinde robotik sistemlerin geliştirilmesi, diş implantı prosedürlerinin hassasiyetini ve etkinliğini artırma ve sonuçta hem hastalara hem de uygulayıcılara fayda sağlama konusunda büyük umut vaat etmektedir. Dental implant robotları, insan-robot etkileşiminin düzeyine bağlı olarak aktif, pasif ve yarı aktif sistemler halinde kategorize edilebilir. Aktif robotlar, bağımsız olarak ağza girip çıkabiliyor, implant yerini hazırlayabiliyor ve implantı yerleştirebiliyor. Operatörün rolü öncelikle delici takımı değiştirmek, komut vermek ve robotun çalışmasını izlemektir. Pasif robotlar, işlem sırasında operatörün robotik kollarını yönlendirmesini gerektirir. Robotun ağza giriş çıkışından, implant yerinin hazırlanmasından ve implantın yerleştirilmesinden operatör sorumludur. Yarı aktif robotlar ise implant alanının hazırlanmasını ve implant yerleştirmesini otonom olarak gerçekleştirebilir. Ancak bu robotlar, ağza giriş ve çıkış sırasında robot kolunun manevrası için operatörün yardımına ihtiyaç duyar (Chen et al., 2023; Haidar, 2017; Li et al., 2023; Qiao et al., 2023; Shi et al., 2024; Tao et al., 2022; van Riet et al., 2021; Wang et al., 2024; Wu et al., 2019; Xu et al., 2023; Yan & Jia, 2022; Yang et al., 2022).



Resim 1. Dental implant robotları (A: Pasif, B: Yarı aktif, C: Aktif) (Xu et al., 2023)

Figure 1. Dental implant robots (A: Passive, B: Semi-active, C: Active)



## Elektromekanik Destekli Diş İmplantı Operasyonunun Verimliliği

Elektromekanik destekli implant cerrahisi de dahil olmak üzere implant yerleştirme sürecini iyileştirmek için çeşitli teknolojiler tanıtılmıştır. Bu teknolojinin, implant yerleştirme hassasiyetini önemli ölçüde artırma yeteneği olduğu bildirilmiştir (Pimkhaokham et al., 2022). Elektromekanik destekli implant cerrahisinin amacı, başarısızlıkları, bitişik anatomik dokuya verilen hasar ve cerrahi komplikasyonlar gibi olumsuz etkileri azaltarak daha iyi klinik sonuçlar elde etmektir (Pimkhaokham et al., 2022; Wu et al., 2019). Elektromekanik destekli implant cerrahisi statik ve dinamik olmak üzere iki temel teknolojik yaklaşım içerir. Statik elektromekanik destekli implant cerrahisinde, osteotomi ve implant yerleşimini yönlendirmeyi içerir. Bunun tersine, gerçek zamanlı dinamik olarak da bilinen elektromekanik destekli implant cerrahisi sistemi, işlem sırasında canlı görüntüleme sağlamak için optik izleme cihazlarını kullanarak cerrahlara gerçek zamanlı olarak yardımcı olur. Her iki sistem de yaygın olarak kullanılmakta ve kapsamlı bir şekilde incelenmekte olup, geleneksel cerrahiye kıyasla cerrahların implant yerleştirmede daha yüksek doğruluk elde etmelerine yardımcı olma yeteneklerini göstermektedir (Pimkhaokham et al., 2022; Wu et al., 2019). Elektromekanik destekli teknolojiler ameliyat öncesi planlamayı, cerrahi şablonları ve video navigasyonunu geliştirmiş olsa da, hala bazı zorlukları vardır. Delme ve kesme prosedürleri sırasında gerçek zamanlı doğruluk ve kararlılığın sağlanması temel zorluklardandır (Gargallo-Albiol et al., 2019; Pimkhaokham et al., 2022).

Bu alandaki yapılan çalışmalardan anlaşılan odur ki, elektromekanik sistemlerle yerleştirilen implantların, bilgisayar destekli implant cerrahisi sistemleriyle yerleştirilenlerden daha doğru olduğunu göstermiştir. (Gargallo-Albiol et al., 2019; Pimkhaokham et al., 2022).

### Elektromekanik Sistemlerin Hassasiyeti

Bu tür çalışmalarda Talmazov ve arkadaşlarının ortaya koyduğu implant konumlandırma doğruluğu metodolojisi

kullanılarak değerlendirilmiştir (Talmazov et al., 2020). Cerrahi operasyon sonrası implant yerleştirilen bölgenin hassas ölçümleri konik ışınli bilgisayarlı tomografi (CBCT) ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi implantın yerleştirilmesinin üç boyutlu sapmasının ölçümü için düzlemsel sapma, tepe sapması ve açıl sapma kullanılmıştır. Burada;

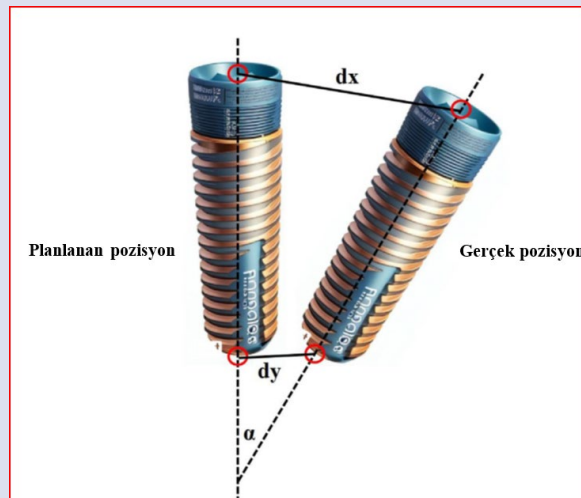
**Düzlemsel sapma:** Yerleştirilen implantın boyun platformunun merkezi ile planlanan implant arasında milimetre (mm) cinsinden ölçülen doğrusal yer değiştirmeyi ifade eder.

**Tepe sapması:** Yerleştirilen implantın apikal kısmının merkezi ile planlanan implant arasında milimetre (mm) cinsinden ölçülen doğrusal yer değiştirmeyi ifade eder.

**Eksenel sapma:** Yerleştirilen implantın varsayılan merkezi eksenini ile planlanan implant arasındaki derece ( $^{\circ}$ ) cinsinden açıyı temsil eder.

Serbest elle yerleştirme ile karşılaştırıldığında robot yardımcı implant yerleştirme, önemli ölçüde daha yüksek konumsal doğruluk sergiledi (Shi et al., 2024). Serbest elle yerleştirme için düzlem sapması, tepe sapması ve açıl sapmanın sırasıyla 1,88 - 1,12 mm, 2,89 - 1,64 mm ve 8,23 $^{\circ}$  - 7,14 $^{\circ}$  arasında olduğu bildirilmiştir. Buna karşılık, elektromekanik destekli yerleştirmenin düzlem sapmasının 1,17 - 0,36 mm, tepe sapmasının 1,41 - 0,62 mm ve açıl sapmasının 3,46 $^{\circ}$  - 3,11 $^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Shi et al., 2024).

