OFİS KOLTUĞU KOLÇAĞININ KATMANLI İMALAT YÖNTEMİNE GÖRE TASARIM VE ANALİZİ

Süleyman KUŞ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OFİS KOLTUĞU KOLÇAĞININ KATMANLI İMALAT YÖNTEMİNE GÖRE TASARIM VE ANALİZİ

Süleyman KUŞ
0000-0002-7958-2810

Prof. Dr. Ali DURMUŞ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OFİS KOLTUĞU KOLÇAĞININ KATMANLI İMALAT YÖNTEMİNE GÖRE TASARIM VE ANALİZİ

Süleyman KUŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali DURMUŞ

Bu tez çalışmasında, katmanlı imalat yönteminden biri olan Ergiyik Biriktirmeli Modelleme ile üretilen bir ofis koltuğu kolçağının, TS EN 1335 Standardı gerekliliklerini karşılayabilecek şekilde; tasarım, analiz, optimizasyon ve testleri gerçekleştirilmiştir. Kolçak modelinin tasarımı standart gerekliliklerine göre yapılarak, %50 doluluk oranına sahip olacak şekilde kolçak modeli iç hacmi için iki farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu optimizasyon çalışmaları; kolçak iç dolgusunun homojen dağılım gösterdiği uygun dış kesit kalınlığı ile iç hücresel boyut değişiminin optimizasyon çalışması ve kolçak üzerindeki gerilimin yüksek olduğu bölgelerin dolu ile diğer bölgelerin homojen düşük yoğunluklu olarak tanımlandığı optimizasyon çalışmalarıdır. Homojen yoğunluklu optimizasyon çalışmasında; sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre kolçak modelinde küçük iyileştirmeler yapılabileceği gözlenmiş; fakat belirlenen dolum oranı ile emniyetli sınır gerilme değerlerini aşmayan uygun sonuç elde edilememiştir. Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışmasında ise; sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre genel olarak homojen yoğunluklu optimizasyon çalışmasından daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen model belirlenen emniyetli gerilme kriterine göre de uygun sonuç vermiştir. Uygun sonucun elde edildiği bu kolçak modelinin üretimi gerçekleştirilmiş; ardından doğrulama testlerine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda, model gereklilikleri yerine getirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı imalat, Yapısal optimizasyon, Sonlu elemanlar yöntemi, Ergiyik Biriktirmeli Modelleme, TS EN 1335 kolçak testi

2020, ix + 89 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND ANALYSIS OF OFFICE SEAT ARMCHAIR ACCORDING TO ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Süleyman KUŞ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali DURMUŞ

In this thesis, an office chair armrest produced with Fused Deposition Modeling, which is one of the additive manufacturing methods, in a way to meet the requirements of TS EN 1335 standard; design, analysis, optimization and testing were carried out. The design of the armrest model was made according to the standard requirements, and two different optimization studies were carried out for the inner volume of the armrest model, with a 50% occupancy rate. These optimization studies; optimization study of suitable outer section thickness and inner cellular size change in which the inner armrest filling shows the homogeneous distribution, and optimization studies where the regions with high stress on the armrest are defined as full and other regions as homogeneous low density. In the homogeneous density optimization study, it was observed that small improvements could be made in the armrest model according to the finite element analysis results; however, with the determined filling ratio, an appropriate result that does not exceed safe limit stress values could not be obtained. In the regional density optimization study, generally lower stress values were obtained than the homogeneous density optimization study according to the finite element analysis results. The model obtained gave a relevant result according to the determined safe stress criteria. The production of this armrest model for which the relevant result is obtained has been realized, then it is subjected to validation tests. As a result of the validation tests, the model fulfilled the requirements.

