

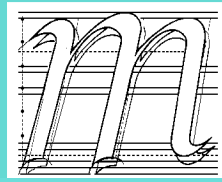
ISSN 2667-4297

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 21

Sayı: 1

Mayıs 2023



*m a t i m*

**ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar  
Eğitim ve Araştırma Vakfı - ANKARA**

## Yayın Kurulu

**Editör:** Erhan İlhan Konukseven  
**Yardımcı Editör:** Hakan Kalkan  
**Yardımcı Editör:** Oğuzhan Yılmaz  
**Yardımcı Editör:** Sezer Özerinç

ODTÜ  
Atılım Üniversitesi  
Gazi Üniversitesi  
ODTÜ

## Kurul Üyeleri

Metin Akkök  
Can Çoğun  
Mustafa Bakkal  
Cemal Merih Şengönül  
Erhan Budak  
İsmail Durgun  
Volkan Esat  
Mehmet Fırat  
Hüseyin Filiz  
Necdet Geren  
Mustafa İ. Gökler  
Yiğit Karpat  
İsmail Lazoğlu  
İzzet Özdemir  
Ferruh Öztürk  
Evren Yasa  
İ. Ethem Saklakoğlu  
Halim Meço  
Yusuf Kaynak  
Ali Oral  
Haydar Livatyalı

ODTÜ  
Çankaya Üniversitesi  
İTÜ  
Atılım Üniversitesi  
Sabancı Üniversitesi  
e- Danışman Bursa  
ODTÜ Kuzey Kıbrıs  
Sakarya Üniversitesi  
Gaziantep Üniversitesi  
Çukurova Üniversitesi  
ODTÜ  
Bilkent Üniversitesi  
Koç Üniversitesi  
İYTE  
Uludağ Üniversitesi  
Eskişehir  
EGE Üniversitesi  
FNSS  
Marmara Üniversitesi  
Balıkesir Üniversitesi  
YTÜ

## Danışma Kurulu

Bilgin KAFTANOĞLU  
Tuna BALKAN  
Melik DÖLEN  
Yiğit YAZICIOĞLU  
Orhan YILDIRIM

ATILIM Üniversitesi  
ODTÜ  
ODTÜ  
ODTÜ  
ODTÜ

## Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar  
Eğitim ve Araştırma Vakfı

Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü 1661.Sk. No:12 Beytepe/Ankara

Tel : +90 312 227 02 73 , Faks : +90 312 227 02 75

Web : <https://parlar.org.tr/matim>

e-mail : [matim@parlar.org.tr](mailto:matim@parlar.org.tr)

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 21 Sayı: 1

JOURNAL OF  
MECHANICAL DESIGN  
AND PRODUCTION

Vol: 21 No: 1

ISSN 2667-4297

## TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfına aittir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

## DİZGİ

Hülya SEVER

## BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

## İÇİNDEKİLER

### ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Dikdörtgen Kesitli Disk Yayların Yapay Sinir Ağı İle Optimizasyonu 1

**Burak Aydoğdu  
Necmettin Kaya**

Yoğun Bakım, Yanık Tedavi ve Fizik Tedavi Kombine Hasta Karyolasının Kavramsal Tasarımı 12

**Harun Sümbül  
Ahmet Böğrek  
Abdurrahman Tunçer**

Görüntü Korelasyon Tekniği Kullanılarak ABS 3B Baskıların Kayma Modülü Analizi 22

**Masoud LATIFINAVID**

Bonding Additively Manufactured PLA Materials: Effects of Joint Scarf Angle and Substrate Raster Orientation 33

**Bahman Paygozar  
Recep M. Gorguluarslan**

Çözücü Değişirme Yöntemi ile Poli(eter eter keton) (PEEK) Kompozitlerinin Üretilmesi 43

**Merve Özkutlu Demirel**

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımını sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimiz, 2017 yılından beri TÜBİTAK DERGİPARK ortamında yayınlanmaktadır. (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim>) 2019 yılından beri elektronik yayına dönmemiz nedeni ile dergi ISSN-No 2667-4297 olmuştur. Dergimizin eski sayılarına da (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim/archive>) adresinden ulaşılmaktadır.

Ayrıca yeni web sayfamızda (<https://parlar.org.tr/matim>) Dergimiz ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Dergimiz 2021 yılından beri tekrar TR Dizin tarafından da önceki yıllarda olduğu gibi taranmaya devam edilmiştir.

(<https://app.trdizin.gov.tr/dergi/TWpreE1RPT0/makina-tasarim-ve-imalat-dergisi>)

Dergimiz, 1986-2022 yılları arasında Makine Tasarım ve İmalat Derneği bünyesinde yayınlanmıştır. Ancak, Derneğin 2022 yılı sonu itibarı ile faaliyetlerini sonlandırması üzerine, dergimiz 2023 yılından itibaren Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı bünyesinde yayına devam etmektedir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

Burak Aydoğdu\* Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
BursaNecmettin Kaya Bursa Uludağ Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Bursa

# Dikdörtgen Kesitli Disk Yayların Yapay Sinir Ağı İle Optimizasyonu

Ürün tasarımında analizlere ayrılan zamanın ve maliyetlerin önemli ölçüde azaltılmasında makine öğrenmesi kilit rol oynamaktadır. Makine öğrenmesi ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışması, sonlu elemanlar analizine kıyasla zaman ve maliyet açısından büyük üstünlükler sağlamaktadır. Bu çalışmada, disk yaylar için bir makine öğrenmesi modeli eğitilmiş, eğitilen modelin disk yayların boyut optimizasyonunda kullanılması amaçlanmıştır. Tek ve çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin uygulanabilirliğini göstermek için istenilen yay rijitliğine sahip çeşitli disk yayların optimizasyonu ele alınmış ve Pareto çözümleri sunulmuş çözümler incelenmiştir. Elde edilen tasarım parametreleri ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve yapay sinir ağı ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağı kullanımı ile optimizasyon sonucuna 4,5 saniye içerisinde ulaşılabildiği ve elde edilen sonuçların doğruluklarının (%96,16) sinir ağı başarı oranı (%97,67) ile benzer olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Disk Yay, Sonlu Elemanlar Analizi, Makine Öğrenmesi, Yapay Sinir Ağı, Optimizasyon, Genetik Algoritma

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 31 Ekim 2022

Kabul: 28 Ocak 2023

\*Sorumlu Yazar: Burak AYDOĞDU

Email: aydogdu.burak@outlook.com

DOI:

<https://doi.org/10.56193/matim.1197038>

Atf şekli/How to cite: Aydoğdu B., Kaya N., Dikdörtgen Kesitli Disk Yayların Yapay Sinir Ağı İle Optimizasyonu. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(1): 1-11.

## GİRİŞ

Rekabetin yoğun olarak yaşandığı günümüzde ürünlerin kısa zamanda, düşük maliyetlerde üretilmesi ve tasarım doğrulama analizlerinin yapılması firmaların pazarda yer alabilmesi açısından önem taşımaktadır [1]. Mühendislikte sonlu elemanlar metodu (SEM) veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak yapılan tasarım doğrulama analizlerinin süreleri modelin karmaşıklığına, ağ yapısına veya kullanılan bilgisayarın yeterliliğine göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar neticesinde saniyeler ile günler arasında değişen sürelerle ihtiyaç duyulurken optimizasyon gibi yüzlerce kez iterasyon yapılması gerekebilen yöntemler ile süreler daha da uzamaktadır.

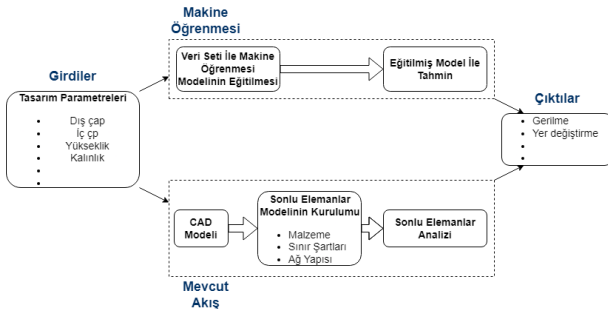
Ürünlerde açığa çıkacak olan gerilme ve yer değiştirmelerin makine öğrenmesi modellerine tahmin ettirilmesi ve optimizasyon problemlerine ayrılan zamanın ve maliyetlerin önemli ölçüde

elemanlar modelinden her iterasyon için gerekli sonuçların alınması çok sayıda iterasyon için çok sayıda sonlu elemanlar çözümü gerektireceğinden hesaplama süreleri açısından uygun olmamaktadır. Bu nedenle genellikle sonlu elemanlar modeli yerine geçen vekil model yaklaşımı kullanılmaktadır.

Bu makalede ise vekil model yerine makine öğrenmesi yaklaşımı kullanılması önerilmiştir. Önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu yöntemde belirli sayıda sonlu elemanlar analizi ile veri seti oluşturulur. Bu veri seti ile makine öğrenmesi eğitilir. Farklı tasarım girdileri için sonuçlar hızlı bir şekilde makine öğrenmesi modelinden elde edilir.

Analizlerin bir kez yapılarak yeterli sayıda veri ile eğitilmiş başarılı bir makine öğrenmesi modelinin kurulması hem zamanı hem de maliyetleri SEM'e kıyasla önemli ölçüde azaltabilmektedir [2].

Mevcut akışta gereken uzun zamanlardan kaçınmak adına, makine öğrenmesi kullanılarak bir model ve yeni iş akışının geliştirilmesi optimizasyon çalışmasında kullanılması istenen değerlerin saniyeler içerisinde elde edilmesini sağlayabilmektedir. Makine öğrenmesi modellerinin hızlı ve başarılı sonuçlar üretmesi optimizasyon problemlerinde makine öğrenmesi tekniklerinin kullanılmasını ilgi çekici hale getirmektedir.



Şekil 1. SEA ile makine öğrenmesinin örnek bir akış diyagramı

Çalışmada, makine öğrenmesi modelinin sonlu elemanlar modeline kıyasla optimizasyon çalışmalarındaki başarısının (ürün geliştirmeye ayrılan kaynakların azaltılması) ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaçla örnek olarak, Abaqus [3] yazılımı kullanılıp bir disk yay için sonlu elemanlar modeli kurulması ve veri seti eldesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, yapay sinir ağının veri seti üzerindeki başarıları incelenerek başarıyı arttıracak uygun parametreler aranmıştır. Son olarak ise elde edilen model optimizasyon çalışmasında kullanılmış ve istenilen yay rijitliğine sahip disk yay parametrelerine bir genetik algoritma ile ulaşılmaya çalışılmıştır. Pareto çözümleri dahil olmak üzere elde edilen sonuçlar (yay rijitliği, hacim, zaman) incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

## LİTERATÜR TARAMASI

Müller vd. [4] yaptıkları çalışmada, kaçınılması mümkün olmayan otomobil kazalarında doğru kararı vermenin insanoğlu için neredeyse imkânsız olduğunu belirterek, birbirine paralel olarak çalışacak iki paralel yol (makine öğrenmesi ve fiziksel olasılık) ile çözüm önerisinde bulunmuşlardır. İlk yol, sonlu elemanlar analizlerinin verileri ile eğitilmiş bir makine öğrenmesi modeli, ikinci yol ise kaza kuvvetlerini ve ivmelerini tahmin eden bir iki-boyutlu kütle-yay-damper modelini içermektedir. Birlikte, her iki yol da aynı kaza senaryosunun iki farklı perspektifini sağlayarak gerçek zamanlı olarak doğru ve güvenilir bir tahmin sonucunu ortaya koymaktadırlar. Yapılan çalışma sonucunda görülmüştür ki, sunulan iki-boyutlu modelin eğik çarpışmalar da dahil olmak üzere çeşitli

senaryoların hız ve çarpışma kuvveti ilerlemesini tahmin etmede uygundur.

Ma vd. [5], doğrusal olmayan (nonlinear) mafsallı yapılar için giderek artan verimli ve doğru modelleme gereksinimlerini karşılamak için sonlu elemanlar modeline ve derin öğrenme tekniklerine dayanan yeni bir karma modelleme yöntemi sunmuşlardır. Sunulan karma modelleme yönteminin performansı, doğrusal olmayan mafsallara sahip bir konsol plakasına odaklanan bir çalışma ile test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sunulan karma modelin doğrusal olmayan yapıların davranışlarının tahminindeki yeterliliğini göstermektedir.

Qi vd. [6] yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve makine öğrenmesine dayanarak karbon fiberin mekanik özelliklerinin tahminini amaçlamışlardır. Çalışmada karar ağacı algoritması kullanımı uygun görülmüş ve aşırı öğrenmeden (overfitting) kaçınmak için uygun ağaç derinliği aranmıştır. Elastisite ve kayma modülünün tahmini için uygun ağaç derinliği belirtilmiştir.

Karina vd. [7], SEM ve deney sonuçlarından elde ettikleri korozyona uğramış çelik levhaların yüzey ve malzeme özelliklerini kullanarak uygulaması basit, yüksek doğruluk oranına sahip ve maliyetsiz olan bir yapay sinir ağı (YSA) modeli geliştirmişler ve eğitilmiş modeli kullanarak çelik levhanın çekme dayanımını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, 10 farklı malzeme özelliği ağın girdisi (feature) olarak belirlenmiş ve girdi sayısı azaltılarak 5 ayrı senaryo için 5 farklı sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Modellerin başarılarının değerlendirilmesinde ortalama mutlak hata (mean absolute error-MAE) kullanılmış ve en düşük MEA oranını %3,7 ile 10 parametrenin de ağ girdisi olarak kullanıldığı modelin ürettiği görülmüştür.

Liang vd. [8], makine öğrenmesi tekniklerini kullanarak aorttaki (şahdamarı) gerilme dağılımını doğrudan hesaplayacak bir derin öğrenme modeli geliştirmişlerdir. Model, sonlu elemanlar analizi (SEA) girdilerini derin öğrenme modelinin girdileri olarak alıp, SEA adımlarını es geçerek aort damarındaki gerilme dağılımını çıktı olarak hesaplayacak doğrultuda tasarlanmış ve eğitilmiştir. Eğitilmiş modelin aort damarındaki gerilme dağılımını ortalama %0,492 ile %0,891 hata ile tahmin etme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.

Phellan vd. [2] yaptıkları araştırmada, doğrudan SEY'e dayanan mekanik simülasyonların ciddi derecede zaman gerektirdiğini belirtmiş ve bu durumun gerçek zamanlı sonuç gerektiren uygulamalarda SEY'in kullanımını kısıtladığı

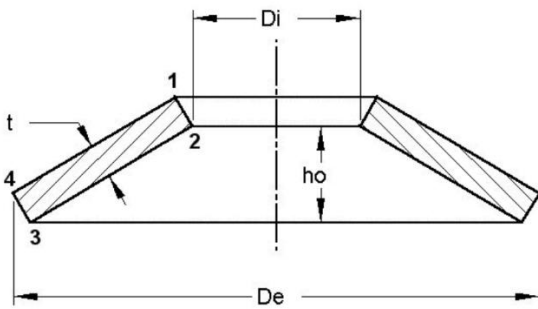
belirtmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonucunda 41 adet çalışma incelenmiş ve bunların 32 tanesinde SEY'e dayanan simülasyonlar ile eğitilmiş makine renmesi modeli kullanıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmaların 35'inde ise tercih edilen makine renmesi algoritmasının yapay sinir ağı olduğu belirtilmiştir. SEY'ne dayanan mekanik simülasyonların makine renimi kullanarak hızlandırılması SEY'nin benimsenmesine ve analiz için gereken zamanın azalmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır.

Literatürde makine renmesi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları az olmakla birlikte gelişen yapay zek teknolojileri sayesinde ilgi çekici hale gelmektedir. Çalışmada, yapay sinir ağı kullanılarak bir makine elemanının boyut optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve uzun süreler gerektiren SEM yerine hızlı ve başarılı sonuçlar üretme avantajına sahip yapay sinir ağı kullanımının ürün geliştirme çalışmalarına sağlayacağı faydalar sunulmuştur.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Disk Yaylar

Tüm makine elemanları dış yük altında deformasyona uğrarlar; deformasyon elastik bölge sınırları içindeyse, yk ortadan kalkınca makine elemanı da başlangıçtaki konumunu alır. Genelde çok kk olan bu deformasyonlar yay adını verdiğimiz özel geometriye sahip elemanlarda oldukça yüksektir, bu nedenle yaylar elastik elemanlar altında da ifade edilirler [9]. Disk yay da denilen tabak yaylar kesilmiş koni [10] ya da eksenleri yönünde  $h_0$  kadar konikleşmiş halkalardır (şekil 2) [9], [11].



şekil 2. Disk yay tasarım parametreleri [1]

Disk yaylar birbirine sabitlenen iki yüzey arasında n yükleme oluşturmak, takım tezgahlarında ve valflerde gergi elemanı olarak, krenlerde ve taşıtlarda titreşim sönümleyici olarak uygulama alanı bulmaktadır [9], [10]. Tek yayın gereken yükü taşıyamadığı durumlarda aynı yönde st üste (yay paketi) veya ters yönde st üste (yay sütunu) koyarak istenilen özellikte yay elde etmek mümkündür [9]. rnek bir uygulama şekil 3'te gösterilmiştir.



şekil 3. Disk yayların bir kullanım rneği [9].

şekil 2'de de görüldüğü üzere disk yaylar dört geometrik parametre ile tanımlanabilir: i ( $D_i$ ) ve dış ( $D_e$ ) ap, kalınlık ( $t$ ) ve yükseklik ( $h_0$ ). Konikleşmiş şekilleriyle basit olarak görünen disk yayların aksenal yönlerindeki yk nedeniyle gerilme dağılımı karmaşık bir hal almaktadır [11].

Dikdörtgen kesitli disk yaylar, kesitin bir eksen etrafında döndürülmesi ile elde edilebilir. Disk yayın hacminin hesaplanması için Pappes-Gulden teoremi kullanılırsa hacim ifadesi:

$$V = 0,7854 \sqrt{(D_e + D_i)^2 (D_e^2 - 2D_e D_i + D_i^2 + 4h_0^2)} t^2 \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir [1].

### Makine renmesi

Yapay zek algoritmalarından biri olan makine renmesi, istediğimiz sonuçlara basit, hızlı ve ucuz bir yöntemle ulaşmamızı sağlarken yüksek boyutlu karmaşık ve lineer olmayan ilişkilerle başa çıkabilmesi nedeniyle mühendislik problemlerinin üzümünde alternatif bir zm yolu sunmaktadır [7], [12]. Makine renmesi sanayide, üretim süreçlerinin planlanması, kalite kontrol, bakım zamanlarının belirlenmesi, lojistik, robotik ve üretim hatlarındaki uygulamalarda yer almaktadır [13]. Makine renmesi algoritması geliştirme süreci 4 temel adımdan oluşur. Bunlar;

1. *Problemin tanımlanması*: Mühendislik probleminin tanımlanıp (başlangıç ve sınır şartları, malzeme özellikleri vb.) bir sonlu elemanlar programında üzülerek veri setinin elde edilmesi.
2. *Veri setinin hazırlanması*: Elde edilen veri setinin incelenerek veri ön işlemenin (boyut indirgeme, öznitelik seçimi, verinin ölçeklendirilmesi vb.) gerçekleştirilmesi.
3. *Model seçimi ve eğitimi*: Çok sayıda algoritmanın mevcut olması veri setine



uygun modelin belirlenmesini gerekli kılar. Modellerin başarı oranları ( $R^2$ -belirlilik katsayısı, MAE, MSE-mean square error) ve karmaşıklığı (gerekli eğitim süresi, işlem gücü vb.) incelenerek uygun model belirlenmelidir.

4. *Makine öğrenmesinin işleme alınması:* Uygun model belirlendikten sonra ilgili çalışmalar (optimizasyon vb.) için modelin kullanılması [12].

Yapay sinir ağları, canlılardaki biyolojik sinir ağlarından esinlenen bilgi işlem sistemleridir. Yapay sinir ağları, bir karara varmak için birden fazla işlem aşamasını gerçekleştiren doğrusal modellerin genellemeleri olarak görülebilir.

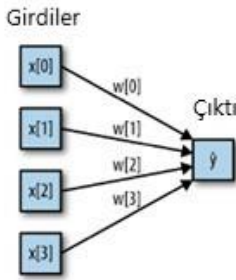
$$\hat{y} = w_0 * x_0 + w_1 * x_1 + \dots + w_n * x_n + b \quad (2)$$

Denklem 2 ile verilen eşitlik bir çoklu doğrusal regresyon denkleminin benzeridir. Burada:

$X$ : Girdiler,

$\omega$ : Geri besleme (backpropagation) ile güncellenen ağırlıklandırma,

$\hat{y}$ : Girdilerin ağırlıklandırılmış toplamı, yapay sinir ağının tahmin değeridir [14].



Şekil 4. Girdilerin ve çıktının node (düğüm) olarak gösterildiği bir ağ [10].

Kayıp fonksiyonu, tahminleri ( $\hat{y}$ ) hedeflerle ( $y$ ) karşılaştırır ve ağın tahminlerinin beklenenle ne kadar iyi eşleştiğinin bir ölçüsü olan bir kayıp değeri üretir. Optimizasyon fonksiyonu, bu kayıp değerini sinir ağının ağırlıklandırmalarını ( $\omega$ ) güncellemek için kullanır [15].

## Optimizasyon

Bir çalışmada en uygun değere ya da en iyi çözüme deneme-yanılma yöntemi yerine optimizasyon ile ulaşmak mümkündür ve optimizasyonun amacı harcanan kaynakları en aza indirerek en yüksek bilgiye ulaşmadır denilebilir [16], [17]. Optimizasyon yöntemleri iki grupta toplanabilir: gradyan tabanlı (gradient-based) ve gradyan tabanlı olmayanlar (non-gradient-based). Gradyan tabanlı optimizasyon tipindeki iki dezavantaj yakınsamanın yavaş gerçekleşmesi ve global optimum sonuca ulaşmanın garanti

edilmemesidir [18]. Başlangıç noktalarının rastgele olarak dağıtıldığı gradyan tabanlı olmayan optimizasyonda (genetik algoritmalar (GAs), benzetimli tavlama (SA) vb.) süreç, yakınsama kriteri karşılanana kadar her bir adımda yeni popülasyon önceki adımdaki örneklerin amaç fonksiyonu ile olan ortalama uyumuna bakılarak edinilen bilgiler doğrultusunda güncellenmesiyle devam eder [18]–[20].

Genetik algoritmalar aynı anda farklı alanlardaki çözümleri inceleyerek sadece yerel minimuma ulaşmayı değil aynı zamanda bir çözüm uzayı, tasarım uzayı bulmayı amaçlar [21], [22]. Bu rastgele dağıtılan noktalar ile farklı alanlardaki çözümleri incelemek yüksek işlem gücü gerektirmesine rağmen yerel bir çözüm yerine global optimum noktanın belirlenebilmesine olanak sağladığından bu gerekliliğe değen bir harcamadır [23]. Genetik algoritmalar adından da anlaşılacağı üzere doğal seçimden, türlerin kökeni teorisinden esinlenilerek geliştirilmiştir ve doğada, güçlü olanın genlerini sonraki nesillere aktarmasına dayanır [17], [21], [23].

Birçok mühendislik problemi maliyeti azaltmak ve performansı arttırmak gibi birden fazla amacı içerisinde barındırır ki, bunlar zorlu ancak gerçekçi problemlerdir. Pareto çözümleri ağırlıklandırılmış toplamlar gibi tek bir sonucun olduğu çözümlere kıyasla daha çok tercih edilir [21]. Pareto çözümlerinin olduğu bir çoklu amaç fonksiyonunda tek bir çözüm yerine her biri kabul edilebilir seviyede olan birden çok çözüm, bir çözüm seti elde etmek amaçlanır [19], [21], [24]. Bir amaç fonksiyonundan feragat edilerek diğerine ağırlık verilebileceği düşünüldüğünde Pareto çözümleri, aranan sonucun amaç fonksiyonları arasında ödün vererek ulaşılmasına olanak sağlar [19], [21].

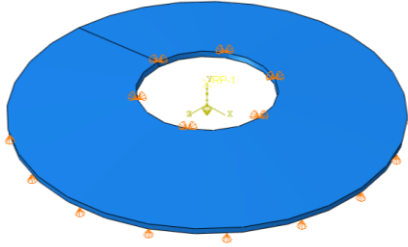
Gradyan tabanlı olmayan algoritmaların lokal optimuma yakalanmadan global optimumu bulabilme avantajı vardır. Bu nedenle çalışmada, gradyan tabanlı olmayan bir genetik algoritma kullanılmıştır.

## Yöntem

Daha önce de belirtildiği üzere kesitin bir eksen etrafında döndürülmesiyle elde edilebilecek olan disk yayların analizleri, Abaqus yazılımı kullanılarak Python programlama dilinde yazılan bir makro ile gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarım parametrelerinin el ile tek tek değiştirilip çözülmesi yerine bu işi otomatik olarak yapan bir kod geliştirilmiştir. Ele alınan disk yayların malzeme özellikleri elastisite modülü  $210000 \text{ N/mm}^2$ , Poisson oranı  $0.3$  ve akma gerilmesi  $450 \text{ N/mm}^2$  olarak kabul edilmiştir.

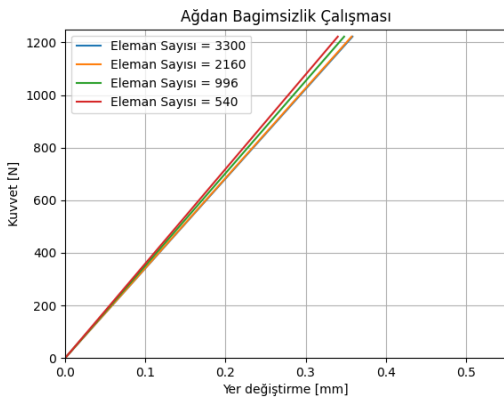


Abaqus yazılımında oluşturulan sonlu elemanlar modelinin sınır şartları Şekil 5'te görülebilir. Sınır şartları olarak, alt yüzeye temas eden dairesel bölge üzerindeki düğüm noktalarının düşey (y) doğrultudaki ve üst yüzeydeki dairesel bölge üzerindeki düğüm noktalarının yatay doğrultudaki (x ve z) yer değiştirme serbestlik dereceleri sıfırlanmıştır. Yayın üst kısmındaki yüzey ile referans noktası (RP-1) arasında coupling ilişkisi kurulmuş ve F kuvveti bu referans noktasına uygulanarak tanımlanmıştır.



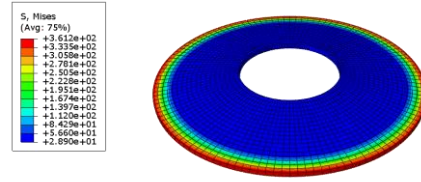
Şekil 5. Sonlu elemanlar modelinin sınır şartları

Çalışmada kullanılan Abaqus yazılımı öğrenci versiyonu olması nedeni ile düğüm ve eleman sayıları 1000 ile sınırlandırılmıştır. Dolayısıyla çalışmadaki yayların sonlu eleman büyüklükleri kontrol edilerek düğüm noktalarının 800 ile 1000 aralığında kalması sağlanmış ve sonlu eleman tipi hexahedron olarak seçilmiştir. Bu geometri için bu elemanlar sayılarının uygun olduğu söylenebilir. Şekil 6'da eleman sayılarına bağlı olarak yay rijitliklerindeki değişimler görülmektedir.

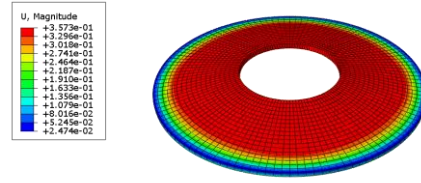


Şekil 6. Ağdan bağımsızlık çalışması

Sabit 1222 N [25] kuvvet altında farklı disk yay parametreleri için toplamda 256 adet analiz gerçekleştirilmiş, her bir analiz için elde edilen sonuçlar (gerilme ve yer değiştirme), düğüm noktaları ve hexahedron eleman sayısı tasarım parametreleri de dahil edilerek bir csv (comma-separated values) dosyasında kaydedilmiştir.

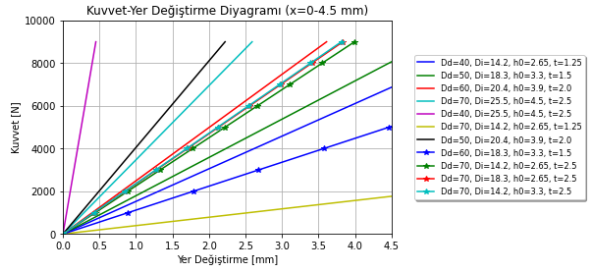


Şekil 7. 1222 N yüklemeye karşılık gelen von-Mises mukayese gerilme dağılımı (MPa)

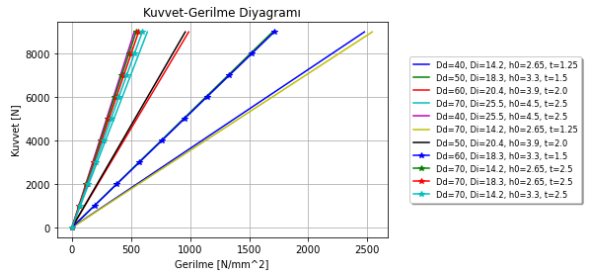


Şekil 8. 1222 N yüklemeye karşılık gelen toplam yer değiştirme dağılımı (mm)

Yapılan 256 adet analizden yanı sıra rijitliğini görmek üzere farklı kuvvetler altında 99 adet analiz daha gerçekleştirilmiştir. Elde edilen diyagramlar (Şekil 9 ve 10) incelendiğinde yayların lineer davranış sergilediği görülmektedir.



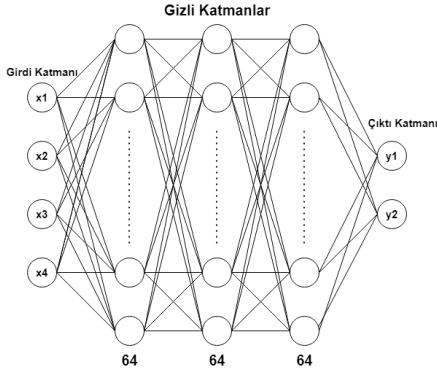
Şekil 9. Yay rijitlikleri



Şekil 10. Yayların gerilme-kuvvet eğrileri

Sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek elde edilen 256 adet veriden oluşan veri seti kullanılarak (%75 eğitim ve %25 test) yapay sinir ağı ile bir makine öğrenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Burada, tasarım parametreleri ( $D_e$ ,  $D_i$ ,  $t$  ve  $h_0$ ) girdiler, gerilme ve yer değiştirme değerleri çıktılar olarak belirlenmiş, 3 adet gizli katmana sahip yapay sinir ağı farklı epoch sayılarında incelenerek çalışmaya uygun ağ yapısı bulunması amaçlanmıştır.

Çalışmada kurulan yapay sinir ağı 4 adet girdiye sahip bir girdi katmanı, her biri 64 adet düğüm noktasından oluşan 3 gizli katman ve 2 adet çıktı değeriye sahip bir çıktı katmanından oluşmaktadır (Şekil 11). Katmanların aktivasyon fonksiyonu relu (rectified linear unit), optimizasyon fonksiyonu Adam [26], loss fonksiyonu mse ve başarı metriği olarak da mae seçilmiştir.