Benzer çalışmalar değerlendirildiğinde, robotik sistemin dinamik navigasyon sistemine kıyasla implant konumlandırma daha az sapma olduğunu göstermiştir. Bu yöntemin diş implant cerrahisi için hala değerli bir araç olma potansiyelini sürdürmektedir. Robotik sistemin başarıları gelişmiş konum doğruluğu, delme eksenini stabilize etme ve insan titremelerini ortadan kaldırma becerisine bağlanabilir. Öte yandan, bilgisayar destekli dinamik navigasyon büyük ölçüde cerrahın becerisine ve deneyimine bağlıdır ve bu da implant yerleştirme doğruluğunda değişiklik yaratabilir (Chen et al., 2023; T. Sun et al., 2018; Tao et al., 2022; Wu et al., 2019; Zhou et al., 2021).



Resim 2. Ölçüm doğruluğunun şematik diyagramı (dx, Düzlemsel sapma; dy, Tepe sapması;  $\alpha$ , Eksenel sapma) (Shi et al., 2024)  
Figure 2. Schematic diagram of measurement accuracy (dx, Plane deviation; dy, Peak deviation;  $\alpha$ , Axial deviation)

## Cerrahi Operasyon Süresi

Elektromekanik destekli implant operasyonlarında her ne kadar manuel operasyonlara göre daha hassas işlemler gerçekleştirilebilse de işlem süresi için bu avantajdan bahsetmek mümkün değildir. Çünkü elektromekanik sistemin hazırlanması ve implant bölgesinin analizi uzun sürmektedir. Özellikle birden fazla implant yerleştirilmesi gündeme geldiğinde bu süre oldukça yüksektir. Literatürdeki sınırlı sayıda yapılan çalışmalar göstermiştir ki tek diş implant uygulamasında bu süre 20 – 25 dakika iken iki diş implant uygulamasında 40 – 50 dakika arasında olmaktadır. Öte yandan aktif ve pasif elektromekanik destekli implant yerleştirme sistemleri karşılaştırıldığında aktif sistemlerin pasif sistemlere göre daha uzun süre aldıkları gözlemlenmiştir. Pasif sistemlerde sistemin delme hızı ve konumlandırma aşamaları kontrol ediliyor olması işlemin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Aktif sistemlerde ise operasyonun bütün aşamalarının bilgisayar kontrolü ile gerçekleşmesi süreyi uzatmaktadır (Bai et al., 2021; Bolding & Reebye, 2022; Qiao et al., 2023; X. Sun et al., 2011; Xu et al., 2023).

## Elektromekanik Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları

Elektromekanik sistemler konumlandırma ve hassas delme işlemlerinde el ile yapılan operasyonlara göre daha üstündür. Özellikle hekimin yorgunluk, dikkat eksikliği ve titreme gibi insan kaynaklı hataları bertaraf edebilmektedir (Bolding & Reebye, 2022; Cheng et al., 2021; Qiao et al., 2023; Shi et al., 2024; Tao et al., 2022; Xu et al., 2023).

Salt elektromekanik sistemler yerine yapay zekâ kullanan sistemlerin kullanılması bu alanda daha büyük ilerlemelere yol açması düşünülmektedir. Yapay zekâyâ sahip elektromekanik sistemler eğitilebilir olduklarından işlem öncesi hazırlık aşamaları ve implant yerleştirme işlemlerini optimize ederek daha hızlı ve kişiye özel operasyonları gerçekleştirebilir (Kurt Bayrakdar et al., 2021; Mureşanu et al., 2023; Revilla-León et al., 2023).

Elektromekanik sistemler yukarıda bahsedilen avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar özellikle maliyetinin yüksek olması, kalifiye ekip ihtiyacı ve ağız açıklığının sınırlı olduğu hastalarda uygulamanın yapılabilirliğinin zorlaştırması olarak sıralanmaktadır (Chiapasco et al., 2009; Wallace & Froum, 2003).

Ayrıca implant uygulanan hastanın çene kemiği kalitesi, yaşı ve cinsiyeti gibi kişiye bağlı değişim gösteren faktörler de elektromekanik sistemin karar vermesini zorlaştırmaktadır (Clementini et al., 2012).

## Sonuçlar

Sonuç olarak, elektromekanik diş implantı uygulamalarında maliyet, ulaşılması zor alanlara erişim zorluğu ve karmaşık vakaları yönetememe gibi sınırlamaları vardır. Bu cerrahi işlemler hâlâ insan uzmanlığı gerektirmektedir. Bununla birlikte, diş implantı

robotları, implant konumlandırmasında iyi bir doğruluk sergilemektedir. Mevcut çalışmalar laboratuvar ortamları veya basit vakalarla sınırlı olduğundan, diş implantı robotlarının belirli durumlara uygunluğu konusunda özel bir öneride bulunması zordur. Ayrıca mevcut diş implantı robotlarına göre daha fazla seçenek ve işlevselliğe sahip yeni robotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yeni robotlar daha küçük boyutlara sahip olmalıdır ve yapay zekâyı içermelidir. Yapay zekanın diş implantı robotlarına entegrasyonu, gerçek zamanlı rehberlik, dinamik karar verme ve otonom cerrahi yetenekler sağlayarak bu alanda devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda yapılan bu derleme çalışması gelişen teknolojiye paralel olarak diş implantı tedavisinde elektromekanik sistemlerin kullanılabilirliğini göstermektedir. Ele alınan çalışmalar değerlendirildiğinde, araştırmaların henüz başlangıç aşamasında olduğu sonucuna varılmıştır. Tam otonom bir sistemin kullanılabilmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç olduğu açıkça görülmektedir.

## Kaynaklar

- Bahrami, R., Pourhajbagher, M., Nikparto, N., & Bahador, A. (2024). Robot-assisted dental implant surgery procedure: A literature review. *Journal of Dental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2024.03.011>
- Bai, S. Z., Ren, N., Feng, Z. H., Xie, R., Dong, Y., Li, Z. W., & Zhao, Y. M. (2021). Animal experiment on the accuracy of the Autonomous Dental Implant Robotic System. *Chinese Journal of Stomatology*, 56(2), 170–174. <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112144-20210107-00008>
- Bolding, S. L., & Reebye, U. N. (2022). Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 128(4), 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.048>
- Chen, J., Bai, X., Ding, Y., Shen, L., Sun, X., Cao, R., Yang, F., & Wang, L. (2023). Comparison the accuracy of a novel implant robot surgery and dynamic navigation system in dental implant surgery: an in vitro pilot study. *BMC Oral Health*, 23(1), 179. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02873-8>
- Cheng, K., Kan, T., Liu, Y., Zhu, W., Zhu, F., Wang, W., Jiang, X., & Dong, X. (2021). Accuracy of dental implant surgery with robotic position feedback and registration algorithm: An in-vitro study. *Computers in Biology and Medicine*, 129, 104153. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104153>
- Chiapasco, M., Casentini, P., & Zaniboni, M. (2009). Bone augmentation procedures in implant dentistry. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 24 Suppl, 237–259. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19885448>
- Clementini, M., Morlupi, A., Canullo, L., Agrestini, C., & Barlattani, A. (2012). Success rate of dental implants inserted in horizontal and vertical guided bone regenerated areas: a systematic review. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 41(7), 847–852. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2012.03.016>

