



## Stress-constrained infill optimization in additive manufacturing for the armrest of an office chair

Süleyman Kuş<sup>1</sup> , Ali Durmuş<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Ermetal Automotive and Furniture Industry Tic. Inc., 16110, Demirtaş, Bursa, Turkey

<sup>2</sup>Bursa Uludağ University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 16059, Görükle, Bursa, Turkey

### Highlights:

- Design optimization and product development
- Homogeneous density outer shell and inner filling optimization in Fused Deposition Modeling method
- Stress focused inner filling optimization in Fused Deposition Modeling method

### Keywords:

- Additive manufacturing,
- Structural optimization,
- Finite element analysis,
- TS EN 1335 armrest test

### Graphical/Tabular Abstract

In this paper, optimization of infill structure has been carried out in accordance with the stress distribution to be formed on the geometry of a structural part. The armrest of an office chair selected as a structural part is produced by Fused Deposition Modeling method. Analysis and verification studies of the armrest are carried out.

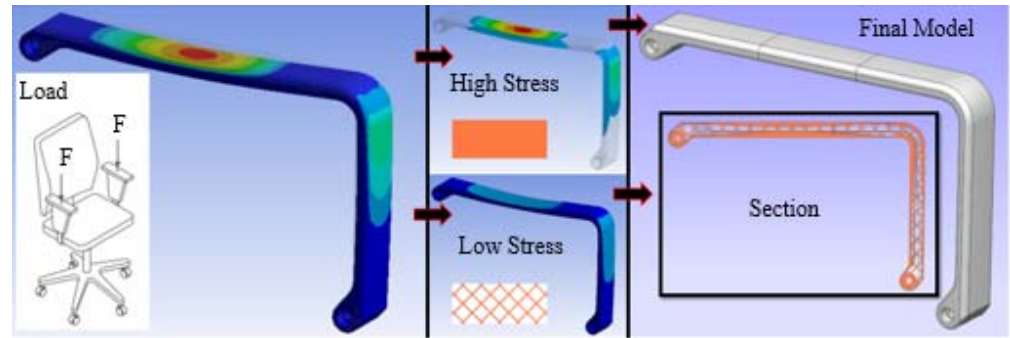


Figure A. Process steps of filling optimization of the regional density model

### Article Info:

Research Article

Received: 31.12.2020

Accepted: 18.04.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.851619

### Acknowledgement:

The authors would like to thank Ermetal Group of Business Companies for supports.

### Correspondence:

Author: Ali Durmuş

e-mail:

adurmus@uludag.edu.tr

phone: +90 224 294 1989

**Purpose:** In the study, it is aimed to increase the mechanical performance of the infill structure of the armrest model according to cases where the infill structure is homogeneously distributed by creating a dense filling structure in regions where the stress is high and the sparse filling structure in other regions having lower stress level.

**Theory and Methods:** The loading conditions of the office chair armrest are determined according to the TS EN 1335 standard and the optimizations of the armrest model are made to have a 50% occupancy rate. In the homogeneous density optimization study, the effects of outer wall thickness and inner cellular size change are investigated. In the regional density optimization study, the internal filling structure is also defined. In those optimization studies, to reach the armrest model with the lowest von-Mises stresses is produced using PLA material and the verification is carried out by utilizing the TS EN 1335 test standard into mechanical tests.

**Results:** In four of the FEM analyzes performed for the five test conditions of the TS EN 1335 standard, a lower stress value is obtained in the regional density model study compared to the homogeneous density model studies. The regional density armrest model, which is predicted to be safe according to FEM analysis, has also met all test conditions in verification tests.

**Conclusion:** In the FEM analyzes performed for homogeneous regional density models with similar weight according to the test loads defined for the TS EN 1335 armrest test, it is evident that up to 36% improvements can be made in von-Mises stresses with the change in cross-section and cellular size in the inner fill. However, a suitable alternative that does not exceed the safe stress limits is not reached. In FEM analyzes performed for the regional density optimization study with similar weight, von-Mises stress values were obtained in a way that they do not exceed safe stress limits and generally lower than homogeneous density studies. It is observed that can be reached better mechanical performances by using the regional density model approach than the homogeneously filled structures with similar weight.



## Bir ofis koltuğu kolçağı için eklemeli imalatta gerilme odaklı iç dolgu optimizasyonu

Süleyman Kuş<sup>1</sup> , Ali Durmuş<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Tic. A.Ş., 16110, Demirtaş, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Tasarım optimizasyonu ve ürün geliştirme
- Eriyik biriktirmeli modelleme yönteminde homojen yoğunluklu dış kabuk ve iç dolgu optimizasyonu
- Eriyik biriktirmeli modelleme yönteminde gerilme odaklı iç dolgu optimizasyonu

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.12.2020

Kabul: 18.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.851619

### Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat,  
yapısal optimizasyon,  
sonlu elemanlar analizi,  
TS EN 1335 kolçak testi

### ÖZ

Bu çalışmada; Eriyik Biriktirmeli Modelleme yöntemiyle üretilen bir ofis koltuğu kolçağının, TS EN 1335 gerekliliklerini karşılayabilecek şekilde; tasarım, analiz, optimizasyon ve testleri gerçekleştirilmiştir. Kolçak modelinin iç hacmi için iki farklı optimizasyon çalışmasının etkisi incelenmiştir. İlk optimizasyon çalışması kolçak iç dolgusunun homojen dağılım gösterdiği durumda uygun dış kesit kalınlığı ve hücresel boyutun değiştiği çalışmadır. Diğer optimizasyon çalışması ise kolçak üzerinde gerilimin yüksek olduğu bölgelerin dolu diğer bölgelerin homojen düşük yoğunluklu olarak tanımlandığı bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasıdır. %50 doluluk oranına sahip homojen yoğunluklu modellerin sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre; yakın ağırlığa sahip kolçak modellerinde çeşitli yük durumları için von-Mises gerilmelerinde %29 ile %36 arasında değişen azalmalar meydana gelmiştir. Ancak; çekme ve eğme testleri referans alınarak oluşturulan emniyetli sınır gerilme değerlerini aşmayan uygun alternatif elde edilememiştir. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasında ise von-Mises gerilme değeri homojen yoğunluklu en iyi alternatifte göre dört test yükü için yaklaşık %20 daha düşük olarak elde edilmiş ve bu model emniyetli sınır gerilme değerlerine göre de uygun sonuç vermiştir. Uygun sonucun elde edildiği bu kolçak modeli üretilmiştir ve doğrulama testlerine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda, modelin istenen gereklilikleri yerine getirdiği tespit edilmiştir.

## Stress-constrained infill optimization in additive manufacturing for the armrest of an office chair

### H I G H L I G H T S

- Design optimization and product development
- Homogeneous density outer shell and inner filling optimization in Fused Deposition Modeling method
- Stress focused inner filling optimization in Fused Deposition Modeling method

### Article Info

Research Article

Received: 31.12.2020

Accepted: 18.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.851619

### Keywords:

Additive manufacturing,  
structural optimization,  
finite element analysis,  
TS EN 1335 armrest test

### ABSTRACT

In this research; an armrest of an office chair is studied by Fused Deposition Modeling, while ensuring requirements of TS EN 1335 are met in each one of design, analysis, optimization and testing phase. The effect of two different optimization studies for the interior volume of the armchair model was investigated. In the first optimization study, an appropriate outer section thickness and cellular size change when the inner filling of the armrest shows a homogeneous distribution. In another optimization study, a regional density optimizations evaluated wherein regions having a high tension on the armrest model are defined with a homogeneous low density, relative to other regions with a fuller density. According to the finite element analysis results of the homogeneous density models with 50% occupancy; In armrest models with close weight, reductions in von-Mises stresses ranging from 29% to 36% have occurred for various load conditions. However, a suitable alternative that did not exceed the safe limit stress values established by reference to tensile and bending tests could not be obtained. In the regional density optimization study, the von-Mises stress value is obtained approximately 20% lower over four test loads than the best alternative with homogeneous density, and a suitable result is obtained according to the safe limit stress values with this model. This armrest model with the appropriate result has been produced and subjected to validation tests. As a result of the tests, it has been determined that the model fulfills the required requirements.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk olarak prototip ürün elde etmek için kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinin günümüzde kullanımı önemli ölçüde artmış ve sadece prototip yapımı için değil, nihai ürün elde etmek için kullanımı da giderek yaygınlık kazanmaktadır [1]. 2019 yılında 'Reports and Data'nın yaptığı araştırmaya göre özellikle otomobil ve savunma sanayi alanında uygulamaların arttığı ve eklemeli imalatın dünya genelindeki pazar payının 2026 yılında 2018 yılı seviyesinin yaklaşık üç katına çıkacağını öngörülmektedir. Eklemeli imalatın kullanımının artmasına karşın üretim hızının düşük ve ürün maliyetinin geleneksel yöntemlere göre yüksek olması sebebi ile yüksek adetli üretimler için birim ürün maliyeti açısından dezavantajını korumaktadır [2, 3]. Fakat eklemeli imalat teknolojisinin süreç planlamasına gerek kalmadan direk kullanılması ürüne özel kalıp, aparat, fiştür vb. üretim ekipmanına ihtiyaç duymayışı renk, desen, şekil ve boyut değişiminin ek bir maliyet oluşturmaması [3, 4] sebebi ile ilk ürün ve küçük ölçekli üretimler için endüstriyel uygulamalarda da yer bulmaktadır [5, 6]. Eklemeli imalat yöntemleri üzerine akademik ve endüstriyel alanlarda malzeme, makine ve performans geliştirmeleri üzerine birçok araştırma yapılmakla beraber halen keşfedilememiş birçok alan bulunmaktadır [7-9]. Eklemeli imalat yöntemlerinin en ekonomik yöntemlerinden biri ve en yaygın olarak kullanılan Eriyik Biriktirmeli Modelleme (FDM: Fused Deposition Modelling) yöntemidir [10, 11]. FDM yöntemi ile elde edilen parçalar anizotrop bir yapıya sahip olması bir dezavantaj oluştururken model iç hacminin istenilen desen ve istenilen yoğunlukta basılabilmesi önemli bir tasarım ve optimizasyon fırsatları sunmaktadır. FDM eklemeli imalat yöntemi, model iç hacminin istenilen geometrik yapılarda üretilebilmesine imkân sunmakta ve bu geometrideki çeşitlilik sayesinde aynı ağırlığa sahip modellerde farklı mekanik özellikler elde edilebilmektedir [12, 13]. Model için katman kalınlığı, iç dolgu tipi, dış dolgu et kalınlığı, iç dolgu et kalınlığı, yazdırma sıcaklığı, yazdırma genişliği, yazdırma hızı vb. üretim parametreleri de eklemeli imalat ile elde edilen modelin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [14-16]. Model iç dolgusu; homojen dağılım gösterecek şekilde elde edilebildiği gibi, istenilen bölgelerde yüksek dolum oranlarında istenilen bölgelerde düşük dolum oranlarında üretilebilmekte ve bu sayede homojen dolgulu parçalara göre daha iyi performansla sahip parçalar elde edilebilmektedir [17-19]. Bölgesel yoğunluklu çalışmalar sunduğu avantajlar sebebi ile endüstriyel uygulamalara yönelik yapılan çalışmalarda da yer bulmaktadır [20]. FDM eklemeli imalat yöntemiyle elde edilen parçalar anizotrop özelliğe sahiptir. Bu sebeple yapılan optimizasyon çalışmasına bu özelliğin de katılması, yapılacak optimizasyon çalışmasının etkinliğini daha da arttıracaktır [21].