Şekil 11. Oluşturulan yapay sinir ağı

1222 N yük altında analizi gerçekleştirilen ve sinir ağı eğitilen yayların Şekil 9 ve 10'da belirttiği üzere davranışlarının lineer olması nedeni ile Denklem 3 ve 4 ile verilen eğim denklemleri yayların herhangi bir yük altındaki yer değiştirme ve gerilme değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir.

$$y_y = \frac{y}{1222} F_y \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{1222} F_y \quad (4)$$

Burada:

$\hat{y}$ : Yapay sinir ağının tahmin ettiği yer değiştirme değeri [mm],

$F_y$ : Tasarım parametreleri aranan yayın yükü [N],

$y_y$ : Hesaplanan yaylanma değeri [mm],

$\hat{\sigma}$ : Yapay sinir ağının tahmin ettiği gerilme değeri [ $N/mm^2$ ],

$\sigma_y$ : Hesaplanan gerilme değeri [ $N/mm^2$ ].

Standart bir optimizasyon problemi için tasarım değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonları tanımlanmalıdır.  $F_y$  yükü altında istenen yaylanma miktarına ( $y$ ) sahip yay için gerçekleştirilecek olan optimizasyon çalışmasına ait eşitlik ve eşitsizlikler aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir.

1. Tasarım Değişkenleri:

$$40 \leq D_e \leq 70 \quad (5)$$

$$14,2 \leq D_i \leq 25,5 \quad (6)$$

$$2,65 \leq h_0 \leq 4,5 \quad (7)$$

$$1,25 \leq t \leq 2,5 \quad (8)$$

2. Amaç Fonksiyonları:

$$\min f_1 = 0,5(y_y - y)^2 \quad (9)$$

$$\min f_2 = V \quad (10)$$

3. Kısıt Fonksiyonları:

$$g_1 = h_0 - y_y \geq 0 \quad (11)$$

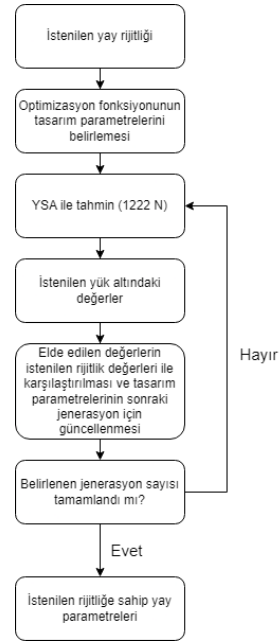
$$g_2 = \sigma_{Akma} - \sigma_y \geq 0 \quad (12)$$

Burada:

$y$ : Tasarım parametreleri aranan yayın yaylanma miktarı [mm],

$f_1$ : Yapay sinir ağının tahmin ettiği yaylanma miktarı ile istenilen yaylanma miktarı arasındaki uyum, minimize edilecek olan rijitlik fonksiyonu [mm],

$f_2$ : Denklem 1 ile hesaplanıp minimize edilecek olan hacim fonksiyonu [mm].



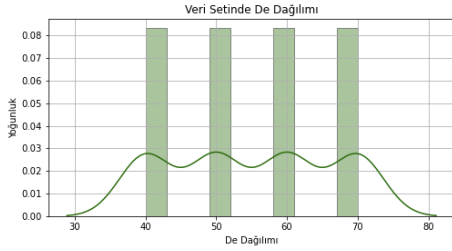
Şekil 12. Optimizasyon çalışmasının akış diyagramı

Optimizasyon çalışması için pymoo [27] kütüphanesinde yer alan algoritmalar kullanılmıştır. Tek amaçlı optimizasyon çalışması için GA (Genetic Algorithm) ve çok amaçlı optimizasyon çalışması için NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithms) [24] algoritması tercih edilmiştir. GA kullanılarak elde edilen çözümlerdeki başarılar incelenmiş ve çok amaçlı optimizasyon çalışması ile ulaşılan Pareto çözümleri sunulmuştur.

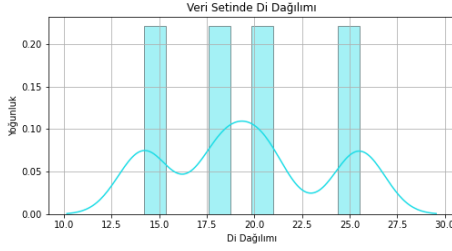
**Veri seti:** Veri setine ait minimum, maksimum, ortalama, varyans ve standart sapma değerleri Tablo 1'de; dış çap, iç çap, yükseklik, kalınlık, gerilme ve yer değişiminin veri seti içerisindeki dağılımları Şekil 13, 14, 15, 16, 17 ve 18'de verilmiştir.

Tablo 1. Veri setine ait özellikler

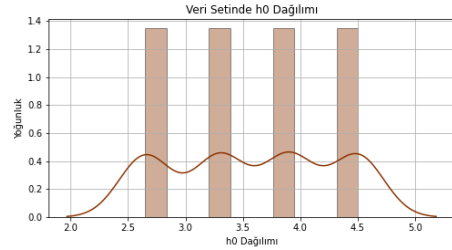
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Varyans	Standart Sapma
$D_e$	40,000	70,000	55,000	125,000	11,180
$D_i$	14,200	25,500	19,600	16,575	4,071
$h_0$	2,650	4,500	3,588	0,473	0,688
$t$	1,250	2,500	1,813	0,230	0,480



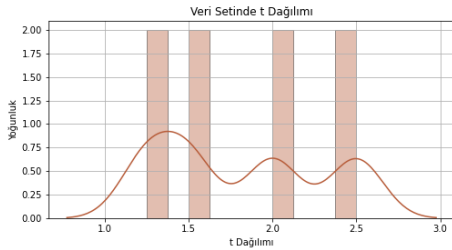
Şekil 13. Dış çapın veri setindeki dağılımı



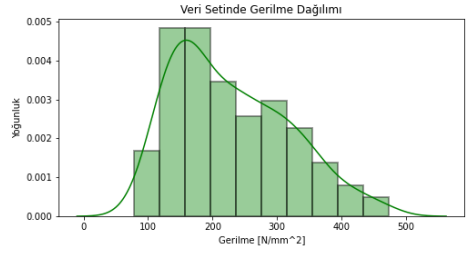
Şekil 14. İç çapın veri setindeki dağılımı



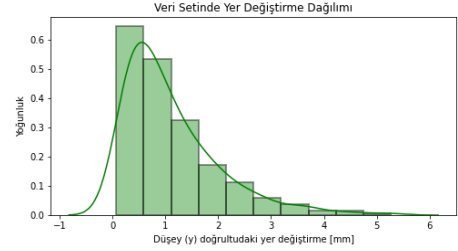
Şekil 15. Yüksekliğin veri setindeki dağılımı



Şekil 16. Kalınlığın veri setindeki dağılımı



Şekil 17. Gerilmenin veri setindeki dağılımı



Şekil 18. Yer değiştirmenin veri setindeki dağılımı

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Yapay Sinir Ağı

Yapay sinir ağının farklı epoch sayılarındaki başarıları  $R^2$ , MAE ve MSE metrikleri kullanılarak Tablo 2, 3 ve 4'te gösterilmiştir. Başarı oranları incelendiğinde 1500 epoch eğitilen sinir ağının özellikle yer değiştirme değerinin tahmininde **%97,67** gibi yüksek  $R^2$  başarı oranı ile öne çıktığı görülmektedir. Tablo 5'te ise yapay sinir ağlarının eğitim süreleri için harcanan zamanlar saniye biriminden belirtilmiştir.

Tablo 2. Sinir ağının  $R^2$  başarı oranı

Epoch	Eğitim Verileri		Test Verileri	
	Gerilme	Yer Değiştirme	Gerilme	Yer Değiştirme
500	%99,74	%67,93	%99,53	%54,86
1000	%99,85	%94,46	%99,80	%90,37
1500	%99,95	%98,39	%99,86	%97,67
2000	%99,93	%86,88	%99,78	%78,18

Tablo 3. Sinir ağının MAE değerleri

Epoch	Eğitim Verileri		Test Verileri	
	Gerilme	Yer Değiştirme	Gerilme	Yer Değiştirme
500	3,3538	0,5838	4,3357	0,4924
1000	2,6545	0,1929	3,0746	0,2191
1500	1,2667	0,0882	2,3387	0,0901
2000	1,3201	0,2882	3,1812	0,2993

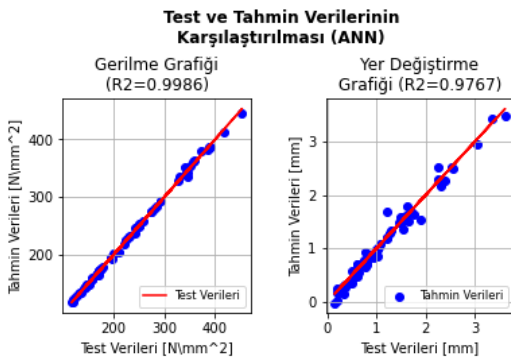
Tablo 4. Sinir ağının MSE değerleri

Epoch	Eğitim Verileri		Test Verileri	
	Gerilme	Yer Değişirme	Gerilme	Yer Değişirme
500	20,2933	0,2802	34,918	0,2873
1000	11,6238	0,0466	15,3649	0,0612
1500	3,9237	0,0141	11,1893	0,01481
2000	5,3997	0,1146	16,7854	0,1388

Tablo 5. Sinir ağının eğitimi için gerekli zaman

Epoch	Zaman [s]
500	68,53
1000	138,98
1500	196,62
2000	271,91

1500 epoch için hem eğitim hem de test verilerinde yüksek ve birbirine yakın başarı oranlarının yakalanması, eğitilen modelde underfitting (öğrenememe) ve overfitting (ezberleme) problemi ile karşılaşmadığını göstermektedir. Yapay sinir ağının tahmin ettiği değerler ile gerçek değerlerin karşılaştırması Şekil 19'da görülebilir.



Şekil 19. Test ve tahmin verilerinin karşılaştırılması (1500 Epoch)

Belirtilen başarı metrikleri incelendiğinde 1500 epoch ile eğitilen ağı, optimizasyon çalışmasında gerilme ve yer değiştirme değerlerinin tahmininde kullanılması adına yeterli seviyede başarıya ulaştığı görülmektedir.

### Boyut Optimizasyonu

4 farklı çalışma için GA algoritması kullanılarak elde edilen tek amaçlı optimizasyon sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. İki adet kısıt fonksiyonuna sahip üç çalışma incelendiğinde istenilen  $1200 N - 1,2 mm$  ve  $3500 N - 2,8 mm$  yay rijitliği için hata değeri  $3E - 08 mm$ 'den daha

küçük olmak üzere son derece başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.  $4000 N - 3,8 mm$  için gerçekleştirilen çalışma optimum sonuca akma sınırına gelerek ( $449.999 N/mm^2$ )  $0,36378 mm$  hata ile ulaşmaktadır. Akma gerilmesine ait  $g_2$  kısıt fonksiyonu kaldırıldığında aynı rijitliğe sahip yaya  $7,959E - 09 mm$  hata ve  $803,135 N/mm^2$  gerilme ile ulaşabildiği görülmüştür. Dört çalışma için de 100 popülasyon ve 20 jenerasyon parametreleri göz önüne alındığında, optimizasyon çalışması için gereken ortalama 4,5 saniyelik süreler kayda değer zaman ve maliyet kazançları sağlamaktadır.

Tablo 6. Tek amaçlı optimizasyon sonuçları

		Yay 1	Yay 2	Yay 3	Yay 4
İstenilen Yay Rijitliği	$F [N]$	1200	3500	4000	4000
	$y [mm]$	1,2	2,8	3,8	3,8
Algoritma		GA	GA	GA	GA
Amaç Fonksiyonları		$f_1$	$f_1$	$f_1$	$f_1$
Kısıt Fonksiyonları		$g_1, g_2$	$g_1, g_2$	$g_1, g_2$	$g_1$
Fonksiyon Değerleri	$f_1 [mm]$	2,4233E-11	2,2980E-08	0,36378	7,9595E-09
$y [mm]$		1,200007	2,79975	2,94702	3,79987
Gerilme [ $N/mm^2$ ]		316,4189	439,45	449,613	803,135
Hacim [ $mm^3$ ]		2707,3306	7924,42	9296,67	4569,799
Popülasyon		100	100	100	100
Jenerasyon		20	20	20	20
Tasarım Parametreleri	$D_s [mm]$	53,3488	68,51	69,9791	65,9168
	$D_1 [mm]$	20,0546	24,2796	14,3105	24,697
	$h_0 [mm]$	3,0362	3,16489	4,2397	3,8258
	$t [mm]$	1,38758	2,4336	2,4938	1,5316
Optimizasyon Süresi [s]		4,312	4,244	4,318	2,307

Tablo 6'da belirtilen  $2,4233E - 11$  seviyesindeki hata değerinden ödün verilerek tasarımcı için kabul edilebilir  $1E - 06$  seviyelerindeki hata seviyesine sahip yayın kullanılması hacimden tasarruf edilmesini olanak sağlayabilir. Bu doğrultuda hacmi ifade edecek ikinci bir amaç fonksiyonu ( $f_2$ ) ile çok amaçlı optimizasyon çalışması gerekli kılınmaktadır.

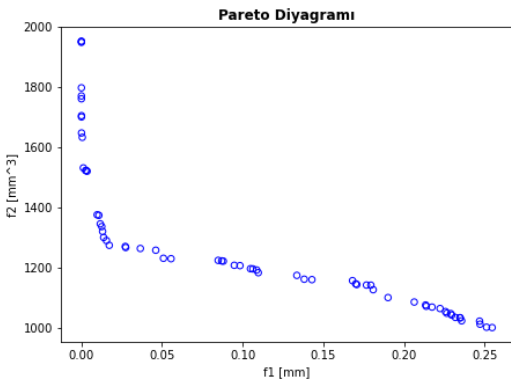
Tablo 7'de ise yine 4 farklı yay rijitliği için NSGA-II algoritması ile elde edilen çok amaçlı optimizasyon sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde NSGA-II algoritmasının GA algoritması kadar başarılı sonuçlar yakalayabildiği görülmektedir.  $6,743E - 8 mm$ 'den daha düşük hata değerleri ile tasarım parametrelerine ulaşılan yay rijitlikleri için, çizelgede belirtilen değerler  $f_1$  amaç

fonksiyonunun en küçük hata değerlerine sahip olduğu ve en yüksek hacme sahip sonuçlardır. Tek amaçlı optimizasyonda olduğu gibi çok amaçlı optimizasyon için de gerekli süreler ortalama 4,5 saniyedir.

Tablo 7. Çok amaçlı optimizasyon sonuçları

		Yay 5	Yay 6	Yay 7	Yay 8
İstenilen Yay Rijitliği	$F [N]$	700	1500	2800	3000
	$y [mm]$	0,86	1,5	2,4	1,2
Algoritma		NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II
Amaç Fonksiyonları		$f_1, f_2$	$f_1, f_2$	$f_1, f_2$	$f_1, f_2$
Kısıt Fonksiyonları		$g_1, g_2$	$g_1, g_2$	$g_1, g_2$	$g_1, g_2$
Fonksiyon Değerleri	$f_1 [mm]$	4,90E-10	6,31E-10	2,19E-09	6,743E-08
	$f_2 [mm^3]$	3029,009	1953,028	6935,77	2661,916
$y [mm]$		0,86003	1,49996	2,400066	1,19963
Gerilme [ $N/mm^2$ ]		191,611	439,224	380,3619	437,1704
Hacim [ $mm^3$ ]		3029,009	1953,03	6935,77	2661,916
Popülasyon		100	100	100	100
Jenerasyon		20	20	20	20
Tasarım Parametreleri	$D_e [mm]$	56,5897	47,445	63,4485	46,6885
	$D_i [mm]$	15,3433	17,825	18,221	24,1731
	$h_0 [mm]$	3,9282	3,2192	3,1424	2,681
	$t [mm]$	1,2769	1,2568	2,368	2,0665
Optimizasyon Süresi [s]		4,336	4,3127	4,371	4,375

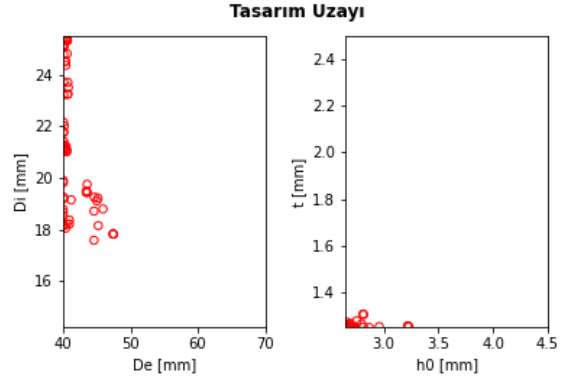
$f_1$  amaç fonksiyonunun hata değerinin arttığı ancak hacmin beklenildiği üzere azaldığı Pareto çözümleri ve tasarım uzayları bir yay rijitliği için Şekil 20 ve 21'de, çok amaçlı optimizasyon çalışmasında elde edilen çözümlerden birkaçı ise Tablo 8'de verilmiştir.



Şekil 20. 1500 N ve 1,5 mm için Pareto diyagramı

Tablo 8 incelendiğinde  $f_1$  fonksiyonundan ödün verilerek hacmin azaltılabileceği

gözlemlenmektedir. Çözüm 1 ve 2 incelendiğinde,  $5,33E - 06 mm$  hataya sahip tasarımın seçilmesi ile hacmin  $181,638 mm^3$  azalacağı ve malzemeden  $\%9,3$  tasarruf edilebileceği görülmektedir.



Şekil 21. 1500 N ve 1,5 mm için tasarım uzayı

Tablo 8. İstenilen 1500N ve 1,5 mm rijitlik için elde edilen çözümlerden bazıları

		Çözüm 1	Çözüm 2	Çözüm 3	Çözüm 4
Fonksiyon Değerleri	$f_1 [mm]$	6,31E-10	5,33E-06	4,62E-05	5,42E-04
	$f_2 [mm^3]$	1953,028	1771,394	1705,753	1633,66
$y [mm]$		1,49996	1,4967	1,4904	1,46708
Gerilme [ $N/mm^2$ ]		439,224	443,668	444,412	445,047
Hacim [ $mm^3$ ]		1953,028	1771,394	1705,75	1633,66
Tasarım Parametreleri	$D_e [mm]$	47,445	45,932	45,006	44,63
	$D_i [mm]$	17,825	18,7936	19,1	19,245
	$h_0 [mm]$	3,2192	2,9579	2,7529	2,8134
	$t [mm]$	1,2568	1,2545	1,2793	1,2521

100 popülasyon ve 20 jenerasyon ile gerçekleştirilen çalışma için 2000 defa yapay sinir ağı çalıştırılarak yapılan tahminler ile gerilme ve yer değiştirme sonuçlarına kısa sürelerde ulaşılması, sonlu elemanlar ile yapılacak olan optimizasyon çalışmasına kıyasla zaman açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Çalışmada elde edilen veri seti (256 adet veri) için yaklaşık 40 dakika harcadığı göz önüne alındığında, 2000 analiz için gerekli olan süre yaklaşık olarak 5 saat olmaktadır. Bu fark, doğrusal olmayan, karmaşık geometri ve çok sayıda elemandan oluşan modellerde daha fazla olacaktır.

#### YSA ve SEA Sonuçlarının Karşılaştırılması

Elde edilen optimizasyon sonuçlarının doğruluğu sonlu elemanlar analizi yapılarak değerlendirilmiştir ve Tablo 9'de karşılaştırmalar verilmiştir. Tablo 2 ile belirtilen ve 1500 epoch eğitilen yapay sinir ağı için yer değiştirmedeki  $\%2,33$  hata değeri optimizasyon sonuçlarında  $\%3,84$



(Tablo 10) olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerilme değeri ise yer değiştirmeden daha iyi sonuçlar üreterek %1'den daha az hata ile hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 9. Elde edilen tasarım parametreleri için YSA ile SEA sonuçlarının karşılaştırılması

İstenilen Yay Rijitliği		Yapay Sinir Ağı Sonucu		Sonlu Elemanlar Analizi Sonucu		Yüzde Hata [%]	
F [N]	y [mm]	y [mm]	Gerilme [N/mm <sup>2</sup> ]	y [mm]	Gerilme [N/mm <sup>2</sup> ]	y [mm]	Gerilme [N/mm <sup>2</sup> ]
1200	1,2	1,200007	316,4189	1,39547	322,523	14,007	1,8926
3500	2,8	2,79975	439,45	3,044	441,615	8,024	0,4902
4000	3,8	2,94702	449,613	3,038	448,7981	2,995	-0,1816
4000	3,8	3,79987	803,135	4,1975	764,696	9,473	-5,0267
700	0,86	0,86003	191,611	0,898	197,363	4,228	2,9144
1500	1,5	1,49996	439,224	1,4366	439,522	-4,410	0,0678
2800	2,4	2,400066	380,3619	2,5285	380,261	5,079	-0,0265
3000	1,2	1,19963	437,1704	1,2971	445,02	7,514	1,7639

Optimizasyon çalışmasının yapay sinir ağı kullanılarak gerçekleştirilmesi ile elde edilen sonuçların, yapay sinir ağı başarı oranları ile benzerlik göstermesi gayet doğaldır. Yapay sinir ağı ile gerçekleştirilecek olan optimizasyon çalışmasının başarısının yapay sinir ağının başarısına bağlı olduğu görülmektedir.

Tablo 10. YSA ile SEA sonuçlarının  $R^2$  değerleri

Yer Değiştirme	Gerilme
%96,16	%99,24

## SONUÇLAR

Gerçekleştirilen çalışmada, sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilecek olan optimizasyon çalışmasının yapay sinir ağı ile gerçekleştirilerek zamandan ve buna bağlı olarak ürün geliştirme maliyetlerinden tasarruf edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda disk yaylar için bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve yapay sinir ağının eğitimi için yeterli sayıda veri toplanmıştır. Eğitilen sinir ağı modeli optimizasyon çalışmasında kullanılarak elde edilen tasarım parametreleri sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde;

1. Belirlenen sinir ağı modeli için uygun epoch sayısı ile gerilme ve yer değiştirme değerlerinin tahmininde yüksek başarı yakalanabildiği,

2. Hem tek hem de çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının yapay sinir ağı ile istenilen tasarım parametrelerine belirtildiği üzere 4,5 saniye gibi kısa süreler içerisinde ulaşabildiği,
3. Özellikle davranışı doğrusal olmayan malzemeler ve karmaşık geometriler ile çok sayıda elemandan oluşan modellerde iki yöntem arasındaki zaman farkının daha fazla olacağı,
4. Elde edilen tasarım parametrelerinin sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılması neticesinde optimizasyon çalışmasının başarısının (%96,16) yapay sinir ağının başarı oranına (%97,67) bağlı olarak değişebileceği,
5. Başarı oranı daha yüksek bir sinir ağı ile daha net ve doğru sonuçlara ulaşmanın mümkün olabileceği gözlemlenmiştir.

## OPTIMIZATION OF RECTANGULAR SECTION BELLEVILLE SPRINGS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Machine learning has a crucial role in significantly reducing the time and costs devoted to analysis in product design. Optimization work with machine learning provides excellent advantages in terms of time and cost compared to finite element analysis. In this study, a machine learning model was trained for Belleville springs and aimed to use the trained model in the size optimization of Belleville springs. To show the applicability of single and multi-purpose optimization methods, the optimization of various Belleville springs with desired spring stiffness is discussed, and Pareto solutions are presented and examined. Finite element analyzes were carried out with the obtained design parameters, and artificial neural network and finite element results were compared. It has been seen that the optimization result can be reached within 4.5 seconds with the artificial neural network, and the accuracy of the obtained results (96.16%) is similar to the neural network success rate (97.67%).

**Keywords:** Belleville Spring, Finite Element Analysis, Machine Learning, Artificial Neural Network, Optimization, Genetic Algorithm

## KAYNAKÇA

1. N. Kaya and F. Öztürk, "Dikdörtgen Kesitli Disk Yayların Optimum Kesit Tasarımı," *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, vol. 4, no. 3, pp. 140–145, 2002.
2. R. Phellan, B. Hachem, J. Clin, J. M. Mac-Thiong, and L. Duong, "Real-time biomechanics using the finite element method and machine learning: Review and

- perspective,” *Med Phys*, vol. 48, no. 1, pp. 7–18, Jan. 2021.
3. “Abaqus/CAE Student Edition 2020.”
  4. M. Müller, X. Longl, M. Betsch, D. Böhmmländer, and W. Utschick, “Real-Time Crash Severity Estimation with Machine Learning and 2D Mass-Spring-Damper Model,” *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, vol. 2018–November, pp. 2036–2043, Dec. 2018.
  5. Z. S. Ma, Q. Ding, and Y. J. Zhai, “Hybrid Modeling of Nonlinear-Jointed Structures via Finite-Element Model Reduction and Deep Learning Techniques,” *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 575–585, Jun. 2021.
  6. Z. Qi, N. Zhang, Y. Liu, and W. Chen, “Prediction of mechanical properties of carbon fiber based on cross-scale FEM and machine learning,” *Compos Struct*, vol. 212, pp. 199–206, Mar. 2019.
  7. C. N. N. Karina, P. Chun, and K. Okubo, “Tensile Strength Prediction of Corroded Steel Plates by Using Machine Learning Approach,” *Steel and Composite Structures*, vol. 24, no. 5, pp. 635–641, Aug. 2017.
  8. L. Liang, M. Liu, C. Martin, and W. Sun, “A deep learning approach to estimate stress distribution: a fast and accurate surrogate of finite-element analysis,” *J R Soc Interface*, vol. 15, no. 138, Jan. 2018.
  9. F. C. Babalık and K. Çavdar, *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*, 8th ed. Bursa: Dora Yayınları, 2015.
  10. D. L. Venkatesh and H. Zhou, “Designing Belleville Spring Washers,” *Int. J. Eng. Res. Technol*, vol. 7, no. 12, pp. 168–174, 2018.
  11. [11] D. Bhope, S. Tahilyani, and K. Singh, “Effects of Slots on Deflection and Stresses in Belleville Spring,” *The International Journal of Engineering And Science (IJES)*, pp. 2–3, 2013.
  12. X. Liu, C. E. Athanasiou, N. P. Padture, B. W. Sheldon, and H. Gao, “A machine learning approach to fracture mechanics problems,” *Acta Mater*, vol. 190, pp. 105–112, May 2020.
  13. S. Fahle, C. Prinz, and B. Kuhlenkötter, “Systematic review on machine learning (ML) methods for manufacturing processes – Identifying artificial intelligence (AI) methods for field application,” *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 413–418, Jan. 2020.
  14. S. Müller, A., & Guido, *Introduction to Machine Learning with Python*. O’Reilly Media, Inc., 2016.
  15. F. Chollet, *Deep Learning with Python*. Manning Publisher Co., 2018.
  16. N. Gunantara, “A review of multi-objective optimization: Methods and its applications,” *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2018.
  17. E. S. Andrabbttir, K. J. Healy, D. H. Withers, B. L. Nelson, Y. Carson, and A. Maria, “Simulation optimization,” *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation - WSC ’97*, pp. 118–126, 1997.
  18. I. Ahmadianfar, O. Bozorg-Haddad, and X. Chu, “Gradient-based optimizer: A new metaheuristic optimization algorithm,” *Inf Sci (N Y)*, vol. 540, pp. 131–159, Nov. 2020.
  19. M. Marseguerra, E. Zio, and S. Martorell, “Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 91, no. 9, pp. 977–991, Sep. 2006.
  20. A. R. Yıldız, N. Öztürk, N. Kaya, and F. Öztürk, “Hybrid multi-objective shape design optimization using Taguchi’s method and genetic algorithm,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 25, no. 4, pp. 251–260, 2003.
  21. A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 91, pp. 992–1007, 2006.
  22. F. Cappello and A. Mancuso, “A genetic algorithm for combined topology and shape optimisations,” *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 8, pp. 761–769, 2003.
  23. R. T. Marler and J. S. Arora, “Survey of multi-objective optimization methods for engineering,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6, pp. 369–395, Mar. 2004.
  24. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr. 2002.
  25. Belleville Springs Ltd., “Belleville Springs User’s Guide and Catalogue.”
  26. D. P. Kingma and J. L. Ba, “Adam: A Method for Stochastic Optimization,” *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*, Dec. 2014.
  27. J. Blank and K. Deb, “Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89497–89509, 2020.



Harun Smbl\* 

Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Yeşilyurt Demir elik Meslek Yüksekokulu  
Elektronik ve Otomasyon

Ahmet Bğrek 

Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Yeşilyurt Demir elik Meslek Yüksekokulu  
Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Tek.

Abdurrahman Tunçer 

Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Yeşilyurt Demir elik Meslek Yüksekokulu  
Elektronik ve Otomasyon

# Yoğun Bakım, Yanık Tedavi ve Fizik Tedavi Kombine Hasta Karyolasının Kavramsal Tasarımı

*İnsan yaşamının yaklaşık üçte biri yatakta geçer. Özellikle yanık tedavi ve yoğun bakım ünitesinde yatan bakıma muhtaç insanlar genellikle bütün gününü yatakta geçirirler. Uzun süre yoğun bakım ünitesinde yatan hastalar, mevcut hastalıklarının yanında farklı risklerle de karşı karşıya kalabilmektedirler. Bu çalışmanın amacı; özellikle mobilizasyonu riskli olan gruplar için yoğun bakım ve yanık tedavi ünitesinde yatıp aynı zamanda fizik tedavi gereksinimi duyulan hastaların sedye aracılığı ile fizik tedavi ünitesine taşınmasını önleyecek, yoğun bakım ünitesinde iken bu tedaviyi almasına imkân sağlayacak kombine bir yatak ve yatak kontrol sisteminin tasarlanmasıdır.*

*Anahtar Kelimeler: Hasta yatağı, elektromekanik, tasarım, kontrol, retme.*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 28 Mart 2022

Kabul: 9 Ekim 2022

\*Sorumlu Yazar: Harun SÜMBÜL

Email: harun.sumbul@omu.edu.tr

DOI:

<https://doi.org/10.56193/matim.1094616>

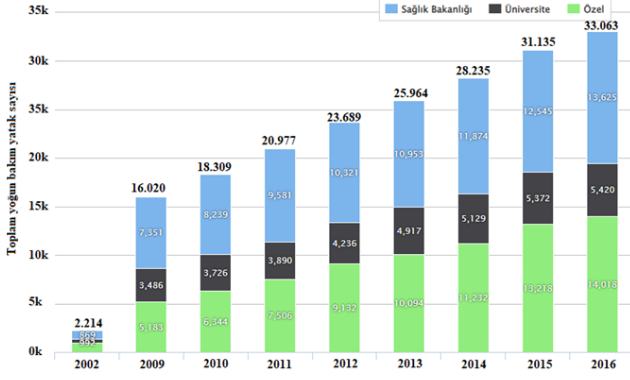
*Atıf şekli/How to cite: Sümbül H., Bğrek A., Tunçer A., Yoğun Bakım, Yanık Tedavi ve Fizik Tedavi Kombine Hasta Karyolasının Kavramsal Tasarımı. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(1): 12-21.*

## GİRİş

Hastaların uzun süreli bakım ve tedavilerinin sağlanması amacıyla yatırıldığı, hasta odalarında ya da hastalara devamlı tıbbi bakım hizmeti verilen birimlere yerleştirilen yatlara hasta yatağı denilmektedir. Yanık tedavi ve yoğun bakım ünitesinde yatan bakıma muhtaç insanlar genellikle bütün gününü hasta yatağında geçirirler. Uzun süre yatıp pozisyonunda bulunan hastaların vücutlarında hava almayan bölgelerde belirli bir süre sonra yara ve tahriş izleri oluşmaktadır. Yanık tedavisi gören hastalar için durum daha da karmaşıktır. nk bu tür hastalara temas edilmeden fizik tedavi uygulamak gerekebilmektedir. Bu durumda da hastanın mekaniksel olarak döndürülmesi gerekmektedir. Yatalak hastaların yatak hareketlerinin durumunu izleyerek hasta hakkında doğru ve gerçek zamanlı geri bildirim sağlamak için etkili ve akıllı kontrol sistemlerinin tasarlanması konusunda çok az araştırma yapılmıştır. Yatak imalatı ve teknolojileri konularında ülkemiz iyi seviyede olsa da yoğun bakım ve yanık tedavi ünitesinde yatıp aynı zamanda

fizik tedavi gereksinimi duyulan hastaların sedye aracılığı ile fizik tedavi ünitesine taşınmasını önleyecek, yoğun bakım ünitesinde iken bu tedaviyi almasına imkân sağlayacak kombine bir yatak ve yatak kontrol sistemi henüz tasarlanmamış ve imal edilmemiştir. Oysaki lkemizde bu ünitelerde yatan hasta sayısı giderek artmakta ve bu tip kombine yatlara daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

şekil 1’ de yıllara göre ülkemizdeki geleneksel yoğun bakım yatağı sayıları verilmiştir. Özellikle 2019 sonrası pandemi (dünya geneli salgın) etkisiyle birlikte Türkiye’de yoğun bakım yatak sayısında oldukça yüksek oranlara ulaşılmıştır [1]. Bu kapsamda erişkin yoğun bakım yatak sayısı 2019 yılında 25.364’ten 2020 yılında 32.663’e, ocuk yoğun bakım yatak sayısı 1.778’den 1.956’ya, yeni doğan yoğun bakım yatak sayısı 12.813’ten 13.081’e yükselmiştir. Böylece Sağlık Bakanlığı yoğun bakım yataklarının, tüm yoğun bakım yatakları içerisindeki payı %50,2 olmuştur [2].