- Gargallo-Albiol, J., Barootchi, S., Salomó-Coll, O., & Wang, H. (2019). Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 225, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2019.04.005>
- Haidar, Z. S. (2017). Autonomous Robotics: A fresh Era of Implant Dentistry... is a reality! *Journal of Oral Research*, 6(9), 230–231. <https://doi.org/10.17126/joralres.2017.072>
- Kurt Bayrakdar, S., Orhan, K., Bayrakdar, I. S., Bilgir, E., Ezhov, M., Gusarev, M., & Shumilov, E. (2021). A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Medical Imaging*, 21(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s12880-021-00618-z>
- Li, C., Wang, M., Deng, H., Li, S., Fang, X., Liang, Y., Ma, X., Zhang, Y., & Li, Y. (2023). Autonomous robotic surgery for zygomatic implant placement and immediately loaded implant-supported full-arch prosthesis: a preliminary research. *International Journal of Implant Dentistry*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00474-2>
- Liu, L., Watanabe, M., & Ichikawa, T. (2023). Robotics in Dentistry: A Narrative Review. *Dentistry Journal*, 11(3), 62. <https://doi.org/10.3390/dj11030062>
- Mureşanu, S., Almăşan, O., Hedeşiu, M., Dioşan, L., Dinu, C., & Jacobs, R. (2023). Artificial intelligence models for clinical usage in dentistry with a focus on dentomaxillofacial CBCT: a systematic review. *Oral Radiology*, 39(1), 18–40. <https://doi.org/10.1007/s11282-022-00660-9>
- Pimkhaokham, A., Jiaranuchart, S., Kaboosaya, B., Arunjaroenasuk, S., Subbalekha, K., & Mattheos, N. (2022). Can computer-assisted implant surgery improve clinical outcomes and reduce the frequency and intensity of complications in implant dentistry? A critical review. *Periodontology 2000*, 90(1), 197–223. <https://doi.org/10.1111/prd.12458>
- Qiao, S., Wu, X., Shi, J., Tonetti, M. S., & Lai, H. (2023). Accuracy and safety of a haptic operated and machine vision controlled collaborative robot for dental implant placement: A translational study. *Clinical Oral Implants Research*, 34(8), 839–849. <https://doi.org/10.1111/clr.14112>
- Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, B. A., Galluci, G. O., Att, W., & Krishnamurthy, V. R. (2023). Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.008>
- Shi, J., Liu, B., Wu, X., Liu, M., Zhang, Q., Lai, H., & Tonetti, M. S. (2024). Improved positional accuracy of dental implant placement using a haptic and machine-vision-controlled collaborative surgery robot: A pilot randomized controlled trial. *Journal of Clinical Periodontology*, 51(1), 24–32. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13893>
- Sun, T., Lan, T., Pan, C., & Lee, H. (2018). Dental implant navigation system guide the surgery future. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 34(1), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2017.08.011>
- Sun, X., McKenzie, F. D., Bawab, S., Li, J., Yoon, Y., & Huang, J.-K. (2011). Automated dental implantation using image-guided robotics: registration results. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 6(5), 627–634. <https://doi.org/10.1007/s11548-010-0543-3>
- Talmazov, G., Bencharit, S., Waldrop, T. C., & Ammoon, R. (2020). Accuracy of Implant Placement Position Using Nondental Open-Source Software: An In Vitro Study. *Journal of Prosthodontics*, 29(7), 604–610. <https://doi.org/10.1111/jopr.13208>
- Tao, B., Feng, Y., Fan, X., Zhuang, M., Chen, X., Wang, F., & Wu, Y. (2022). Accuracy of dental implant surgery using dynamic navigation and robotic systems: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 123, 104170. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104170>
- van Riet, T. C. T., Chin Jen Sem, K. T. H., Ho, J.-P. T. F., Spijker, R., Kober, J., & de Lange, J. (2021). Robot technology in dentistry, part two of a systematic review: an overview of initiatives. *Dental Materials*, 37(8), 1227–1236. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.06.002>
- Wallace, S. S., & Froum, S. J. (2003). Effect of Maxillary Sinus Augmentation on the Survival of Endosseous Dental Implants. A Systematic Review. *Annals of Periodontology*, 8(1), 328–343. <https://doi.org/10.1902/annals.2003.8.1.328>
- Wang, W., Xu, H., Mei, D., Zhou, C., Li, X., Han, Z., Zhou, X., Li, X., & Zhao, B. (2024). Accuracy of the Yakebot dental implant robotic system versus fully guided static computer-assisted implant surgery template in edentulous jaw implantation: A preliminary clinical study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 26(2), 309–316. <https://doi.org/10.1111/cid.13278>
- Wu, Y., Wang, F., Fan, S., & Chow, J. K.-F. (2019). Robotics in Dental Implantology. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 31(3), 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.coms.2019.03.013>
- Xu, Z., Xiao, Y., Zhou, L., Lin, Y., Su, E., Chen, J., & Wu, D. (2023). Accuracy and efficiency of robotic dental implant surgery with different human-robot interactions: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 137, 104642. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104642>
- Yan, Y., & Jia, Y. (2022). A Review on Human Comfort Factors, Measurements, and Improvements in Human–Robot Collaboration. *Sensors*, 22(19), 7431. <https://doi.org/10.3390/s22197431>
- Yang, S., Chen, J., Li, A., Li, P., & Xu, S. (2022). Autonomous Robotic Surgery for Immediately Loaded Implant-Supported Maxillary Full-Arch Prosthesis: A Case Report. *Journal of Clinical Medicine*, 11(21), 6594. <https://doi.org/10.3390/jcm11216594>
- Zhou, L.-P., Zhang, R.-J., Sun, Y.-W., Zhang, L., & Shen, C.-L. (2021). Accuracy of Pedicle Screw Placement and Four Other Clinical Outcomes of Robotic Guidance Technique versus Computer-Assisted Navigation in Thoracolumbar Surgery: A Meta-Analysis. *World Neurosurgery*, 146, e139–e150. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.10.055>



## Influence of Process Parameters on Kerf Width in Abrasive Waterjet Machining of GFRP Composites

Arslan Kaptan<sup>1,a,\*</sup>, Serdar Mercan<sup>2,b</sup>, Fuat Kartal<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Sivas Technical Sciences Vocational School, Sivas Cumhuriyet University, 58140 Sivas, Türkiye

<sup>2</sup>Department Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering, Sivas Cumhuriyet University, 58140 Sivas, Turkey <sup>3</sup>

<sup>3</sup>Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kastamonu University 37150, Kastamonu, Türkiye

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 07/06/2024

Accepted: 01/07/2024

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

### ABSTRACT

This study investigates the influence of process parameters on kerf width in abrasive waterjet (AWJ) machining of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites. The experimental analysis was conducted using a Taguchi L27 orthogonal array to optimize the machining parameters: pressure, feed rate, abrasive flow rate, and standoff distance. The top kerf width (TKW) and bottom kerf width (BKW) were measured to evaluate the impact of these parameters. Results indicate that higher pressures and abrasive flow rates generally increase both TKW and BKW due to enhanced material removal rates. Conversely, increased feed rates tend to reduce kerf widths, highlighting the importance of optimizing cutting speeds. Standoff distance exhibited a less pronounced effect but still influenced the kerf widths. The optimal parameters for minimizing TKW and BKW were identified, providing valuable insights for improving precision and efficiency in AWJ machining of GFRP composites. These findings contribute to the development of more effective manufacturing practices for high-performance composite materials.