Gerçekleştirilen çalışmanın amacı; bir ofis koltuğu kolçağının, FDM temelli katmanlı imalat sınır şartları gözetilerek, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM: Finite Element Method) analizleri ve optimizasyon çalışmaları neticesinde

tasarımının ortaya konmasıdır. Geliştirilen tasarım FDM yönetimiyle imal edilip, nihai ürünün uluslararası normlar çerçevesinde mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. FDM eklemeli imalat yönteminin daha etkin kullanılmasına ve kullanımının benimsenerek yaygınlaşmasına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında; üretim için belirlenen parametreler ile kullanılan malzemenin mekanik performansını tespit etmek için, farklı yönlerde çekme ve eğme numuneleri üretilip, testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler FEM analizlerinde girdi ve emniyet şartları olarak kullanılmıştır. Kolçak modeli TS EN 1335 standardına uygun dış boyutlarda tasarlanıp, model optimizasyonu için kolçak dış formu değişmeyecek şekilde iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Yapılan optimizasyon yöntemlerinden homojen dağılımlı iç dolgu çalışması ile en uygun kabuk et kalınlığı ve iç dolgu dağılımı tespit çalışması gerçekleştirilmiştir. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasında gerilmenin yüksek olduğu bölgelerde kolçak modeli %100 dolu olarak tanımlanırken, gerilmenin düşük olduğu bölgelerde ise kolçak modeli düşük dolum oranlarında tanımlanarak kolçak modeli için uygun iç dolgu yapısı geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada FDM yönteminin yöne bağlı farklı mekanik özellik göstermesinin etkileri de dikkate alınmıştır. FEM analiz sonuçlarına göre geliştirilen en uygun model 1,75 mm'lik (ölçülen filament çapı:1,72 mm) ESUN marka PLA malzemeden FDM yöntemi kullanılarak üretilmiş ve TS EN 1335 standardına göre mekanik testlere tabi tutularak ürün doğrulaması yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Üretim İçin Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Working Parameters for Production)

Uygun üretim ve model parametrelerinin seçimi, yapılacak çalışmanın performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu sebeple çalışmada kullanılacak parametreler literatür araştırması sonucunda tespit edilen önergeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Et kalınlığı olarak büyük parçalarda 1,2 mm ve üzeri kullanılması önerilmektedir [22]. Yazdırma sıcaklığı olarak katmanlar arası birleşmenin daha iyi olabilmesi için malzeme üretim sıcaklıklarının üst aralığı seçilmesi önerilmektedir [14]. Yazdırma hızı olarak da mekanik performans için düşük hızlar önerilmektedir [14]. Katman kalınlığının da yazdırma genişliğinin yarısı ve daha düşük oranında olması önerilmektedir [15]. Numune ve kolçak modeli üretimi için seçilen üretim parametreleri Tablo 1'de çizelge haline getirilmiştir.

### 2.2. Çekme ve Eğme Numune Üretimi ve Testleri (Tensile and Bending Sample Production and Tests)

Literatürde önerilen üretim ve model parametrelerine göre malzeme çekme ve eğme numuneleri üretilip testleri yapılarak çalışma şartlarındaki mekanik performansları tespit edilmiştir. Çekme numunesi için ISO 527-1:2019

standartı, eğme numunesi için ISO 178:2019 standardı referans alınmıştır. FDM ile üretilen parçaların anizotrop özellik göstermesi sebebiyle çekme ve eğme test numunelerinin Şekil 1a'daki gibi dikey, en ve yatay konumlandırılmış üç farklı pozisyonda üretimleri yapılmıştır. Numune üretimi %100 dolulukta eş merkezli yörünge izleyecek şekilde, Tablo 1'deki değerler kullanılarak, Şekil 1b'deki 0,4 mm nozul çapına sahip Creality CR-10 max FDM eklemeli imalat cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme ve eğme testleri Şekil 1c'deki Universal Zwick/Roell Z2020 çekme test cihazı kullanılarak, oda sıcaklığında ve 50 mm/dk çene hareket hızında yapılmıştır. Çekme testindeki uzama değerleri de mekanik bir ekstansometre yardımıyla ölçülmüştür.

### 2.3. Kolçak Modelinin Oluşturulması (Creating the Armrest Model)

Kolçak modelinin, boyutsal ölçüm ve mekanik performans testleri için; tasarım tescili 'Bürosit Büro Donanımları San. ve Tic. A.Ş.' firmasına ait 'Dorado' ürün gövdesi seçilmiştir

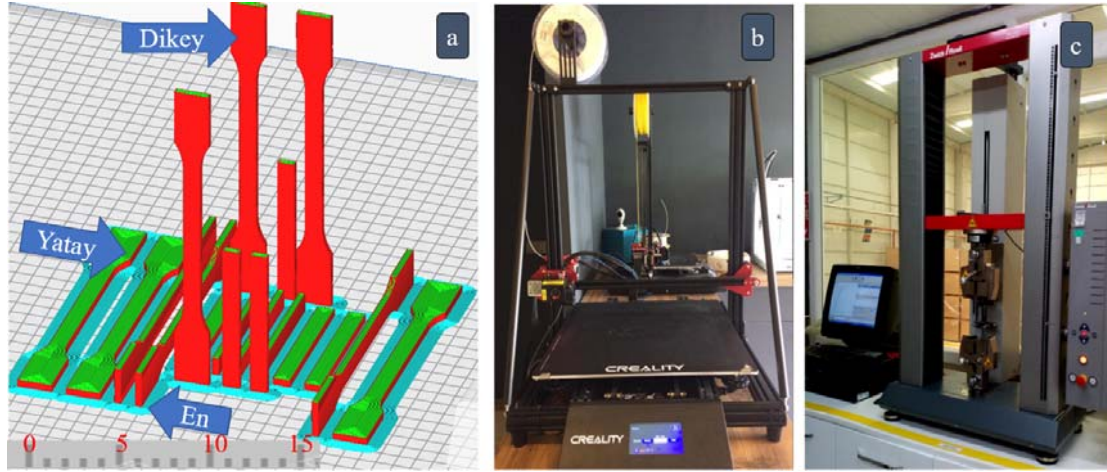
(Türk Patent Enstitüsü Tasarım Tescil No: 2020 00596, 2020 00597) [24]. Kolçağın boyutsal ölçüm ve mekanik performans testleri bu ürün üzerinden yapılmıştır. Kolçak modelinin boyutsal ölçüleri Tablo 2'deki standart gerekliliklerine göre 'Siemens NX' yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Boyutsal ölçümlerde oturak üzerinden kolçak yüksekliği ölçüsü 65 kg yük altında yapıldığı için, oturak süngerin 20 mm ezileceği öngörüsü ile 3 boyutlu model ölçümüne 20 mm eklenmiştir. İç dolgu yapısı tanımlamaları sonrası nihai kolçak modeline ulaşılmıştır. Uygun iç yapının belirlenmesi de Tablo 3 ve Şekil 2'deki TS EN 1335 test şartlarına göre yapılan FEM analizleri ve optimizasyon çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir.