Şekil 1. Yıllara göre yoğun bakım yatak sayıları

Sağlık bakanlığı verilerine göre Türkiye’deki yanık ünite ve merkezlerinin bulunduğu hastane sayısı ise 32 civarındadır [3]. 2019 yılında Sağlık Bakanlığınca Resmî Gazete ‘de hazırlanan "Yanık Tedavi Birimleri Hakkında Yönetmelik" kapsamında yataklı sağlık tesisleri tarafından verilen yanık tedavi hizmetlerinin güncel ihtiyaç ve beklentilere uygun olarak sunulmasını temin etmek üzere hizmet verilen acil travma birimlerinin, fiziki şartların, araç, gereç, tıbbi donanım standartlarının iyileştirilmesi ve bu kapsamda yanık merkezi ve yatak kapasitelerinin artırılması amaçlanmıştır. Ayrıca yine bu mevzuat kapsamında Bakanlıkça faaliyet izin onayında belirtilen yatak sayısının altında veya üzerinde yatak sayısı ile faaliyet gösterilemez ve bu yataklar yanık tedavisi dışında kullanılamaz [4].

Fizik tedavi merkezleri ise mevcut durumda ülke genelinde 11 ilde var iken sağlık bakanlığı tarafından 2019 yılında 21 ilde toplam 4 bin 400 yatak kapasiteli 26 yeni fizik tedavi ve rehabilitasyon hastanesi inşa etme kararı alınmıştır. Çünkü Türkiye’de gelecek 30 yılda yaşlı nüfus oranının 2-3 kat artacağı öngörülmektedir [5]. Görüldüğü üzere özellikle 2019’dan sonra pandemiyle birlikte Türkiye’deki sağlık alanında yapılan yatırımlar oldukça yüksek ivmelere ulaşmıştır. Tüm bu veriler ülkemizdeki hasta yatak durumlarının giderek iyileştirildiği ve yaygınlaştırıldığı ve her yıl bu konuya daha da önem verildiğini ortaya koymaktadır. Bu bilgiler ışığında bu çalışmada tasarımı yapılan yatağa ülkemizde her üç alanda da (yoğun bakım, yanık tedavi ve fizik tedavi üniteleri) ilerleyen süreçte daha fazla ihtiyaç olacağı anlaşılmaktadır.

Yapılan detaylı literatür araştırması neticesinde literatürde, yatak kumanda ve kontrol sistemleri üzerinde çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, yoğun bakım hasta yatağı mekaniği ve hasta yatağı kontrol teorisi ile ilgili çalışmalara karşılaşılmamıştır. Yapılan endüstriyel piyasa araştırması neticesinde ise Türkiye’de üretilen yoğun bakım yataklarının fizik tedavi uygulamaları için

elverişsiz olduğu ve genellikle yatakların 2,3 ve 4 motorlu tasarıma sahip oldukları, dolayısı ile bazı önemli pozisyonlar (tilt vb.) için kullanışsız olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmanın amacı, özellikle mobilizasyonu riskli olan gruplar için (Kardiyoloji hastaları, kardiyak cerrahi, anjioplasti, hipertansiyon, periferik arter hastalığı, solunum sistemi- KOAH, astım hastaları gibi) yoğun bakım ve yanık tedavi ünitesinde yatıp aynı zamanda fizik tedavi gereksinimi duyulan hastaların sedye aracılığı ile fizik tedavi ünitesine taşınmasını önleyecek, yoğun bakım ünitesinde iken bu tedaviyi almasına imkân sağlayacak kombine bir yatak ve yatak kontrol sisteminin tasarlanmasıdır.

## KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son dönemde dünya sağlık örgütü tarafından pandemi ilan edilen koronavirüs (covid-19) tehdidi, tüm dünyada insanları olumsuz etkilemiş ve yoğun bakım ve entübe hasta sayısında oldukça yüksek artışına sebep olmuştur. Özellikle yaşlı bireyler bu durumdan daha fazla etkilenmiştir. Böylece dünya genelinde yoğun bakım kapasitesine duyulan ihtiyaçta artmıştır. Yoğun bakım ünitesi hastanelerin merkezinde yer alan bir servistir. Bu ünite hemen hemen tüm tıp uzmanlıklarının, sağlık personelleri ve destek hizmetlerinin bir araya getirildiği oldukça kritik bir alandır. Yoğun bakım üniteleri tasarımı karmaşıktır ve tedavileri en üst düzeye çıkarmak ve riskleri en aza indirmek için hem hastalar hem de personel için en iyi ortamın sağlanması ve mümkün olduğunca ileri teknoloji ile donatılması gerekmektedir [6]. Çünkü uzun süre yoğun bakım ünitesinde yatan hastalar, mevcut hastalıklarının yanında farklı risklerle de karşı karşıya kalabilmektedirler. Özellikle yoğun bakım ünitesinde kalan hastalar için uzun süre yatağa yatmak fiziksel aktivitelerin kapasitesini ciddi şekilde etkileyebilir ve bu etki hastanede geçen gün sayısı arttıkça giderek şiddetlenir. Hareketsizliğin etkisi yaşlılarda ve konjestif kalp yetmezliği ve kronik obstrüktif akciğer hastalığı da dâhil olmak üzere kronik hastalığı olan hastalarda daha da fazladır. Hareketsizliğin zararlı etkilerine ek olarak, yoğun bakım ünitesi hastaları nöromusküler bozuklukların gelişimi için de yüksek risk altındadır. Ayrıca yatalak hastalar, alınan ilaçların yan etkileri nedeniyle fizyolojik işlevleri üzerindeki diğer etkilerin yanı sıra bilişsel bozukluklara, vertigoya (baş dönmesi) ve fiziksel zayıflığa da duyarlı hale gelebilmektedirler [7,8]. Bu durum hızlı pastoral değişiklikler veya baş dönmesi sonrasında başa yetersiz kan akışı ile sonuçlanır. Bu etkiler ile iç kulağın denge işlev bozukluğu sonucunda hastalar yataktan zemine düşebilmekte ve yaralanabilmektedirler [9,10]. Uzun süre yataкта kalan hastaların yaklaşık %13-20’si en az bir kez yataktan düşmektedir. Çalışmalar, bu tür düşüşlerin hastaların %13’ünde ölüme ve hastaların %25’inde

kırık, eklem dislokasyonu, laserasyon ve morarma gibi fiziksel yaralanmalara neden olduğunu göstermektedir [9]. Bu nedenle, birçok klinik kurum, hastaların yatak kenarından düşme sonucu kazayla yaralanmalarını önlemek için hasta yataklarını koruyucu korkuluklar veya el tutamaklarıyla donatmıştır [11]. Benzer şekilde İskelet kasları da uzun süre aynı pozisyonda hareketsiz kalmaktan olumsuz etkilenir. Dinlenirken, kardiyak çıkışın yaklaşık %20'si iskelet kasına kan akışını sürdürmeye yönlendirilir. Uzun süre yatakta hareketsiz kalmak, iskelet ve kas yapısını da olumsuz etkilemektedir [12]. Hastalarda hareketsizlikten kaynaklanan günlük %1,3 ila %3 kas gücü kaybı oluşabilmektedir. Kas kaybı, yoğun bakım ünitesine kabul edildikten sonraki birkaç gün içinde hızla gerçekleşir [13]. Ayrıca yoğun bakım ünitesinden çıkan hastalarda, buradan kalma birtakım bozukluklar bir süre daha devam edebilmektedir [14]. Özellikle nöromusküler zayıflık, yoğun bakımdan taburcu olduktan sonra fiziksel işlevleri ve sağlıkla ilişkili yaşam kalitesi üzerinde olumsuz etkilere sahiptir [15]. Bunlar arasına görülen en önemli bozukluklar yiyecekleri kaldırıma ve taşıma, merdiven çıkma, bükme, diz çökme veya orta mesafelerde yürüme yetersizliği gibi günlük fiziksel işlevsellik ile ilgilidir. Fakat yoğun bakım ünitesinde kalış sırasında yapılan fizik tedavi müdahaleleri bu bozuklukları azaltabilir [16]. Uzun süre yatan hastalardaki bilinmesi gereken bir diğer unsur ise hava almayan bölgelerde belirli bir süre sonra oluşan yara ve tahriş izleridir. Yanık tedavisi gören hastalar için durum daha da karmaşıktır. Çünkü bu tür hastalara temas edilmeden fizik tedavi uygulamak gerekebilmektedir. Bu durumda da hastanın mekaniksel olarak döndürülmesi gerekmektedir.

Bu tür olumsuzlukların önüne geçebilmek ve yatalak hastaların yatak hareketlerinin duruşunu ve durumunu izleyerek hasta hakkında doğru gerçek zamanlı geri bildirim sağlamak için etkili ve akıllı kontrol sistemlerinin tasarlanması konusunda çok az araştırma yapılmıştır [17]. Bu çalışmanın amacı, özellikle mobilizasyonu riskli olan gruplar için yoğun bakım ve yanık tedavi ünitesinde yatıp aynı zamanda fizik tedavi gereksinimi duyulan hastaların sedye aracılığı ile fizik tedavi ünitesine taşınmasını önleyecek, yoğun bakım ünitesinde iken bu tedaviyi almasına imkân sağlayacak kombine bir yatak ve yatak kontrol sisteminin tasarlanması ve gerçekleştirilmesidir.

## **Konu ve Kapsam**

Yatak tipi sistemler ile ilgili araştırmalar esas olarak iki kapsama ayrılmıştır. Bunlardan biri, kullanıcının hareketini destekleyen veya statik duruşu önleyen mekanik tasarımıdır [18]. Diğer yaklaşım, kullanıcının durumunu (sağlık durumu, duruş,

hareket) algılayıcılar ile izlemektir [19]. Burada doğrudan vücuda bağlı algılayıcıları olan bir ölçüm sistemi genellikle vücut hareketi veya duruş tahmini için kullanılır. İkinci tip yaklaşımda vücut hareketini veya duruşu doğru bir şekilde ölçülebilse de vücuda birçok algılayıcı ve dönüştürücünün takılacağı, bu tip yaklaşımların en önemli dezavantajını oluşturmaktadır. Çünkü bu tür donanımlar, hastanın hareket kabiliyetini daha da fazla kısıtlamaktadır. Bununla birlikte video kamera kullanılarak vücut hareketlerinin takibi ve bunun sonucunda hastaya pozisyon değiştirebilen sistemler için birçok araştırma da yapılmıştır [20]. Fakat bu sistemler hareket özelliklerini çıkartmakta güçlük çeker çünkü vücut yataktan dolayı genellikle görünmez. Statik yüke duyarlı yataklarda vücut hareketlerini izlemek için kullanılabilir. Bu tip yataklar solunum, kalp atım hızı ve seğirme hareketlerini ölçebilir. Sıcaklık sensörü dağıtım yatağı, vücut dönüşleri gibi kaba hareketleri ölçülebilir [21]. Basınç sensörü dağıtım yatağı birçok çalışmada uygulanmıştır. Bu tip yataklarda vücut modelinde çok sayıda parametre belirlendiğinden, postürü belirlemek için çok sayıda hesaplama süresi gerekmesi bu sistemin dezavantajları arasındadır.

Literatürde, yatak kumanda ve kontrol sistemleri üzerinde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Fakat literatür taramalarında, yoğun bakım hasta yatağı mekaniği ve hasta yatağı kontrol teorisi ile ilgili çalışmalara karşılaşılmamıştır. Çalışma alanımızla farklılıklar içerse de yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından bu kaynaklar da incelenmiş ve literatür bölümünde bu kaynaklar da paylaşılmıştır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, yaşlılara ve engellilere yatakta bağımsız bir yaşam sürmelerine yardımcı olabilecek bir akıllı yatak robot sisteminin (AYRS) geliştirilmiştir. AYRS, iki robot kolu ve yatağa bağlı bir dizi basınç sensörü ile donatılmış özel bir yataktır. Şilte üzerindeki basınç dağılımı, hastanın pozunu tahmin etmek için kullanılır ve robot kolları tarafından uygun bir yardım sağlanır [22]. Fakat önerilen sistemin yoğun bakım ünitesinde kullanılabilirliği henüz test edilememiştir. Diğer bir çalışmada ise elektrik tasarrufu için toplam ağırlığı azaltmak ve nakliye veya konumlandırma yükünü azaltmak için karbon fiberler kullanılarak akıllı bir hasta yatağı geliştirilmiştir. Bu yatak sisteminde gerçek zamanlı olarak, kullanıcının izlenmesi için tasarlanmış bir Grafik Kullanıcı Arabirimi (GUI) kullanılmıştır [23]. Bu yatak hemşire çağrısı özelliğine de sahiptir fakat tamamen hareketsiz ve baygın durumdaki hastalar için bu özelliğin kullanılabilmesi zor görülmektedir. İncelenen başka bir yatak sisteminde ise "akıllı yataklar" olarak tanımlanan elektronik tıbbi yataklar hakkında net bir görüş sunulmaktadır. Mikro denetleyici olarak kullanılan Raspberry pi, bir motor sürücü devresi kullanılarak bir step motor ile yatağa yön

vermektedir. Sistem bir mikrofonu sahiptir ve hastadan alınacak sesli komutlara göre yatak pozisyonu değiştirebilmektedir [24]. Bu yatağın yoğun bakım ünitesinde konuşamayacak durumda bulunan hastalar tarafından kullanılmayacağı anlaşılmaktadır. İncelenen bir diğer önemli çalışmada ise ses ile kontrol edilen yatak çalışmalarında denetleyici olarak Arduino kullanılmış ve bilgi girişi olarak ses tanıma modülü (VR3) ile kullanılmıştır [25]. Yoğun bakım ünitesinde yatmakta olan çoğu hasta konuşamaz halde olduğundan bu sistemin verimli çalışabileceği ve yoğun bakım ünitesinde kullanılabileceği kesin değildir. İncelenen başka bir yatak modelinde ise amaç, hareket edemeyen bir hasta ile başa çıkmanın yolunu basitleştirmek şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre önerilen tıbbi yatak birkaç saatte bir kendi kendine otomatik olarak dönebilmeye özelliğine sahiptir [26]. Yatağın gerçek zamanlı çalışmaması ve istenen konumlar için önceden programlanmış olması kullanım avantajını yitirmiştir. Literatür [27] de ise, yatağın otomatik hareketinde kullanılan kontrol sinyallerinin üretimi için gerekli karakteristikleri elde etmek amacıyla ham EMG sinyallerini, üst ekstremitedeki kaslardan toplamışlar ve bu verileri daha sonra işleyerek sınıflandırmışlardır. Bu çalışma birçok algılayıcı gereksinimine ihtiyaç duymakla birlikte genel olarak oldukça karmaşıktır. Etkili bir hasta veri yönetim sistemi gerçekleştirmek amacı ile hastanın gerçek zamanlı bilgilerinin alınmasına imkân sunan bir veri toplama kartı geliştiren Knight vd., [28] yoğun bakım ünitelerinde konuşma üretme ve tanıma üzerine çalışmalar yapmışlar fakat henüz yoğun bakım ünitelerinde kullanılabilecek bir ürün ortaya koyamamışlardır. Hastaya pozisyon verme işlemi, hastaya birçok fayda sağlarken birtakım riskleri de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle pozisyon etkilerinin iyi bilinmesi ve pozisyon verirken solunum ve dolaşım sisteminin en az etkilenmesi sağlanmalıdır ve hasta travmatize edilmemelidir. Yapılan kapsamlı literatür araştırmasından da anlaşıldığı üzere hastalar için hem fizik tedavi imkânı sunan hem de yoğun bakım yatağı özelliklerini taşıyan ve aynı zamanda fonksiyonel olarak programlanabilen bir mobilizasyon yatağı bulunmamaktadır. Bu konuda önerilen tasarım çalışmasının hayata geçirilmesi ile hem akademik alanda hem de sanayi alanında literatüre yeni bir ürün kazandırılacaktır.

### Özgün Değer

Uzun süre yatak istirahatine alınan hastalarda, kan dolaşımını sağlamak ve sağlık sorunlarının ortaya çıkmasını engellemek için yatış pozisyonlarının en az 2 saat ara ile değiştirilmesi ve hastanın mobilize edilmesi gerekmektedir. Hastaya verilen pozisyona göre farklı vücut bölümleri desteklenmelidir. Sık sık pozisyon değiştiren hastalarda basınç noktaları da

değişmiş olduğundan kan dolaşımını hızlanır ve yatak yararı açılma riski de azalır. Mobilizasyon yoğun bakım ünitesinde uygulanan fizyoterapi programlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Mevcut durumda yoğun bakım ünitesinde uzun süre yatakta hareketsiz kalan hastalarda kan akışının yavaşlaması veya durması neticesinde birtakım fizyolojik (derin ven trombozu vb.) ve nörolojik (vertigo vb.) sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Bu hastalar için fizik tedavi uygulanmazsa da hareketsizlik kaynaklı toplardamarda pıhtı oluşması neticesinde bu durum pulmoner embolizm, inme, damar tıkanıklığı, felç ve hatta ölümle sonuçlanabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek ve hastaların kan dolaşımını mekaniksel hareket yardımı ile sağlamak amacı ile hastalar, sedye ve yardımcı personeller yardımı ile yoğun bakım ünitesinden çıkarılmakta, sedyeye alınıp fizik tedavi ünitesine götürülmektedir. Burada fizik tedavi yatağına alınan hasta, yatağın mekaniksel hareketleri sayesinde pozisyon değiştirme ve kan dolaşımını normalleşmesi sağlanmaktadır. Burada fizik tedavisi biten hastalar tekrar sedyeye alınmakta ve yoğun bakım ünitesine götürülmektedir. Hasta tekrar sedyeden yatağa alınarak yoğun bakım yatağına yatırılmaktadır. Bu olay neticesinde ortaya çıkan olumsuzluklar;

- Hastalar çok yıpranmakta ve yorulmakta (sedyeden sedyeye taşındığı için),
- Personel için zaman kaybı ortaya çıkmakta (hastaların sedye nakillerinde en az 2 personele ihtiyaç duyulur),
- Personel için güç kaybı ortaya çıkmakta (özellikle kilolu hastaların sedye nakillerinde),
- Taşınma sırasında hastanın maruz kalabileceği muhtelif durumlar (enfeksiyon kapma, sedyeden düşme vb.),
- Malzeme bekletilmesi (başka hastalar için kullanılabilecek sedye, serum çubuğu vb. araç-gereçlerin nakliye esnasında kullanılmak zorunda kalınması) ve kullanım sonucu erken deforme olması,
- Fizyoterapistin yoğun iş yükü olması,
- Hemşireler hastaya manevra esnasında çok fazla güç ve enerji harcadığından çoğu zaman bu işlemi yapmadan yapmış gibi göstermesi, dolayısı ile hastaların bu tedaviden tam anlamıyla faydalanamaması,
- Hastanın mahremiyeti ile alakalı ortaya çıkabilecek olası problemler,
- Bazı yoğun bakım yatakları için hasta yatağında iken röntgen çekiminin elverişsiz olabilmesi (özellikle C tipi makinelere uyumsuz olması),
- Yanık tedavisi gören hastalara temas edilmeden fizik tedavi uygulamak gerekebildiğinden hastanın el yardımı ile döndürülmesinin oldukça zor ve zahmetli olması,

- Diğer birtakım sorunlar (her taşınma sırasında çarşaf vb. değiştirmek zorunda kalınması gibi),

Kavramsal tasarımı yapılan çalışmanın hayata geçirilmesi neticesinde sayılan tüm bu olumsuzlukların önüne geçilecektir. Mevcut durumda hem fizik tedavinin uygulandığı hem yanık tedavisinin alındığı hem de yoğun bakım yatağı görevini gören bir yatak bulunmamaktadır. Bu anlamda sunulan çalışma oldukça özgün bir değere sahiptir ve hayata geçtiğinde ticarileşebilecek bir ürün ortaya çıkacak özelliktedir. Bunun yanında yatak fonksiyonları için hasta bakıcı ve hemşirelerin kullanımına uygun yatağa programlanabilme özelliği sağlayacak bir kontrol paneli de yapılacaktır. Hemşire, hastaya uygun tedavi sırasında yatağın olması gereken hareket pozisyonu, hareket sayısı ve hareket süresini fizyoterapist yönlendirmesi dahilinde kontrol panelinden girip kaydedecektir. Bunun neticesinde ayarlanan süre geldiğinde yatak istenilen pozisyonu alıp istenilen sürede istenilen hareketleri otomatik yapacaktır. Ayrıca yatağa yerleştirilecek olan ağırlık (load cell) algılayıcısı sayesinde hastanın kilo durumu da takip edilebilecektir. Tüm bu durumların izlenebilmesi ve uzaktan da (kablosuz) gerekli programlamanın yapılabilmesi için Android işletim sistemine uygun mobil uygulama geliştirilecektir. Böylece tasarımın hayata geçmesi neticesinde ileri teknolojiye sahip oldukça konforlu, zahmetsiz ve akıllı bir ticari ürün ortaya çıkmış olacaktır.

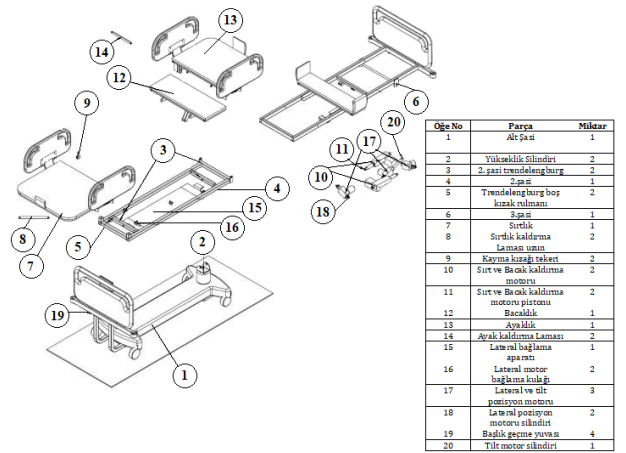
## MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan kavramsal tasarım çalışması iki önemli bölümden oluşmaktadır;

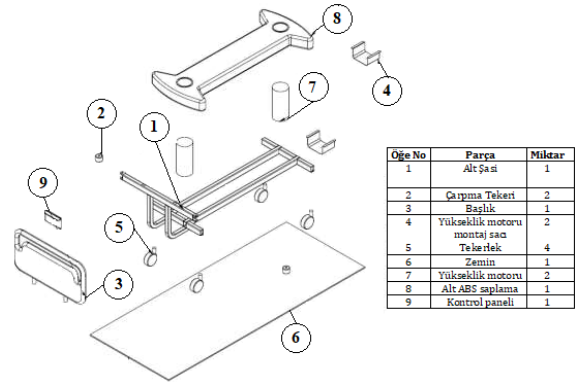
1-) Doktor ve fizyoterapistlerin istedikleri pozisyonları rahatlıkla alabilecek ve hastaya mekaniksel mobilizasyon yaptırabilecek; kalıp ve mekanik işlemleri içeren ve birçok parçadan oluşan 8 motorlu ve 9 eksenli hasta karyolası,

2-) Karyolaya istenilen pozisyonun verilmesini sağlayabilecek, üzerinde dokunmatik ekran, mikrodenetleyici, bluetooth gibi teknolojik komponentleri barındıran, hemşire tarafından programlanabilen, kablolu ve kablosuz özellikte olan ve cep telefonu uygulaması ile eşleşebilen kumanda ve kontrol kartı,

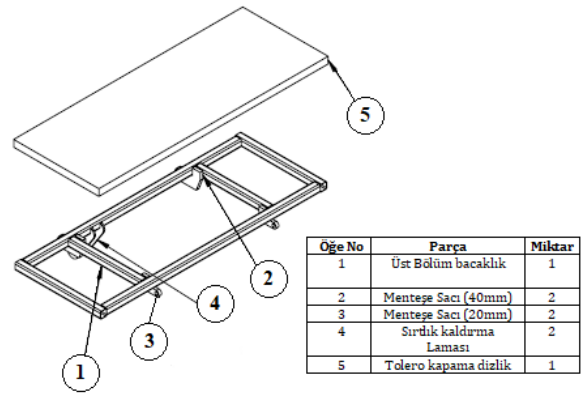
Birinci bölüm için tasarlanacak olan hasta yatağına ait parçaların Solidworks programında çizilen katı modelleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Katım model tasarımında en çok kullanılan program Solidworks olduğundan bu çalışmada da bu program tercih edilmiştir [29]. Tasarımı yapılan yatağına ait mekaniksel özellikler aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 2. Yatağına ait ana parça görünümü ve isimleri

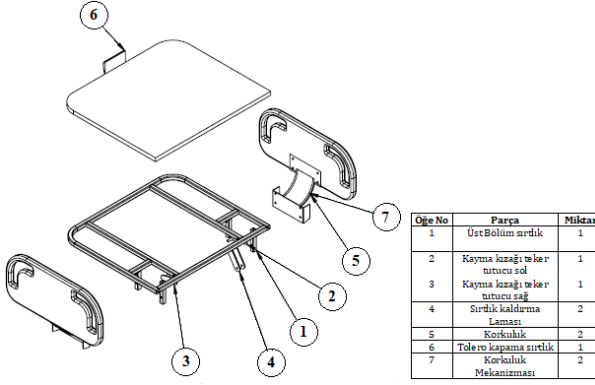


Şekil 3. Yatak alt ana şasi parça görünümü ve isimleri



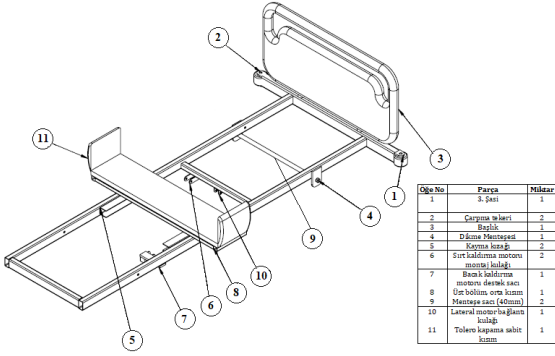
Şekil 4. Yatak bacak kaldırma parça görünümü ve isimleri

Tasarlanan yatakta 8 adet motor yardımı ile hastaların farklı yatış pozisyonları alabilmeleri amaçlanmıştır. Kullanılan motorların yatak pozisyonları ile ilişkisi Tablo 1' de görülmektedir.