**Keywords:** Abrasive waterjet cutting, optimization, reinforced composite, GFRP, machining parameters, kerf width.

## GFRP Kompozitlerin Aşındırıcı Su Jeti ile İşlenmesinde Proses Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

### Araştırma Makalesi

#### Süreç

Geliş: 07/06/2024

Kabul: 01/07/2024

### ÖZ

Bu çalışma, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitlerin aşındırıcı su jeti (AWJ) işlenmesinde işlem parametrelerinin kerf genişliği üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Deneysel analiz, işleme parametrelerini optimize etmek için bir Taguchi L27 ortogonal dizisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir: basınç, ilerleme hızı, aşındırıcı akış hızı ve ara mesafe. Bu parametrelerin etkisini değerlendirmek için üst kerf genişliği (TKW) ve alt kerf genişliği (BKW) ölçülmüştür. Sonuçlar, daha yüksek basınçların ve aşındırıcı akış hızlarının, artan malzeme çıkarma hızları nedeniyle genellikle hem TKW'yi hem de BKW'yi artırdığını göstermektedir. Tersine, artan ilerleme oranları kerf genişliklerini azaltma eğilimindedir ve bu da kesme hızlarını optimize etmenin önemini vurgulamaktadır. Ara mesafe daha az belirgin bir etki göstermiştir ancak yine de kerf genişliklerini etkilemiştir. TKW ve BKW'yi en aza indirmek için optimum parametreler belirlenmiş ve GFRP kompozitlerin AWJ işlenmesinde hassasiyet ve verimliliği artırmak için değerli bilgiler sağlanmıştır. Bu bulgular, yüksek performanslı kompozit malzemeler için daha etkili üretim uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Aşındırıcı su jeti kesimi, optimizasyon, takviyeli kompozit, GFRP, işleme parametreleri, kesme genişliği.

<sup>a</sup> akaptan@cumhuriyet.edu.tr  
<sup>c</sup> fkartal@kastamonu.edu.tr

<sup>id</sup> 0000-0002-2431-9329  
<sup>id</sup> 0000-0002-2567-9705

<sup>b</sup> smsmercan@gmail.com

<sup>id</sup> 0000-0002-1225-8290

**How to Cite:** Kaptan et al. (2024) Influence of Process Parameters on Kerf Width in Abrasive Waterjet Machining of GFRP Composites, Journal of Science and Technology, 3(1): 35-43.



## Introduction

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials are extensively utilized in various sectors, including space, automotive, machinery, and electronics industries, primarily due to their exceptional properties. These materials are known for their high hardness and resistance, low thermal expansion, and superior damping properties, which make them ideal for a broad range of applications (Agarwal and Broutman, 2017). Despite being manufactured in the desired geometrical configurations, composite structures often require additional cutting during the assembly process (Mallick, 2007). In the context of manufacturing processes, cutting operations represent a significant portion, accounting for approximately 40% of all machining activities (Davim, 2012). However, drilling composite materials poses several challenges, notably surface damage to the holes, such as delamination and fiber breakage (Singh and Bhatnagar, 2006). Such damage is a critical issue as it can significantly impair the structural integrity and performance of the composite materials. Preventing these damages necessitates a meticulous selection of the workpiece, cutting tools, and cutting parameters (Davim, 2012). Research has consistently highlighted that the quality of the machined surface is heavily dependent on factors such as cutting parameters, tool geometry, and cutting forces (Singh and Bhatnagar, 2006; Kartal and Kaptan, 2024; Abrão, 2008; Kartal and Kaptan, 2023). Polymer matrix composite materials, due to their advantageous engineering properties, are not only common in daily applications but also prominent in the aerospace industry. Nevertheless, the inherent complexity of these materials can lead to adverse effects on their engineering properties during machining operations. The assembly of composite parts often involves the use of pin connections, which necessitates an increased frequency of drilling operations. Extensive research in the literature has focused predominantly on the drilling process, investigating surface damages at the inlet and outlet of holes while considering variables such as cutting tools, cutting parameters, and tool geometry.

### *Importance of Composite Materials in Various Industries*

Composite materials, particularly glass fiber reinforced composites, are indispensable in modern industry due to their unique combination of high strength and low weight. These materials exhibit superior mechanical properties, including high stiffness and durability, which are critical for aerospace applications where weight reduction is paramount (Kaw, 2005). In the automotive sector, the use of composites contributes to the production of lighter vehicles, thereby improving fuel efficiency and reducing emissions (Friedrich and Almajid, 2013). Similarly, in the electronics industry, composites are favored for their excellent thermal stability and electrical insulation properties, making them suitable for various components and housings (Hegde and Sharma, 2008).

### *Challenges in Machining Composite Materials*

Despite their advantages, machining composite materials, especially drilling, presents numerous challenges. Delamination, which refers to the separation of layers within the composite, is a common issue that occurs during drilling and can compromise the structural integrity of the material (Hegde and Sharma, 2008). Fiber breakage is another prevalent problem that leads to rough hole surfaces and

reduced material strength (Hocheng and Tsao, 2003). These defects are influenced by several factors, including the type of cutting tool used, the cutting parameters (such as feed rate and spindle speed), and the geometry of the cutting tool (Khashaba, 2004).

### *Influence of Cutting Parameters and Tool Geometry*

The relationship between cutting parameters and the quality of the drilled holes in composite materials has been a focal point of numerous studies. Optimal cutting parameters are crucial for minimizing surface damage and ensuring a high-quality finish. For instance, appropriate feed rates and spindle speeds can reduce the forces exerted on the material, thereby mitigating delamination and fiber breakage (Rahme et al., 2011). Additionally, the geometry of the cutting tool, including its point angle and helix angle, plays a significant role in the drilling process. Tools with specific geometries designed for composite materials can enhance cutting performance and reduce damage (Isbilir and Ghassemieh, 2013).

### *Advances in Drilling Techniques for Composite Materials*

Recent advancements in drilling techniques have aimed to address the challenges associated with machining composite materials. Innovations such as the use of special coatings on cutting tools, the development of hybrid drilling methods, and the implementation of automated drilling systems have shown promising results in improving the quality of drilled holes (Saradini et al., 2009). Furthermore, ongoing research continues to explore the effects of different tool materials, cutting fluids, and cooling methods to optimize the drilling process for composite materials (Rubio et al., 2008).

## Material and Methods

### *Material Preparation*

The material used in the experiments was glass fiber reinforced polymer (GFRP), characterized by its high strength-to-weight ratio and resistance to corrosion. Prior to machining, samples were prepared to standard dimensions of 100x100 mm with a thickness of 10 mm to ensure uniformity across all tests. The surface of each sample was cleaned and dried to remove any contaminants that could affect machining outcomes. The mechanical properties of the composite material used in this study are outlined in Table 1.