### 2.4. Kolçak Modelinin FEM Analizleri (FEM Analysis of the Armrest Model)

Kolçak modelinin optimizasyon çalışmalarında FEM analizleri için ANSYS yazılımı ve modelleme çalışmaları içinde 'Siemens NX' yazılımı kullanılmıştır. FEM analizleri Tablo 3'deki sıraya göre Şekil 2'de belirtildiği gibi

**Tablo 1.** Kolçak üretim parametreleri (Printing parameters of armrest)

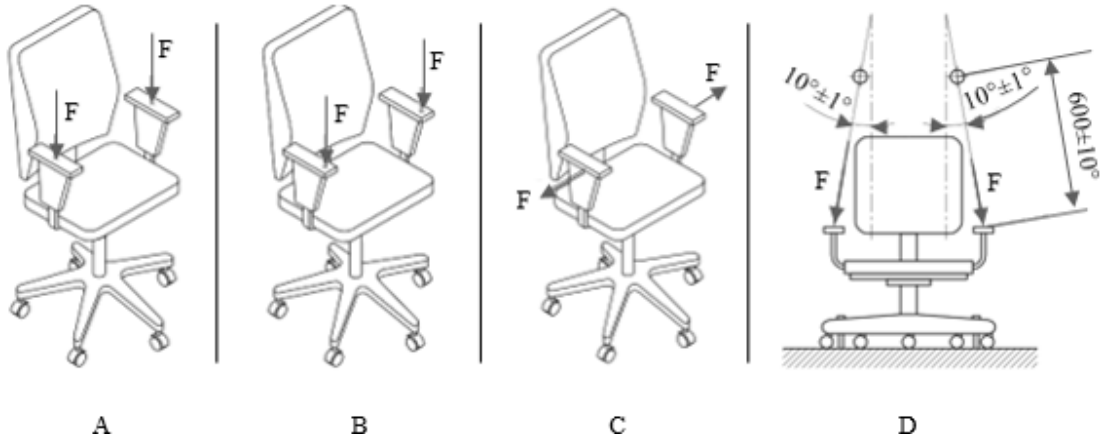
Parametreler	Uygulama	Referans
Nozul çapı ve yazdırma genişliği (mm)	0,4	Standart nozul
Kabuk et kalınlığı (mm)	1,2	[22]
Dolgu et kalınlığı (mm)	1,2	[22]
Katman kalınlığı (mm)	0,2	[15]
Baskı sıcaklığı (°C)	210	[14]
Tabla sıcaklığı (°C)	50	[23]
Baskı hızı İç / Dış (mm/s)	50 / 25	[14]



**Şekil 1.** Çekme ve eğme test numuneleri (a), FDM baskı cihazı (b), Çekme test cihazı (c)  
(Tensile and bending testing samples (a), FDM print (b), Tensile testing machine (c))

**Tablo 2.** Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler [25] (Office chair armrest dimensional requirements)

Tanım	İstekler
Kolçak kullanım uzunluğu	En az 200 mm
Kolçak kullanım genişliği	En az 40 mm
Kolçak ön kenarından uzaklığı	En az 100 mm
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Sabit)	200-250 mm arası
Kolçaklar arası mesafe (Sabit)	460-510 mm arası



**Şekil 2.** Ofis koltuğu kolçağı dayanım testlerinin uygulama şekilleri (A-Dik, B-Ön, C-Yan, D-Açılı) [26]  
(Application methods of office chair armrest strength tests (I-Vertical, II-Front III-Side, IV Angled))

**Tablo 3.** Kolçak mekanik testleri [26] (Armrest mechanical tests)

Uygulanan Yük	Çevrim (Adet)	Uygulama zamanı (s)	Uygulama
900 N Dik	5	10	Şekil 2 (A)
450 N Ön	5	10	Şekil 2 (B)
400 N Yatay	10	10	Şekil 2 (C)
400 N Açılı	60 000	1	Şekil 2 (D)
750 N Dik	5	10	Şekil 2 (A)

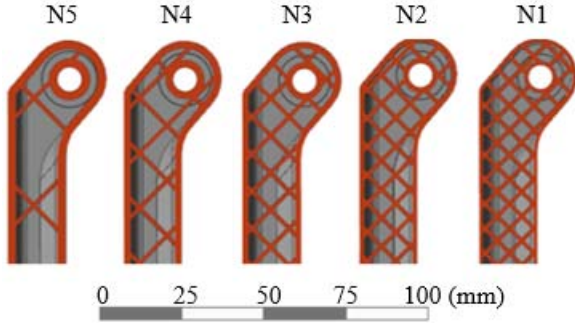
gerçekleştirilmiştir. Kolçağın, iç hacim modelleme çalışması için iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlar; homojen yoğunluklu iç dolgu ve bölgesel yoğunluklu iç dolgu yöntemleridir. Bu çalışmalarda, belirlenen kolçak modelinin tam dolu ağırlığı üzerinden optimizasyon çalışmalarıyla %50 ağırlık azaltılacak şekilde iç yapı modelleri geliştirilmiştir. FDM ile üretilen parçalar, üretim yöntemi kaynaklı anizotropik bir yapıya sahiptir. Bu sebeple FDM ile üretilen parçaların yapısal olarak modellenmesi için birtakım kabuller yapılması gerekmektedir [27]. Bu çalışmada kullanılacak PLA malzemenin mekanik özellikleri, literatür araştırma sonuçlarından elde edilen bilgiler ve test sonuçları ile lineer izotrop bir malzeme olarak belirlenmiştir. FDM yöntemi ile üretilen modellerden örme yönündeki (yatay ve en numunelerinin çekme yönü) mekanik performansı örme yönüne dik doğrultuya (dikey numune çekme yönü ve kolçak modelinde z yönü) göre daha yüksek olmaktadır [16, 28]. Bu sebeple FEM analiz sonuçlarının von-Mises gerilmesi olarak testler sonucunda elde edilen en düşük (çekme numuneleri dik yön) dayanım değerini aşmayacak şekilde değerlendirmesi yapıldığında, model üzerinde gerçekleştirilebilecek iyileştirmeler sınırlı kalmaktadır. Model anizotropisinin dikkate alındığı bir değerlendirme durumunda modellerdeki fazla emniyetli bölgeler de optimize edilebilmektedir [21]. Yapılan çalışmadaki FEM analizlerinde model anizotropisi de dikkate alınmış ve değerlendirme şu şekilde yapılmıştır. Model üzerinde oluşan von-Mises gerilmeleri örme yönü mekanik performansına göre incelenmiş, malzemenin örme yönüne dik yöndeki mekanik performansına göre kolçak üzerinde bu yönde oluşan z yönü normal gerilmelerine bakılmıştır. FDM yönteminde üretilen malzemeler örme yönüne dik doğrultuda basma gerilmesine maruz kaldığında

en az örme yönündeki gibi mekanik özellik göstermektedir [29]. Bu sebeple FEM analizlerinde, kolçak modelinin z yönünde oluşan normal gerilmelerin, sadece çekme yönündekileri üzerinden değerlendirmesi yapılmıştır. FEM analizleri için model uygunluk değerlendirmesi de kolçak modelinin TS EN 1335 test şartlarında oluşan von-Mises gerilmesinin çekme testlerinden elde edilen örme yönünde ki emniyetli gerilme değerini geçmeyecek, kolçak modelinin z yönünde oluşan çekme gerilmesinin de örme yönüne dik yöndeki emniyetli çekme gerilmesi değerini geçmeyecek şeklinde yapılmıştır.

### 2.5. Homojen Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu Optimizasyonu (Homogeneous Density Armrest Inner Filling Optimization)

FDM yönteminde model iç dolgusu için genel olarak homojen yoğunluklu dolgu yapıları tercih edilmektedir. İç dolgunun homojen yoğunluklu olması durumunda da aynı toplam ağırlığa sahip olsa da farklı dolgu yapıları farklı mekanik özellikler sunabilmektedir [12, 30]. Bu çalışmada da mekanik performans için önerilen ızgara (grid) dolgu yapısı seçilmiştir [30]. Dış kesit kalınlığı ve iç dolgu hücresel boyut parametrelerinin en uygun dağılımının bulunması için de aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada iç dolgu yapılarının kalınlığı 1,2 mm olarak seçilmiştir. Dış et kalınlığı da 1,2 mm'den 2,8 mm'ye kadar farklı kalınlıklarda alternatiflendirilmiştir. Çalışması yapılan alternatiflerin ağırlık, dış kabuk genişliği, iç dolgu genişliği ve hücresel yapı boyutsal değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Belirlenen kriterlere göre elde edilen alternatiflerin kesit görünüşleri Şekil 3'te görülebilmektedir. Her bir alternatif kolçak için ayrı ayrı TS EN 1335 kolçak test yükleri için FEM analizleri yapılarak eşit dolgu oranına sahip alternatifler arasında en

uygun sonuç veren dış dolgu et kalınlığı ve iç dolgu hücresel boyutu tespit edilmiştir.



**Şekil 3.** Homojen dolgulu kolçak modellerinin kesit görünümü  
(The Cross sectional view of homogeneously filled armrest models)

#### 2.6. Bölgesel Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu Optimizasyonu (Regional Density Armrest Inner Filling Optimization)

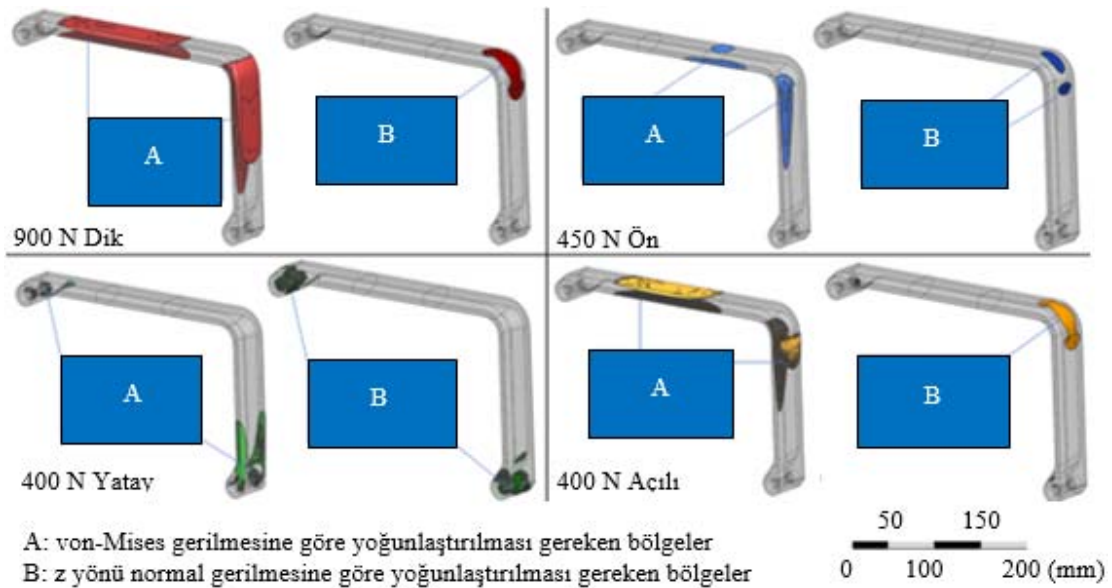
Farklı iç dolgu tipi, dolgu hücresel boyutu ve dolgu kalınlığı gibi parametreler ile optimizasyon çalışması yapıldığında ulaşılabilecek iyileştirmeler sınırlı olabilmektedir. Bölgesel yoğunluk dağılımı uygulanmış model çalışmalarının,