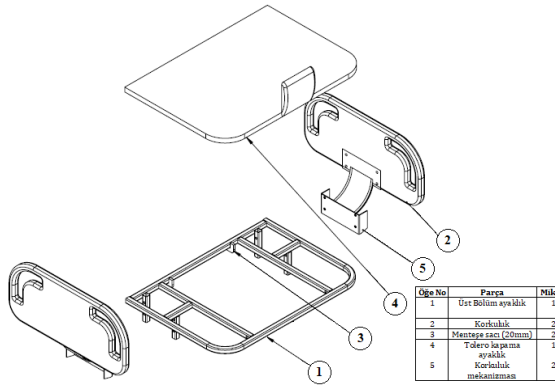
Şekil 5. Yatak sırtlığına ait parça görünümü ve isimleri

Oğe No	Parça	Miktar
1	Üst Bölüm sırtlık	1
2	Kayma lozağı teker tütücü sol	1
3	Kayma lozağı teker tütücü sağ	1
4	Sırtlık kaldırma Laması	2
5	Korukluk	2
6	Tolerö kapama sırtlık	1
7	Korukluk Mekanizması	2



Şekil 6. Yatak şasisine ait parça görünümü ve isimleri

Oğe No	Parça	Miktar
1	Şişe	1
2	Çerçeve ayağı	2
3	Şişe	1
4	Düme Montajı	1
5	Kayma lozağı	2
6	Sırt kaldırma motoru	2
7	Bacak kaldırma motoru	1
8	Motor desteği sacı	1
9	Üst bölüm ayırıcı sacı	1
10	Montaj sacı (40mm)	2
11	Lateral motorlu kulağı	1
12	Tolerö kapama altı	1



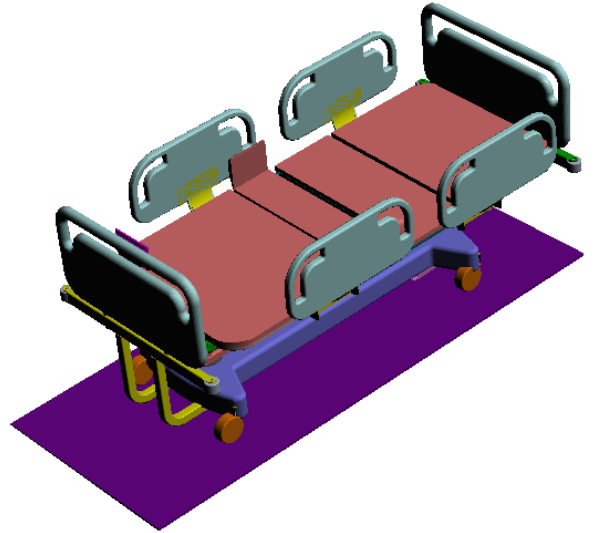
Şekil 7. Yatak ayaklığına ait parça görünümü ve isimleri

Oğe No	Parça	Miktar
1	Üst Bölüm ayaklık	1
2	Korukluk	2
3	Montaj sacı (20mm)	2
4	Tolerö kapama ayaklık	1
5	Korukluk mekanizması	2

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda tasarlanan yatağın istenilen bütün pozisyonlarda rahatlıkla çalıştığı görülmüştür. Mevcut yataklara göre daha fazla hareket ve manevra kabiliyetine sahip olan bu ürün üretime geçilip gerekli izinler alındıktan sonra rahatlıkla ve güvenilir bir şekilde hastanelerde ilgili departmanlara konuşlandırılacağı düşünülmektedir. Tasarımı yapılan yatağa ait son görünüm Şekil 8’de görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan motorların yatak pozisyonları ile ilişkisi

Motor	Hasta yük sekl iği	Tran dlen bur g	Ter s Tran del en bur g	Tilt	Sırt Kal dır ma	Bac ak Kal dır ma	Sa ğa La ter al	S ol a La ter al
A	✓	✓		✓				
B	✓		✓					
C							✓	✓
D							✓	✓
E				✓				
F				✓				
G					✓			
H						✓		



Şekil 8. Tasarlanan yatağın montajlanmış görünümü

## Araştırma Bulguları

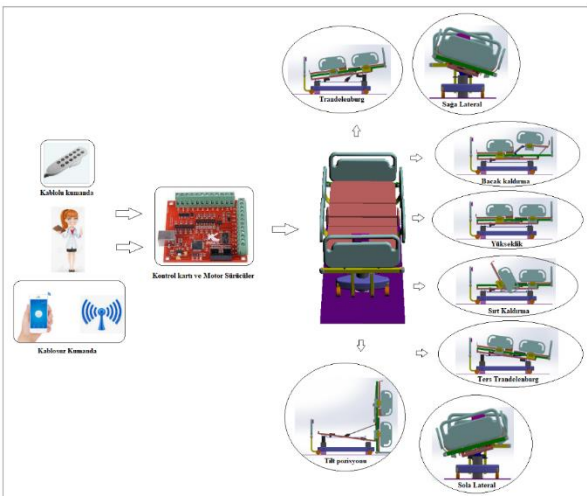
Tasarlanan yatağa ait yoğun bakım hasta karyolası, aşağıdaki yatış pozisyonu özelliklerine sahip olacaktır;

- Supine (Sırtüstü) pozisyon; Acil durumlarda, muayene ve tedavilerde kullanılan bir pozisyonudur.
- Fowler's (sırt kaldırma, oturur) pozisyon: Yatağın baş kısmı yükseltilerek hasta 90° oturur olduğu pozisyonudur. Yemek yeme pozisyonu vs. İhtiyaçları için kullanılır.
- Semi-Fowler's (yarı oturur) pozisyon; Yatağın baş kısmı 30° olduğu pozisyonudur.
- Prone (Yüzüstü) pozisyon: Hareket edemeyen ya da uzun süreli yatak istirahati önerilen hastalarda tedavi amaçlı kullanılır.



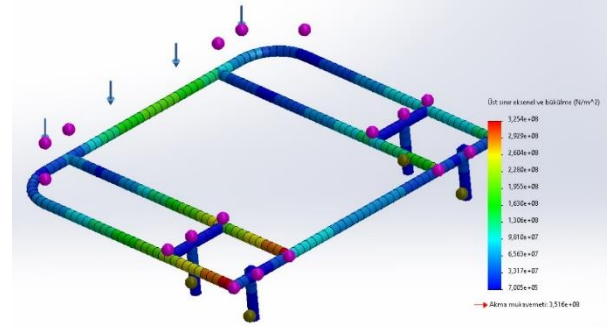
- Trendelenburg pozisyonu; Baş aşağıda ayaklar yukarıda olacak şekilde hastanın sırtüstü yatar durumda olduğu pozisyonudur. Genellikle doktor kontrolünde kullanılır. Hayati organlara kan akışını kolaylaştırır. Bu pozisyon ayrıca hastanın tansiyon düşüklüğü sırasında yatağın baş ve ayak yüksekliğinin ayarlanabilmesini sağlar.
- Ters Trendelenburg pozisyonu; Baş yukarıda ayaklar aşağıda olacak şekilde hastanın sırtüstü yatar durumda olduğu pozisyonudur. Hastanın kardiyak şikâyetlerinin giderilmesi için kullanılır.
- Bacak kaldırma; kan akışını dengelemek için uygun pozisyonudur.
- Yükseltme; Hastanın yatağa konulup alınması, doktorun hastaya temizlik, bakım ve kontrolü sırasındaki erişim yüksekliğinin değiştirilmesini sağlar.
- Sağ-Sol Lateral pozisyon; sol ya da sağ yan yatış pozisyonudur. Bilinci kapalı veya yarı açık hastalara ve uzun süre yatarak tedavi gören hastalara bu pozisyon verilir. Özellikle yanık tedavilerinde bu pozisyonlar çok sık kullanılır.
- Tilt pozisyonu; kan damarlarında genişleme sonucu kan basıncında ani düşme olması ve buna bağlı gelişen komplikasyonları ayırt etmek ve tanı koymak için uygulanan pozisyonudur.

Ayrıca bu pozisyonda rutin yoğun bakım tedavileri sırasında hastada oluşan vertigo ve buna bağlı şikâyetlerin giderilmesi için hastanın zemine göre 00-90° arası açı ile ayağa kaldırılarak konumlandırılması sağlanır. Yapılan tasarım çalışması kapsamında geliştirilebilecek olan yatak, tüm bu pozisyonları sağlayabilecek özelliktedir. Şekil 9, sunulan tasarımın uygulanışını en genel hatları ile göstermektedir.



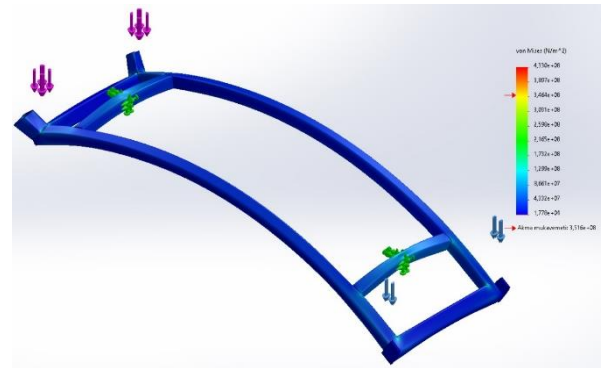
Şekil 9. Tasarımın uygulaması ve yatak pozisyonlarının gösterimi

Kavramsal çalışması yapılan yatağa ait oluşturulan mekanizmanın/sistemin yük taşıyan önemli bölgeleri için hareket ve kuvvet analizleri de yapılmış olup sonuçların bir kısmı aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 10. Yatağın sırtlık kısmı için oluşturulan mukavemet modeli

Hasta yatağının sırtlık kısmı için oluşturulan mukavemet modelinde en yüksek yükleme şartları için (2000 N) kuvvet uygulanmıştır. Bu şartlar altında AISI1020 malzeme tanımlandığında maksimum gerilme ( $\approx 3,25 \times 10^8$  N/mm<sup>2</sup>) akma sınırı ( $3,51 \times 10^8$  N/mm<sup>2</sup>) altında kaldığı gözlemlenmiştir.



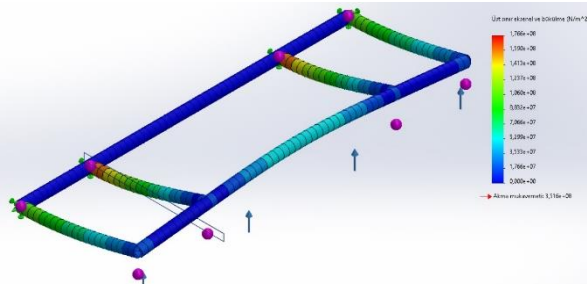
Şekil 11. Yatağın Ana Şasi kısmı için oluşturulan mukavemet

Ana Şasi için oluşturulan mukavemet modelinde ise yatak üzerinde oluşabilecek maksimum yük 5000N olarak kabul edilmiştir. Yatağın ana şasisi üzerinde köşelere gelen 1250N'luk yükün, şasi merkezinde sağa ve sola lateral hareket sırasında kullanılan dönme merkezi üzerine etkisi şeklinde görülmektedir. Yapılan mukavemet analizi ile ana şasi üzerine gelen yükleme koşulları için yeterli olduğu görülmektedir.

Yatağın bacaklık bölgesi için belirlenen yük miktarı 1500N'dur. Bacak kaldırma işlemi sırasında bacaklık kısmında oluşabilecek maksimum gerilme  $1,77 \times 10^8$  N/mm<sup>2</sup> olup AISI1020 malzemesinin akma



gerilmesinden daha düşük bir gerilmeye maruz kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 12. Yatağın bacaklık bölgesi için oluşturulan mukavemet

Bununla birlikte tasarlanan yatağın simülasyon sonuçları incelendiğinde yatağın istenilen performansta çalışabilmesi için aşağıda belirtilen özelliklerde olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Buna göre direnç kol kalıbı ve baş bağlama kalıbı için yatak balon kalıp işlemlerinin yapılmasına ve Lineer aktüatörler için sırası ile 250mm, 200mm, 150mm, 100mm, 50mm ve 30mm stroka sahip aktüatörlerin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Bunun yanında kolon motorun ise 2000N, 400mm stroka sahip olması, korkuluk yatak platformu bağlama, kilitleme mandalı, mekanizma sistemi LCD ekran panelleri ve baş panelleri geçme yuvaları için imalat çeliğinden mamul enjeksiyon kalıplarının kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca üst tolero ABS kalıpları sırt ve ayak bölümü için sırası ile 780mmx850mmx50mm ve 600mmx850mmx50mm şekilli alüminyuma ihtiyaç duyulacağı anlaşılmıştır. Kaplama ABS kalıpları alt ana kasa içinde 1455mmx600mmx120mm ölçülerinde şekilli metal kalıp ihtiyacı olacağı anlaşılmıştır. Yapılan tasarım çalışması neticesinde yan korkuluklar içinde sağ ve sol için 680mmx340mmx50mm ölçülerinde kalıba ihtiyaç duyulacağı anlaşılmıştır. Hasta karyolası boş panel içinse 920mmx480mmx52mm panel kalıbı gerektiği anlaşılmıştır. Tasarlanan yatak 5 tekerlekli, bataryalı ve tartı aksamına sahip olması planlanmıştır.

Yapılması düşünülen tasarım ve tekniklerin istenilen amaç ve hedeflere ulaşmaya elverişli olduğu yapılan simülasyon üzerinden görülmüş ve ayrıca çalışmaya destek veren Medisan Hastane Malzemeleri İmalat-İhr. San Tic. A.Ş firması imalat personelleri tarafından da incelenerek onaylanmıştır.

## SONUÇ

Mevcut durumda, hastanelerde hem fizik tedavinin uygulandığı hem yanık tedavisinin alındığı hem de yoğun bakım yatağı görevini gören bir yatak bulunmamaktadır. Çalışma kapsamında ilgili firma ile birlikte yapılacak ar-ge çalışması neticesinde

piyasada olmayan, hastaya mekaniksel mobilizasyon yaptırabilecek; kalıp ve mekanik işlemleri içeren ve birçok parçadan oluşan 8 motorlu ve 9 eksenli hasta karyolası üretilecektir. Bu anlamda sunulan çalışma oldukça özgün bir değere sahiptir ve hayata geçtiğinde ticarileşebilecek özelliindedir. Bunun yanında yatak fonksiyonları için hasta bakıcı ve hemşirelerin kullanımına uygun yatağa programlanabilme özelliği sağlayacak bir kontrol paneli de yapılacaktır. Hemşire, hastaya uygun tedavi sırasında yatağın olması gereken hareket pozisyonu, hareket sayısı ve hareket süresini fizyoterapist yönlendirmesi dahilinde kontrol panelinden girip kaydedecektir. Bunun neticesinde ayarlanan süre geldiğinde yatak istenilen pozisyonu alıp istenilen sürede istenilen hareketleri otomatik yapacaktır. Ayrıca yatağa yerleştirilecek olan ağırlık (load cell) algılayıcısı (tartı) sayesinde hastanın kilo durumu da takip edilebilecektir. Tüm bu durumların izlenebilmesi ve uzaktan da (kablolu) gerekli programlamanın yapılabilmesi için Android işletim sistemine uygun mobil uygulama geliştirilecektir. Böylece sunulan çalışma neticesinde ileri teknolojiye sahip oldukça konforlu, zahmetsiz ve akıllı bir ticari ürün ortaya çıkmış olacaktır.

## TARTIŞMA

Tasarımı yapılan hasta yatağının belirlenen fonksiyonları yerine getirilebilmesi için bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Özellikle tilt yatak konumu ile sağa ve sola lateral konumlar arasında geçiş sağlanırken mutlaka yatağın normal konuma gelmesi gerekmektedir. Ayrıca tilt konumunda hasta ve yatağın üst şasi kısmının yeterince dikleştirilmesi ve bu işlem sırasında ivmeli hareket oluşumu, kullanılacak motorun kapasitesinin yükselmesine neden olmaktadır.

Bu nedenle tilt konumu için yatak hareket mekanizmasının geliştirilmesi gerekmekte ve motor gücü optimizasyonu yapılması gerekmektedir. İlerleyen çalışmalarda bu probleminde çözümüne yönelik adımlar atılması düşünülmektedir.

## CONCEPTUAL DESIGN OF THE COMBINED PATIENT BED FOR INTENSIVE CARE, BURN THERAPY AND PHYSICAL THERAPY

About a third of human life span is spent in bed. People in need of care, especially in burns and intensive care units, usually spend the whole day in bed. Patients who stay in the intensive care unit for a long time may confronted different risks besides their existing diseases. Being in the bed for a long time can seriously affect the capacity for physical activities, and this effect is exacerbated by the number of days in the hospital. The effect of inactivity is greater in the elderly and in patients with chronic diseases such

as congestive heart failure and COPD (chronic obstructive pulmonary disease). In addition to the detrimental effects of inactivity, intensive care unit patients are also at high risk for the development of neuromuscular disorders. With these effects, the balance function of the inner ear can be impaired and patients may fall from the bed to the floor and be injured. The aim of this study is the design of a combined bed and bed control system that will prevent the patients who are in intensive care and burn treatment unit but also in need of physical therapy from being transported to the physical therapy unit by stretcher, especially for groups whose mobilization is at risk, (cardiology patients (angioplasty, hypertension, peripheral arterial disease), respiratory system diseases (COPD, asthma, etc.))and that will allow them to receive this treatment while in the intensive care unit.

**Keywords:** Hospital bed, electromechanical, design, control, production.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinatörlüğü tarafından TTO.YMY.ULAP.21.281 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca verdikleri destekten dolayı Medisan Hastane Malzemeleri İmalat-İhr. San Tic. A.Ş firması tasarım ve imalat personellerine teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. <https://rapor.saglik.gov.tr/istatistik/rapor/>, T.C. Sağlık Bakanlığı verileri, Son erişim: 20.03.2022, 16:13
2. Sağlık İstatistikleri Yıllığı 2020 Haber Bülteni, <https://sbsgm.saglik.gov.tr/Eklenti/41611/0/haber-bulteni-2020pdf.pdf>, son erişim: 20.03.2022, 14.45
3. <https://khgmsaglikhizmetleridb.saglik.gov.tr.>, T.C. Sağlık Bakanlığı verileri, Son erişim: 18.03.2022, 12:17
4. 8 Ekim 2019 SALI, Resmî Gazete, Sayı: 30912 Sağlık Bakanlığı: Yanık Tedavi Birimleri Hakkında Yönetmelik
5. <https://www.haber7.com/genel-saglik/haber/1008918-21-sehire-26-yeni-fizik-tedavi-hastanesi>, Son erişim: 10.03.2022, 10:13
6. Christopher Johnson, Design, organization and staffing of the intensive care unit, *Critical Illness And Intensive Care – I, Surgery (Oxford) Volume 36, Issue 4, April 2018, Pages 159-165*
7. D.W. Bates, K. Pruess , P. Souney , R. Platt , Serious falls in hospitalized patients: correlates and resource utilization, *Am. J. Med.* 99 (1995) 137–143.

8. R.I. Salgado, S.R. Lord, F. Ehrlich, N. Janji , A. Rahman , Predictors of falling in elderly hospital patients, *Arch. Gerontol. Geriatrics* 38 (2004) 213–219.
9. L.Z. Rubenstein, Falls in older people: epidemiology, risk factors and strategies for prevention, *Age and ageing*, 35 Suppl 2 (2006) ii37-ii41.
10. L.Z. Rubenstein, A.S. Robbins, K.R. Josephson, B.L. Schulman, D. Osterweil , The value of assessing falls in an elderly population. A randomized clinical trial, *Ann Internal Med* 113 (1990) 308–316.
11. E. Capezuti , G. Maislin , N. Strumpf , L.K. Evans , Side rail use and bed-related fall outcomes among nursing home residents, *J. Am. Geriatrics Soc.* 50 (2002) 90–96.
12. Ikuko Sato-Suzuki, Fusako Kagitani, Sae Uchida, Somatosensory regulation of resting muscle blood flow and physical therapy, *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical* 220 (2019) 102557.
13. Selina M. Parry, Lee-anne S. Chapple, Marina Mourtzakis, Exploring the Potential Effectiveness of Combining Optimal Nutrition with Electrical Stimulation to Maintain Muscle Health in Critical Illness: A Narrative Review, *Nutrition in Clinical Practice, Volume 33 Number 6, December 2018* 772–789.
14. Carol L Hodgson, Claire J Tipping, Physiotherapy management of intensive care unit-acquired weakness, *Journal of Physiotherapy* 63 (2017) 4–10.
15. Katherine E. Hodgkin, Amy Nordon-Craft, Kim K. McFann, Meredith L. Mealer, and Marc Moss, Physical Therapy Utilization in Intensive Care Units: Results from a National Survey, *Crit Care Med.* 2009 February; 37(2): 561–568. doi:10.1097/CCM.0b013e3181957449.
16. Thiti Sricharoenchai, Ann M. Parker, Jennifer M. Zanni, Archana Nelliott, Victor D. Dinglas, Dale M. Needham, Safety of physical therapy interventions in critically ill patients: A single-center prospective evaluation of 1110 intensive care unit admissions, *Journal of Critical Care* 29 (2014) 395–400.
17. Liang-Hsuan Lu, Shang-Lin Chiang, Shun-Hwa Wei, Chueh-Ho Lin, Wen-Hsu Sung, Development and clinical application of a computer-aided real-time feedback system for detecting in-bed physical activities, *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 147 (2017) 11–17.
18. Peng Shih-Wei, Lian Feng-Li, Fu Li-Chen. Mechanism design and mechatronic control of a multifunctional test bed for bedridden healthcare. *IEEE/ASME Trans Mech* 2010;15(2):234–41.

19. Seo K. Unified framework for object tracking and recognition based on condensation principal component analysis in a structured environment. PhD thesis, Dept. EECS, KAIST; 2009.
20. Wren CR, Clarkson BP, Pentland AP. Understanding purposeful human motion. In: IEEE international conference on automatic face and gesture recognition;2000.
21. Tamura T, Zhou J, Mizukami H, Togawa T. A System for monitoring temperature distribution in bed and its application to the assessment of body movement. *Physiol Meas* 1993; 14:33–41.
22. Kap-Ho Seo, Tae-Yong Choi, Changmok Oh, Development of a robotic system for the bed-ridden, *Mechatronics*, Volume 21, Issue 1, February 2011, Pages 227-238.
23. Ping-WinLui, Feng MinLai, Kuo-ChihSu, Jen YungLin, Hwa WeiChi, Jean-ShyanWang, Yuh WenChen, *Energy Procedia*, Volume 143, December 2017, Pages 553-558.
24. Ignacio Ghersi, Mario Mariño and Mónica Teresita Miralles, Smart medical beds in patient-care environments, Ghersi et al. *BMC Medical Informatics and Decision Making* (2018) 18:63. IEEE.
25. G. Panik, K. Benki and B. Breko, Voice Operated Intelligent Wheelchair – VOIC, IEEE ISIE 2005, June 20- 23, 2005, Dubrovnik, Croatia.
26. Tawfik, Ahmed Hamdan, Abdulrahman Azzam and Yahya Ibrahim Published Online on 2018. Son erişim: 21.02.2022, 11:23.
27. M.S. Kaiser, Z. Chowdhury, S. Al Mamun, A. Hussain, M. Mahmud. (2016). A Neuro-Fuzzy Control System Based on Feature Extraction of Surface Electromyogram Signal for Solar-Powered Wheelchair. *Cogn. Comput.*, 8(5): 946-954. doi: 10.1007/s12559-016-9398-4.
28. H. Knight, J. K. Lee and H. Ma, "Chair Alarm for patient fall prevention based on Gesture Recognition and Interactivity," 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vancouver, BC, 2008, pp. 3698-3701.
29. Işık, E. & Çelik, İ. (2021). Tersine Mühendislik Çalışmalarında Solidworks Scan To 3d Modülü Kullanarak Tarama Datasından Kati Model Oluşturulması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9 (2), 606-615. DOI: 10.21923/jesd.823317.

# Görüntü Korelasyon Tekniği Kullanılarak ABS 3B Baskıların Kayma Modülü Analizi

Üç boyutlu (3B) baskıların kullanım alanları arttıkça, bu baskıların özelliklerini ve bu özellikleri etkileyen faktörleri anlamak çok önem taşımaktadır. 3B yazdırılan parçaların malzeme özellikleri, bunları yazdırmak için kullanılan ham malzemelerin özellikleriyle eşdeğer değildir. 3B baskının doğası gereği farklı mikro yapısı ve baskı yönleri parçaların anizotropisine neden olur. Bu makale, kesme özelliklerinin anizotropisini belirlemek için Akrilonitril Bütadien Stiren 3B baskılı parçaların mekanik karakterizasyonu için deneysel teknikleri ve sonuçları sunmaktadır. Fiber oryantasyonunun üç boyutlu basılmış parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi,  $\pm 45^\circ$  derece yatay ve dikey olarak basılan numunelerle incelenmiştir. Numunelerin tam alan gerinimini ölçmek için Dijital Görüntü Korelasyon Hesaplama yönteminden yararlanılırken evrensel bir test makinesinde yüklemeye tabi tutulmuştur. İnceleme sonuçlarında yatay numuneler dikey numunelere göre %30 daha yüksek kesme mukavemeti göstermiştir.

*Anahtar Kelimeler: Dijital Görüntü Korelasyon Hesaplama, Mekanik Karakterizasyon, 3B baskı, ABS Gerinim*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 04 Aralık 2022

Kabul: 18 Nisan 2023

\*Sorumlu Yazar: Masoud LATIFINAVID

Email: mlatifinavid@thk.edu.tr

DOI:

<https://doi.org/10.56193/matim.1214523>

*Atf şekli/How to cite: Latifinavid M., Görüntü Korelasyon Tekniği Kullanılarak ABS 3B Baskıların Kayma Modülü Analizi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(1): 22-32.*

## GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) bir birleştirme süreci olarak tanımlanır. Bu süreçte talaşlı imalatın aksine üç boyutlu model (3B) verilerinden nesnelere yapmak için genellikle malzemeler katman katman eklenir. Eİ teknolojisi geleneksel yöntemlerle üretilmeyen ve karmaşık geometrilere sahip olan çok çeşitli prototiplerin üretimini mümkün kılar (Alimardani ve ark. 2007; Yakovlev ve ark. 2005) Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, Eİ tasarım-üretim döngüsünü kısaltabilir ve böylece üretim maliyetini düşürerek, rekabet gücünü artırabilir (Hague ve ark. 2003; Hague ve ark. 2003). Ayrıca, modelleme ve tasarım (Sugavaneswaran ve ark. 2014) süreçlerindeki gelişmeler sayesinde, Eİ teknolojileri son yıllarda daha çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Bu alanların en önemlileri havacılık, otomotiv ve tıp sektörüdür (Antoniw ve ark. 2013; Zeng ve ark. 2013). Eİ teknolojisi özetle fotopolimer sıvı kullanarak (West ve ark. 2001) stereo-litografi (SLA), plastik filamentlerden ergiyik yığıma modellemeyi (FDM) (Dudek 2013), plastik laminasyonlardan laminatlı nesne üretimini (LOM) (Park ve ark. 2000) ve plastik tozlardan seçici lazerli

sinterlemeyi (Kruth ve ark. 2003) kapsamaktadır. Bu teknikler arasında, FDM düşük maliyeti, minimum atık ve malzeme değişimi kolaylığıyla saf plastik parçaların imal edilmesi için en yaygın kullanılan yöntemdir (Noorani 2006).

FDM baskılı parçaların mekanik özellikleri, yazdırma parametreleri (Dey ve ark. 2019), inşa ve doldurma açısı önemli ölçüde etkilenir (Ahn ve diğerleri 2003, 2002). İnşa ve doldurma aşısındaki açıların Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polikarbont'ın (PC) akma ve nihai çekme mukavemetleri, elastisite modülü ve tokluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Cantrell ve ark. 2017). Sunulan sonuçlar, belirtilen malzeme özelliklerinde önemli bir anizotropi göstermiştir.

Literatürde 3B baskılı parçaların kesme özellikleri de araştırılmış, ancak çoğunda tek eksenli çekme testleri ile elde edilen elastik modülü ve Poisson oranı kesme özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır (Ahn ve ark. 2002; Ahn ve ark. 2003). Bu yaklaşımın temelinde, malzemenin izotropik

özelliklere sahip olduğu varsayılır. Doğru kesme modülü ölçümleri elde etmek için, numuneye, normal gerilmelerin en aza indirildiği, saf ve tekdüze kesme gerilimi altında yük uygulanmalıdır.

ASTM 5379 ve ASTM 7078 standartları, kompozit malzemelerin saf ve tekdüze kesme yükü altında kesme özelliklerini belirlemek için özel olarak geliştirilmiş, iyi bilinen doğrudan kesme testi yöntemleridir (ASTM International 2012 ASTM D5379/D5379M-12; ASTM International 2012 ASTM D7078/D7078M-05). Iosipescu test yöntemi kullanılarak kesme gerilim-gerinim davranışının karakterizasyonu, kesme gerilim ve kesme geriniminin kopma meydana gelene kadar tüm yük geçişininin (değerlerinin) ölçülmesini gerektirir.

Hesaplama ve ölçüm tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, duyuca geri beslemesi kullanarak Eİ ve nano-partiküllerin özellikle kompozit malzeme davranışı üzerindeki etkileri inceleyen araştırmalar yaygın olmuştur (Zareie ve ark. 2011; Pol ve ark. 2013; Zareie, Azizi ve ark. 2009). Bu yöntemlere ek olarak optik ve görüntü işleme yöntemleri ile birçok yapısal parametre tespit edilebilmektedir. Özellikle, Dijital Görüntü Korelasyonu (DGK) tekniği ile tam alan izleme, yüzey gerinim dağılımını doğru bir şekilde ölçebilmektedir. DGK metodu kullanılarak deformasyon mekanizmasını incelemek için yüzey yer değiştirmesi ve gerinimi ölçülebilir. Güvenilir gerinim alanını elde etmek için yerel en küçük kareler uydurma yöntemi kullanımı ve alan sınırı, delik alanı ve çatlak alanı gibi durumların incelemesi Bing ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir (Bing ve ark. 2007). Yapay delaminasyonun neden olduğu gerinim tekilliği ve proses hatası DGK izleme yoluyla Devivier tarafından tespit edilmiştir (C Devivier ve ark. 2010; Cédric Devivier, Pierron, and Wisnom 2012). Bazı araştırmalarda deformasyon yoluyla malzeme performansını incelemek için DGK kullanılmıştır. Jorge ve ark. korelasyon hesaplama yazılımı yardımıyla çatlak büyüme davranışını incelemiştir (Abanto-Bueno ve ark. 2002). Laurin ve ark. hasarlı kompozit yapıları çekme ve basma yükleri altında DGK tam alan ölçümlerini kullanarak incelemiştir (Laurin ve ark. 2012). Caminero, kompoziti izlemek, açık delikli laminatlar, ardından yapışkanla bağlanmış yama onarımlarının hasar ve performansını araştırmak için DGK kullanmıştır (Caminero ve ark. 2013).

Bu çalışmada görüntü işleme tekniği kullanılarak, ABS 3B baskıların kayma modülü analizi yapılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, gerinim pulu gibi mekanik duyuclar kullanmadan üç boyutlu baskı parçalarda, üretim parametrelerinin kayma modülü üzerinde etkisini incelemektir. İncelenen üretim parametreleri inşa ve doldurma aşısıdır.

## YÖNTEM

### Test Numunelerinin Üretimi

Numuneler FDM yöntemi kullanarak, ASTM D5379 standartlarına uygun üretilmiştir. Malzeme olarak ABS filament (1.75 mm çapında) kullanılmıştır. Test numunelerinin tasarımı SolidWorks yazılımıyla yapılmıştır. Kesme testi için tasarlanan test numunelerin boyutları Şekil 1'de gösterilmiştir. Numune geometrisi Stereolitografi dosyası (STL) haline getirilmiş ve "Z-Suite" adında, 3B dilimleme yazılımına aktarılmış ve orada baskı parametreleri girilmiştir. Numuneler Zortrax M 200 yazıcısıyla üretilmiştir.

Baskı parametreleri tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Numunelerin baskı parametreleri

Baskı hızı	35 mm/s
Katman yüksekliği tüm katmanlar için	0.19 mm
Doldurma yoğunluğu	%100
Yatak ve başlık sıcaklığı	80 °C
Başlık sıcaklığı	275 °C

Fiber oryantasyonunun üç boyutlu basılmış parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, Şekil 2'de gösterildiği gibi, farklı baskı doğrultusundaki numunelerle incelenmiştir.

### Dijital Görüntü Korelasyon Analizi Sistemi

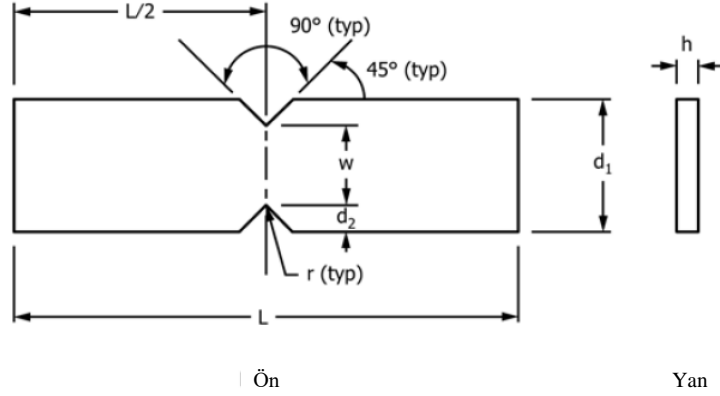
Bu çalışmada DGK analizi GOM yazılımı (GOM Correlate Professional 2017, Braunschweig, Germany) ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle üretilen numuneler (Şekil 3-a) beyaz renk spreyle boyanmış (Şekil 3-b). Ardından siyah spreyle boyanmış (Şekil 3-c). Bu siyah işaretler GOM yazılımı kullanılarak bir stokastik desen şeklinde uygulanmıştır. Bu stokastik desen sayesinde yazılım yüzey algılamasını ve gerekli değişkenleri ölçmeyi sağlamıştır. Deseni oluşturan beyaz boya ile siyah markerler arasındaki kontrast, GOM yazılımının algılayabileceği kadar büyüklüktedir.