Key words: Additive manufacturing, Structural optimization, Finite element method, Fused Deposition Modeling, TS EN 1335 armrest test

2020, ix + 89 pages.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ…… 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 1
2.1. Katmanlı İmalat 2
2.2. Katmanlı İmalat Yöntemleri 4
2.2.1. Fotopolimerizasyon Yöntemi 5
2.2.2. Malzeme Extrüzyonu Yöntemi 6
2.2.3. Malzeme Püskürtme Yöntemi 7
2.2.4. Bağlayıcı Püskürtme Yöntemi 9
2.2.5. Toz Yatağında Birleştirme 10
2.2.6. Doğrudan Enerji Biriktirme Yöntemi 11
2.2.7. Tabaka Laminasyonu Yöntemi 11
2.3. Katmanlı İmalat Uygulamaları 12
2.4. Ofis Mobilyaları ve Standartları 14
2.5. Yapısal Optimizasyon 17
2.5.1. Boyut Optimizasyonu 18
2.5.2. Şekil Optimizasyonu 18
2.5.3. Topoloji Optimizasyonu 19
3. MATERYAL VE YÖNTEM 32
3.1. Kolçak Modelinin Oluşturulması 32
3.2. Üretim İçin Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi 34
3.3. Çekme ve Eğme Numune Üretimi ve Testleri 35
3.4. Kolçak Model Optimizasyonu 38
3.4.1 Homojen Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu Optimizasyonu 41
3.4.2 Bölgesel Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu Optimizasyonu 43
3.5. Nihai Kolçak Modelinin Üretimi ve Doğrulama Testleri 49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 53
4.1. Çekme Eğme Test Sonuçları 53
4.2. Optimizasyon Çalışması Sonucu Elde Edilen Kolçak Modelleri 57
4.2.1 Homojen Yoğunluklu Kolçak Model Sonuçları 57
4.2.2 Bölgesel yoğunluklu kolçak model sonuçları 60
4.3. FEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 60
4.3.1 Homojen Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu FEM Analizleri 65
4.3.2. Bölgesel Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu FEM Analizleri 74
4.3.3. FEM Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması 78
4.4. Nihai Ürün Test Sonuçları 80
5. SONUÇ.... 83
KAYNAKLAR 85
ÖZGEÇMİŞ 89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
σ	Çekme Dayanımı
E	Elastisite Modülü
N1	Numune 1
N2	Numune 2
N3	Numune 3
N4	Numune 4
N5	Numune 5
M1	Numune 6
M2	Numune 7
M3	Numune 8
M4	Numune 9
M5	Numune 10