homojen yoğunluklu çalışmalara göre belirgin farklar oluşturduğu birçok çalışmada ortaya konulmuştur [17-19]. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışması, homojen yoğunluklu dolgu optimizasyonuna çalışmasına benzer şekilde yapılmıştır. Kolçak modeli dış kabuk et kalınlığı 1,2 mm olarak seçilmiştir. Bölgesel yoğunluklu kolçak iç hacim malzeme dağılımı tespiti için; kolçağa uygulanacak test yüklerinin uygulandığı durumlar altında oluşan gerilme dağılımlarından faydalanılmıştır. FEM analizleri altında oluşan von-Mises gerilme değerlerinin belirlenen sınır gerilme değerinin üzerinde kalan bölgeleri kolçak modelinde tam dolu olarak modellenmiş ve gerilmenin düşük olduğu bölgelerde ise homojen yoğunluklu alternatiflerdeki gibi ızgara (grid) dolgu tipi ve düşük yoğunluklu olarak uygulanmıştır. z normal gerilmesi yönünde oluşan gerilmelere (örme yönüne dik doğrultu) göre de gerilmenin yüksek olduğu alanlarda bölgesel yoğunlaştırma işlemi yapılarak kolçak modelinin z yönündeki mekanik performansı iyileştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar ile homojen yoğunluklu iç dolgu optimizasyon çalışmasına göre daha iyi sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Kolçak modelinde bölgesel yoğunlaştırılacak alan tanımlanırken 900 N yük durumu için belirlenen gerilme sınırları 450 N ön, 400 N yatay ve 400 N açılı yük şartlarında

**Tablo 4.** Homojen dolgulu kolçak model alternatifleri (Homogeneously filled armrest model alternatives)

Numune	Dış Kabuk Genişliği (mm)	İç Dolgu Genişliği (mm)	Hücresel Boyut (mm)	Ağırlık (g)
Dolu Model	-	-	-	521
N1	1,2	1,2	6	250
N2	1,6	1,2	7	251
N3	2	1,2	9	248
N4	2,4	1,2	13,5	244
N5	2,8	1,2	26	245



A: von-Mises gerilmesine göre yoğunlaştırılması gereken bölgeler  
B: z yönü normal gerilmesine göre yoğunlaştırılması gereken bölgeler

**Şekil 4.** Kolçak modelinde test yüklerine göre yoğunluk ihtiyacı olan bölgeler  
(The areas that require density according to test loads in the armrest model)

yük durumunu karakterize edecek yeterli alan oluşturamadığından diğer yük durumları için gerilme sınır değerleri düşürülmüştür. 750 N dik yük için bölgesel gerilme yığılmaları 900 N dik yük ile aynı karaktere sahip daha düşük bir yük değeri olduğundan ayrı bir çalışma yapılmamıştır. Yüklere göre bölgesel yoğunluk için tanımlanan sınır gerilme değerleri Tablo 5’de toplu olarak verilmiştir. Tüm test yüklerinin sınır değerlerine göre kolçak modeli üzerindeki yoğunluk ihtiyacı olan bölgeler Şekil 4’te ayrı ayrı olarak, Şekil 5a’te elde edilen bu bölgeler tek model üzerinde birleştirilerek verilmiştir. Nihai kolçak modeli için bölgesel yoğunluk ihtiyacı olan bölgeler dolu, diğer bölgeler düşük yoğunluklu olarak tanımlanmıştır. Kolçak modeli üzerindeki yoğunluk ihtiyacı olan bölgeler dışındaki alanlar homojen düşük yoğunluklu olarak tanımlanarak kolçak modeli 249 g olarak Şekil 5b’deki gibi elde edilmiştir. Kolçak modeli oluşturulurken gerilme yığılması oluşmaması için bölgesel geçişler yumuşatılarak modellenmiştir.

### 2.7. Nihai Kolçak Modeli Üretimi ve Doğrulama Testleri (Final Armrest Model Production and Verification Tests)

Optimizasyon çalışması sonrası en uygun sonuçların elde edildiği model, üretim ve doğrulama testleri yapılması için seçilmiştir. Seçilen kolçak modeli çekme ve eğme numunelerinde olduğu gibi Şekil 1b’deki FDM temelli üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Kolçak modeli üretiminde yine Tablo 1’deki parametreler kullanılmıştır. TS EN 1335 doğrulama testleri  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve %50 nem oranında şartlandırılmış laboratuvardaki Şekil 6’daki test ekipmanlarıyla gerçekleştirilmiştir. Kolçak boyutsal ölçümleri Şekil 6a’daki ekipman yardımı ile yapılmıştır. Kolçak genişliği, kolçak uzunluğu, kolçak ön kenardan uzaklığı ve kolçaklar arası

mesafe; ürün serbest halde iken cetveller yardımıyla, kolçağın oturak üzerinden yüksekliği 65 kg lık kütle kullanılarak lazer metreyle ölçülmüştür. TS EN 1335’e göre mekanik testleri sırasıyla 400 N yatay, 450 N ön, 750 N dik, 400 N açılı ve 900 N dik şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kolçak mekanik testlerinden 400 N yatay testi Şekil 6b’deki ekipman ile kolçağın iç orta noktasından kolçakları dışa doğru açacak şekilde yük durumunda 10 s bekleyerek 10 çevrim olarak yapılmıştır. 750 N dik, 900 N dik testleri Şekil 6c’deki ekipman ile kolçağın kullanım bölgesi orta noktasından yük durumunda 10 s bekleyerek, 5 çevrim olarak yapılmıştır. 450 N ön yük testi de 750 N ve 900 N yük durumları ile benzer fakat uygulama noktası kolçağın ön kenarından olacak şekilde yapılmıştır. 400 N açılı yük testi  $10^{\circ}$  ile başlayıp  $20^{\circ}$ ’yi aşmayacak, yük durumunda 2 s bekleyecek, çevrim hızı da 10 çevrim/dk olacak şekilde, kolçağın kullanım bölgesinin orta noktasından 60000 çevrim olarak uygulanmıştır.

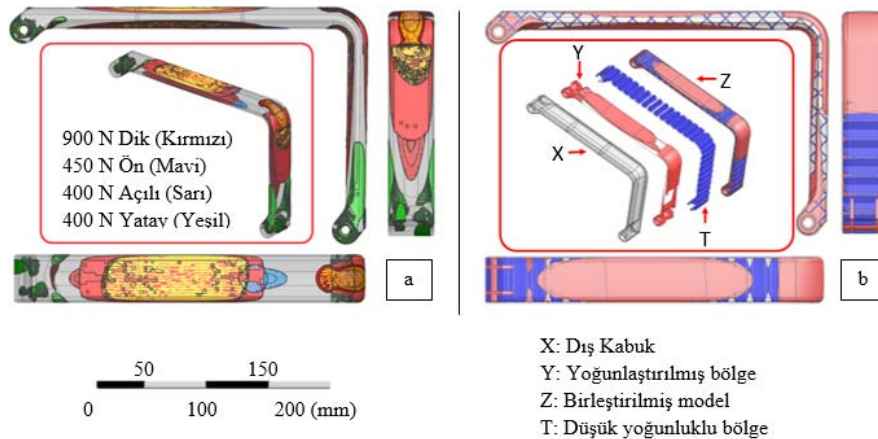
### 3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF EXPERIMENT RESULTS)

#### 3.1. Çekme ve Eğme Test Sonuçları (Tensile and Bending Test Results)

FDM yönteminin yöne bağlı olarak farklı özellik göstermesinden dolayı dikey, en ve yatay olacak şekilde üç farklı yönde numune üretimi yapılmış, testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ISO 527-1:2019 standardına, eğme testleri ise ISO 178:2019 standardına göre yapılmıştır. Yapılan testlerdeki çekme numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 7’de verilmiştir. Çekme dayanımı, eğme dayanımı ve modül sonuçları da Şekil 8’de verilmiştir.

**Tablo 5.** Bölgesel yoğunluk tespiti için analiz gerilme sınırları (Analysis stress limits for local density determination)

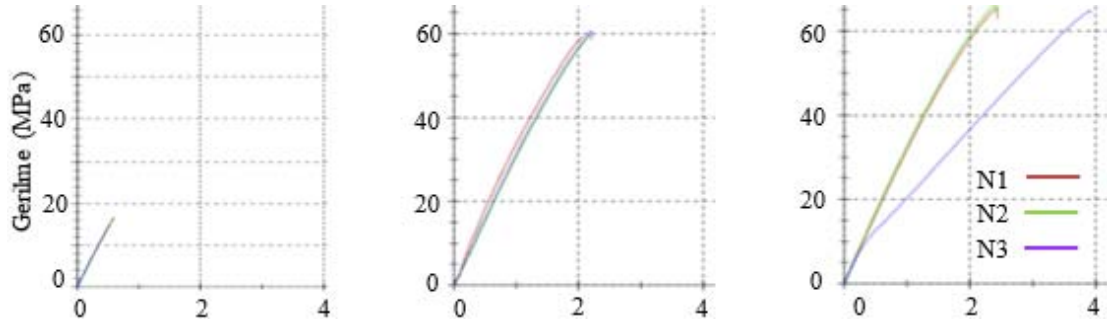
Test	von-Mises Gerilme sınırı (MPa)	z normal Gerilme sınırı (MPa)
900 N Üst	8	0,7
450 N Ön	5	0,4
400 N Yatay	5	0,4
400 N Açılı	5	0,4