Table 1. Mechanical properties of the GFRP material.

Tensile strength [MPa]	Youngs modulus [GPa]	Elongation [%]	Hardness [VHN]
255	8	3	30

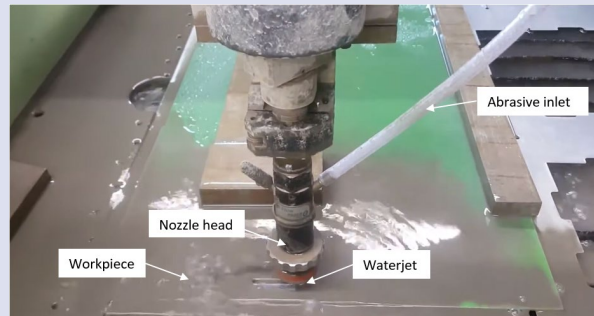


Figure 1. GFRP composites machining with AWJ.

Table 2. AWJ machining parameters

Parameters	Levels		
	1	2	3
Pressure [MPa]	200	250	300
Feed rate [mm/min]	200	300	400
Abrasive flow rate [g/min]	100	150	200
Standoff distance [mm]	2	4	6

#### Experimental Setup and Parameters

The abrasive waterjet (AWJ) machining was conducted using a precision AWJ machine capable of exerting a maximum pressure of 400 MPa. The machine was equipped with a 0.3 mm diameter nozzle and utilized garnet abrasive particles of 80 mesh size. The operational parameters adjusted during the experiments included. Figure 1 shows the machining process of GFRP composite material using AWJ.

A Taguchi L27 orthogonal array was utilized to design the experiments, allowing for an efficient exploration of the parameter space with a minimized number of experimental runs. The effects of the parameters on kerf width were analyzed using analysis of variance (ANOVA), which helped in identifying the statistically significant factors. The interaction effects between parameters were also explored to understand their combined influence on the outcomes. The experimental setup involves varying four parameters: Pressure (P), abrasive flow rate ( $m_v$ ), feed rate (V), and standoff distance (d). Pressure is ranged from 200 to 300 MPa in increments of 20 MPa. Feed rate is set between 100 mm/min and 200 mm/min, with increments of 25 mm/min. Abrasive flow rate is adjusted from 150 g/min to 300 g/min in increments of 30 g/min. Standoff distance is varied from 2 mm to 6 mm in increments of 1 mm. This systematic variation allows for comprehensive analysis of the effects of these parameters on the desired outcomes.

To further understand the quantitative relationship between the machining parameters and the kerf widths, multiple linear regression analysis was conducted. The regression model was developed with kerf width as the dependent variable and pressure, feed rate, abrasive flow rate, and standoff distance as independent variables. This model provided coefficients that quantified the impact of each parameter on the kerf width, offering insights into how

parameter adjustments could optimize machining performance.

Based on the regression model and the ANOVA results, response surface methodology was employed to find the optimal set of parameters for minimizing kerf width while maintaining the integrity of the machined surface. Contour plots were generated to visualize the relationship between parameters and their effects on kerf width, aiding in the decision-making process for parameter selection. Table 2 shows the processing parameters and levels.

#### Results

In the current work, the effect of the AWJ process parameters on the top and bottom slit widths was examined using an L27 orthogonal array. A total of 27 experiments were conducted, each with two recurrences. The operational parameters for each run are detailed in Table 3. During each run, a 20 mm length was cut from the test sample using a three-axis AWJ computer numeric control machine. The widths of the slits on the top and bottom surfaces are referred to as the TKW and the BKW, respectively. The kerf widths were measured using a digital caliper tool. For each sample, the kerf width was measured at seven equidistant points along the length of the cut, and the average values were recorded in Table 3. The analyze influence of four key AWJ process parameters on the TKW and BKW. These parameters are P,  $m_v$ , V and d. The goal is to understand how variations in these parameters affect the kerf widths and to identify optimal conditions for minimizing surface damage while achieving precise cuts. The Taguchi L27 orthogonal array was selected for its specific advantages in optimizing and understanding the influence of multiple parameters on kerf widths in abrasive waterjet machining of

GFRP composites. This array structure allows for a comprehensive analysis of three levels for each factor in fewer experimental runs than would be required in a full factorial design. Specifically, the L27 array supports the examination of up to 13 factors simultaneously, which provides significant efficiency and robustness in experimental design. The use of this orthogonal array enhances the reliability of the results by minimizing the effects of variability in the experiments. It systematically covers the interaction and main effects of the parameters, thereby providing a balanced view of the process factors under study. This design methodology not only reduces the time and resources needed but also improves the precision of the data obtained, facilitating a more effective optimization of the machining parameters. As a result, it is particularly valuable in industrial applications where time and cost efficiency are crucial, and it contributes substantially to the reproducibility and scalability of the findings.

The line graphs presented elucidate the impact of various operational parameters on the mean cutting thicknesses (TKW and BKW) in a controlled experimental setting. From the *Table 3. Experiment parameters and their levels*

analysis, it is evident that increasing pressure correlates with an increase in both TKW and BKW, suggesting that higher pressures enhance the material's removal rate, possibly due to intensified jet penetration capabilities (Figure 2.a). Conversely, as the abrasive flow rate rises, there is a noticeable reduction in the thickness measurements, indicating improved cutting efficiency and precision, attributable to the increased availability of abrasive particles to erode the material more effectively (Figure 2.b). Similarly, an increase in feed rate leads to a decrease in both TKW and BKW, which could be attributed to reduced interaction time between the abrasive jet and the material, resulting in thinner cuts (Figure 2.c). However, the variation in standoff distance shows a less pronounced effect on the cutting thickness, implying that its influence might be overshadowed by the other more dominant operational parameters (Figure 2.d). This analysis highlights the intricate balance and interplay between different machining conditions that can be optimized for enhanced cutting performance in abrasive water jet machining processes.

Exp. Number	Pressure [MPa] ( <i>P</i> )	Abrasive flow rate [g/min] ( <i>m<sub>v</sub></i> )	Feed rate (mm/min) ( <i>V</i> )	Standoff distance [mm] ( <i>d</i> )	TKW [mm]	BKW [mm]
1	200	100	200	2	1.01	0.98
2					1.00	0.98
3					1.01	0.92
4		150	300	4	0.98	0.95
5					0.95	0.95
6					0.97	0.95
7		200	400	6	0.95	0.93
8					0.94	0.93
9					0.95	0.93
10	250	100	300		1.10	1.00
11					1.10	1.05
12					1.00	1.05
13		150	400	2	1.03	1.04
14					1.06	1.01
15					1.03	1.04
16		200	200	4	0.98	0.93
17					0.99	0.93
18					0.99	0.93
19	300	100	400		1.18	1.14
20					1.18	1.14
21					1.18	1.14
22		150	200	6	1.11	1.03
23					1.11	1.03
24					1.11	1.03
25		200	300	2	1.06	1.01
26					1.06	1.01
27					1.02	1.01