Kısaltmalar	Açıklama
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AM	Additive Manufacturing (Katmanlı İmalat)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
BIFMA	Business and Institutional Furniture Manufacturer's Association (İş ve Kurumsal Mobilya İmalatçıları Birliği)
CNC	Computer numerical control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
DLP	Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Lazer Ergitme)
DOD	Drop On Demand (Damlacık Püskürtme Yöntemi)
EBM	Electron Beam Melting (Elektron Işını ile Eritme)
EN	European Standards (Avrupa standartları),
FDM	Fused Deposition Modeling (Ergiyik Biriktirmeli Modelleme)
FEM	Finite element method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
MJ	Material Jetting (Malzeme Püskürtme),
MJF	Multi Jet Fusion (Çoklu Jet Füzyonu)
NPJ	Nano Particle Jetting (Metal Nano Parçacık Püskürtme)
PLA	Polilaktik Asit / Biopolimer Polilaktik Asit
SLA	Stereolithography (Stereolitografi)
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SLS	Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
TSE/TS	Türk Standartları Enstitüsü
UV	Ultraviyole
YMETAD	Yöne Bağlı Mekanik Özellikler Tahminleri Dairesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Katmanlı imalat model oluşumu şematik gösterimi 3
Şekil 2.2. ISO/ASTM 52900: 2015 standardına göre katmanlı imalat yöntemleri 4
Şekil 2.3. Fotopolimerizasyon Yöntemi çalışma prensibi 5
Şekil 2.4. Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi 6
Şekil 2.5. FDM yönteminde yöne bağlı çekme değerlerinin değişimi 7
Şekil 2.6. Malzeme Püskürtme Yöntemi çalışma prensibi 8
Şekil 2.7. Bağdaştırıcı Püskürtme Yöntemi çalışma prensibi 9
Şekil 2.8. Toz Yatağında Birleştirme Yöntemi çalışma prensibi. 10
Şekil 2.9. Doğrudan Enerji Biriktirme Yöntemi çalışma prensibi 11
Şekil 2.10. Tabaka Laminasyonu Yöntemi çalışma prensibi 12
Şekil 2.11. IKEA firmasının katmanlı imalat ile üreteceği kişiye özel oyuncu koltuğu. 13
Şekil 2.12. Wilkhahn 3D baskılı tabureleri 14
Şekil 2.13. Kolçak Test Uygulamaları (I-Dik, II- Ön III-Yan, IV Açılı) 17
Şekil 2.14. Boyut optimizasyonu 18
Şekil 2.15. Şekil optimizasyonu 19
Şekil 2.16. Topoloji optimizasyonu 19
Şekil 2.17. Farklı kısıtlar altında topoloji optimizasyon uygulamaları 20
Şekil 2.18. General Motors'un katmanlı imalat yöntemi ile ürettiği koltuk braketi 21
Şekil 2.19. Interior arama algoritması kullanarak salıncak kolu şekil optimizasyonu. 22
Şekil 2.20. Topoloji optimizasyonu medikal uygulama 23
Şekil 2.21. Otomotiv motor takozu topoloji optimizasyonu 24
Şekil 2.22. Askeri araç salıncak kolunun dört farklı kullanım duruma göre topoloji optimizasyonu 24
Şekil 2.23. Homojen, bölgesel ve topoloji optimizasyon sonuçları karşılaştırması 25
Şekil 2.24. Gerilme yönü, büyüklüğü ve malzeme aniztropisinin dikkate alındığı optimizasyon çalışması 26
Şekil 2.25. FDM yöntemi için eş merkezli (solda) ve paralel yörüngeli (sağda) modeller için hasar durum incelemesi 27
Şekil 2.26. FDM yöntemi ile PLA malzemeden üretilen farklı doğrultulardaki numunelerin mekanik performansı 28
Şekil 2.27. FDM katmanlı imalat yöntemi için PLA malzemenin yazdırma sıcaklığı ve yazdırma hızının değişiminin çekme dayanıma etkisi 29
Şekil 2.28. İnsansız hava aracı kanadı iç dolgu çalışması 29
Şekil 2.29. Nozul çapı/katman kalınlığı değişiminin çekme dayanımına etkisi 30
Şekil 2.30. FDM katmanlı imalat ile üretilen kilit mekanizması çekme testi 31
Şekil 3.1. Kolçak uygulamasının yapılacağı ofis koltuğu gövdesi 33
Şekil 3.2. Çekme (ISO 527-1:2019) ve eğme (ISO 178:2019) test numune ölçüleri 36
Şekil 3.3. Çekme ve eğme test numuneleri dolgu yapıları ve üretim pozisyonları 36
Şekil 3.4. Micron 3D FDM kolçak baskısı cihazı çekme ve eğme numune üretimi 37
Şekil 3.5. Çekme ve eğme testlerinde kullanılan Universal Zwick/RoellZ020 çekme cihazı 38
Şekil 3.6. Cura yazılımı standart dolgu tipleri 42
Şekil 3.7. 900 N dik yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 8 MPa ve üzeri, z normal 0,7 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri) .. 45