**Şekil 5.** Kolçak modeli üzerindeki yoğunluk ihtiyacı olan bölgeler (a) ve Bölgesel yoğunluklu nihai kolçak modeli iç yapısı (b) (The areas with density need on the armrest model (a) and The regional density final armrest model internal structure (b))



**Şekil 6.** Ermetal Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarındaki Test ekipmanları (a: TS EN 1335 ölçüsel kontrol cihazı, b: TS EN 1335 kolçak içten açma test cihazı, c: TS EN 1335 kolçak dik, ön ve açılı test uygulama cihazı)  
(Test equipment in Ermetal R&D Center Office Furniture Test Laboratory (a: TS EN 1335 dimensional control device, b: TS EN 1335 armrest internal opening test device, c: TS EN 1335 armrest vertical, front and angle test application device))

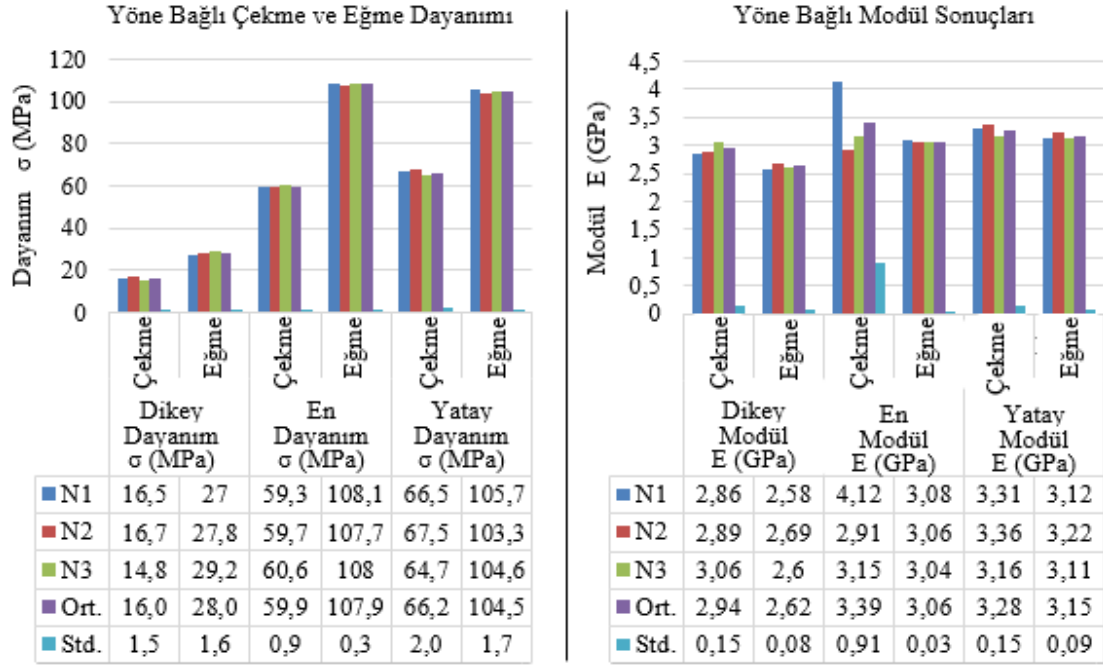


**Şekil 7.** Çekme test numuneleri için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Stress-strain curves for tensile test specimens)

Çekme test sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımı; yatay yönde üretilen numunelerde  $66,2 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$  ortalamasıyla elde edilmiştir. Enine doğrultuda üretilen numunelerin ortalama çekme değeri  $59,9 \text{ MPa} \pm 0,9 \text{ MPa}$  olarak gerçekleşmiştir. En düşük çekme dayanımı  $16,0 \text{ MPa} \pm 1,5 \text{ MPa}$  ile dikey yönde üretilen numunelerde elde edilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre en ve yatay yön test sonuçları yakın özellikler göstermektedir; ayrıca model formunda da bu iki yön arasında ayırım yapılabilmesi oldukça zordur. Bu sebeple bu iki yönün en düşük çekme dayanımı birlikte değerlendirilip, en düşük değeri örme yönü emniyet sınırı olarak kabul edilmiştir. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlar, literatürde yapılmış çalışmalara benzer şekilde gerçekleşmiş [16, 28] ve FDM ile üretilen parçalar için model oluşum yörüngesi, mekanik sonuçlara en çok etkisi olan parametre olarak ortaya çıkmıştır. Çekme testleri ve eğme testlerinin eğilimleri benzer karakter göstermiştir. FDM yönteminde elde edilen modelin yöne bağlı mekanik performansını tanımlamak için çekme ve eğme testleri

yanında basma yükü durumundaki performansının da tanımlanması gerekmektedir. Eğme testlerinde elde edilen değerler, test esnasında numunelerin alt bölgesinde çekme yükü oluşurken, üst bölgesinde basma yükü oluşması sebebiyle hem çekme hem de basma yükü durumunu ifade etmektedir. Bu sebeple yatay ve en (örme yönü) doğrultularında basma yükü durumunda emniyetli gerilme değeri çekme dayanım değerleri olarak alınmıştır. FDM yöntemi ile üretilen ve basma yüküne maruz kalan malzemeler için örme yönüne dik yöndeki mekanik performansı örme yönü doğrultusu kadar iyi sonuçlar vermektedir [29]. Bu sonuca göre kolçak modelinin örme yönüne dik doğrultusunda çekme gerilmesi yönünde  $14,8 \text{ MPa}$  değerine kadar, basma gerilmesi yönünde de  $59,3 \text{ MPa}$  değerine kadar emniyetli olacağı öngörülmektedir. Yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçların daha kolay anlaşılabilir olabilmesi için Şekil 9'daki yöne ve yük durumuna göre emniyetli bölge alan tanımlamaları yapılmıştır. Yatay ve enine doğrultuları aralarında çok küçük farklılıklar olmakta





**Şekil 8.** PLA malzeme için yöne bağlı çekme ile eğme dayanımı ve modül sonuçları  
(Tensile and bending strength depending on the direction, and module results for PLA material)

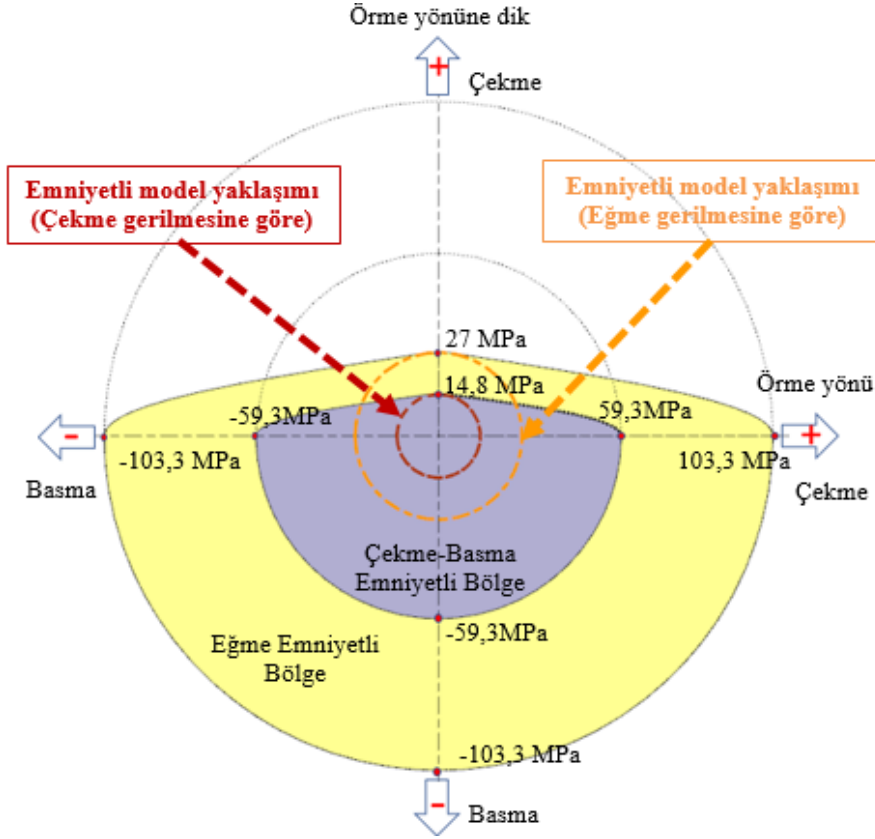
ve elde edilen sonuçlar da birbirine çok yakın gerçekleşmiştir. Yatay ve enine doğrultularında model oluşturma yörüngeleri boyuna doğrultuda olduğu için Şekil 9'daki oluşturulan emniyetli bölge grafikleri için model örme yönü şeklinde tanımlaması yapılmıştır. Dikey yön doğrultusu ise örme yönüne dik doğrultuyu ifade etmektedir. Örme yönüne dik çekme ile örme yönü basma ve örme yönüne dik çekme ile örme yönü çekme doğrultuları ara geçişleri Zhao ve ark. [28] çalışmasına benzetilerek oluşturulmuştur. Örme yönüne dik basma ile örme yönü basma ve örme yönüne dik basma ile örme yönü çekme doğrultuları ara geçişleri benzer mekanik performans gösterdikleri için ara geçişlerinde de aynı mekanik performansı sağlayacağı öngörüldüğü için aralarında dairesel bir geçiş tanımlanmıştır. Ayrıca en düşük mekanik özelliklerin aşılmadığı durumdaki değerlendirme emniyetli model yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır [27]. Bu yaklaşıma göre çekme ve eğme gerilmesine göre kullanılabilir emniyetli bölge tanımlamaları da Şekil 9'daki elde edilen grafiğe eklenmiştir.