Deney sırasında yüksek çözünürlüklü görüntü kaydı için IP kamera düzeneği kurulmuştur. Bu düzenek bir SONY marka FCB-EV 7520A model kamera ve bağlantı ekipmanından oluşmaktadır (Şekil 4). Bu kamera yüksek başarımlı 1/2.8-tip Exmor R CMOS duyuca kullanarak Full HD (1920 x 1080) görüntü sağlamaktadır. Kamera manuel ve otomatik odaklanma özelliğine ve 30 X optik zoom ve 12 X dijital zoom kabiliyetine sahiptir. Bu kameradan görüntü almak için bir LVDS kablo ve bir

görüntü aktarıcı kartı kullanılmıştır. Bu kartın görevi yüksek görüntü frekansında gelen kareleri RJ45 bağlantısı ile IP üzerinden RTSP protokolü ile bilgisayara aktarmaktır. Bu görüntüler H264 sıkıştırma yöntemi ile kodlanıp aktarılmıştır.

Visca-Pelco-D protokolü kullanılmıştır. Bu protokol ile net görüntü elde etmek için gerekli zoom ve odaklama komutları kameraya gönderilmiş kesme deneyi sırasında alınan görüntüler saniyede 50 kare olarak kayıt edilmiştir.

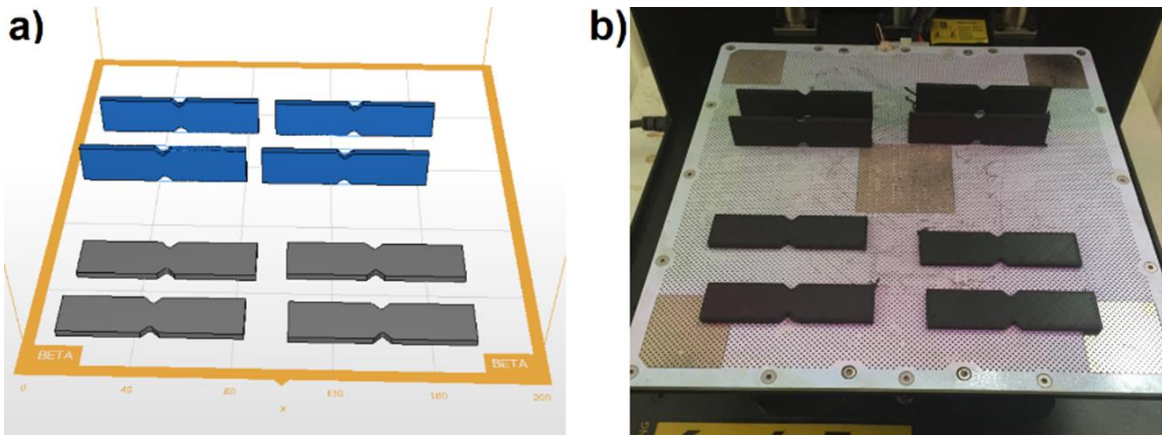
Deney sırasında kameraya bilgisayardan komut göndermek için RS485 seri iletişim portu ve



Nominal Numune Ölçüleri

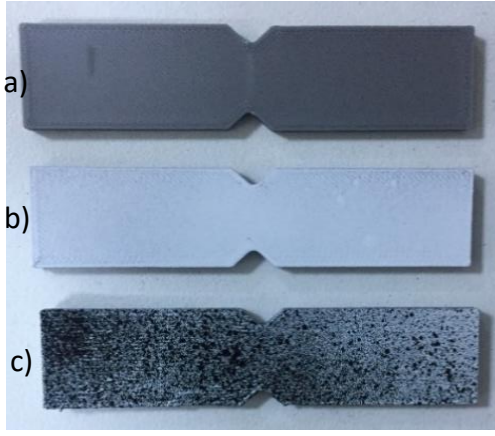
$d_1$	= 19 mm [0.75 in.]
$d_2$	= 3.8 mm [0.15 in.]
$h$	= gerektiği kadar
$L$	= 76 mm [3.0 in.]
$r$	= 1.3 mm [0.05 in.]
$w$	= 11.4 mm [0.45 in.]

Şekil. 1. V çentikli test çubuğu şematiği (ASTM International, 2012.ASTM D5379/D5379M-12-Standard)

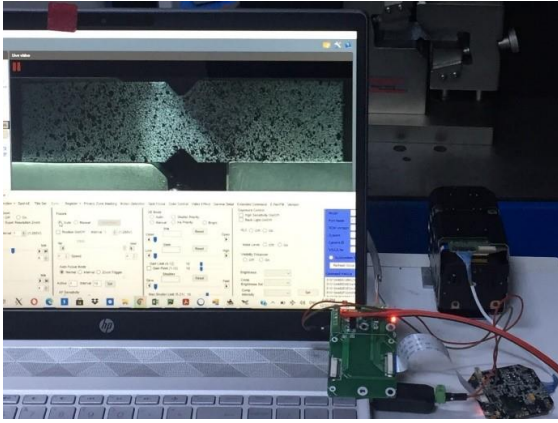


Şekil.2. ASTM D638 standardına uygun numunelerinin hazırlanması a) Z-Suite yazılımında parçaların tabla üzerinde yerleşimi ve basım işlemi için hazırlanması; b) basılmış numuneler





Şekil 3. Dijital Görüntü Korelasyon Analizi için numuneler üç aşamada hazırlanmıştır. (a) Üretilen Numune – (b) Beyaz sprey ile boyanmış numune – (c) Siyah işaretler eklenmiş numune



Şekil 4 Görüntü alma düzeneği

### Mekanik Karakterizasyon

Numunelerin kalınlığı 3 mm'dir. Testler ASTM D5379M-12 standardına uygun bir fikstür 'de (Şekil 5) gerçekleştirilmiştir. Bu fikstür geniş kapsamlı çekme testi makinesine bağlanmıştır (Şekil 6). Test numuneleri yüklenirken aşağıdaki prosedür izlenmiştir:

- Önce, her tutucunun çenesi numunenin tutucuya kolayca girebileceği kadar gevşetilmiştir. Ardından tutucuların dikey pozisyonunda yaklaşık olarak hizalanması için oynar başlık ayarlanmıştır.
- Numuneler iki tutucuya da gevşek olarak yerleştirilmiş ve numunenin düz sırtı fikstürün arka duvarına yaslanmıştır. Numune hizalama aracıyla numunenin v-çıkıntısını fikstürün ortasına hizalamak için Şekil 3'te gösterildiği gibi numune yukarı çekilmiştir.
- Numune ortalanmış şekilde tutulurken, sol tarafta kalan çene (alt tutucu) numuneyi sabitlemek için hafifçe sıkılmıştır. Ardından test cihazının kafası, üst tutucunun üst yüzeyi ile sağ taraftaki çenenin üst yüzeyi birbirine dokunana kadar oynatılmıştır.

Bundan sonra sağ taraftaki çene de hafifçe sıkılmıştır.

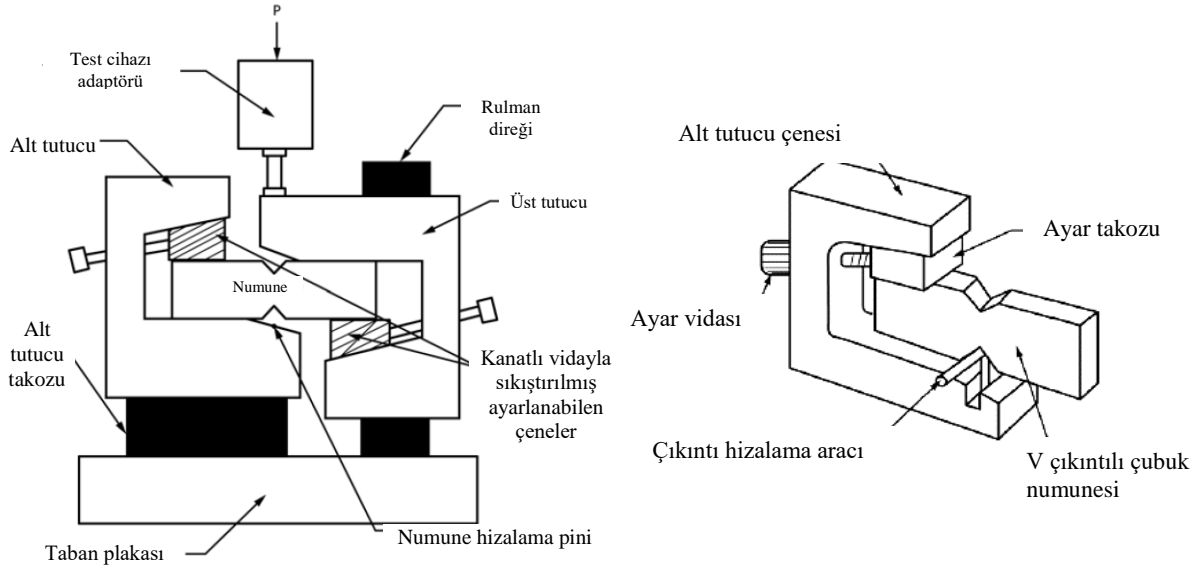
Testler 1 mm/dk sabit çene başlık hızıyla yapılmıştır. Test esnasında yük ve yer değiştirme verileri kaydedilmiştir. Bu veriler yük-yer değiştirme grafiklerini çizdirmek ve kayma gerilimini bulmak için kullanılmıştır.

### Dijital Görüntü Korelasyon Hesaplama

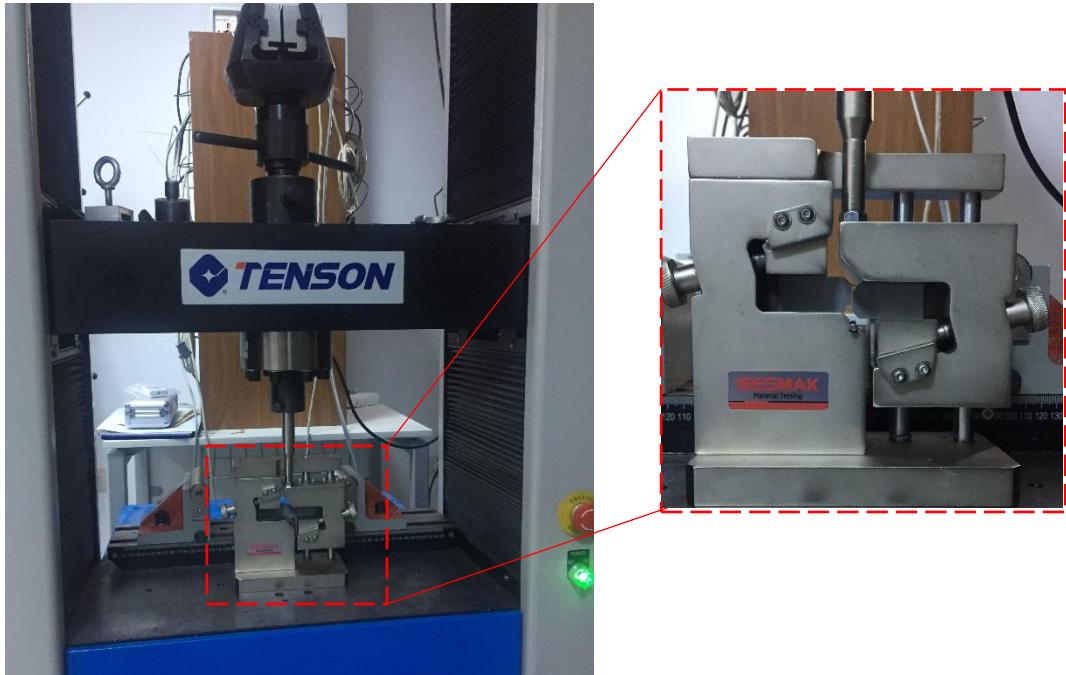
DGK kayma ve gerilimi temassız olarak hassas optik ölçümleme yöntemidir. Deformasyondan önceki ve sonraki nesne yüzeyinin iki görüntüsü kayıt edilir. Nesne deformasyon alanının ölçümü, nesne yüzeyinde rastgele dağılmış noktaların deformasyonundan önce ve sonra olasılıksal korelasyona dayalı olarak gerçekleştirilir. Daha önce belirtildiği gibi bu noktalar, manuel sprey boya ile oluşturulur veya nesne yüzeyinde bulunan doğal dokular kullanılır. Alan deformasyonu meydana geldiğinde, noktalar birlikte hareket ederler. Koordinat orijinlerinin deformasyonunu incelemek için deformasyon öncesi ve sonrasını resimleri karşılaştırılır. Karakteristik noktalar deformasyonla birlikte değişir. Deformasyon öncesi ve sonrası nesne yüzey alanının sayısal korelasyonu hesaplanabilir ve daha sonra, alanın yer değiştirmesini değerlendirmek için en yüksek benzerlik değerine sahip merkezi nokta koordinatı döndürülür. Örneğin bir referans görüntüden  $N$  sayıda referans noktasının seçildiğini varsayalım. Referans görüntü,  $(2m+1) \times (2m+1)$  boyutunda  $N$  noktası ortalanmış bölgelere bölünür, burada  $m$ , alt kümenin uzunluk birimidir. Bu  $N$  bölgelerine referans alt küme denir. Benzer şekilde, deformasyon görüntüsü, boyutu  $(m+1) \times (m+1)$  olan  $N$  noktası merkezli bölgelere bölünür. Bu  $N$  bölgelerine hedef alt küme denir. Referans alt küme hedef alt kümeden daha büyük olduğundan, deformasyon çok açık olmadığı sürece, referans alt kümede ve hedef alt kümede 'neredeyse özdeş' bir bölge bulunabilir. Bu iki bölge arasındaki benzerlik derecesinin en yüksek olduğu anlamına gelir (Şekil 7).

Referans noktalarının sayısı hesaplama hassasiyetini ve süreç yükünü belirler. Ne kadar çok referans noktası varsa, o kadar fazla deformasyon detayı yansıtılabilir. Tek korelasyon hesaplamasının başarı oranı, referans alt kümesinin boyutuna bağlıdır. Referans alt küme ne kadar büyükse, benzer bölgeleri bulma olasılığı o kadar yüksek olur, Şekil 7. Elde edilen görüntüler, her testten sonra GOM yazılımında işlenmiştir. DGK analizlerinde aşağıdaki parametreler kullanılmıştır: grit boyutları (grid size), 57– 83 piksel; and grit örtüşme (grid overlapping), 11 piksel. Sonuç olarak, incelenen yüzeyde yer değiştirmelerin ve şekil değiştirmelerin dağılımları elde edilmiştir.

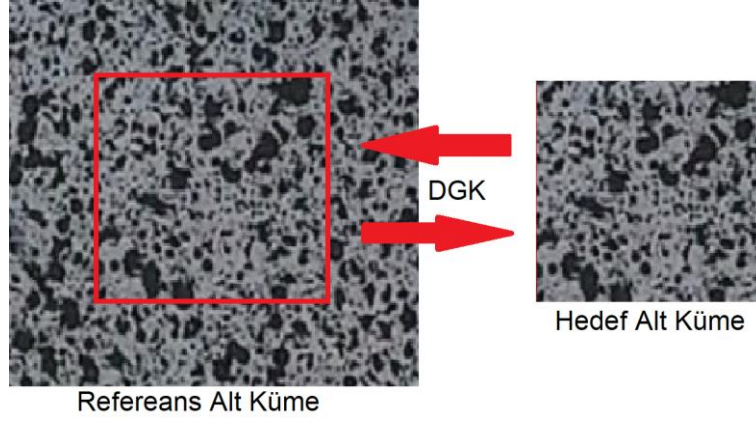




Şekil 5. V çıkıntılı çubuk için test fişstürü a) şematik, b) Numunenin fişstüre hizalanma şematığı (ASTM International, 2012. ASTM D5379/D5379M-12-Standard)



Şekil.6. Kayma testi düzeneği



Şekil. 7. Referans alt küme ve hedef alt küme arasındaki en yüksek benzerlik oranı

### Kesme Elastisite Modülü Hesaplama

Bu aşamada öncelikle kesme gerilimi ( $\tau$ ) ve kırılmadaki kesme direnci ( $\tau_u$ ) Denklem 1 ve Denklem 2'yi kullanarak hesaplanmıştır.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$\tau_u = \frac{P_u}{A} \quad (2)$$

Bu denklemlerde,  $A$  kesit alanı,  $P$  kesme kuvveti ve  $P_u$ , kırılma kuvveti veya %5 mühendislik kesme gerinimine tekabül eden kesme kuvvetidir. ASTM D 5379 standardına göre kesme Gerinimi ( $\gamma$ ) ve kırılma gerinimini ( $\gamma_u$ ) hesaplamak için Denklem 3 ve 4 kullanılmıştır (ASTM International 2012. ASTM D5379/D5379M-12). Denklem 3'te

$$\gamma = |\epsilon_{+45}| + |\epsilon_{-45}| \quad (3)$$

$$\gamma_u = \text{minimum} \left\{ \begin{array}{l} \%5 \\ \gamma \text{ Nihai kuvvetteki hesaplanan gerinim} \end{array} \right. \quad (4)$$

ASTM D 5379 standardına göre Denklem 4'te kesme mukavemetini temsil etmeyen sonuçların raporlanmasından kaçınmak için %5 mühendislik kayma gerinimi dahilinde nihai kırılma meydana geldiyse maksimum ölçülen kuvvetteki gerinim dikkate alınır. Aksi takdirde yani %5 mühendislik kayma gerinimi dahilinde nihai kırılma meydana gelmezse, bu %5'lik değere tekabül eden gerinim dikkate alınır (ASTM International, 2012. ASTM D5379/D5379M-12).

Burada  $\epsilon_{+45}$  ve  $\epsilon_{-45}$ , yük eksenlerine göre +45° ve -45°'de tanımlanan ölçme aracının (gauge) kayıt ettiği gerinim değerleridir. GOM yazılımında -45° yönü x eksen, +45° yönü y eksen olarak

tanımlanmış ve bu eksenlerde gerinim ölçme aracı tanımlanmıştır. Her eksen için ölçme aracı üzerinde üç nokta tanımlanmıştır. Bu noktaların ortalama gerinim değerleri deney süreci boyunca yazılımsal olarak hesaplanmış ve kayıt edilmiştir (Şekil 8).

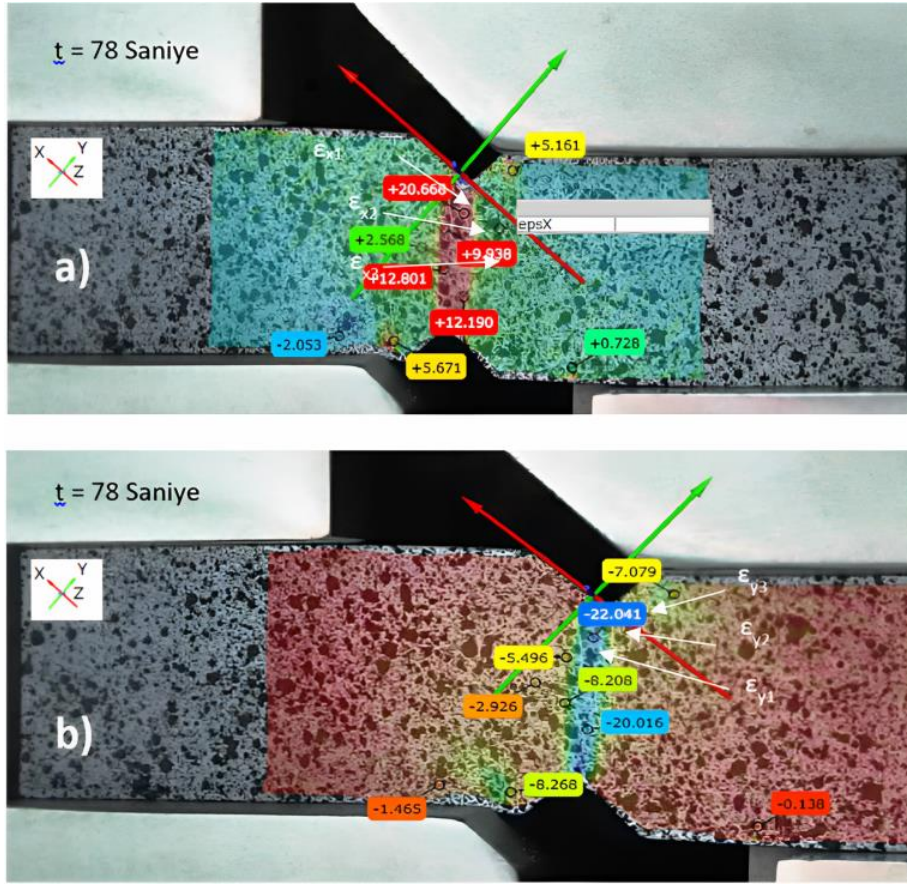
Son olarak Kesme Elastisite Modülü ( $G$ ) Denklem 6 kullanılarak hesaplandı.

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (6)$$

Kesme Gerinimini hesaplamak için denklem 3'te belirtildiği gibi  $\epsilon_{+45}$  ve  $\epsilon_{-45}$  değerlerine ihtiyaç vardır. Bu değerleri hesaplamak için X ve Y eksenlerine paralel olarak üç referans nokta tanımlanmıştır (Şekil 8). Bu referans noktalarının gerinim değerlerinin ortalaması Dijital Görüntü Korelasyon yöntemi ve GOM yazılımını kullanarak hesaplanmıştır. X eksenine paralel olan değerlerin gerinim ortalaması  $\epsilon_{-45}$  ve Y eksenine paralel olan değerlerin gerinim ortalaması  $\epsilon_{+45}$  olarak kullanıldı.

### SONUÇ

Şekil.9. Kesme test Şekil 9'da sunulmuştur. Bu sonuçlar yatay ve dikey olarak basılan numunelerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri olarak verilmiştir. Yatay ve dikey basılan numunelerin maksimum dayanımı sırasıyla 1.45 ve 1.16 kN çıkmıştır. Şekil.10. Yatay ve dikey baskıları için Gerilim-Gerinim Diagramı verilmektedir. Şekil 10'daki graflar DGK yazılımında ayrı olarak sabit frekansta %15 hareketli ortalama kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yüzden saçılım diyagramı formunda gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre ABS yatay basılan numuneler için ortalama kesme dayanımı 34.8±4 MPa olarak hesaplanmıştır. Dikey numuneler için ise ortalama kesme dayanımı 26.8±2 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar üç başarılı testin sonuçlarının ortalaması olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Kesme gerinimi hesaplama (a) x-ekseni, and (b) y-ekseni

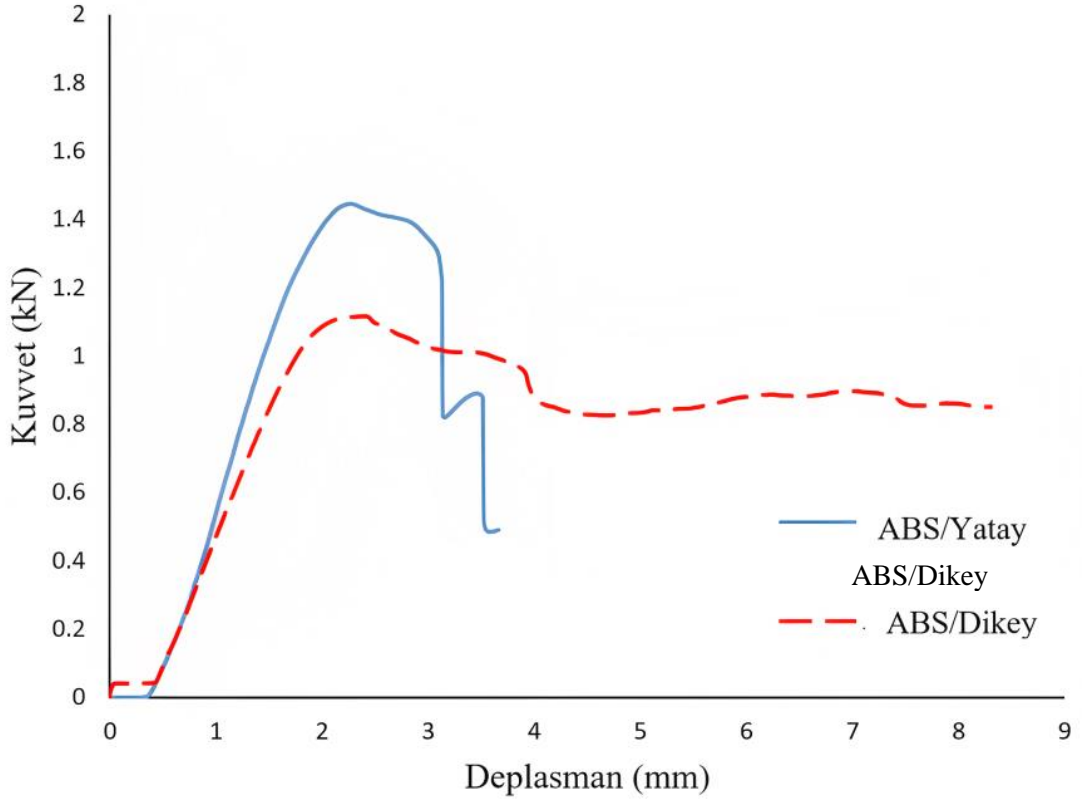
Üç başarılı testin ortalama Kesme Elastisite Modülü yatay ve dikey basılan numuneler için sırayla  $940 \pm 80$  MPa ve  $1300 \pm 100$  MPa olarak denklem 6'da belirtildiği gibi hesaplanmıştır. Yatay ve dikey basılan örnek numunelerin X ve Y yönündeki gerinim dağılım oranları sırayla Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmektedir.

Yatay ve dikey basılan numunelerin gerinim dağılımlarındaki değer farklarına rağmen genel dağılım şeması her iki formda benzerdir. Numunelerin nihai kesme mukavemetini karşılaştırırken, net bir eğilim ortaya çıkmıştır. Yatay numuneler dikey numunelere göre % 30 daha yüksek kesme mukavemeti göstermiştir. Bu sonuçların nedeni, üç boyutlu baskı katmanları arasındaki yapışma yüzeyinin düşük mukavemeti ve bu nedenle çekilen alanlarda delaminasyon oluşmasıdır. Başka bir deyişle yatay baskılarda yük daha çok polimeri etkiliyor ve kırılma polimer örgülerinin çekilmesi ve kırılması sonucunda meydana geliyor (Şekil 11-a). Ama dikey baskılarda polimer örgülerinin kırılmasından önce delaminasyon meydana gelebilir ve bu nedenle erken kırılma ve daha az kesme mukavemeti gözlemlenmiştir (Şekil 11-b).

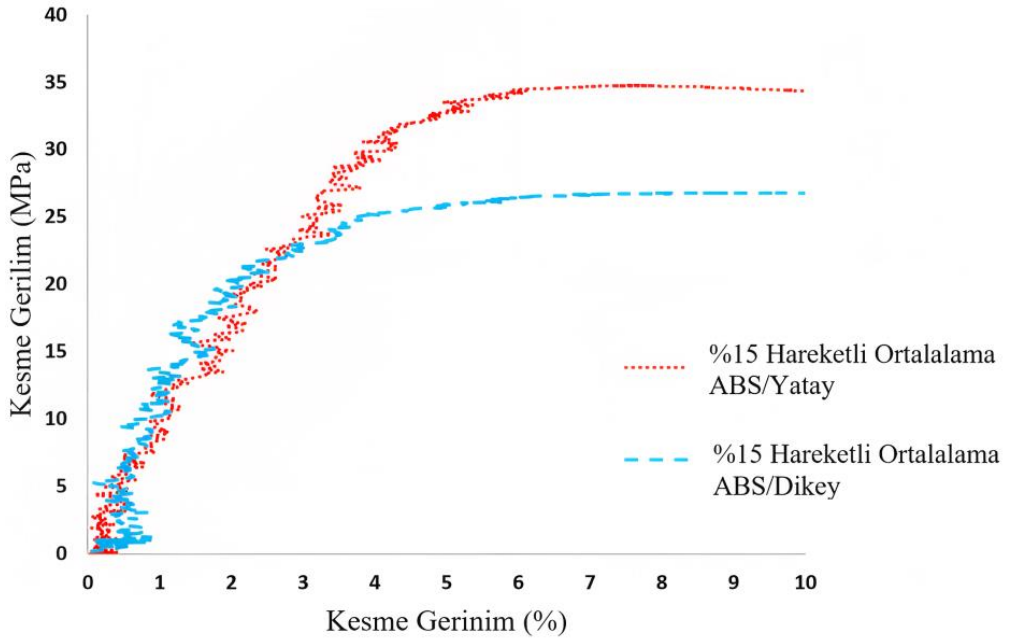
## DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada FDM baskılı ABS parçaların kesme özellikleri baskı yönleri açısından incelenmiştir. Kesme yüklemesi altındaki numuneler üzerindeki tam alan gerilimini ölçmek için 2 boyutlu DGK tekniği kullanılmıştır. Kesme testi sonuçları, ABS dikey baskılara kıyasla ABS yatay baskı dayanımlarının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Numunelerin inşa yönüne bağlı olarak kesme özelliklerinde gözle görülür bir anizotropi gözlemlenmiştir. Biriktirilen katmanlar arasındaki yapışma yüzeyinin düşük mukavemeti nedeniyle dikey basılan numunelerde daha düşük kesme dayanımı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, ABS 3B baskılarda yatay olarak basılan numunelerde elde edilen üstün mekanik özellikler, 3B baskı teknolojisinde daha yüksek kesme mukavemeti elde etmek için doğru baskı yönü seçimi önemini göstermektedir. Ayrıca bu çalışma DGK Hesaplama yönteminin gerinim analizinde uygulanabilirliğini ve etkisini göstermektedir.