Şekil 3.8. 450 N ön, 400 N açılı ve 400 N yan yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 8 MPa ve üzeri, z normal 0,7 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri) 45
Şekil 3.9. 450 N ön yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 5 MPa ve üzeri, z normal 0,4 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri) .. 46
Şekil 3.10. 400 N yatay yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 5 MPa ve üzeri, z normal 0,4 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri) . 46
Şekil 3.11. 400 N açılı yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 5 MPa ve üzeri, z normal 0,4 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri) . 47
Şekil 3.12. Tüm test yüklerinin sınır değerlerine göre kolçak modeli üzerindeki yoğunluk ihtiyacı olan bölgeleri 48
Şekil 3.13. Optimize edilmiş kolçak modelinin FDM yöntemi ile üretimi 49
Şekil 3.14. TS EN 1335 ölçüsel kontrol cihazı (Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı) 50
Şekil 3.15. TS EN 1335 kolçak içten açma test cihazı (Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı) 51
Şekil 3.16. TS EN 1335 kolçak dik, ön ve açılı test uygulama cihazı (Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı) 52
Şekil 4.1. Çekme ve eğme test numunelerinin test sonucu görselleri 55
Şekil 4.2. Yöne Bağlı Mekanik Özelliklerin Tahminleri Dairesi (YMETAD) 57
Şekil 4.3. Kolçak modelinin 0,8 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri 58
Şekil 4.4. Kolçak modelinin 1,2 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri 59
Şekil 4.5. Bölgesel yoğunluklu kolçak modelinin iç yapısı 60
Şekil 4.6. 900 N dik test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 63
Şekil 4.7. 450 N ön test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 64
Şekil 4.8. 400 N yan test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 64
Şekil 4.9. 400 N açılı test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 64
Şekil 4.10. 900 N dik test yükü altında homojen yoğunluklu 1,2 mm kabuk ve 0,8 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 66
Şekil 4.11. 900 N dik yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 69
Şekil 4.12. 450 N ön yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 69
Şekil 4.13. 400 N yan yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 70
Şekil 4.14. 400 N açılı yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 71
Şekil 4.15. 750 N dik yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 72
Şekil 4.16. Tüm yükler için 0,8 mm dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 73
Şekil 4.17. Tüm yükler için 1,2 mm dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları 73

Şekil 4.18. 900 N dik test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 75
Şekil 4.19. 450 N ön test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 75
Şekil 4.20. 400 N yatay test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 76
Şekil 4.21. 400 N açılı test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 76
Şekil 4.22. Test sonrası nihai kolçak modeli..... 82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler (Anonim 2020ı)..... 16
Çizelge 2.2. Kolçak mekanik testleri (Anonim 2020i,j) 17
Çizelge 3.1. Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler ve 3D model ölçümleri..... 33
Çizelge 3.2. PLA malzeme çalışma parametreleri 35
Çizelge 3.3. Bölgesel yoğunluk tespiti için analiz gerilme sınırları 47
Çizelge 4.1. PLA yöne bağlı çekme dayanım ve modül sonuçları 53
Çizelge 4.2. PLA yöne bağlı eğme dayanım ve modül sonuçları 54
Çizelge 4.3. Kolçak modelinin 0,8 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri .. 58
Çizelge 4.4. Kolçak modelinin 1,2 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri .. 59
Çizelge 4.5. PLA malzeme FEM analiz verileri ve kontrol parametreleri..... 61
Çizelge 4.6. Dolu kolçak modelinin test yüklerine göre von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 65
Çizelge 4.7. Homojen yoğunluklu 0,8 mm genişliğindeki iç dolgulu kolçak modelleri von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 67
Çizelge 4.8. Homojen yoğunluklu 1,2mm genişliğindeki iç dolgulu kolçak modelleri von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 68
Çizelge 4.9. Bölgesel yoğunluklu kolçak modelleri von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri 77
Çizelge 4.10. Kolçak modelinin tüm yükler altında homojen yoğunluklu ve bölgesel yoğunluklu von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları derecelendirmesi 79
Çizelge 4.11. Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler öngörülen ve gerçekleşen sonuçlar 81

1. GİRİŞ

Katmanlı imalat, 3 Boyutlu (3B) modelleri imal etmek için katman katman malzeme biriktirme yöntemini esas alan bir üretim yöntemidir. Bu metot ile geleneksel imalat süreçlerinde kullanılan üretim araçlarına ihtiyaç duyulmadığından kişiselleştirilebilecek tasarımlar kolaylıkla ve hızlı bir şekilde hayata geçirilebilmektedir. 3B modelin katman katman elde edilmesi çok karmaşık yapıların üretimini de mümkün kılmakta ve 3B model için büyük bir tasarım özgürlüğü sunmaktadır. Katmanlı imalat yöntemleri ilk kullanıldığı günden bugüne yapılan çalışmalar ile sürekli gelişmekte ve çeşitlilikleri artmaktadır. Katmanlı imalat yöntemlerinin kullanımı birtakım avantajlar sunsa da bu yöntemlerin kullanımı birtakım zorluklar da içermektedir. Katmanlı imalat yöntemlerinin avantajlarının etkin kullanımı için yapılacak yeni çalışmalar katmanlı imalat yönteminin kullanımındaki zorlukların aşılmasına yardımcı olarak kullanıcılar için daha büyük avantaj ve fırsatlar sunacaktır. Yapılacak bu yeni çalışmalar katmanlı imalat yöntemlerinin gelişmesine ve kullanımın yaygınlaştırılmasına yardımcı olacaktır.