### 3.2. FEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of FEM Analysis Results)

Kolçak modeli FEM analizleri için; test sonuçlarından elde edilen değerler birbirinden farklı olması sebebi ile FEM analizleri için test sonuçlarından elde edilen modül değerlerinin ortalaması olarak 3,07 GPa'lık bir elastisite modülü (E) tanımlaması yapılmıştır. PLA malzeme için 1,24 ( $g / cm^3$ ) olarak verilen yoğunluk değerinin de ölçümü yapılmış ve ölçümlerde 1,23 ( $g / cm^3$ ) olarak elde edilmiştir. Poisson oranı 0,36 olarak literatürden alınmıştır [31]. Yatay ve en test numuneleri mekanik performansı örme yönü ve dik test numunelerinin mekanik performansı örme yönüne dik

yönün mekanik performansı olarak kullanılmıştır. Emniyetli gerilme sınırları da çekme testlerinden elde edilen en düşük değerlere göre belirlenmiştir. FEM analizleri için; model emniyetli gerilme sınırları Tablo 6'da verilmiştir.

Tam dolu kolçak modelinin ilk olarak 900 N dik test yükleme durumu için; FEM analizlerinde en yüksek von-Mises gerilme değeri 26,7 MPa olarak gerçekleşmiştir. Oluşan gerilme değeri en zayıf yön emniyetli gerilme değeri 14,8 MPa'nın üzerinde gerçekleşmiş ve kolçak modeli emniyetli model yaklaşımına göre uygun sonuç verememiştir. Emniyetli model yaklaşımı Şekil 9'da elde edilen YMETAD'de tanımlanan emniyetli kullanılabilir bölgenin küçük bir bölümünü kullandığı için, tam dolu kolçak modeli bile bu yaklaşıma göre uygun sonuç verememiştir. Emniyetli model yaklaşımına göre emniyetli bölgenin daha büyük bir aralığını kullanacak bir yaklaşım önerilmektedir. FDM yöntemiyle elde edilen modeller örme yönünde örme yönüne dik doğrultuya göre daha iyi mekanik performans gösterdiği Şekil 9'daki YMETAD'de de görülebilmektedir. Önerilen yaklaşım şu şekildedir. Kolçak modelinde yük durumunda oluşan maksimum von-Mises gerilme değeri, örme yönündeki 59,3 MPa emniyetli gerilme değerini aşmadığı ve kolçak modeli üzerinde örme yönüne dik doğrultuda (kolçak modeli z yönü) oluşan z normal gerilme değeri de örme yönüne dik yöndeki 14,8 MPa emniyetli gerilme değerini aşmadığı durumda kolçak modelinin emniyetli olacağı öngörülmektedir. Örme yönüne dik doğrultuda kolçak modeli 59,3 MPa değerine kadar emniyetli olacağı öngörüldüğünden z normal gerilme değerlerinin sadece çekme yönünde oluşan gerilmeleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Önerilen yaklaşıma göre kolçak modeli 900 N yük durumu için



Şekil 9. Yöne Bağlı Mekanik Özelliklerin Tahminleri Dairesi (YMETAD)  
(Department of Estimates of Directional Mechanical Properties (YMETAD))

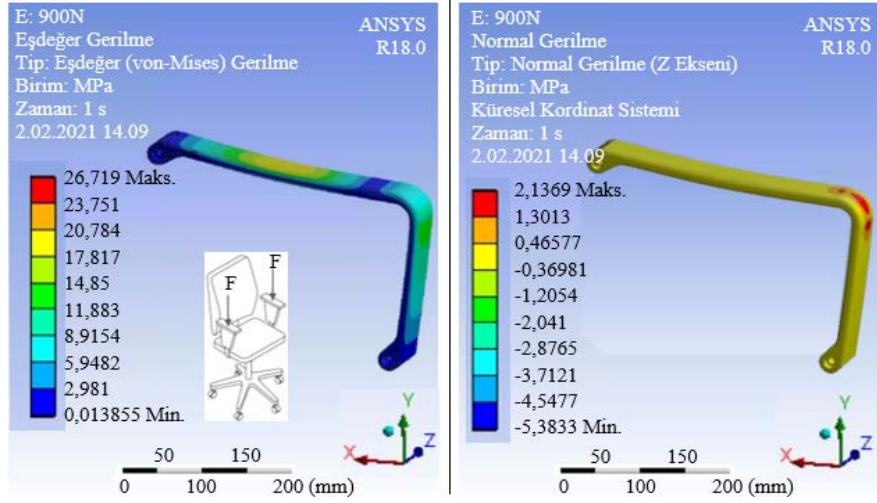
Tablo 6. FEM analiz kontrol parametreleri (Control parameters of FEM analysis)

Parametreler	Uygulama	Referans
Örme Yönüne Dik Çekme Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	14,8	Testler
Örme Yönüne Dik Basma Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	59,3	Testler ve [29]
Örme Yönüne Dik Eğmedeki Çekme Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	27	Testler
Örme Yönüne Dik Eğmedeki Basma Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	59,3	Testler ve [29]
Örme Yönünde Çekme Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	59,3	Testler
Örme Yönünde Basma Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	59,3	Testler ve [29]
Örme Yönünde Eğmedeki Çekme Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	103,3	Testler
Örme Yönünde Eğmedeki Basma Dayanımı ( $\sigma$ ) MPa	103,3	Testler

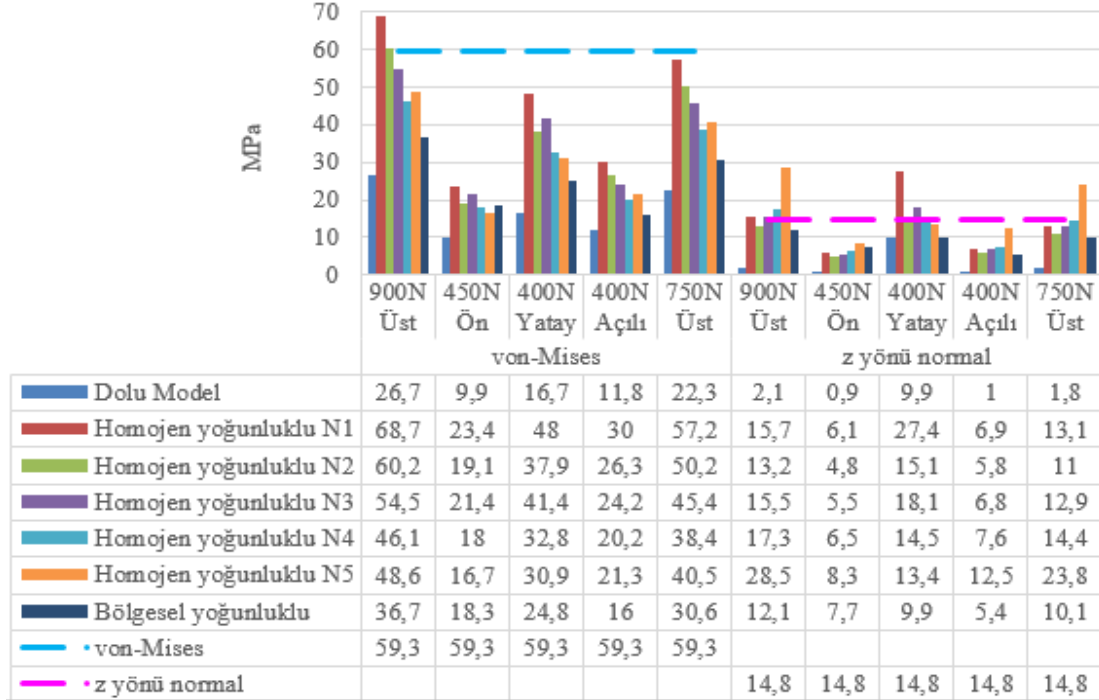
değerlendirildiğinde 26,7 MPa olan von-Mises gerilmesi 59,3 MPa örme yönündeki emniyetli gerilme değerini aşmadığı ve 2,1 MPa olarak gerçekleşen z yönü normal gerilme değeri 14,8 MPa olan örme yönüne dik emniyetli gerilme değerini aşmadığı için kolçak modeli bu yaklaşıma göre emniyetli olacağı öngörülmektedir. Bu yaklaşım kolçak modeli için yapılan tüm yük durumları için yapılan FEM analizlerinde benzer şekilde uygulanmıştır. Kolçak modeli için yapılan tüm test şartları Şekil 10'daki 900 N dik yük durumu için yapıldığı gibi gerçekleştirilerek Şekil 11'de toplu olarak verilmiştir.

Toplu olarak sonuçların verildiği Şekil 11'deki grafik üzerine von-Mises ve z normal emniyetli gerilme sınırlarının tanımlaması yapılarak alternatif kolçak modellerinin daha kolay değerlendirilebilmesi sağlanmıştır. Yapılan analiz

sonuçlarına göre dolu modelin tüm yük durumları için belirlenen sınır gerilme değerleri içinde olduğu Şekil 11'de görülmektedir. Kolçak modelinin optimizasyon çalışmalarından homojen yoğunluklu tüm alternatif modelleri belirlenen kriterlere göre 900 N üst test yükü için uygun sonuç verememiştir. N1, N2 ve N3 numuneleri 400 N yatay test yükü içinde başarısız sonuç vermiştir. N5 numunesi de 750 N dik yük içinde başarısız sonuç vermiştir. Homojen yoğunluklu optimizasyon çalışması ile belirlenen kriterlere göre istenilen sonuçlara ulaşılamamıştır. Homojen yoğunluklu modellerde dış et kalınlığının 1,2 mm'den 2,4 mm'ye kadar artması ile gerilme değerlerinde bir iyileşme olmuş, ardından gerilme değerlerinin çoğunda bir artış başlamıştır. Homojen yoğunluklu modellerde en iyi sonuç N4 numunesi için elde edilse de istenilen şartları N4 numunesi de sağlayamamıştır. Bölgesel yoğunluklu



Şekil 10. 900 N dik yük altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri  
(The von-Mises and z-direction normal stresses occurring in the armrest model under 900 N vertical load)