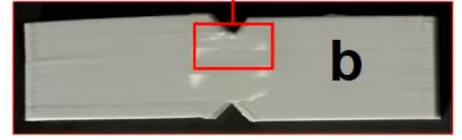
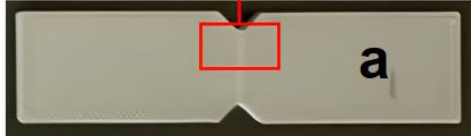
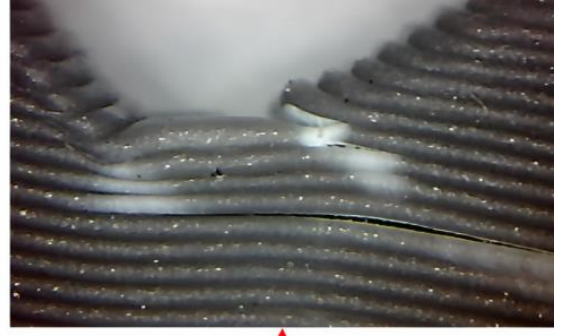
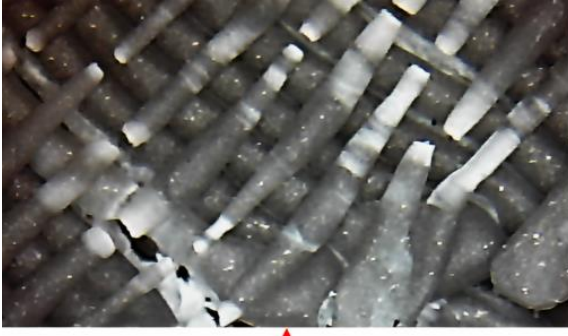


Şekil.9. Kesme testlerinden elde edilen yük-yer değıştirme grafiği

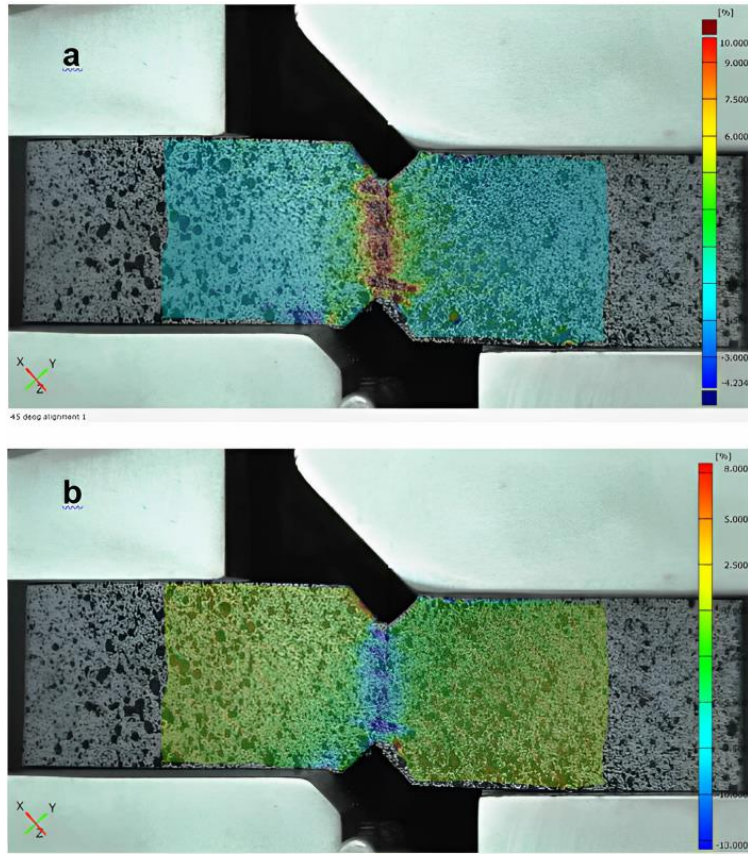


Şekil.10. Yatay ve dikey baskıları için Gerilim-Gerinim Diagramı %15 hareketli ortalama kullanarak hesaplanmıştır. Kırmızı yatay baskı ve mavi dikey baskı sonuçlarıdır.

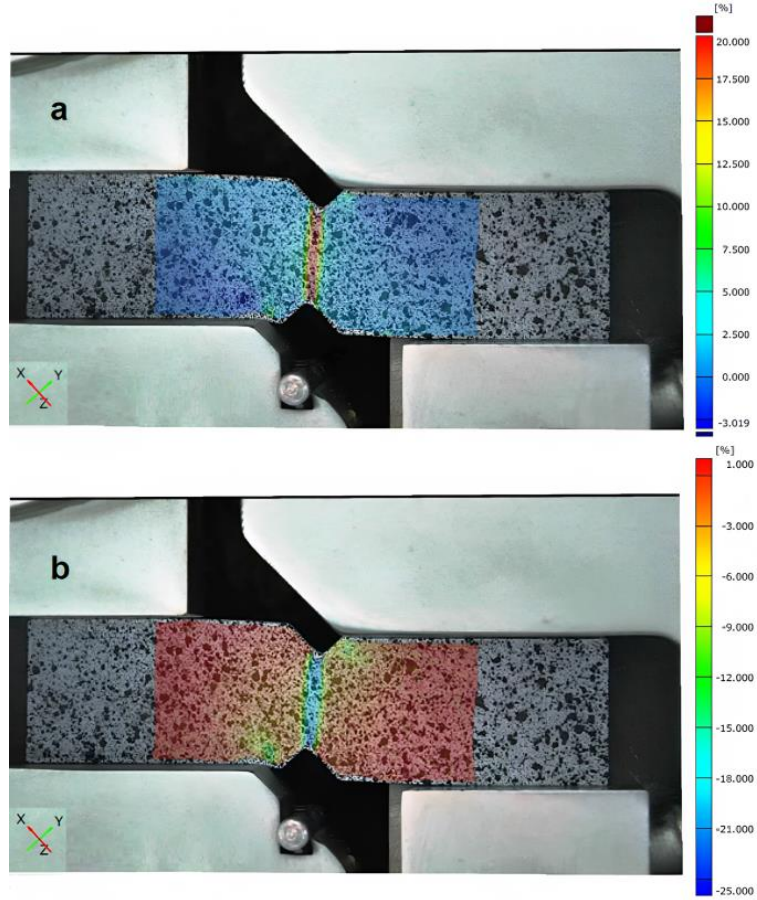




Şekil.11. Yatay ve dikey baskıların kırılma davranışı, (a)Yatay baskı, (b) Dikey baskı



Şekil.12. Dikey basılan örnek numunede gerinim dağılım oranı, (a)  $\epsilon_x$ , (b)  $\epsilon_y$



Şekil. 13. Yatay basılan örnek numunede gerinin dağılım oranı, (a)  $\epsilon_x$ , (b)  $\epsilon_y$

### SHEAR MODULUS ANALYSIS OF ABS 3D PRINTS USING IMAGE CORRELATION TECHNIQUE

As the application areas of three-dimensional (3D) printing increase, it is very important to understand the characteristics of these prints and the factors affecting these features. The material properties of 3D-printed parts are not equivalent to the properties of the raw materials used to print them. Due to the nature of 3D printing, different microstructures and printing directions cause anisotropy in parts. This study presents experimental techniques and results for the mechanical characterization of Acrylonitrile Butadiene Styrene 3D-printed parts to determine the anisotropy of shear properties. The effect of fiber orientation on the mechanical properties of 3D printed parts was investigated with samples printed horizontally and vertically at  $\pm 45^\circ$ . The samples were investigated under load using a universal testing machine while using the Digital Image Correlation Calculation method to measure the full field strain. In the test results, horizontal samples showed 30% higher shear strength than vertical samples.

**Keywords:** Digital Image Correlation Calculation, Mechanical Characterization, 3D Printing, ABS Strain

### KAYNAKÇA

1. Abanto-Bueno, J. and Lambros, J., 2002. Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(14-16), pp.1695-1711.
2. Ahn, S.H., Baek, C., Lee, S. and Ahn, I.S., 2003. Anisotropic tensile failure model of rapid prototyping parts-fused deposition modeling (FDM). *International Journal of Modern Physics B*, 17(08n09), pp.1510-1516.
3. Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P.K., 2002. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid prototyping journal*.
4. Alimardani, M., Toyserkani, E. and Huissoon, J.P., 2007. Three-dimensional numerical approach for geometrical prediction of multilayer laser solid freeform fabrication process. *Journal of laser applications*, 19(1), pp.14-25.
5. Antoni, S., McCarthy, N., Pacey, E., Parkin, B. and Shelton, P., 2013. *Additive manufacturing: opportunities and constraints*. Royal Academy of Engineering, 1st edition, London.

6. ASTM International, 2012. ASTM D5379/D5379M-12-Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
7. ASTM International, 2012. ASTM D7078/D7078M-05-Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
8. Azizi, A., Dourali, L., Zareie, S. and Rad, F.P., 2009, December. Control of vibration suppression of an smart beam by pizeoelectric elements. In 2009 Second International Conference on Environmental and Computer Science (pp. 165-169). IEEE.
9. Caminero, M.A., Lopez-Pedrosa, M., Pinna, C. and Soutis, C., 2013. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation. *Composites Part B: Engineering*, 53, pp.76-91.
10. Cantrell, J.T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., Young, A., Jerez, A., Steinbach, D., Kroese, C. and Ifju, P.G., 2017. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), pp.811-824.
11. Devivier, C., Thompson, D., Pierron, F. and Wisnom, M.R., 2010. Correlation between full-field measurements and numerical simulation results for multiple delamination composite specimens in bending. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 24, pp. 109-114). Trans Tech Publications Ltd.
12. Devivier, C., Pierron, F. and Wisnom, M.R., 2012. Damage detection in composite materials using deflectometry, a full-field slope measurement technique. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(10), pp.1650-1666.
13. Dey, A. and Yodo, N., 2019. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), p.64.
14. Dudek, P.F.D.M., 2013. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of metallurgy and materials*, 58(4), pp.1415-1418.
15. Hague, R., Campbell, I. and Dickens, P., 2003. Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), pp.25-30.
16. Hague, R., Mansour, S. and Saleh, N., 2003. Design opportunities with rapid manufacturing. *Assembly Automation*, 23(4), pp.346-356.
17. Bing, P. and Huimin, X., 2007. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method. *Acta Optica Sinica*, 27(11), p.1980.
18. Kruth, J.P., Wang, X., Laoui, T. and Froyen, L., 2003. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), pp.357-371.
19. Laurin, F., Charrier, J.S., Lévêque, D., Maire, J.F., Mavel, A. and Nuñez, P., 2012. Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements. *Procedia IUTAM*, 4, pp.106-115.
20. Noorani, R., 2006. *Rapid prototyping: principles and applications*. John Wiley & Sons.
21. Park, J., Tari, M.J. and Hahn, H.T., 2000. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*.
22. Pol, M.H., Zabihollah, A., Zareie, S. and Liaghat, G., 2013. EFFECTS OF NANO-PARTICLES CONCENTRATION ON DYNAMIC RESPONSE OF LAMINATED NANOCOMPOSITE BEAM. *Mechanics*, 19(1), pp.53-57.
23. Sugavaneswaran, M. and Arumaikkannu, G., 2014. Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication. *Materials & Design* (1980-2015), 54, pp.779-785.
24. West, A.P., Sambu, S.P. and Rosen, D.W., 2001. A process planning method for improving build performance in stereolithography. *Computer-Aided Design*, 33(1), pp.65-79.
25. Yakovlev, A., Trunova, E., Grevey, D., Pilloz, M. and Smurov, I., 2005. Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surface and Coatings Technology*, 190(1), pp.15-24.
26. Zareie, S., Zabihollah, A. and Azizi, A., 2011, April. Buckling control of morphing composite airfoil structure using multi-stable laminate by piezoelectric sensors/actuators. In *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2011* (Vol. 7978, pp. 495-500). SPIE.
27. Zeng, W., Guo, Y., Jiang, K., Yu, Z., Liu, Y., Shen, Y., Deng, J. and Wang, P., 2013. Laser intensity effect on mechanical properties of wood-plastic composite parts fabricated by selective laser sintering. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(1), pp.125-136.



Bahman Paygozar 

TOBB University of Economics and Technology  
Department of Mechanical Engineering  
Ankara

Recep M. Gorguluarslan\* 

TOBB University of Economics and Technology  
Department of Mechanical Engineering  
Ankara

# Bonding Additively Manufactured PLA Materials: Effects of Joint Scarf Angle and Substrate Raster Orientation

*The aim of this study is to investigate the effect of the scarf angle of the bonding region and the raster orientation of 3D printed substrates for the adhesive scarf joints made of additively manufactured Polylactic acid (PLA) adherends. In the first step, single PLA specimens were 3D printed using the fused filament fabrication (FFF) process in three different raster orientations of 0°, 45°, and 90°. The joints were built with five different scarf angles. The tensile and compression tests of all the specimens were conducted to determine the failure loads for different scarf angles and raster orientations. It is found that the endured load before rupture varies measurably as a function of the raster orientation of printed substrates and scarf angle of the joint, but differently for tensile and compression loadings. An optimization was also done for the joints with substrates of 45° raster orientation and different scarf angles to find a suitable scarf angle, with which the joint can have an acceptable behavior (i.e. reasonable values of the failure load) under both compression and tensile loadings. Consequently, the optimal scarf angle was determined to be about 30°.*

*Keywords: Adhesive scarf joint; scarf angle; raster orientation; PLA; Interlayer and Intralayer failure.*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 6 Şubat 2023

Kabul: 11 Nisan 2023

\*Sorumlu Yazar: Recep M. Gorguluarslan

Email: [rgorguluarslan@etu.edu.tr](mailto:rgorguluarslan@etu.edu.tr)

DOI:

<https://doi.org/10.56193/matim.1248357>

*Atıf şekli/How to cite: Paygozar B., Gorguluarslan R., M., Bonding Additively Manufactured PLA Materials: Effects of Joint Scarf Angle and Substrate Raster Orientation. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(1): 33-42.*

## 1. INTRODUCTION

Several industries have lately accepted the additive manufacturing (AM) technology with an eagerness to reduce the manufacturing costs and to raise the advantages provided through the parts produced by AM (e.g. drops in petrol usage due to reduction in the weight of cars) [1]. Potential benefits of AM technology include the fabrication of complex geometries and the reduction of products' weight, transport difficulties, and material losses, because of which AM techniques are of high interest in the automotive industry [2, 3]. AM techniques have also been suggested to be used for joining structures made from dissimilar materials such as polymers and metals [4]. Furthermore, the adhesively bonded joints have recently been used for polymeric parts fabricated by one of AM techniques called fused filament fabrication (FFF) [5].

Adhesively bonded joints are widely valued in various industries due to the advantages including

uniformity of the stress distribution, tolerating large values of peel and shear strengths, low levels of stress concentration, and the negligible added weight of the joints compared to the traditional mechanical (riveting, bolting, etc.) or welded joints. Other suitable features of adhesive bonding include the applicability of adhesives in attaching a variety of materials comprising metals, composites, and 3D printed polymers [6, 7].

Among different types of adhesive bonding techniques such as the single-lap or the double-lap joints, the scarf joints are of high interest and used for industrial applications as they can eliminate some negative effects of other bonding techniques such as the bending of the substrates under loading. Moreover, the strength of scarf joints is much less affected by over stresses near the adhesive layer, when compared to single or double lap joints [8].

The use of adhesive bonding in AM industries can also enable the fabrication of parts with large dimensions, which are not possible to build by FFF machines due to their small build region (i.e. print bed of the machine) [9]. Some studies investigated bonding the additively manufactured parts with adhesives. For instance, it has been shown that modifying the adherend geometry at the adhesive bonding region and changing the raster orientation of the adherends fabricated by the FFF technique can improve the bonding of single lap joints for the Polylactic acid (PLA) material [10, 11].

Recent studies indicated that the adhesive bonding of polymeric materials fabricated by AM techniques is promising to be also used in industrial applications. It is notable that, PLA is one of the existing bio-based materials that has suitable mechanical features which makes it appropriate for automotive applications [12], where adhesive joints are broadly being used as well [13].

The main motivation of this research is that the usage of PLA material for adhesive scarf joints can be of high interest in the automotive industry due to the above-mentioned advantages. Furthermore, the existing adhesive bonding-related studies that utilized the AM techniques to fabricate polymeric adherends usually worked on single lap joints [14], which indicates that there is a need for investigating the behavior of scarf joints in the PLA adherends fabricated by AM. Two aims of the study include investigating the effects of the raster orientation and scarf angle on the failure load of scarf joints under both tension and compression loading conditions as

well as optimizing the scarf angle to obtain a joint with an acceptable behavior under both compression and tensile loads. More precisely, the aim is to find a scarf angle, by which the joint can tolerate suitable amounts of loading under both loading types.

## 2. EXPERIMENTAL WORK

### 2.1 Fabrication of specimens for joint preparation

The overall configuration of the scarf joint specimen is shown in Fig. 1(a) along with the cross-sectional dimensions provided in Fig. 1(b). The adherends were manufactured by five different scarf angles ( $A$ ), including  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $90^\circ$ . A fused filament fabrication (FFF) 3D printer was used for manufacturing using PLA material. The longer side of each adherend has a length of 120 mm as shown in Fig. 1(a). The length of the other side is determined based on the scarf angle. In the FFF 3D printing process, the printing path of the material can have various angles between  $0^\circ$  and  $90^\circ$  called the raster orientation as shown in Fig. 1(c). In this study, the adherend specimens were printed in two different raster orientations ( $O$ ), including  $0^\circ$  and  $45^\circ$ , for each of the 5 scarf angles. The build plate is the  $xy$ -plane shown in Fig. 1(c). The thickness of the specimens are printed in the  $z$ -direction, i.e., the build direction. Two of the manufactured adherend specimens are illustrated in Fig. 2(a). The raster orientation of  $90^\circ$  was not considered for the adherends, since it leads to the weakest parts under tensile loading as will be shown for the results of single PLA adherends in later sections (see Fig. 4(e)).

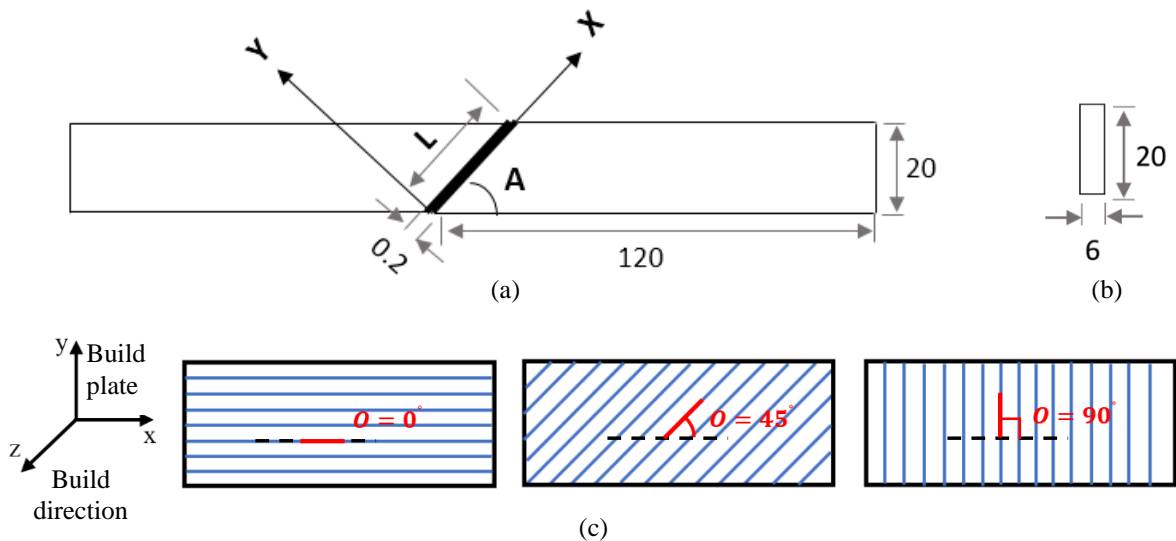


Fig. 1. Scarf joint specimen configurations (a) Top view of general configuration (b) Cross-sectional dimensions, (c) Three raster orientations of  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $90^\circ$  in 3D printing (from left to right, respectively). The build plate is on the  $xy$ -plane and the specimens are printed in  $z$ -direction.

The PLA adherends of the same scarf angles were attached by a thin layer of adhesive with a thickness of 0.2 mm. A structural epoxy-based adhesive, Araldite 2011 (Huntsman Advanced Materials, India), was utilized for bonding the printed PLA adherends to make the scarf joints. The surface preparation process was done according to the steps described in [11]. Both components of the adhesive were mixed in a 1:1 weight ratio [15], and in a suitable amount (50 ml). Then an appropriate amount of the mixed adhesive was applied onto the bonding surfaces of each joint. Each sample was cured in the room temperature for 24 hours under an appropriate pressure applied by a fixture, in order to obtain the maximum strength while keeping the thickness of the adhesive layer as 0.2 mm.

The prepared scarf joint samples were labeled to identify their raster orientation and scarf angle. For instance, the sample labeled as O45A30 denotes an adhesive scarf joint prepared by adherends manufactured via a raster orientation of 45° (O45) and a scarf angle of 30° (A30). Single PLA specimens were also 3D printed with the dimensions of 120×20×6 mm, in three different raster orientations of 0°, 45°, and 90° as shown in Fig. 2(b) to investigate the failure behavior of single specimens, without any bonding, under tensile and

compression tests. The dimensions of the tensile and compression tests were considered to be the same as those of the adherends of the scarf joints for consistency. The labels O0C and O0T refer to a raster orientation of 0° which will be tested under compression (C) and tension (T) loadings, respectively. Similarly, O45C and O45T refer to the samples with a raster orientation of 45° used for compression and tension tests, respectively.

## 2.2 Tensile and compression tests

Tensile and compression tests were conducted for both single PLA specimens fabricated by the FFF process and the prepared scarf joints via a testing machine with a cross-head speed of 1mm/min. In Fig. 3, pictures of selected tests are shown to highlight different types of failure observed during the tests including interlayer, intralayer and adhesive failures. The intralayer failure refers to the damage of a PLA layer itself as in Fig. 3(a) while the interlayer failure relates to the separation of PLA layers from each other as in Fig. 3(b) and Fig. 3(c). In addition, the adhesive failure experienced in a scarf joint which reflects the damage of the adhesive layer of the joint, resulting in the debonding of the two adherends of the joint, can be observed in Fig. 3(d).

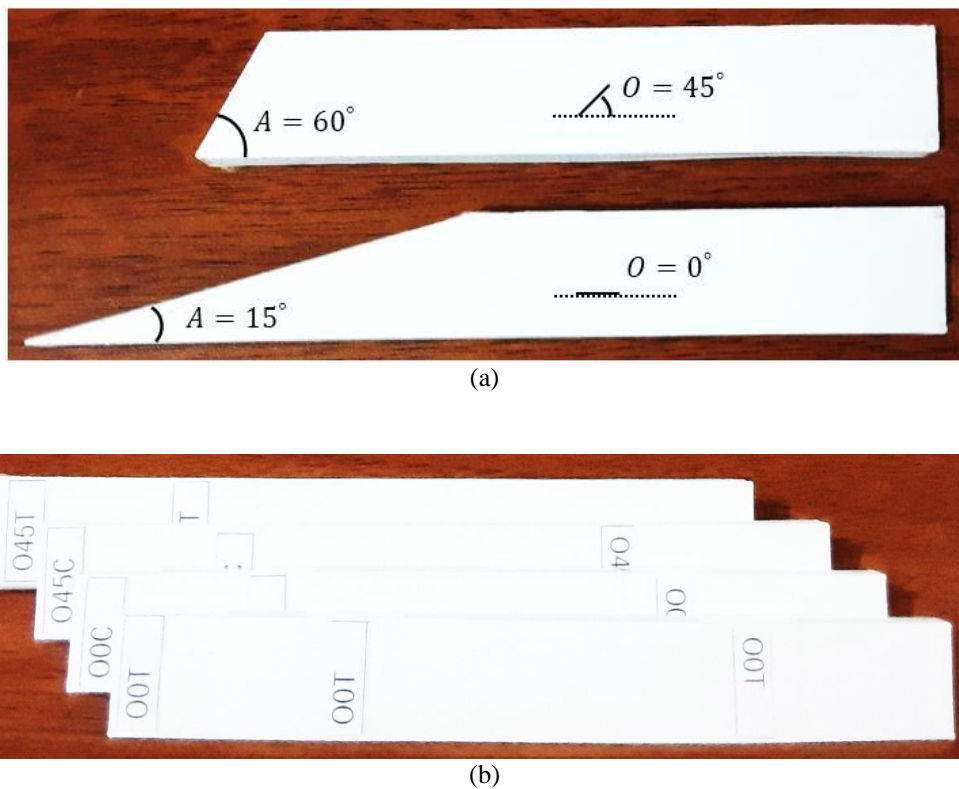


Fig. 2. Fabricated specimens (a) 3D printed PLA adherends in different scarf angles (A) and raster orientation (O), (b) the 3D printed single PLA specimens.

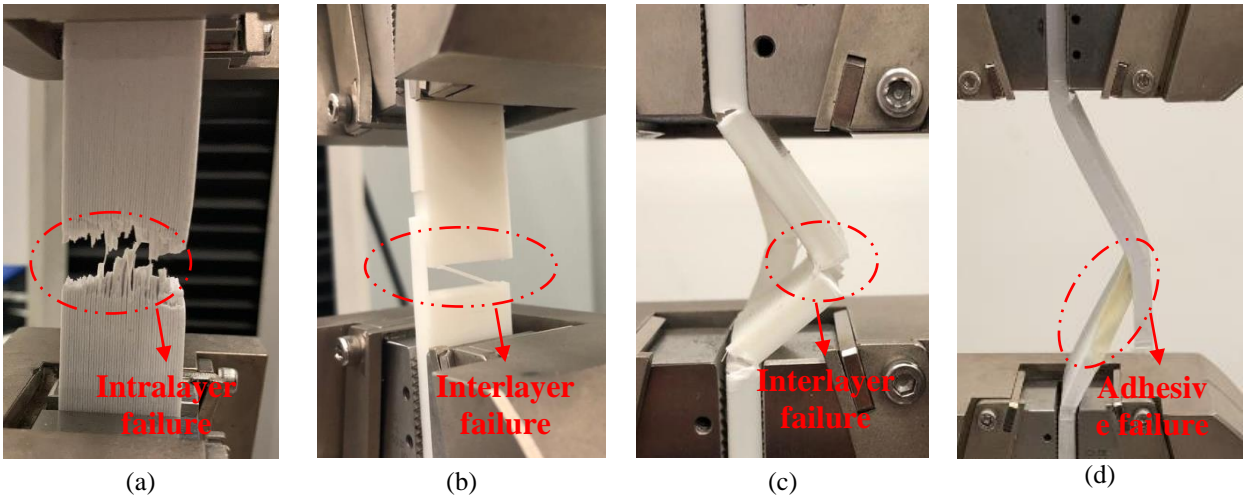


Fig. 3. Illustration of different experiments (a) tensile test of a single PLA specimen – O0T, (b) tensile test of a single PLA specimen - O90T, (c) compression test of a single PLA specimen – O90C, and (d) compression test of the scarf joint specimen - O45A30.

### 3. RESULTS and DISCUSSION

#### 3.1 Effect of raster orientation for PLA specimens

The load-displacement curves obtained from tensile and compression tests for the single PLA specimens printed in different raster orientations are illustrated in Fig. 4. The failure loads were calculated as the first peak load for each load-displacement curve. Those computed failure load values are also shown in respective graphs in Fig. 4.

It is seen in Fig. 4(a) that the load-displacement curve rises almost linearly up to a maximum level (failure load) and then goes down in several steps. This is because the raster orientation is  $0^\circ$ , due to which the fracture occurs in the layers gradually without any lateral movement as shown in Fig. 3(a) (just intralayer failure). Each layer or groups of layers endure the plastic deformation and then rupture, by which loading reflection demonstrates such a step-wise pattern.

This step-wise pattern of the load curve is also the case for the compressive loading condition as shown in Fig. 4(b), in which the raster orientation is  $0^\circ$ . In this case, however, the compression load leads to interlayer failure (i.e. separation of PLA layers from each other) unlike intralayer failure seen in the case of tensile loading. The failure behavior of the single PLA specimen under compression load is shown in Fig. 5(a) to highlight the difference compared to the tensile loading case shown in Fig. 3(a). In compression, buckling with out-of-plane

deformation occurs as seen in Fig. 5(a). Since the bent zone in buckling is perpendicular to the PLA layers, separation is seen along the raster orientation angle of  $0^\circ$  in the middle of the buckled region in Fig. 5(a). This separation behavior in the specimen results in gradual decreases in the load-displacement curve as seen in Fig. 4(b).

When the raster orientation is  $45^\circ$ , a higher displacement at peak load is observed for tensile loading as shown in Fig. 4(c). Since the raster orientation of  $45^\circ$  leads to the separation of the PLA layers, i.e., interlayer failure as well. This raster orientation causes the sample to have a failure load (4.45 kN) a bit less than that of a specimen manufactured with a raster orientation of  $0^\circ$  (5.54 kN). This is because for the raster orientation of  $45^\circ$ , the separation of layers (i.e. interlayer failure) is also experienced along with the failure of the material itself (i.e. intralayer failure), and because the interlayer strength of the FFF-printed materials is lower than the strength of a layer itself (intralayer strength). This fact can be realized through the failure loads obtained from the tensile testing of the samples O0T and O90T shown in Fig 3(a) and Fig. 3(b), respectively. In particular, O90T experienced interlayer failure (i.e. failure between layers) as seen in Fig. 3(b) and had a failure load of 1.68 kN. On the other hand, O0T experienced intralayer failure as seen in Fig. 3(a), and therefore, had a much higher failure load of 5.54 kN. Figs. 4(a) and (e) indicate the load-displacement response of O0T and O90T, respectively.

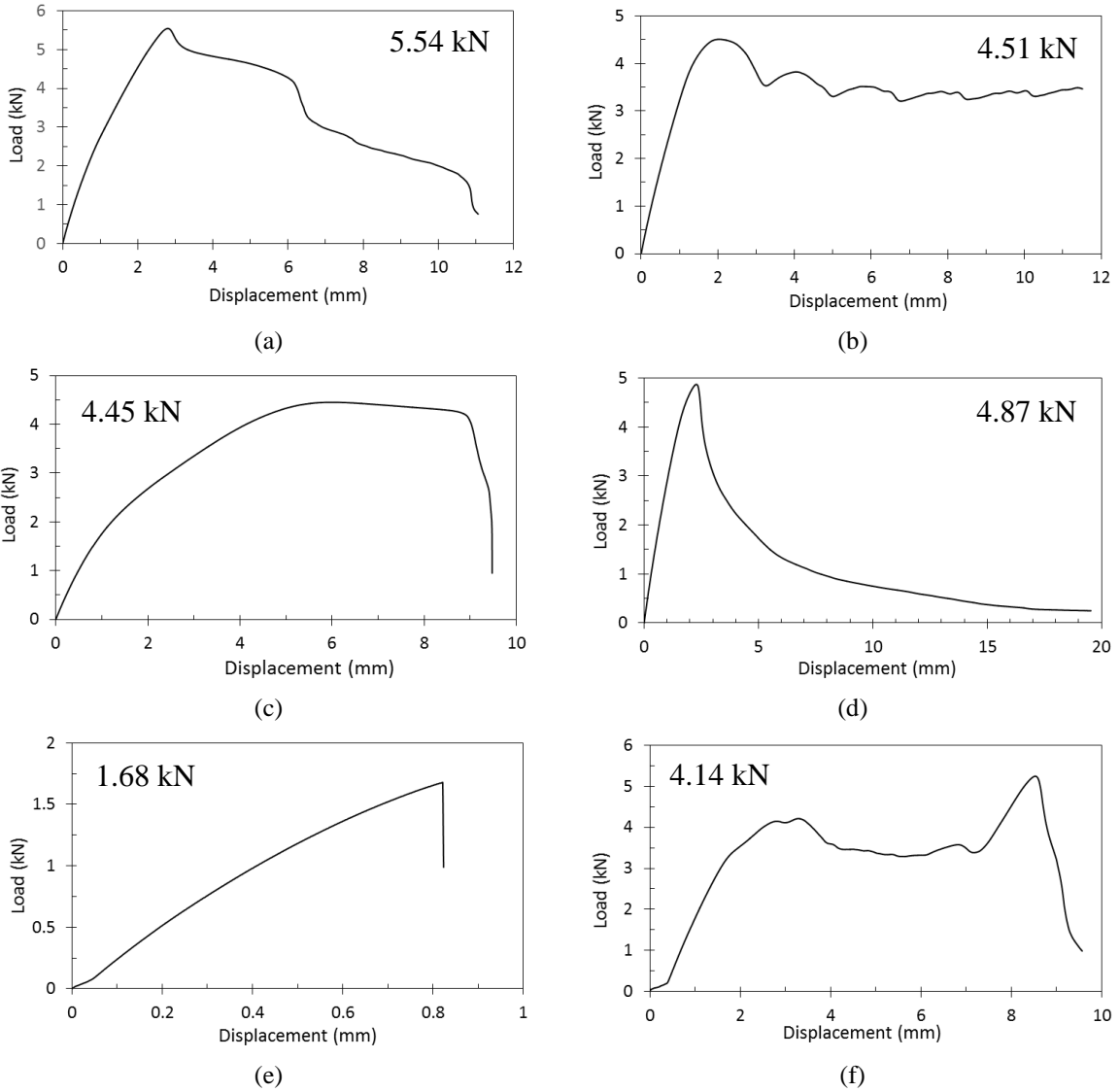


Fig.4 Load-displacement responses of single PLA specimens printed in different raster orientations; (a) OOT under tensile testing (b) OOC under compression testing, (c) O45T under tensile testing, (d) O45C under compression testing, (e) O90T under tensile testing, (f) O90C under compression testing. The failure loads are written onto the plots. In the plots related to the compression testing (b, d, and f), absolute values are given.