Yapılan çalışmada katmanlı imalat yöntemlerinin gelişimi, çeşitleri, uygulama alanları, avantajları, dezavantajları ve katmanlı imalat yöntemleri özelinde yapısal optimizasyon çalışmaları üzerine makale ve tez çalışmaları incelenmiş ve çalışmalar hakkında özet bilgiler sunulmuştur.

Tez çalışması kapsamında bir ofis koltuğu kolçağının katmanlı imalat yöntemine göre tasarımı, analizi, optimizasyon çalışması ve doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, FDM katmanlı imalat yönteminin nihai ürün eldesi için etkin şekilde kullanımına örnek bir uygulama adımlarını içermektedir. Gerçekleştirilen çalışmaların katmanlı imalat yöntemlerinin gelişimine ve nihai ürün için kullanımın yaygınlaşmasına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

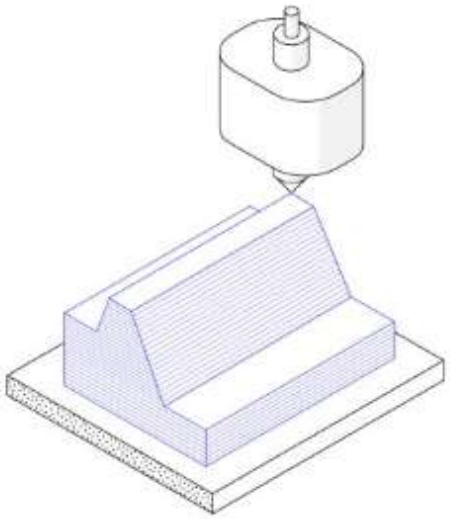
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Katmanlı İmalat

İlk olarak prototip ürün elde etmek için kullanılan katmanlı imalat (AM: Additive Manufacturing) yöntemleri, günümüzde kullanımı önemli ölçüde artmış ve sadece prototip yapımı için değil, nihai ürün elde etmek için kullanımı da giderek yaygınlık kazanmaktadır (Attaran 2017). Katmanlı imalatın en önemli özelliği süreç planlamasına gerek kalmadan doğrudan üretilebilmesidir. Katmanlı imalat geleneksel yöntemlerdeki gibi üretim yardımcı ekipmanlarına ve 3B modelin üretilebilir olabilmesi için gerekecek bilgi birikimine de ihtiyaç duymayışı sebebiyle; bir 3B modelin üretimi için daha az bilgiye ihtiyaç duymaktadır (Gibson ve ark. 2015). Katmanlı imalat yöntemleri nihai kullanıcı ürünü elde etmek için kullanıldığında, üreticiler için geleneksel yöntemlere göre önemli bir tasarım esnekliği sunabilmekte ve ayrıca ürünün müşteriye ulaşma hızını da kısaltabilmektedir. Bu özelliklerin etkin kullanılması, bir rekabet avantajı getirebileceği de öngörülmektedir (Murmura ve Bravi 2017, Keshavamurthy ve ark. 2021).