Şekil 11. Kolçak modelinde tüm yükler altında homojen yoğunluklu ve bölgesel yoğunluklu von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

(von-Mises and z-direction normal stress analysis results of homogeneous and regional density for armrest model under all loads)

optimizasyon çalışması sonucu elde edilen kolçak modelinde von-Mises gerilmesi ve z yönü normal gerilmesi için belirlenen emniyetli gerilme değerleri aşılmamış ve belirlenen kriterlere göre bölgesel yoğunluklu kolçak modeli istenilen şartları sağlamıştır. FDM yöntemi ve PLA malzeme kullanımı durumu için bölgesel yoğunluklu kolçak model çalışması literatürdeki yapılmış çalışmalara [17, 18] paralel bir sonuç ortaya koyup, homojen yoğunluklu çalışmaya göre daha uygulanabilir bir alternatif olduğunu göstermiştir. Fakat yakın ağırlığa sahip homojen yoğunluk dağılımına sahip

modellerin iç geometrik yapılarının değişimi ile de model mekanik özelliklerinde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Homojen yoğunluklu optimizasyon çalışması ile ulaşılabilecek iyileştirmeler bölgesel yoğunluklu alternatiflere göre daha sınırlı kalsa da kolay uygulanabilirliği sebebi ile sıklıkla tercih edilmektedirler. Mekanik performans ve fonksiyonel parçalar için 1,2 mm ve üzeri olarak önerilen kabuk genişliği oranında [22]; yapılan çalışmada en iyi sonuçlar 2,4 mm'de elde edilmiştir. Kolçak modeli için uygulanan test yükleri farklı doğrultu ve

büyükte olması sebebi ile elde edilen sonuçların başka endüstriyel çalışmalar içinde kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasında bölgesel yoğunlaştırma için belirlenen sınır gerilme değerleri öngörü şeklinde alınmasına rağmen genel olarak homojen yoğunluklu alternatiflere göre daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir.

450 N ön yük durumu homojen yoğunluklu alternatiflerdeki N4 alternatif modelinde bölgesel yoğunluklu alternatiften daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. Fakat homojen yoğunluklu bu alternatif, diğer dört yük durumu içinde bölgesel yoğunluklu alternatiften daha yüksek gerilme değerleri vermiş ve belirlenen emniyetli gerilme şartlarını da sağlayamamıştır. FDM yöntemi için model anizotropisinin dikkate alındığı optimizasyon çalışmaları, kullanılan ağırlığa karşı elde edilen performans etkisini arttırmaktadır [21]. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasında z yönü normal gerilme durumlarının dikkate alınması ile model anizotropisi de dikkate alınmış ve kolçak modelinin örne yönüne dik doğrultudaki mekanik performansı da iyileştirilmiştir. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışması ile elde edilen model tüm test yük durumları için emniyetli gerilme sınırlarını aşmamış ve genel olarak en düşük gerilme değerleri de bu model üzerinde elde edilmiştir. Bu sebeple nihai test çalışmasına bu model üzerinden devam edilmiştir.

### 3.3. Nihai Ürün Test Sonuçları (Final Product Test Results)

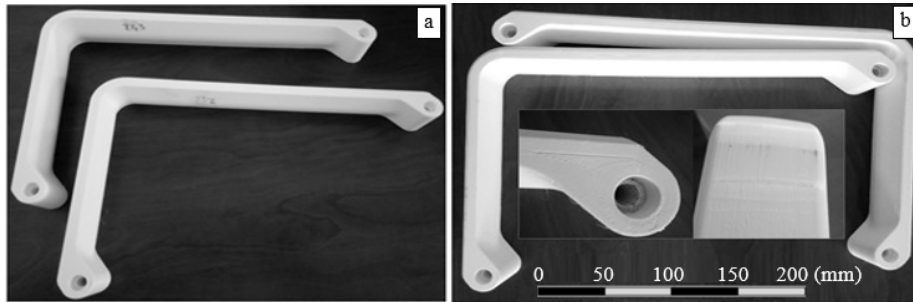
Kolçak modeli Şekil 1b'deki FDM cihazı ile imal edilmiştir ve kolçak modellerinin ağırlık ölçümleri neticesinde: 3 boyutlu model ağırlığı 249 g olan kolçak modeli 246 g ve 243 g olarak elde edilmiştir. Üretimi yapılan kolçak modeli, TS EN 1335 standardına göre ölçüsel ve mekanik testleri için 'Bürüsit Dorado' ürününün gövdesine sabitlenmiştir ve testleri yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarında üretim

toleransları, montaj toleransları, ölçümü yapılan ürünlerin esnek bir yapıda olması ve bazı ölçümlerin tanımlı bir yük altında yapılması sebebi ile öngörülene göre bir miktar sapma olabilmektedir. Örneğin yük altında yapılan ölçümlerde ürün üzerindeki sünger sertliği, yoğunluğu veya ürünü kaplamak için kullanılan kumaş vb. malzemenin özellikleri bile ölçüm sonuçlarına etki edebilmektedir. TS EN 1335 standardı esnek yapılar ile ilgili ölçümlerde tekrarlanan ölçümlerde veya farklı laboratuvarlarda yapılan ölçümlerde de  $\pm 5$  mm sapmaların olabileceğini kabul etmektedir. Yapılan ölçümlerde kolçak kullanım uzunluğu, kolçaklar arası mesafe ve kolçak genişliği ölçülerinde önemli bir değişiklik olmadan gerçekleşmiştir. Kolçağın ön kenardan uzaklığı ve oturak üzerinden yüksekliği ölçülerinde sünger malzemesinin esnek bir karaktere sahip olması sebebi ile küçük bir sapma ile gerçekleşse de kolçak modeli 3D Model üzerinde öngörüldüğü gibi istenilen ölçüsel yeterlilikleri sağlamıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 7'de çizelge halinde sunulmuştur.

Nihai kolçak modeli ile ilgili yapılan boyutsal ölçümler sonrası kolçak modelinin mekanik doğrulama testlerine geçilmiştir. Kolçak modeli mekanik testleri tek bir kolçak takımı üzerine sıra ile TS EN 1335 standardının tanımladığı şekilde ve çevrimlerde uygulanmıştır. FEM sonuçlarına göre uygun sonuçların alındığı kolçak modeli mekanik testlerde de istenilen şartları sağlamıştır. Kolçak modelinin çok farklı doğrultu, farklı bölge, farklı yük ve farklı sayıdaki çevrimlerde test ve analizlerinin yapılması yapılan çalışmanın başka çalışmalara da uygulanabilirliğini güçlendirmektedir. Yapılan testlerde tüm yüklerin ardı ardına aynı kolçak modeli için uygulanması ve 60000 çevrimlik tekrarlı yükleri de içermesi sebebi ile, kolçak modelini FEM analizlerinden daha fazla zorlamaya maruz bırakmıştır. Bu duruma rağmen kolçak modeli Şekil 12'de görüldüğü gibi ürün test şartlarını sağlamış ve üzerinde kullanımına engel bir deformasyon da gözlemlenmemiştir.

**Tablo 7.** Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler için öngörülen ve gerçekleşen sonuçlar  
(Predicted and realized results for office chair armrest dimensional requirements)

Tanım	3D Model	Nihai Model	Sapma
Kolçak kullanım uzunluğu	332 mm	330 mm	-0,6 %
Kolçak kullanım genişliği	46 mm	46 mm	0,0 %
Kolçak ön kenarından uzaklığı	160 mm	150 mm	-6,3 %
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Sabit)	245 mm	242 mm	-1,2 %
Kolçaklar arası mesafe (Sabit)	495 mm	495 mm	0,0 %



**Şekil 12.** Test öncesi kolçak modeli (a) ve test sonrası kolçak modeli (b) (Pre-test armrest model (a) and post-test armrest model (b))

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen sonuçlara göre FDM yöntemi ile üretilen parçaların, üretim parametreleri ve yöne bağlı mekanik özellikleri çok farklı olsa da TS EN 1335 test şartlarını sağlayıp ofis mobilyaları ve diğer endüstriyel alanlarda fonksiyonel bir parça olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. FDM eklemeli imalat yöntemi ile anizotrop karaktere sahip parçalar elde edilmesi tasarım süreci için izotrop karaktere sahip parçalara göre zorluk içerse de FDM eklemeli imalat yönteminin üretim yardımcı ekipmanlarına ihtiyaç duymadan küçük ölçekli ve özel üretimler için kullanılabilmesi düşünülmektedir.

Tam dolu kolçak modeli için en zayıf yön mekanik özelliklerin aşılmaması durumunda model emniyetli olacağı kabulü ile bir değerlendirme yapılmıştır. Yapılan değerlendirmede FEM analizlerine göre 900 N dik, 750 N dik ve 400 N yatay test koşullarında, en zayıf yön emniyetli gerilme değeri olan 14,8 MPa'nın üzerinde gerilmeler oluşmuş ve kolçak modeli 521 g olarak elde edilecek tam dolu hali ile bile bu yaklaşıma göre uygun sonuç verememiştir. Model anizotropisinin de dikkate alındığı model örme yönü için 59,3 MPa ve model örme yönüne dik (kolçak z normal) doğrultu içinde 14,8 MPa emniyetli gerilme sınırının aşılmayacağı durumda modelin emniyetli olacağı öngörüsüne göre tam dolu kolçak modeli uygun sonuç vermiştir.