On the contrary, the scenario is fully different for the compression test results of the same specimens, i.e. printed by the raster orientations of  $0^\circ$  and  $45^\circ$  as seen in Figs. 4(b) and 4(d), respectively. For the compression loading case, the sample with a raster orientation of  $45^\circ$  (Fig. 4(d)) has a higher absolute failure load (4.87 kN) than that of the sample with a raster orientation of  $0^\circ$  (4.51 kN). The sample with a raster orientation of  $45^\circ$  works better because it experiences the rupture including intralayer failure which is stronger than interlayer failure, whereas the specimen printed with a raster orientation of  $0^\circ$  experiences just buckling in its layers followed by a slight level of interlayer failure at the end of loading (see Fig. 5).

As stated earlier, in the case of samples printed by a raster orientation of  $90^\circ$  (Fig. 4(e)), the amount of the failure load during tensile loading is the least (1.68 kN) compared to the cases when the raster orientation is  $45^\circ$  and  $0^\circ$ . The low failure load is because the raster orientation is perpendicular to the tensile loading direction, which results in layer separation directly (i.e. interlayer failure) as seen in Fig. 3(b).

On the other hand, the failure load under compressive loading for the specimen printed by the raster orientation of  $90^\circ$  presented in Fig. 4(f) is much larger in absolute value (4.14 kN) than the load under tensile loading for the same raster orientation (1.68 kN). This result is because the layers are not



separated under compression; rather they are compressed on each other. For this reason, the absolute failure load of the sample with the raster orientation of  $90^\circ$  is close to that of the samples with raster orientations of  $45^\circ$  and  $0^\circ$  under compression. Just after huge levels of displacement (Fig. 4(f)) and experiencing large levels of plastic deformations, the sample fails by interlayer failure imposed by buckling (Fig. 3(c)).

From the failure images of PLA specimens printed by the raster orientations of  $0^\circ$  and  $45^\circ$  (Fig. 5), it can be seen that raster orientation affects the nature of the failure (i.e. either rupture or fully buckling). In both samples, first, an out-of-plane deformation (i.e. buckling) occurs. Then, for the raster orientation of  $0^\circ$  (i.e. O0C), the sample does not endure any rupture but buckling as shown in Fig. 5(a), leading to gradual interlayer failure and consequent several decreases in the load-displacement curve (see Fig. 4(b)). By contrast, for the raster orientation of  $45^\circ$ , the rupture is seen along the raster orientation, indicating mainly interlayer failure as seen in Fig. 5(b). Due to the rupture, the absolute load value endures a sudden decrease after the peak load (see Fig. 4(d)).

### 3.2 Effect of raster orientation for PLA scarf joints

The raster orientation also influences the failure behavior of the scarf joints that includes the

printed PLA adherends bonded by the adhesive in different scarf angles. To investigate the effects of raster orientation on the load-displacement responses of the scarf joint specimens of the same scarf angles, tensile test results for two raster orientations ( $0^\circ$  and  $45^\circ$ ) are plotted together for the same scarf angle of  $60^\circ$  in Fig. 6(a) and of  $15^\circ$  in Fig. 6(b). It is seen that the scarf joints made by adherends printed with a raster orientation of  $0^\circ$  indicate lower displacements at failure and higher failure loads compared to those of the adherends printed with a raster orientation of  $45^\circ$ , even though they have the same scarf angles. These similar results obtained for both scarf angles of  $60^\circ$  and  $15^\circ$ , as shown in Fig. 6, reflect the consistency of the bonding because considering the results of the single PLA specimens shown in Fig. 4, it was revealed that the raster orientation of  $0^\circ$  should have a larger failure load but lower displacement at the peak load. This can be justified by the fact that intralayer failure occurs for the raster orientation of  $0^\circ$  which needs higher forces (or energy) compared to interlayer failure. As mentioned previously, one mechanism of the failure (interlayer) refers to the separation of the PLA layers from each other, due to the direction of applied loading and the orientation of the layers of PLA parts. This tendency to separation is the reason for the larger values of elongation at failure of the specimens, in which the adherends were printed with a raster orientation of  $45^\circ$  (see Fig.6).

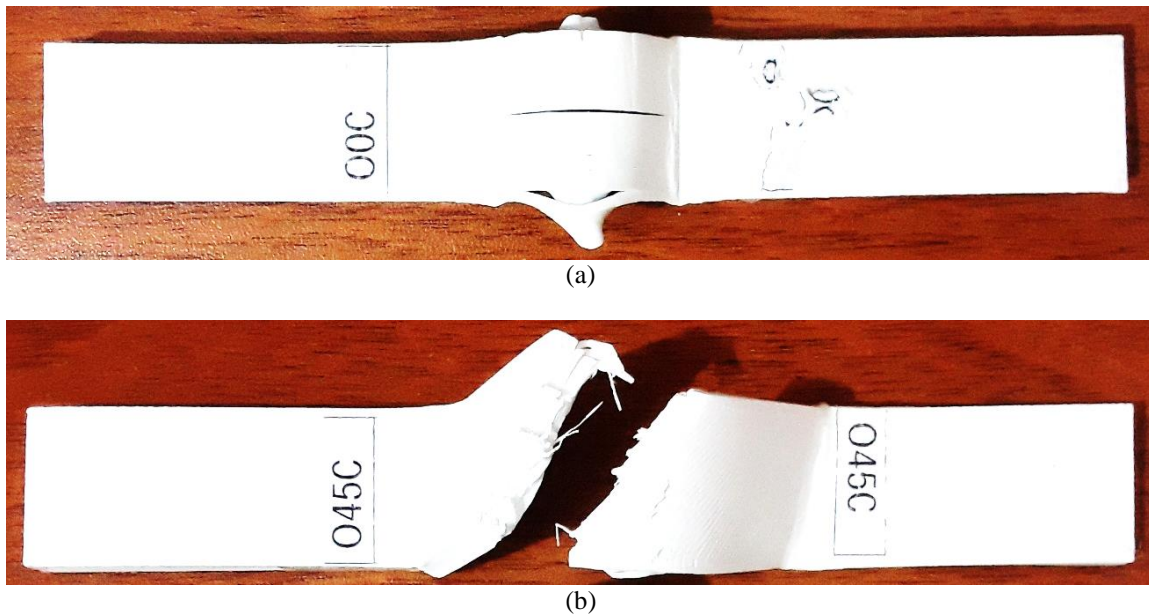


Fig.5 Failure images of single PLA specimens of different raster orientations in the compression test, (a)  $0^\circ$  raster orientation, (b)  $45^\circ$  raster orientation.



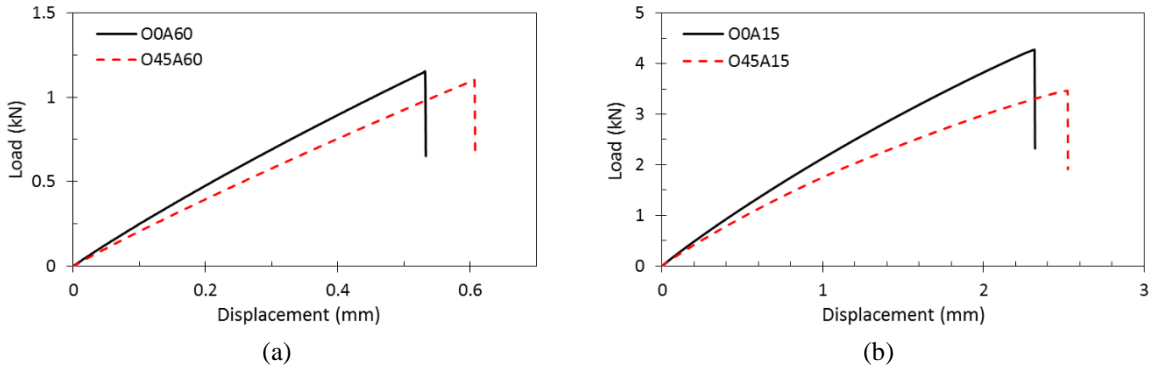


Fig.6 Comparison between the tensile behaviors of the joints including adherends of different raster orientations (i.e. 0° and 45°), (a) for the scarf angle of 60° (b) for the scarf angle of 15°.

### 3.2 Effects of scarf angle for PLA scarf joints

The load-displacement results of the scarf joint specimens with different scarf angles tested in this study are shown in Fig. 7. It can be observed that for all the joints, the reduction of the scarf angles results in enhancement of the failure load and similarly in the rise of the displacement at the peak load. In addition, the behaviors of the joints were compared to those of single adherends (without any bonding), labeled as O45T and O45C in Fig. 7. The outcome has a logical trend in the change of the load-displacement curves, reflecting the fact that with reducing scarf angle the behavior is approaching to the behavior of one single PLA part without any bonding. In other words, the smaller the scarf angle, the higher the failure load, and the larger the displacement at failure.

One outlier for this behavior is the failure load of the specimen O45A45. In Fig. 7(a), as a general trend owing to a larger bondline, the sample O45A45 is supposed to have a stiffer behavior than O45A90 but due to the equivalence of the scarf angle and raster orientation of the adherends in O45A45, the joint failed sooner than expected. This is the reason for the smaller failure load and experienced displacement (elongation at failure) of O45A45 compared to the results of O45A90.

For the compressive test results in Fig. 7(b), on the other hand, there is no unusual performance with the equivalence of the scarf angle and raster orientation of the adherends. This can be justified by the fact that tensile loading causes the plates of PLA material inside the adherends to accelerate the failure of the joints under tensile loading, which is not the case for the samples under compressive loading.

Besides, there is another different behavior observed in the compressive test results in Fig. 7(b). Taking the samples O45A45 and O45A15 into account, it can be observed in Fig 7(b) that there is a

limit of failure load for the scarf joints under the compressive loading because both specimens experienced the same failure load at the same displacement. However, it is worth noting that the behaviors of these joints after enduring the maximum load are different. O45A45 had a sudden drop of the load curve indicating a failure by debonding of the adhesive, whereas O45A15 had a gradual decrease of the curve indicating that it experienced some sort of buckling or slow debonding while absorbing more energy.

It is also noteworthy that the difference between the failure loads of a single adherend (O45T) and a joint with a scarf angle of 15° (O45A15) is less than 1 kN under tensile loading, whereas this amount is about 2.5 kN for the corresponding samples under compressive loading. Thus, based on the tensile and compressive test results in Fig. 7, it can be understood that loading type affects the load-displacement behavior completely differently, especially for the joints of smaller scarf angles (i.e. 15°).

### 3.3 Joint debonding

In adhesive joints, due to the adhesive and materials used, there can be different sorts of debonding modes, e.g. adhesive, or adherend (i.e. interlayer and intralayer failures) [16]. In this study, it was observed that the debonding type was adhesive in most of the joints because the separation was observed along the surface of adhesive as in the joint O0A60 shown in Fig. 8(a). However, in a few cases such as the joint O45A15 shown in Fig. 8(b), the mechanism of the failure was changed to a combination of both adhesive and adherend (interlayer and intralayer) types. This combined type is observed when the scarf angle is low, resulting in higher failure loads. For instance, joint O45A15 has a low scarf angle of 15° and in Fig 8(b), it is seen that at the bottom the debonding occurred along the adhesive surface, which is therefore called the

adhesive debonding mode. But after some point, the failure surface is seen to be different from the adhesive surface and therefore adherent debonding occurred. The adherent is seen to be debonded along a different path of raster orientation in the middle section which is defined as an intralayer failure as seen in Fig 8(b). In the top section, on the other hand, the debonding is seen to be along the raster orientation path and therefore defined as the interlayer failure.

### 3.4 Optimization Study

The experimental results in this study showed that at different scarf angles the failure load can differ under tensile and compressive loadings. This difference can result in an unexpected failure of the scarf joint when a different loading condition occurs in real-life applications. To ensure the scarf joint has an acceptable behavior under both tensile and compressive loadings, an optimization study is conducted. As shown in Fig.9, optimization was done for the joints of adherends with a raster orientation of 45°. It was done based on both the failure load and displacement at the failure of joints with three different scarf angles including 15°, 30°, and 45°. The

best option is the joint with a scarf angle, for which the curves corresponding to the tensile and compressive failure loads intersect each other. Considering the failure load results in Fig. 9(a), the intersection is observed at a scarf angle of about 30°. A similar observation can be made for the displacements at maximum experienced load in Fig. 9(b). Hence, the optimized scarf angle can be selected to be 30°. Thus, the joint O45A30 is chosen as the optimized joint.

To investigate the failure behavior of the aforementioned optimized joint, Fig. 10 indicated the rupture after tensile loading. It is seen that in the joints some of the separation occurred along the scarf angle on the adhesive layer, i.e. the adhesive failure, while the broken parts indicate that some also occurred within the PLA adherends. Hence, the transition from the adhesive failure to adherend failure is clearly seen at the scarf angle of 30°. Thus, the failure behavior of this specimen supports the conclusion made based on Fig. 9 that the O45A30 is the optimized joint. In addition, the behavior (failure type) of the optimized joint under compression loading can be understood from Fig.3 (d).

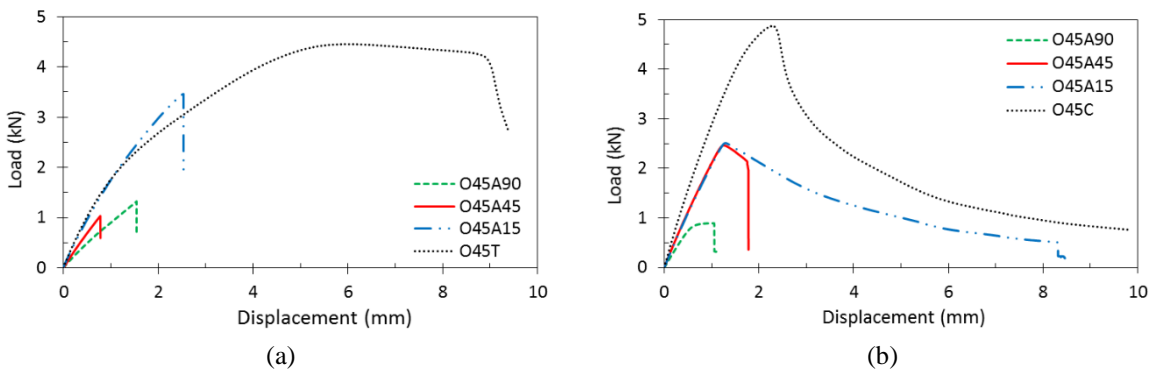


Fig.7 Comparison among the behaviors of the joints with different scarf angles (a) tensile test results (b) compressive test results. O45T and O45C show single adherends with a raster orientation of 45° under tensile and compression loadings, respectively. In the plot related to the compression tests (b), absolute values are given.

### 4. Conclusion

In this study, adhesively bonded PLA scarf joints with different scarf angles as well as 3D printed PLA parts with different raster orientations were tensile- and compressive-tested to investigate their load-displacement responses. Several raster orientations and scarf angles were utilized in the joints. The failure of the PLA scarf joints and PLA samples revealed several worthwhile results from which the remarks below can be drawn;

1. The raster orientation is a key in manufacturing PLA parts since a raster orientation of 0° gives the highest amounts of failure load under tensile loading while a raster orientation of 90° gives the lowest amount.
2. Decreasing the scarf angles results in the improvement of the joint's failure load for both the tensile and compressive loadings.
3. It was found that a scarf angle of almost 30° is an optimized one for the joints made of adherends with a raster orientation of 45°, under both types of loadings.

4. The debonding mode of the joints was observed to be different depending on the scarf angle which justifies the introduced approach conducted to define the optimized joint.

Future studies can be related to the use of different adhesives (i.e. ductile and brittle types or a

mixed one) and repeating the procedure of this work for those adhesives. Also, investigating the effects of complex raster orientations (e.g. +45/-45 or 0/90) and different types of adhesive joints (e.g. double-strap) on the failure behavior of the joint can be of interest.



Fig.8 Debonding surfaces of two selected joints, (a) O0A60, and (b) O45A15. Different types of failure including Adhesive and Adherend (Interlayer and Intralayer) were labeled in the figures.

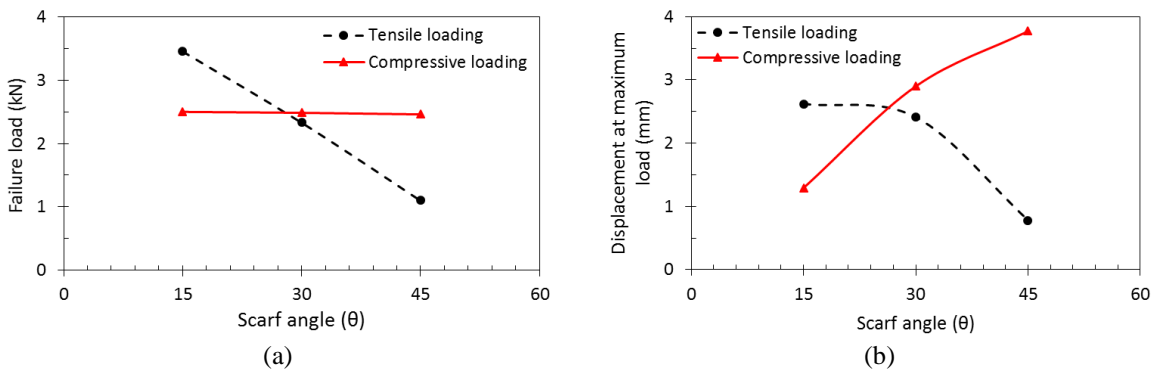


Fig. 9. Optimal design for scarf joints including adherends printed with a raster orientation of 45° attached by Araldite 2011. Optimization based on (a) failure load of the joints, (b) displacement at the maximum experienced load by the joints, as a function of scarf angle.



Fig. 10. Demonstration of the test specimens with the optimized scarf angle of 30°.

## EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN PLA MALZEMELERİNİN YAPIŞTIRILMASI: YAPIŞTIRMA EĞİM AÇISININ VE BASKI YOLU YÖNELİMİNİN ETKİLERİ

Bu çalışmanın amacı, eklemeli imalat ile PLA malzemeden üretilen parçaların yapıştırıcı ile bağlanmasında, bağlantısı açısının ve baskı yolu yöneliminin etkisini araştırmaktır. İlk adımda, bütün PLA numuneleri, 0°, 45° ve 90°'lik üç farklı baskı yolu yöneliminde malzeme ekstrüzyonu eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Bu numunelerin çekme ve basma testleri, 90° baskı yolu yöneliminin en zayıf sonuçları verdiğini göstermiştir. İkinci adımda, bütün haldeki numuneyi oluşturacak iki bağlantı parçası, 0° ve 45° baskı yolu yönelimi ile üretilmiştir. Bağlantı parçalarının yapışma bölgesi beş farklı eğim açısı ile üretilmiştir. Farklı eğim açıları ve baskı yolu yönelimlerinde oluşturulan bütün haldeki numunelerin çekme ve basma testleri, kırılma dayanımlarını belirlemek için yapılmıştır. Kırılma dayanım kuvvetinin, bağlantı parçasının baskı yolu yöneliminin ve bağlantı açısının bir fonksiyonu olarak ölçülebilir şekilde değiştiği; ancak çekme ve basma yükleri için farklı olduğu bulunmuştur. 45° baskı yolu yönelimine ve farklı eğim açılarına sahip bağlantı parçaları için bir optimizasyon çalışması yapılarak hem basma hem de çekme yükü altında kabul edilebilir bir davranışa sahip olması (kırılma kuvvetinin benzer olması) için uygun eğim açısı belirlenmiştir. Sonuç olarak uygun eğim açısının yaklaşık 30° olduğu belirlenmiştir.

### REFERENCES

1. Attaran, M., *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. Business Horizons, 2017. **60**(5): p. 677-688.
2. Gorgularslan, R.M., et al., *Design and fabrication of periodic lattice-based cellular structures*. Computer-Aided Design and Applications, 2016. **13**(1): p. 50-62.
3. Gorgularslan Recep, M., et al., *An improved lattice structure design optimization framework considering additive manufacturing constraints*. Rapid Prototyping Journal, 2017. **23**(2): p. 305-319.
4. Ozlati, A., et al., *An Alternative Additive Manufacturing-Based Joining Method to Make Metal/Polymer Hybrid Structures*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **45**: p. 217-226.
5. Frascio, M. *Joint-Design Strategies for Additive Manufacturing*. 2020.
6. Paygozar, B., S.A. Dizaji, and L.F.M. da Silva, *Bonding dissimilar materials via adhesively bonded spot-welded joints: cohesive zone model technique*. Journal of

- Adhesion Science and Technology, 2020: p. 1-12.
7. Kariz, M., M.K. Kuzman, and M. Sernek, *Adhesive bonding of 3D-printed ABS parts and wood*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017. **31**(15): p. 1683-1690.
8. Alves, D.L., et al., *Effect of material hybridization on the strength of scarf adhesive joints*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1244-1251.
9. Spaggiari, A. and F. Denti, *Mechanical strength of adhesively bonded joints using polymeric additive manufacturing*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019: p. 0954406219850221.
10. Kioshi Kawasaki Cavalcanti, D., M. Banea, and H. Queiroz, *Mechanical Characterization of Bonded Joints Made of Additive Manufactured Adherends*. Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII Welding Equipment and Technology, 2019. **30**: p. 27-33.
11. Roy Choudhury, M. and K. Debnath, *Experimental analysis of tensile and compressive failure load in single-lap adhesive joint of green composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **99**: p. 102557.
12. Notta-Cuvier, D., et al., *Tailoring polylactide (PLA) properties for automotive applications: Effect of addition of designed additives on main mechanical properties*. Polymer Testing, 2014. **36**: p. 1-9.
13. Kreibich, U.T. and A.F. Marcantonio, *New Developments in Structural Adhesives for the Automotive Industry*. The Journal of Adhesion, 1987. **22**(2): p. 153-165.
14. Frascio, M. and E.A.S. Marques, *Review of Tailoring Methods for Joints with Additively Manufactured Adherends and Adhesives*. 2020. **13**(18).
15. Paygozar, B., et al., *Adhesively bonded aluminium double-strap joints: effects of patch part on failure load*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020. **42**(11): p. 589.
16. Ghandriz, R., K. Hart, and J. Li, *Extended finite element method (XFEM) modeling of fracture in additively manufactured polymers*. Additive Manufacturing, 2020. **31**: p. 100945.

Merve Özkutlu Demirel\* 

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.  
Ankara

# Çözücü Değişirme Yöntemi ile Poli(eter eter keton) (PEEK) Kompozitlerinin Üretilmesi

*Termoplastik malzemeler, hızlı proses edilebilir ve geri dönüştürülebilir olmalarının sağladığı avantajları nedeniyle havacılık sektöründe termoset reçinelerin son zamanlarda muadili olmaya başlamışlardır. Grafen yüksek mukavemeti nedeniyle kompozit malzemelerde kullanılan nano ölçekli katkı malzemeleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışma kapsamında grafen nanolevhalar (GNP) ile termoplastik malzeme sınıfından poli(eter eter keton) (PEEK) kullanılarak nanokatlı termoplastik malzeme üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak çözücü değişirme yöntemi seçilmiş ve bu yöntemle PEEK zincir yapısına bisülfid grupları eklenerek elde edilen çözünebilir sülfonlanmış PEEK yapı elde edilmeden, ilk olarak bu yöntemle saf PEEK malzemenin kompozitleri üretilmiştir. Elde edilen kompozitlerin tanecikli toprak yapıda olduğu gözlemlenmiş ve bu yapının malzemenin termal bozunma sıcaklığı ve camı geçiş sıcaklığında küçük bir düşüşe neden olduğu bulunmuştur. Yapıya grafen eklenmesi ile malzemenin termal özellikleri iyileşmiştir. Elde edilen kompozit malzeme ile yüksek sıcaklık isteri olan eriyik harmanlama cihazlarına gerek duyulmadan enjeksiyonlu kalıplama, baskılı kalıplama gibi üretim tezgahlarına kolay bir yöntemle hammadde sağlanabilecektir.*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 29 Haziran 2022

Kabul: 15 Mayıs 2023

\*Sorumlu Yazar: Merve Özkutlu Demirel

Email: merve.ozkutludemirel@tai.com.tr

DOI:

<https://doi.org/10.56193/matim.1137838>

*Anahtar Kelimeler: PEEK, grafen nanolevha, çözücü değişirme yöntemi*

*Atıf şekli/How to cite: Demirel M. Ö., Çözücü Değişirme Yöntemi ile Poli(eter eter keton) (PEEK) Kompozitlerinin Üretilmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(1): 43-50.*

## GİRİŞ

Havacılık ve uzay sanayinde kullanılan malzemelerin, hafifliğin artırılması, mukavemet değerlerinin iyileştirilmesi ve fiyatlarının rekabetçi olabilmesi için sürekli bir yenileme sürecinden geçmesi gerekmektedir. Uçak yapılarında kullanılan metal malzemeler, yerini hızla düşük yoğunluklu, karbon fiber takviyeli termoset kompozitlere bırakmaktadır. Termoset kompozitlerin kullanılması, ağırlıkta, dolayısıyla yakıt tüketiminde önemli bir tasarruf sağlamaktadır [1]. Ancak termosetlerin uzun işlem süreleri, çapraz bağ yapısından dolayı geri dönüştürülememeleri, ısı ile iletkenliklerinin yüksek olması, sertlikleri nedeniyle titreşime maruz kalan bölgelerde tercih edilmemeleri ve kullanım ömürlerinin sınırlı olması gibi dezavantajları vardır. Bu endişeler, endüstriyi yeni malzeme türlerinin geliştirilmesine yönelmektedir.

Termoplastikler, termosetlere göre çeşitli avantajlar sunabilir. Termosetler yerine termoplastiklerin tercih edilmesinin ana nedeni hızlı

işlenebilirlikleridir. Termoplastik parçalar için üretim yöntemleri, termosetlerin klasik otoklav yöntemine göre işlem süresini azaltabilir. Diğer bir sebep ise tekrarlanabilirlikleridir. Hasarlı termoplastik parçalar, basit bir ısı ile iyileştirilebilir ve kullanım ömürlerinin sonunda, geri dönüştürülebilirler. Diğer bir avantajı ise termoplastiklerin raf ömrünü uzatan herhangi bir gereklilik olmaksızın oda sıcaklığında saklanabilmeleridir [2]. Uçaklar için termoplastik kompozit parçaların üretimine yönelik çalışmalar, sıcak presle şekillendirme ve kaynaklama gibi yeni, hızlı işleme yöntemlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır.

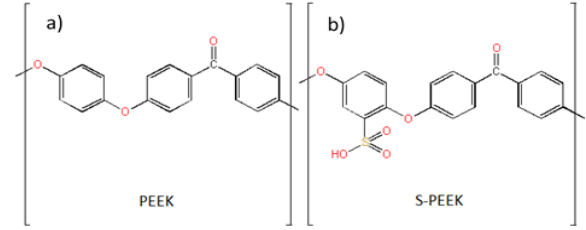
Termoplastikler arasında PEEK yüksek performanslı, yarı kristal bir malzemedir. PEEK'in göze çarpan özellikleri arasında etkili mekanik dayanımı, yüksek sıcaklık performansı ve kimyasal madde bozunumlarına karşı kararlı direnci sıralanabilir. Ayrıca, aşınma, yorulma ve sürünme özellikleri PEEK'i havacılık sektöründe polimerik malzemeler arasında önemli kılmaktadır [3].



PEEK, ekstrüzyon, baskılı kalıplama ve enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel yöntemlerle işlenebilir. Sahip olduğu üstün özelliklerin yardımıyla, PEEK ve kompozitleri havacılık, otomotiv, yapısal parçalar ve yüksek sıcaklık elektrik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek fiyatına rağmen PEEK malzemelerinin getirdiği katma değer ile imalat parçaları hafif, tokluğu yüksek ve daha uzun süre dayanım gücüne sahiptir.

Karbon bazlı malzemeler arasında son zamanlarda sıklıkla araştırmalara konu olan grafen nanolevhalar (GNP) PEEK polimerine katkılanarak PEEK'in fiziksel özelliklerine etkisi değerlendirilmektedir [4]. Bu çalışmalar arasında kuru ve ıslak metotlarda aynı ölçülerde katkılandırma yapılarak iki metottan elde edilen GNP katkılı PEEK'ler karşılaştırılmıştır [5]. Islak metotta PEEK ve GNP tozu etanol içerisinde dağıtılarak, kuru metotta ise bu tozlar kuru haldeyken karıştırılmış ve lazer sinterleme yöntemi ile kompozitler elde edilmiştir. Yapılan çekme testlerinin sonucunda ıslak metot ile elde edilen kompozitlerde GNP'nin daha iyi dağılım gösterdiği ve daha düşük oranda topaklanma yaptığı görülmüştür. Buna ek olarak, ıslak metot ile elde edilen numunelerden ağırlıkça %0.5 GNP/PEEK kompozisyonunun en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Ekstrüzyon yöntemi kullanılarak hazırlanan ağırlıkça % 2-15 GNP/PEEK karışımlarında ise çekme modülünün PEEK malzemeye GNP eklenmesi ile arttığı gözlemlenmiştir [6]. Bir diğer çalışmada ağırlıkça % 1,3,5,10 GNP/PEEK kompozitler yine ekstrüzyon yöntemi ile hazırlanmış ve GNP konsantrasyonunun arttıkça çekme ve eğme modüllerinde artış gözlemlenmiştir [7]. Sertlik testlerinde ise PEEK'e GNP eklenmesi ile sertliğin doğru orantılı olarak arttığı bulunmuştur. Islak metot ile elde edilen grafen oksit (GO) katkılı nanokompozitlere daha sonra yüksek basınçla kalıplama yapılmıştır [8]. Yapılan tribolojik testlerde sürtünme katsayısının GO eklenmesiyle düştüğü gözlemlenmiştir. PEEK kompozit üretimine bir alternatif de, grafen ve PEEK malzemenin kuru yöntemle karıştırıldıktan sonra, enjeksiyonlu kalıplama cihazında kalıplı kompozit olarak elde edilmesidir [9]. % 2 ve % 5 oranlarında hazırlanan kompozitlerin saf malzemeye göre daha yüksek eğme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, PEEK grafen kompozitleri önce ıslak karıştırma metodu daha sonrasında ise sıcak kalıplama yöntemi ile de üretilmiş ve grafenin PEEK'in mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir [10]. Çekme testi sonucunda grafen katkılı malzemenin saf malzemeye oranla daha yüksek çekme dayanımı ve modülüne sahip olduğu bulunmuştur.