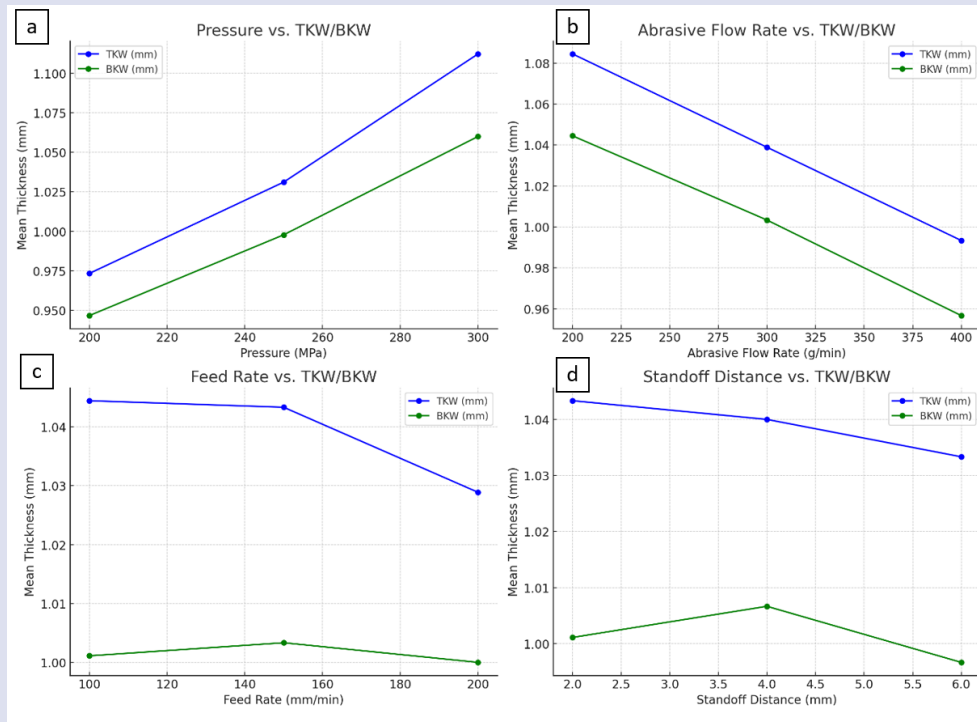
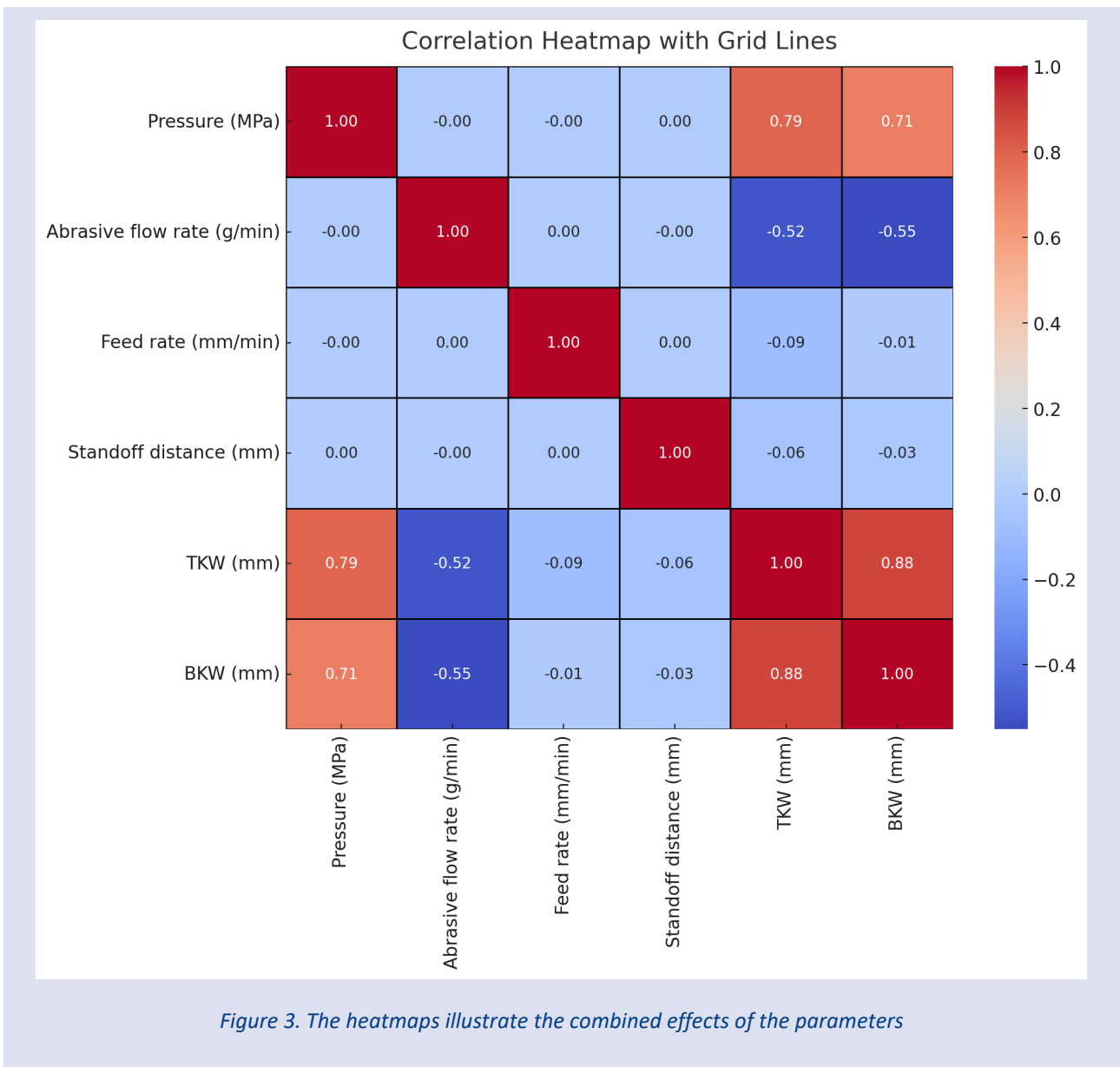


Figure 2. Effects of operational parameters on mean cutting thicknesses (TKW and BKW) in AWJ machining a.) Pressure b.) Abrasive flow rate c.) Feed rate d.) Standoff distance



The combined effects of these parameters can be analyzed using interaction plots, which show how two parameters together influence the kerf widths. Understanding these interactions is crucial for optimizing the AWJ process. Understanding the combined effects of multiple parameters on TKW and BKW is crucial for optimizing the AWJ process. The interplay between  $P$ ,  $m_v$ ,  $V$ , and  $d$  significantly influences machining performance. Higher pressure combined with increased abrasive flow rate generally results in greater kinetic energy and more effective material removal, widening both TKW and BKW due to the enhanced abrasive action. High pressure coupled with a lower feed rate often leads to increased exposure time of the material to the jet, resulting in wider kerf widths, whereas a high feed rate at high pressure might reduce the kerf width due to shorter interaction time. Increasing both pressure and standoff distance can significantly affect the kerf widths as high pressure ensures effective cutting, but a larger standoff distance may cause the jet to spread more, widening the kerf

widths. A high abrasive flow rate paired with a low feed rate usually results in a wider kerf due to prolonged cutting action, while a high feed rate with a high abrasive flow rate may balance out, depending on the material's response to rapid cutting. Higher abrasive flow rates and increased standoff distances can lead to wider kerf widths as the spread of the jet and the quantity of abrasives erode the material more effectively. A low feed rate with a large standoff distance typically results in wider kerf widths due to extended exposure and jet spread, whereas a high feed rate with a small standoff distance may lead to narrower kerfs. Understanding these combined effects is crucial for optimizing the AWJ process, as each combination influences TKW and BKW differently, and the optimal settings depend on the specific machining task requirements, such as precision, material properties, and desired surface quality. In conclusion, careful consideration and optimization of  $P$ ,  $m_v$ ,  $V$ , and  $d$  can lead to improved machining performance and higher quality outcomes.