FEM analizlerine göre homojen yoğunluklu optimizasyon çalışmasında yakın ağırlığa sahip 5 alternatif içinde model anizotropisinin de dikkate alındığı yaklaşıma göre değerlendirmesi yapılmış; von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri için belirlenen sınır gerilme değerlerinin aşılmadığı uygun sonuç elde edilememiştir. Fakat yapılan optimizasyon çalışmalarında 900 N dik yük durumu için aynı ağırlığa sahip alternatiflerde dış kabuk kalınlığı 1,2 mm olan bir modeldeki 68,7 MPa olarak elde edilen gerilme değeri dış et kalınlığının 2,4 mm'ye yükseldiği başka bir alternatif ile 46,1 MPa değerine kadar düşürülmüştür. Yakın ağırlığa sahip model iç dolgusunun değişimi ile model mekanik performansının iyileştirilebileceği [12, 13] yapılan çalışma ile de görülmüştür. Fakat bu alternatif içinde z normal gerilme değeri sınırı 14,8 MPa sınırının üzerinde 17,3 MPa olarak gerçekleşmiştir. Optimizasyon çalışması kapsamında oluşturulan 5 alternatif de uygun sonuç verememiş ve bu yöntemle yapılacak iyileştirmeler kolçak modeli için sınırlı kalmıştır.

Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışması ile 249 g olarak elde edilen kolçak modeli, örme yönü emniyetli gerilme sınırının von-Mises gerilmesi olarak aşılmaması ve z normal gerilme değerlerinin de örme yönüne dik emniyetli gerilme değerlerini aşmaması durumuna göre; uygun sonuç vermiştir. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışması sonrası elde edilen kolçak modelinde, beş test şartının dört tanesinde hem von-Mises hem de z normal gerilmeleri yönünden homojen yoğunluklu 5 alternatif modelden daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. Bölgesel yoğunluklu

optimizasyon çalışması ile elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalara benzer şekilde homojen yoğunluklu çalışmalardan daha uygun sonuçlar vermiştir [17-19]. Uygun sonuçların elde edildiği bölgesel yoğunluklu model çalışması üretimi gerçekleştirilip doğrulama testlerine de tabi tutulmuş ve kolçak modeli FEM analiz sonuçlarında öngörüldüğü gibi tüm test gerekliliklerini yerine getirmiştir.

Bölgesel yoğunlaştırılmış model çalışmasında farklı yük durumları için %50 doluluk oranı aşılmayacak şekilde bir oran belirlemeye çalışılmış ve von-Mises gerilmesi için 8 MPa ve z normal gerilmesi için 0,7 MPa değeri seçilmiştir. 900 N dik yön dışındaki yükler için bu sınır değerinde yeterli yoğunlaştırılacak bölge oluşmadığından 450 N Ön, 400 N Açılı ve 400 N Yatay yük durumu için von-Mises gerilme sınırı 5 MPa ve z normal gerilme sınırı 0,4 MPa olarak değiştirilmiş ve bölgesel yoğunlaştırılmış kolçak modeli için bu sınır gerilme değerlerinin üzerindeki alanlar dolu olarak tanımlanmıştır. Bölgesel yoğunlaştırma için belirlenen bu gerilme sınırları, yük durumlarına göre öngörü şeklinde alınmasına rağmen FEM sonuçlarına göre homojen yoğunluklu optimizasyon çalışmasından daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. Bölgesel yoğunlaştırma yönteminin çoklu yük durumu için yapılması ve FEM analiz sonuçlarının nihai testler ile desteklenmesi çalışmada elde edilen verilerin, bu alanda yapılacak yeni çalışmalar için kullanılabilmesini güçlendirmektedir. Ayrıca yöntemin tek bir yük durumu için daha kolay uygulanabileceği ve daha etkili sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasında model anizotropisinde düşünülerek örme yönüne dik doğrultuda oluşan gerilme durumları da göz önünde bulundurulmuş ve uygulanan bu yöntem ile örme yönüne dik doğrultuda oluşacak gerilme değerleri düşürülmeye çalışılmıştır. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışması sonucu elde edilen kolçak modeli homojen yoğunluklu çalışmalara göre örme yönüne dik doğrultuda oluşan gerilmeler yönünden de literatüre benzer şekilde [21] daha iyi sonuçlar vermiştir. Yapılan çalışmada; FDM yöntemi ile elde edilen parçalar için yapılan optimizasyon çalışmalarında yöne bağlı mekanik özelliklerin de dikkate alınması, parçaların daha efektif olarak elde edilebilmesine katkı sağlayacağı görülmüştür. FDM eklemeli imalat yöntemi ile elde edilen parçaların yöne bağlı mekanik özelliklerinin değişiminin Yöne Bağlı Mekanik Özelliklerin Tahminleri Dairesi (YMETAD) olarak isimlendirilen görsel ile daha etkili bir anlatıma kavuşturulması sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmanın geliştirmeye açık yönleri olmakla birlikte FDM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesine ve FDM yöntemin daha etkin bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmada PLA malzemenin uzun süre kullanımı durumundaki mekanik performansındaki değişim dikkate alınmamıştır. Uygulamaya dönük yapılacak çalışmalarda ve malzeme seçiminde bu durumun da dikkate alınması gerekmektedir.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)**

Bu çalışma, birinci yazarın Yüksek Lisans Tez çalışmasından üretilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Ermetal Şirketler Grubuna teşekkür eder.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Attaran M., The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60 (5), 677-688, 2017.
- Reports and Data. Additive Manufacturing Market Analysis By Material Type (Metals, Thermoplastics, Ceramics, Others), By Metal Type (Titanium, Stainless Steel, High-Performance Alloys, Aluminum, Precious Metals, Others), By Polymer Type, By Ceramics Type, By Process, By End-use, And Segment Forecasts To 2027. <https://www.reportsanddata.com/report-detail/additive-manufacturing-market>. Yayın tarihi Temmuz, 2020. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- Thomas D.S., Gilbert S.W., Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: A Literature Review and Discussion, National Institute of Standards and Technology, National Institute of Standards and Technology - U.S. Department of Commerce, Amerika Birleşik Devletleri, 2014.
- Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. Springer, New York, A.B.D., 2015.
- Wilkhahn. Printstool One - 3D printed stool. <https://www.wilkhahn.com/en/products/conference-and-visitor-chairs-seating/printstool/>. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- 3dprint. IKEA Debuts 3D Printed Gaming Chair Prototype, Developed in Collaboration with UNYQ and Area Academy. <https://3dprint.com/216438/3d-printed-gaming-chair/>. Yayın tarihi Haziran 12, 2018. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- Keshavamurthy R., Tambrallimath V., Saravanabavan D., Development of Polymer Composites by Additive Manufacturing Process. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2021.
- Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34 (2), 663-674, 2019.
- Yaman U., Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Parçaların 3B Yazıcılar ile Doğrudan Üretilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (1), 236-244, 2019.
- 3dhubs. How to design parts for FDM 3D printing. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/>. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- 3dhubs. 3D Printing. <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- PechoP., Ažaltovič V., Kandra B., Bugaj M., Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution. *Transportation Research Procedia*, 40, 861-868, 2019.
- Bayraktar Ö., Uzun G., Çakiroğlu R., Abdulmecit Guldaz A., Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks. *Polymers for Advanced Technologies*, 28 1044-1051, 2017.
- Aydın M., YıldırımF., Çantı E., Farklı Yazdırma Parametrelerinde PLA Filamentin İşlem Performansının İncelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (2), 102-115, 2019.
- Kuznetsov V.E., Solonin A.N., Urzhumtsev O.D., Schilling R., Tavitov A., Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers*, 10 (3), 313, 2018.
- Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J., Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143-157, 2017.
- Li D., Liao W., Dai N., Dong G., Tang Y., Xie Y.M., Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing; *Computer-Aided Design*, 104: 87-99, 2018.
- Hackaday. Finite Element Analysis Results in Smart Infill. <https://hackaday.com/2019/02/06/finite-element-analysis-results-in-smart-infill/>. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- Wang Y., Zhang L., Daynes S., Zhang H., Feih S., Wang M.Y., Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing. *Materials and Design*, 142, 114-123, 2018.
- Murat F., Korkmaz İ.H., Şensoy A.T., Kaymaz İ., Functionally Graded Porous Implants Obtained by Additive Manufacturing. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (3), 540-553, 2019.
- Wang Y., Li S., Yu Y., Xin Y., Zhang X., Zhang Q., Wang S., Lattice structure design optimization coupling anisotropy and constraints of additive manufacturing. *Materials and Design*, 196, 109089, 2020.
- Materialise. Design Guidelines - ABS - FDM. <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/abs/design-guidelines>. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- Esun. Download center. <http://www.esun3d.net/Download/>. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- Bürosit Büro Donanımları San. ve Tic. A.Ş. Dorado Ofis Koltuğu. Türk Patent Enstitüsü Tasarım Tescil No: 2020 00596, 2020 00597, <https://online.turkpatent.gov.tr/>. Erişim Tarihi: 10.09.2020.
- Türk Standartları Enstitüsü. TS EN 1335-1 Büro mobilyası-Büro çalışma sandalyesi standardı - Bölüm 1: Boyutlar-Boyutların tayini. <https://tse.org.tr/>. Yayın tarihi Temmuz 2, 2020. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.

26. Türk Standartları Enstitüsü. TS EN 1335-2 Büro mobilyası-Büro çalışma sandalyesi standardı - Bölüm 2: Emniyet gerekleri. <https://tse.org.tr/> . Yayın tarihi Mart 19, 2020. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
27. Ansys. Constitutive Modeling of 3D Printed FDM Parts: Part 2. <https://www.ansys.com/blog/constitutive-modeling-of-3d-printed-fdm-parts>. Yayın tarihi Ocak 23, 2016. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
28. Zhao Y., Chen Y., Zhou Y., Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses. *Materials and Design*, 181, 108089, 2019.
29. Park J., Topology Optimization to Design Bone Replacement Shapes in Craniofacial Reconstructive Surgery: Design, Simulation and Experimental Validation. Yüksek Lisans Tezi, Ohio Eyalet Üniversitesi, Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, Ohio, 2013.
30. The3dbros. 3D Print Infill Patterns Explained. <https://the3dbros.com/3d-print-infill-patterns-explained/>. Yayın tarihi Ocak 2020. Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
31. Farah S., Anderson D.G., Langer R., Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392, 2016.