Yapılan çalışmalar PEEK polimerin grafen ile katkılanmasının hem mekanik, hem termal hem de elektriksel özelliklerde iyileşmelere yol açtığını göstermiştir [11 – 13]. Ancak PEEK kompozitlerinin üretilmesi bir çok açıdan zordur. Örneğin PEEK kompozitlerinin eriyik harmanlama yöntemi ile üretilmesi, PEEK'in yaklaşık 340 °C olan erime sıcaklığında çalışabilen ekstruder gibi cihazların bulunurluğu açısından güçtür. Kompozitlerin çözücü yöntemi ile hazırlanması ise PEEK'in organik çözücülere karşı inert olması nedeniyle zordur. PEEK ancak zincir yapısına sülfürik asit ortamında eklenebilen bisülfite (HSO<sub>3</sub>) iyonlarıyla sülfonlanmış PEEK (S-PEEK)'e dönüştükten sonra organik çözücülerle çözülebilir. PEEK ve S-PEEK'in molekül yapıları Şekil 1'de verilmiştir. Saf halde PEEK malzemenin çözülmesi ise bu zamana kadar yalnızca Venkatraman vd.'nin [14] çalışmasında çözücü değiştirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. a) PEEK ve b) S-PEEK malzemelerinin molekül yapıları

Bu çalışmada Venkatraman vd.'nin [14] yönteminden yararlanarak, nano ajanların PEEK malzemeye karıştırılması ile ilk olarak çözücü değiştirme yöntemiyle PEEK kompozitleri elde edilmiştir. Bu amaçla grafen nanolevhalarından yararlanılmıştır.

## MALZEME VE YÖNTEM

### Malzeme

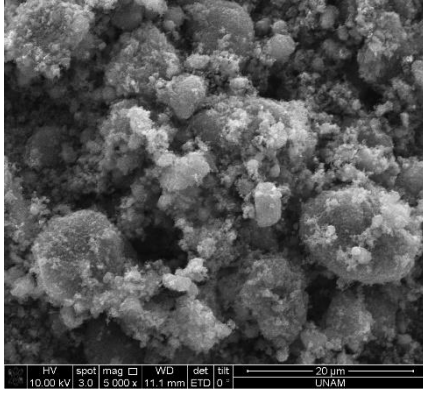
Kullanılan malzemelerin listesi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. PEEK-grafen kompozit üretimi çalışmasında kullanılan malzemeler

Malzemeler	Marka
4-klorofenol	Sigma-Aldrich, ≥99%
Poli(eter eter keton)	Victrex PEEK 450G
Grafen nanolevha	Nanografi
Etanol	Sigma Aldrich, 96%
Distile su	-

Toz haldeki grafen nanolevhalarla ait SEM görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.





Şekil 2. Grafen nanolevhalara ait SEM görüntüsü

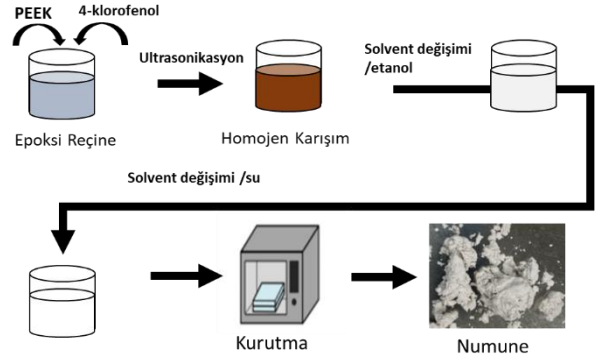
## Yöntem

PEEK kompozitin oluşturulmasında Venkatraman vd.'nin [14] PEEK malzemeyi çözme prosedürü temel alınmıştır. Bu yöntemde PEEK malzemeyi çözmek amacıyla 4-klorofenolden yararlanılmıştır. Bu malzeme katı formda olup ilk olarak sıcak tabla üzerinde 60 °C'ye ısıtılmıştır. Daha sonra çözücü içerisinde %15 ağırlık PEEK/hacim çözücü oranında PEEK tozu eklenerek nanomalzemeler 4 saat boyunca 80 °C'de ultrasonikasyon yöntemiyle karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra karışıma etanol eklenip yıkanarak, 4-klorofenol etanol ile yer değiştirmiştir. Bu işlem 4-klorofenolün karışımdan tamamen uzaklaştığının gözlemlendiği, karışımın rengi gri olana kadar devam etmiştir. Daha sonrasında birer gün aralıklarla 5 kere çözücü etanol ile değiştirilmiştir. Sonrasında ise yine birer gün aralıklarla çözücü 5 kere su ile değiştirilmiştir. Son olarak malzeme bir gün boyunca oda sıcaklığında kurutulmuş, en son olarak ise 4 saat boyunca, 100 °C'de, vakum altında etüvde kurutulmuştur. PEEK grafen kompozitinin üretilmesi için 4-klorofenole PEEK eklenmesi aşamasında ağırlıkça % 1 ve %2.5 oranlarında grafen nanolevha eklenerek kompozitler elde edilmiştir. Çözücü değiştirme yöntemi ile PEEK kompozit eldesi için üretim akım şeması Şekil 3'te gösterilmiştir. Elde edilen malzemeler tanecikli toprak yapı formundadır. Bu çalışmada çözücü değiştirme yöntemiyle PEEK kompozit üretimi ilk olarak gerçekleştirilmiştir.

## Karakterizasyon

Malzemelerin yapısal özellikleri Vertex 70 marka Fourier Transform Infrared (FTIR) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Morfoloji incelemesi çalışmaları için Quanta 400 F Field Emission taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Analizlerden önce malzeme yüzeyleri altın/paladyum ile kaplanmıştır.



Şekil 3. Çözücü yöntemiyle termoplastik kompozit üretimi için akış şeması

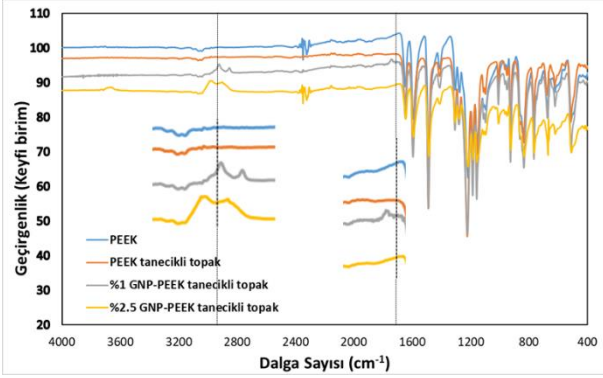
Termal gravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analiz ise malzemenin ısıl özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. TGA analizi TA Instruments marka cihaz ile 10 °C/dk ısıtma hızında, azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Termal bozunma sıcaklığı değerleri, TGA eğrisinin türevinin alınmasıyla elde edilen türev eğrisinin tepe noktasından belirlenmiştir ve bozunmanın en hızlı olduğu sıcaklığı temsil etmektedir. DSC analizleri ise yine TA Instruments'a ait cihaz ile 10 °C/dk'lık ısıtma programında azot atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Ticari PEEK malzemenin camsı geçiş sıcaklığı ikinci ısıtma eğrisinin türevinin alınmasıyla elde edilen pikin tepe noktası olarak belirlenirken, çözücü değiştirme yöntemiyle elde edilen tanecikli toprak yapıdaki malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları, tanecikli yapının da etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla birinci ısıtma eğrilerinin türevlerinin tepe noktaları olarak belirlenmiştir.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Termoplastik kompozit çalışmaları kapsamında ilk olarak çözücü değiştirme yöntemiyle kompozit üretimi tekniği denenmiş, bu kapsamda PEEK-grafen kompoziti üretilmiştir. Üretilen malzemelerin yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen FTIR analizi sonucunda elde edilen FTIR spektrumları Şekil 4'te gösterilmiştir.

PEEK polimerinin FTIR spektrumunda gözlemlenen karakteristik tepe noktaları 1590 cm<sup>-1</sup> (karbonil gerilmesi), 1486 cm<sup>-1</sup> (halka absorplaması), 1186 cm<sup>-1</sup> (karbonil gerilmesi) ve 1154 cm<sup>-1</sup> (karbon-oksijen-karbon) olarak belirtilmiş ve bu noktalar Şekil 4'te gözlemlenebilir. Polimer yapıyaraften eklenmesi genel olarak bahsi geçen bu tepe noktalarında pik yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır [9]. Ancak grafenin ağırlıkça yalnızca %1'lik düşük bir oranda katkılanırılması ile böyle bir etki gözlemlenmemiştir. Grafenin etkisi 2950 cm<sup>-1</sup> ve 1700 cm<sup>-1</sup> bölgesinde yer alan karbon-karbon

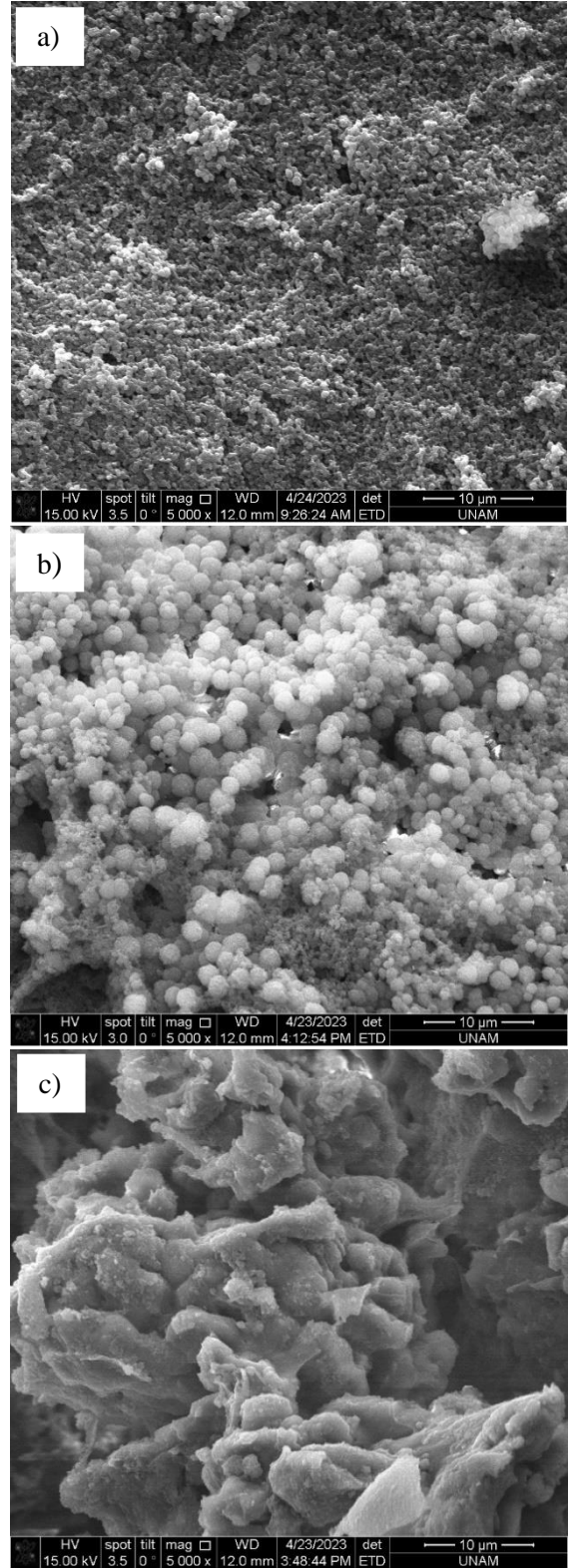
gerilmeleri ile kendini göstermiştir. Çalışmada PEEK malzemenin satın alınan versiyonu olan PEEK tozunun ve çözücü değiştirme işleminden sonra tanecikli toprak yapı formunda elde edilen versiyonunun spektrumları kıyaslandığında, bu iki malzeme arasında fark gözlemlenmemiştir. Bu da diğer çözücü yöntemlerinde olduğu gibi zincir yapıya farklı grupların (-SH<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi) bağlanmadığının, PEEK'in ilk halinde tekrar elde edilebilirliğinin bir göstergesidir.



Şekil 4. PEEK ve kompozitlerinin FTIR spektrumu

Çözücü değiştirme yöntemi ile elde edilen saf PEEK ve PEEK-grafen kompozitinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Malzemelere ait SEM görüntüleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

Çözücü değiştirme yöntemiyle elde edilen saf PEEK ve GNP-PEEK kompozitlerinin tanecikli yapıda toprak bir morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tanecikli yapının çözücü değiştirme işlemi sırasında PEEK malzemenin tamamen çözünebildiği 4-klorofenol ile PEEK malzemenin hiç çözünmediği etanolün ani değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. PEEK malzeme ile %1 GNP-PEEK kompozitinin aynı büyütmadaki SEM görüntüleri kıyaslandığında, grafen eklenmesinin tanecikli toprak yapının tanecik boyutunda büyümeye neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun yapıdaki grafenin yüzey gerilimini artırarak daha büyük tanelerin oluşmasına neden olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Yine yapıdaki GNP oranı %2.5'e çıkarıldığında taneciklerin daha da büyüdüğü ve bazı bölgelerde taneciklerin oluşmayıp daha katı bölgelerin kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek katkılandırma oranındaki grafen nanolevhaların varlığının çözünme esnasında ısıyı içeride tutarak, solvent değiştirme sırasında tanecik sınırlarını yok etmesiyle açıklanabilir. Şekil 5. c)'de gözlemlenebilen yüzey pürüzlülüklerin grafen nanolevhaların ait olduğu düşünülmektedir.

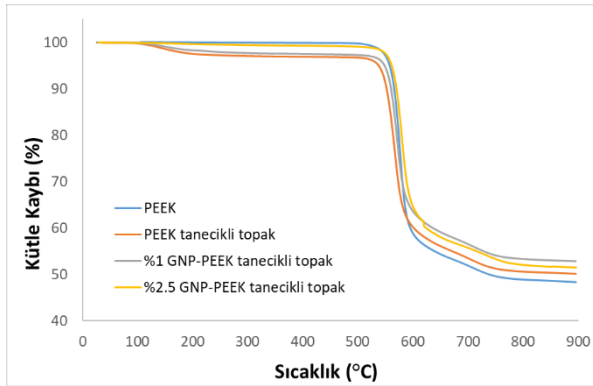


Şekil 5. a) PEEK tanecikli toprak, b) %1 GNP-PEEK tanecikli toprak ve c) %2.5 GNP-PEEK tanecikli toprak malzemelerin SEM görüntüleri

Vankatremam vd. PEEK kompozitlerinde çözücü değiştirme yöntemi ile köpüğe benzer bir yapı elde etmiştir [14]. Bu gözenekli yapıyı şöyle

açıklamıştır: Çözücünün yavaş buharlaşması, PEEK gözenekli yapısını sıkıştıran bir kılcal basınç oluşturarak büzülmesine neden olur. Sıvı-katı arayüzey, sıvı-gaz arayüzeyine kıyasla enerji açısından daha elverişli olduğundan, kurutma sırasında gözeneklerdeki çözücü iç bükey alanlar oluşturur ve bu alanlar PEEK matrise karşı bir gerilim oluşturur. Bu iki eş zamanlı kuvvet de PEEK içerisinde boşluklu bir yapıya sebep olur. Buna ek olarak, küresel tanecikli yapı oluşumu koloidal süspansiyon yapılarla da açıklanabilir. Koloidal bir süspansiyondaki küresel partiküllerin oluşumu, yüzey gerilimi, Brown hareketi ve elektrostatik kuvvetlerin birbirleriyle etkileşiminden kaynaklanır. Brown hareketleri ve elektrostatik kuvvetler parçacıkları birbirinden ayrı tutmaya yararken, yüzey gerilimi malzemenin yüzey alanını azaltmaya yönelik isteğini tetiklediği için küresel tanecik oluşumunu sağlar [15].

Çözücü değiştirme yönteminin ve grafen nanolevha eklenmesinin PEEK malzemenin termal bozunma davranışına etkisi TGA ile incelenmiştir. Şekil 6'da PEEK malzemenin çözücü değiştirme yönteminden önceki ve sonraki versiyonu ile PEEK-grafen nanolevha kompozitlerinin sıcaklık-kütle kaybı grafikleri verilmiştir.



Şekil 6. PEEK ve kompozitlerinin sıcaklığa karşı kütle kaybı eğrileri

Şekil 6 incelendiğinde tüm malzemelerin tek bir basamakta bozunmaya uğramadığı gözlemlenmektedir. PEEK tanecikli topak yapı ve 1 wt.% GNP içeren kompozitte başlangıçta 110 °C bölgesinde az miktarda bir kütle kaybı gözlemlenmiştir. Kurutma işlemi sırasında PEEK'in camsı bölgelerinde hapsolmuş çözücünün uzaklaştırılması işlemi kurutma işlemindeki buharlaşmadan ziyade difüzyona bağlı kalmaktadır. Bozunma sıcaklığından önce gözlemlenen kütle kaybının bu çözücünün uzaklaşması olabileceği düşünülmüştür. Bozunmanın gerçekleştiği sıcaklık gözönüne alındığında bu çözücü sudur. %2.5 GNP-PEEK tanecikli topak için başlangıç bölgesinde kütle kaybına rastlanmamıştır. Bu durumun nedeni tanecik

sınırlarının kaybolduğu %2.5 GNP-PEEK tanecikli topak yapısında çözücünün hapsolabileceği boşlukların oluşmaması nedeniyle, çözücü difüzyonunun daha etkin bir biçimde gerçekleşmesi olarak açıklanabilir. TGA analizi sonrasında elde edilen bozunma sıcaklığı, %5 kütle kaybının gözlemlendiği bozunma sıcaklığı ve kül yüzdesi değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'ye göre PEEK malzemenin bozunma sıcaklığı çözücü değiştirme işlemi sonrasında bir miktar azalmıştır. Bunun nedeninin morfolojideki değişim olduğu düşünülmüştür. Şekil 5'te gözlemlenebilen tanecikli topak yapıdaki malzemenin bozunması, toz PEEK malzemeye göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. Tanecik boyutundaki azalma nedeniyle, taneciklerin yüzey alanının artması ve bu nedenle ısı aktarımının toz haldeki PEEK malzemeye göre daha etkin gerçekleşmesi, tanecikli topak malzemenin daha düşük sıcaklıklarda bozunmasına neden olmuştur. Ancak yapıya grafen nanolevha eklenmesi ile bozunma sıcaklığında artış gözlemlenmiştir. Termal kararlılıktaki artış, PEEK matrisindeki karbonik yapıdaki nanoparçacıkların yüksek termal kararlılığına bağlanabilir [16]. Nanoparçacık oranının artmasıyla malzemenin bozunma sıcaklığı da artmıştır. Nanoparçacıkların varlığı, C-C titreşimlerini kısıtlayarak, bozunma için daha yüksek enerji ihtiyacını doğurmuştur [17]. Malzemelerin %5 kütle kaybındaki bozunma sıcaklıkları incelendiğinde ise yine bozunmanın erken basamaklarında tanecikli yapı etkisini göstermiş, ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanının artması ile daha düşük sıcaklıklarda bozunmaya sebep olmuştur. Ancak yapıya GNP eklenmesiyle bir ısı bariyeri oluşmuş ve malzemenin bozunması yavaşlamıştır. Yapıya GNP eklenmesiyle özellikle düşük katkılandırma oranlarında GNP'nin kül miktarına önemli bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Tablo 2'de PEEK malzeme ve kompozitlerinin camsı geçiş sıcaklıkları verilmiştir. PEEK ve kompozitlerinin camsı geçiş sıcaklıkları incelendiğinde ise çözücü değiştirme yönteminin PEEK malzemenin camsı geçiş sıcaklığını çok küçük farkla azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun iki nedeni olabilir. Birincisi yapı içerisinde TGA analizinde de gözlemlenen hapsolmuş çözücünün plastikleştirici etki yaratmasıyla camsı geçiş sıcaklığını düşürmesi, ikincisi ise tanecikli topak yapı morfolojisine geçişin polimer zincirlerinin daha rahat hareket etmesini sağlayarak camsı geçiş sıcaklığını düşürmesidir. Yapıya grafen eklenmesi ise yalnızca %2.5'lük bir katkılandırma oranında çok küçük bir artışa sebep olmuştur. Burada şekil 5. c)'de gözlemlenebilen tanecik sınırlarının yok olmasıyla, camsı geçiş sıcaklığı üzerindeki morfolojik etki azalarak, grafen nanolevhaların varlığı camsı geçiş sıcaklığını

arttırmıştır. Bu da GNP varlığının polimer zincirlerinin hareketini kısıtlamasıyla açıklanabilir.

Tablo 2. PEEK ve kompozitlerinin termal bozunma davranışları ve camsı geçiş sıcaklıkları

	Bozunma sıcaklığı (°C)	%5 kütle kaybı bozunma sıcaklığı (°C)	Kül yüzdesi (%)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
PEEK	584	557	48	166
PEEK tanecikli topak yapı	572	547	50	163
%1 GNP – PEEK tanecikli topak yapı	575	550	55	162
% 2.5 GNP-PEEK tanecikli topak yapı	585	562	52	168

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında çözücü değiştirme yöntemi ile ilk olarak PEEK kompozitleri elde edilmiştir. FTIR analizlerinden elde edilen bilgilere göre PEEK zincir yapısına başka gruplar eklenmeden, saf PEEK malzemenin kompoziti eriyik harmanlama yöntemlerine gerek kalmadan üretilebilmiştir. Morfoloji incelemelerine göre üretilen malzemeler tanecikli topak yapıdadır. Bu yapı, çözünmüş polimerin solventinin, polimerin hiç çözünmediği organik malzeme ile ani değişimi sonucunda yapısında oluşan kuvvetlerin etkisiyle oluşmuştur. Gerçekleştirilen termal analizler sonucunda çözücü değiştirme yönteminin PEEK malzemenin bozunma ve camsı geçiş sıcaklıklarında küçük bir düşüşe sebep olduğu bulunurken, yapıya GNP eklenmesinin termal özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın çıktısı olarak nanokatlı termoplastik PEEK malzeme sıcak harmanlama yöntemine alternatif olarak çözücü değiştirme yöntemi ile üretilmiştir. Bu yöntem ile PEEK malzemenin kompozitleri yüksek sıcaklık isterleri olan eriyik harmanlama cihazlarına gerek kalmadan kolay bir biçimde üretilebilecek ve

nanomalzemelerin PEEK özelliklerine etkisi incelenebilecektir. İstenildiği takdirde, tanecikli topak yapı formunda elde edilen kompozit yapı, sıcak pres ve enjeksiyonlu kalıplama gibi yöntemlerle parça üretiminde giriş maddesi olarak kullanılabilir. Bu sayede daha homojen nanokatlı termoplastik kompozit parçalar elde edilebilecektir.

Çalışmanın devamı olarak çözücü değiştirme yöntemiyle GNP-PEEK kompozitlerinde GNP'nin etkili olduğu konsantrasyonun belirlenmesi amacıyla, farklı konsantrasyonlarda grafen katkılılandırması yapılmalıdır. Buna ek olarak, çözücü değiştirme yönteminin diğer PEEK kompozitlerinin eldesinde de kullanılması bu yöntemin etki alanının belirlenmesinde faydalı olacaktır. En optimum sonucu veren nanokatlı termoplastik numune sıcak pres veya enjeksiyonlu kalıplama gibi yöntemlerle parça üretiminde kullanılarak mekanik testlerin gerçekleştirilmesine uygun numuneler üretilmesi ve mekanik değerlerin belirlenmesi, yine çalışmanın kapsamını genişletecektir. Tüm bu çalışmalar kapsamında elde edilecek sonuçlara göre havacılık standartlarına uygun olan termoplastik kompozitler belirlenebilecektir.

## PRODUCTION OF POLY(ETHER ETHER KETONE) COMPOSITES VIA SOLVENT EXCHANGE METHOD

In the aviation world, recently, thermoplastic materials have started to replace thermosets with their important advantages such as being both rapidly processable and recyclable. Graphene, on the other hand, has an important place in composite studies as it is the strongest nanomaterial. In this study, thermoplastic nanocomposites were produced by using graphene nanoplatelets (GNP) and poly(ether ether ketone) (PEEK) from thermoplastic material class. The solvent exchange method was chosen as the production method, and the composite of pure PEEK material could be produced first time with the solvent chosen, without adding any group to the PEEK chain structure. It was observed that the obtained composites were in granular foam structure and it was found that this structure caused a small decrease in the thermal decomposition temperature and glass transition temperature of the material. With the addition of graphene to the structure, the thermal properties of the material were maintained. With the obtained composite material, raw materials can be supplied to production benches such as injection molding and compression molding with an easy method without the need for melt blending devices which requires high temperature processing.

**Keywords:** PEEK, graphene nanoplatelets, solvent exchange method



## TEŞEKKÜR

Yazar, 20AG001 ve 5189901 projeleri kapsamında araştırma ve laboratuvar geliştirmeleri için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun 1004 ve 1515 programları kapsamında mali destek alındığını bildirmektedir. Ayrıca yazar, gerekli imkan ve altyapıyı sağladığı için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne ve Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'ne teşekkürlerini sunar. Yazar çalışmada bilimsel görüşlerini aldığı Mahide Betül Öztürkmen, Yahya Öz ve Remzi Ecmel Ece'ye teşekkürlerini sunar.

## KAYNAKÇA

- Schuster, A., Larsen, L., Fischer, F., Glück, R., Schneyer, S., Kühnel, M. 2018. "Smart Manufacturing of Thermoplastic CFRP Skins", *Procedia Manuf.*, 17, 935–43. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.147>.
- Díaz, J., Rubio, L. 2003. "Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fibre reinforced thermoplastic materials", *J Mater Process Technol.*, 143–144, 342–6. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00450-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00450-3).
- McKeen L. W. 2012. *Film Properties of Plastics and Elastomers*. 3rd Ed. 315-337.
- Öz, Y., Yılmaz, B., Evis, Z. 2022. "A Review on Nanocomposites with Graphene Based Fillers in Poly(ether ether ketone)", *Polymer Science, Series A*, 64.
- Chen, B., Berretta, S., Evans, K., Smith, K., Ghita, O. 2018. "A primary study into graphene/polyether ether ketone (PEEK) nanocomposite for laser sintering", *Applied Surface Science*, 428, 1018 – 1028.
- King, J.A., Tomasi, J.M., Klimek-McDonald, D.R., Miskioğlu, İ., Odegard, G. M., King, T.R., Sutherland, J.W. 2016. "Effects of carbon fillers on the conductivity and tensile properties of polyetheretherketone composites", *Polymer Composites*, 39(S2), E807 – E816.
- Puértolas, J., Castro, A., Morris, M., Rios, J.A., Ansón-Casaos, R. 2019. "Tribological and mechanical properties of graphene nanoplatelet/PEEK composites", *Carbon*, 141, 107 – 122.
- Song, H., Li, N., Li, Y., Min, C., Wang, Z. 2012. "Preparation and tribological properties of graphene/poly(ether ether ketone) nanocomposites", *Journal of Materials Science*, 47(17), 6436 – 6443.
- Tewatia, A., Hendrix, J., Dong, Z., Taghon, M., Tse, S., Chiu, G., Mayo, W.E., Kear, B., Nosker T., Lynch, J. 2017. "Characterization of melt-blended graphene – poly(ether ether ketone) nanocomposite", *Materials Science and Engineering: B*, 216, 41 – 49.
- Wang, Y., Rouholamin, D., Davies R., Ghita, O.R. 2015. "Powder characteristics, microstructure and properties of graphite platelet reinforced Poly Ether Ether Ketone composites in High Temperature Laser Sintering (HT-LS)", *Materials & Design*, 88, 1310 – 1320.
- Arif MF, Alhashmi H, Varadarajan KM, Koo JH, Hart AJ, Kumar S. Multifunctional performance of carbon nanotubes and graphene nanoplatelets reinforced PEEK composites enabled via FFF additive manufacturing. *Compos Part B* 2020;184:107625. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107625>.
- Mokhtari M, Archer E, Harkin-jones E, Mcilhagger A. A review of electrically conductive poly ( ether ether ketone) materials 2021. <https://doi.org/10.1002/pi.6176>.
- Thiruchitrabalam M, Bubesh Kumar D, Shanmugam D, Jawaid M. A review on PEEK composites - Manufacturing methods, properties and applications. *Mater Today Proc* 2020;33:1085–92. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.124>.
- Venkatraman, P., Rader, C., Bohmann, N., Foster, EJ. 2019. "Structure-property-processing relationship of ethanol solvent exchanged PEEK.", *Polymer (Guildf)*, 169, 154–9. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.02.057>.
- Yethiraj A. 2007. "Electrostatically Driven Formation of Spherical Colloidal Clusters." *Soft Matter*; 3:1099-1115. <https://doi.org/10.1039/B704251P>
- Wang P., Ma R., Wang Y., Cao W., Liu C, Shen C. 2001. "Comparative study of fullerenes and graphene nanoplatelets on the mechanical and thermomechanical properties of poly(ether ether ketone)." *Mater Lett*; 249:180–4. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.092>.
- Mishra TK, Kumar A, Verma V, Pandey KN, Kumar V. PEEK composites reinforced with zirconia nanofiller. *Compos Sci Technol* 2012;72:1627–31. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.06.019>.

## YAYIN İLKELERİ

### Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

### Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;  
Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.
- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıttığı yazılar yayımlanabilir

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

### Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

### YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı'na aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

### ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfıdır. "Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulları ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı tarafından seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of  
MECHANICAL  
DESIGN  
AND  
PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the METU Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Education and Research Foundation, Ankara, Turkey.



## MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanıtıldığı yazılardır.

Örnek makale <https://parlar.org.tr/matim> sitesinde verilmiştir. Yazarlar, makalelerini TÜBİTAK ULAKBİM tarafından yürütülen <http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim> sitesine yüklemelidirler. Bir sorun ile karşılaşılırsa İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Hakan Kalkan (hakan.kalkan@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirler. Yazarlar, yayınlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik olarak aynı şekilde yüklemelidirler. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır.

### MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

#### Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanılmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

#### Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
- Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
- Özet ve anahtar kelimeler
- Makalenin ana kısmı
- Teşekkür (gerekli ise)
- İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
- Kaynakça
- Ek(ler) varsa

Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir. Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanımlanmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

#### Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,

- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

#### Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, bilgisayar ile anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazılı belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle bilgisayar kullanımında "l" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşliğin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "( )" içinde verilmelidir.

#### Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için bilgisayar ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında çizilmelidir. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler yeterli çözünürlükte sağlanmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Derginin elektronik ortamda renkli olarak yayınlanacağı dikkate alınmalıdır.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

#### Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

#### Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [ ] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

- Dergi Makalesi
1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376. Kitap
  2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983. Rapor
  3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980. Kongre Makalesi
  4. Adalı, E. ve Tunali, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

#### Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler bilgisayar ile A4 formatında, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

#### YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.