The heatmaps (Figure 3) illustrate the combined effects of pressure and abrasive flow rate on the TKW and BKW in the AWJ machining process. As observed in the heatmaps, both TKW and BKW tend to increase with higher pressure and abrasive flow rates. This trend is particularly evident at higher pressure levels, where the increased kinetic energy and abrasive particle flow contribute to wider cuts. The heatmaps also show that the BKW is generally narrower than the TKW, reflecting the jet's diminishing energy as it penetrates deeper into the material. These visualizations highlight the critical influence of operational parameters on the precision and quality of the machining process.

The main effects on TKW and BKW indicate that increasing pressure generally increases both TKW and BKW, suggesting that higher pressure results in wider cuts at both the top and bottom surfaces. Similarly, higher abrasive flow rates lead to increases in both TKW and BKW, implying that more abrasive material contributes to wider kerfs. Conversely, increasing feed rates tend to decrease both TKW and BKW, meaning faster feed rates result in narrower cuts. Additionally, a greater standoff distance generally results in wider TKW and BKW, as the increased distance between the nozzle and the workpiece affects the spread of the water jet. These insights into how each parameter individually influences the kerf widths are valuable for optimizing the machining process. The heatmaps provide a comprehensive visualization of the interactions between various operational parameters -  $P$ ,  $m_v$ ,  $V$ , and  $d$  - on the mean values of TKW and BKW in AWJ machining. The analysis reveals that higher pressures consistently result in increased cutting thicknesses for both TKW and BKW, indicating that greater pressure enhances the jet's penetration capability. However, the abrasive flow rate exhibits a more complex relationship: moderate levels of abrasive flow rate achieve optimal cutting thickness, while extremes (either too high or too low) result in suboptimal performance, likely due to inefficient material removal or excessive dispersion of the jet. Similarly, feed rate shows a negative correlation with TKW and BKW, where increased feed rates lead to reduced cutting thicknesses, suggesting a faster traversal speed limits the interaction time between the jet and

material, thus reducing the cut depth. Standoff distance, though less influential than other parameters, still plays a role, with lower standoff distances generally favoring better cutting performance by maintaining the jet's focus and energy density. The interaction plots between pairs of parameters underscore the importance of balanced settings; for instance, combining higher pressure with moderate abrasive flow rate and feed rate yields the best results. These insights are crucial for optimizing the AWJ machining process, ensuring efficient material removal while maintaining precise control over the cut dimensions.

The optimal parameters for minimizing kerf widths in AWJM machining. For the smallest BKW of 0.92 mm, (Figure 4.a) the ideal settings are 200 MPa pressure, 200 g/min abrasive flow rate, 200 mm/min feed rate, and a 6 mm standoff distance, which also resulted in a TKW of 1.01 mm. Conversely, the minimum TKW of 0.94 mm (Figure 4.b) was achieved with 200 MPa pressure, 400 g/min abrasive flow rate, 150 mm/min feed rate, and a 2 mm standoff distance. These findings emphasize the necessity of fine-tuning process parameters to enhance cutting precision and efficiency in AWJM, highlighting that different optimal settings are required to minimize upper and lower kerf widths (Table 4).

The regression analysis for TKW (Table 5) shows that none of the process parameters ( $P$ ,  $m_v$ ,  $V$ , and  $d$ ) are statistically significant predictors at the 0.05 level, as indicated by their high p-values. The ANOVA results for TKW (Table 6) support this, with none of the factors having a significant effect on TKW, as all p-values exceed 0.05. Similarly, the regression analysis for BKW (Table 7) indicates that only Pressure is marginally significant ( $p=0.051048$ ), while other parameters are not significant predictors. The ANOVA for BKW (Table 8) confirms this, showing a near-significant effect of Pressure on BKW ( $p=0.051048$ ), with other parameters not having significant effects. In summary, pressure has a marginal impact on BKW but not on TKW, while abrasive flow rate, feed rate, and standoff distance do not significantly influence either kerf width.

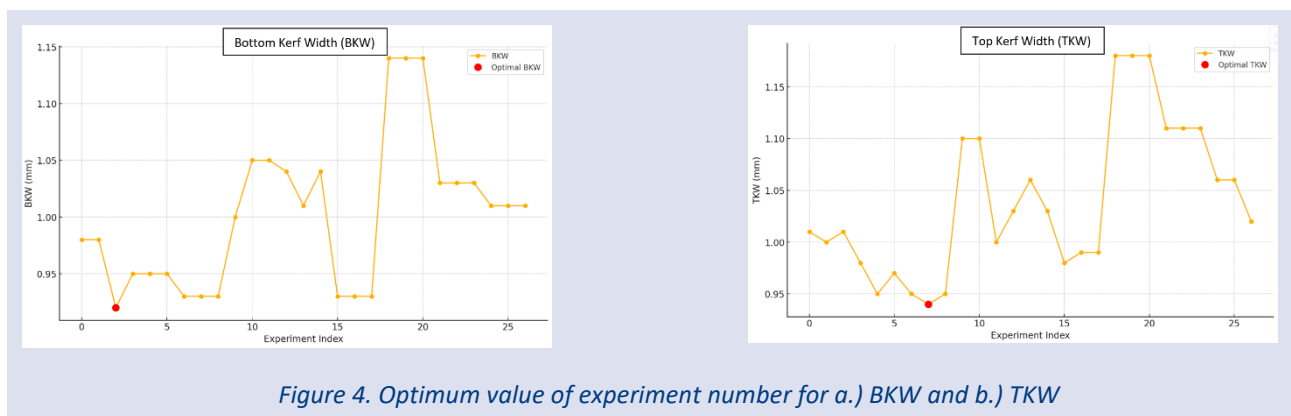


Figure 4. Optimum value of experiment number for a.) BKW and b.) TKW



Table 4. Optimum kerf width parameters and their values.

AWJ Parameters	Optimum parameters	
	TKW	BKW
Pressure [MPa]	200	200
Feed rate [mm/min]	150	200
Abrasive flow rate [g/min]	400	200
Standoff distance [mm]	2	6
Optimum kerf width	0.94	0.92

Table 5. Regression analysis table for TKW.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
Intercept	0.008411	1	2.129423	0.158627
Pressure	0.002468	1	0.624916	0.437665
Abrasive_Flow_Rate	0.002936	1	0.74331	0.397903
Feed_Rate	0.005498	1	1.392021	0.250665
Standoff_Distance	0.086895	22		

Table 6. ANOVA for TKW.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
Pressure	0.008411	1	2.129423	0.158627
Abrasive_Flow_Rate	0.002468	1	0.624916	0.437665
Feed_Rate	0.002936	1	0.74331	0.397903
Standoff_Distance	0.005498	1	1.392021	0.250665
Residual	0.086895	22		

Table 7. Regression analysis table for BKW.

	Coef.	Std.Err.	t	P> t
Intercept	0.858518	0.085631	10.02579	1.15E-09
Pressure	0.000788	0.000382	2.063618	0.051048
Abrasive_Flow_Rate	5.82E-06	0.000157	0.037028	0.970797
Feed_Rate	-9.7E-05	0.000176	-0.55128	0.587001
Standoff_Distance	0.003621	0.00733	0.493988	0.626211

Table 8. ANOVA for BKW.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
Pressure	0,015045	1	4,25852	0,051048
Abrasive_Flow_Rate	4,84E-06	1	0,001371	0,970797
Feed_Rate	0,001074	1	0,303905	0,587001
Standoff_Distance	0,000862	1	0,244024	0,626211
Residual	0,077723	22		

## Discussions

The findings of this study reveal that while pressure marginally impacts the bottom kerf width (BKW), other parameters such as abrasive flow rate, feed rate, and standoff distance do not significantly influence either the top kerf width (TKW) or BKW. These results align partially with previous research, where pressure has been noted to play a crucial role in abrasive waterjet machining, enhancing material removal rates and affecting kerf geometry (Agarwal & Broutman, 2017; Mallick, 2007). However, the insignificant effect of abrasive flow rate and feed rate contrasts with some studies that highlight their importance in optimizing cutting performance (Singh & Bhatnagar, 2006; Isbilir & Ghassemieh, 2013). These discrepancies could be attributed to differences in experimental setups, material properties, and specific machining conditions. The lack of significance for standoff distance is consistent with findings from Davim (2012), who noted its secondary role compared to other parameters. Further research incorporating a broader

range of parameters and more advanced statistical analyses, such as interaction effects, could provide deeper insights into the complex dynamics of AWJ machining of GFRP composites.

## Conclusion

AWJM is a precise and efficient method for cutting various materials, including metals, composites, and polymers. This study investigated the effects of different process parameters on the TKW and BKW, aiming to identify optimal settings for minimizing these widths. This study demonstrates that by carefully optimizing AWJ machining process parameters, it is possible to achieve desirable kerf characteristics. Specifically, achieving smaller kerf widths, both upper and lower, can significantly enhance precision and material efficiency in AWJM processes. The identified optimal settings—200 MPa pressure, 200-400 g/min abrasive flow rate, 150-200 mm/min feed rate, and 2-6 mm standoff distance—

provide a useful guideline for improving cut quality and minimizing material waste in various cutting applications.

- **Top kerf width (TKW):** The smallest TKW of 0.94 mm was achieved with a  $P=200$  MPa, an  $m_v = 400$  g/min, a  $V = 150$  mm/min, and a  $d = 2$  mm. This indicates that lower pressure and higher abrasive flow rates are effective in reducing the upper kerf width.
- **Bottom kerf width (BKW):** The smallest BKW of 0.92 mm was achieved with a  $P=200$  MPa, an  $m_v = 200$  g/min, a  $V = 200$  mm/min, and a  $d = 6$  mm. This suggests that lower abrasive flow rates and higher feed rates are beneficial for minimizing the lower kerf width.
- **Water Pressure (P):** Higher water pressure generally helps in reducing kerf taper by maintaining a uniform energy distribution, but beyond a certain point, it may increase kerf widths. Optimal TKW and BKW were found at 200 MPa, showing the significance of balancing pressure.
- **Abrasive Flow Rate ( $m_v$ ):** Optimal abrasive flow rates were 400 g/min for TKW and 200 g/min for BKW. This highlights the complex influence of AFR on kerf widths, necessitating careful optimization.
- **Feed rate (V):** Higher traverse speeds were effective in minimizing BKW. The optimal BKW was achieved at a feed rate of 200 mm/min, indicating the importance of optimizing feed rates for better cut quality.
- **Standoff Distance (d):** Smaller standoff distances significantly reduce kerf widths and improve cut precision. Optimal TKW was achieved with a standoff distance of 2 mm, but very small distances should be managed to avoid excessive nozzle wear and cut irregularities.

In future studies, researchers can focus on determining the optimum kerf width for composite materials with different components. On the other hand, as the size of the workpiece increases, the optimization of the kerf width becomes more important. Therefore, within the framework of the limitations of the abrasive water jet process, the optimization of the kerf width can be achieved by evaluating the material thickness together.

## Acknowledgements

The authors would like to thank "CT Cutting Technologies and Machinery Industry Trade Co. Ltd." in Istanbul/Turkey for their assistance in the experimental works.

## References

- Abrão, A. M., Rubio, J. C. C., Faria, P. E., & Davim, J. P. 2008. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials & Design*, 29(2), 508-513. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016>
- Agarwal, B. D., & Broutman, L. J. 2017. *Analysis and Performance of Fiber Composites*. John Wiley & Sons.
- Davim, J. P. (Ed.). 2012. *Machining of Polymer Composites*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-938-3>

Friedrich, K., & Almajid, A. A. 2013. Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 20(2), 107-128. <https://doi.org/10.1007/s10443-012-9258-7>

Hegde, M. N., & Sharma, S. S. 2008. Performance evaluation of polymer matrix composites in electronic packaging. *Journal of Electronic Materials*, 37(5), 688-694.

Hocheng, H., & Tsao, C. C. 2003. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335-339. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00749-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00749-0)

Isbilir, O., & Ghassemieh, E. 2013. Evaluation of the influence of drill point angle and feed rate on delamination in drilling GFRP. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(23), 1766-1781.

Kartal, F., & Kaptan, A. 2024. Artificial neural network and multiple regression analysis for predicting abrasive water jet cutting of Al 7068 aerospace alloy. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(2), 516-528. <https://doi.org/10.14744/sigma.2023.00102>

Kartal, F., & Kaptan, A. 2023. Influence of abrasive water jet turning operating parameters on surface roughness of ABS and PLA 3D printed parts materials. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(2), 184-190. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1247636>

Kaw, A. K. 2005. *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420058291>

Khashaba, U. A. 2004. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures*, 63(3-4), 313-327. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00180-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00180-6)

Mallik, P. K. 2007. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005981>

Rahme, G., Khashaba, U. A., & Hady, M. S. A. 2011. Machinability of glass fibre-reinforced polymer composites: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5-8), 775-790.

Rubio, L., Abrao, A. M., & Davim, J. P. 2008. Effects of high speed in the drilling of glass fiber reinforced plastic. *Journal of Composite Materials*, 42(13), 1365-1379.

Sarasini, F., Santulli, C., & Valente, T. 2009. Hybrid composite materials: An overview. *Composite Materials*, 20, 105-132.

Singh, I., & Bhatnagar, N. 2006. Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study. *Materials & Design*, 27(10), 872-880.