Katmanlı imalatta 3B bir model, geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinin tersine yazıcıların çalışma prensibine benzer bir şekilde katmanlar halinde oluşturulması ile elde edilir (Anonim 2015a). Katmanlı imalat cihazları arasındaki farklar; kullanılan malzemeler, katmanların nasıl oluşturulduğu ve katmanların birbirine nasıl bağlandığıdır. Bu farklılıklar, nihai parçanın doğruluğu, malzeme özellikleri, üretim hızı, boyutu, maliyeti ve mekanik özellikleri gibi faktörlerde önemli değişiklik oluşturmaktadır (Gibson ve ark. 2015). Katmanlı imalat yöntemlerinde kullanılan cihazlar genellikle ‘3B Yazıcı’ ismi ile adlandırılmaktadır. Kısaca üretim süreci şu adımları içermektedir. Süreç her zaman bir 3B bir model ile başlar ve bu model ara bir yazılım ile seçilen hassasiyete göre değişen 2 boyutlu (2B) katmanlara ayrılır. Yapılan bu işlemlerin ardından 3B Yazıcı cihazlarında üretilebilmesi için farklı üretim tekniklerine göre 3B modeli katman katman yazılımsal olarak tanımlayan G kodlarına dönüştürülür. Oluşturulan G kodlarına göre 3B yazıcılar model yörüngesini takip ederken malzeme bırakarak veya olan malzemeyi katılaştırarak model katmanı oluşturur. Modelin oluşturulduğu platform bir katman kalınlığı kadar 3B yazıcı modeline göre aşağı veya yukarı hareket eder ve diğer katman inşa edilmeye başlanır. Model tamamlanana kadar işlem adımları bu şekilde tekrar edilir.

Şekil 2.1'de katmanlı imalat yöntemi model oluşumu şematik olarak görülmektedir (Anonim 2020a).

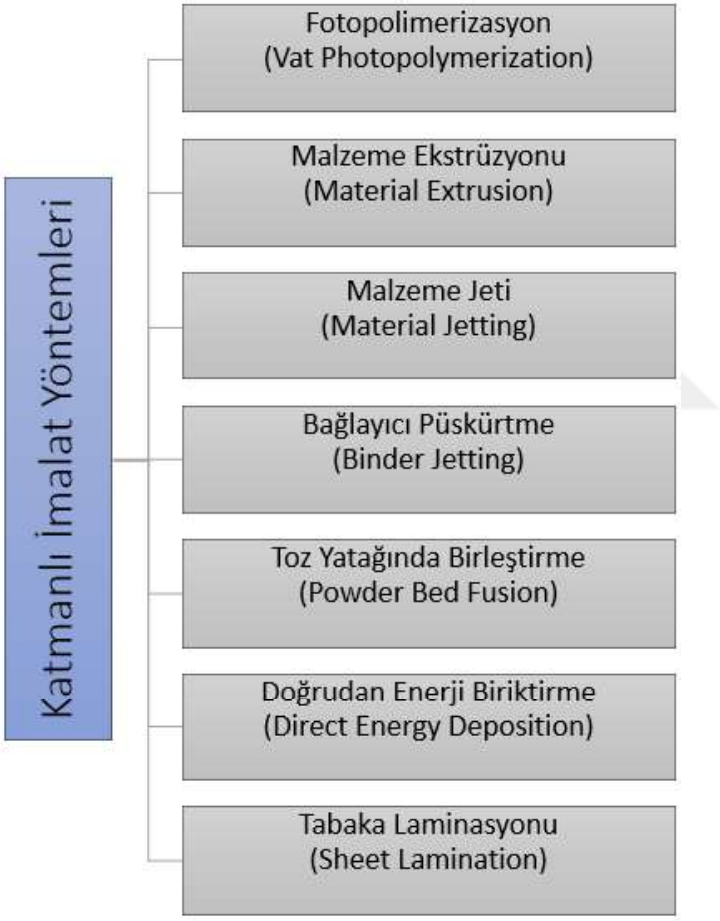


Şekil 2.1. Katmanlı imalat model oluşumu şematik gösterimi (Anonim 2020a)

Katmanlı imalat yöntemlerinden ilk olarak ultoviyole ışık altında polimerize olma prensibi ile çalışan SLA (Stereolitografi) türü bir 3B yazıcı keşfedilmiştir ve 1987'de piyasaya sürülmüştür. Bu gelişmeden kısa bir zaman sonra eriyik malzeme biriktirme prensibi ile çalışan FDM (Fused Deposition Modeling) metodu bulunmuş ve 1990 yılında bu yöntemde piyasaya sunulmuştur. Günümüzde termoplastik, termoset plastik, seramik, metal vb. birçok malzeme ve tekniğe göre üretim yapan yöntemler geliştirilmiştir (Wohlers ve Gornet 2016). Sanayi devrimi öncesi küçük ölçekli veya kişisel olarak üretimler yapılır iken, sanayi devrimi sonrası seri üretim yöntemlerinin büyük ekonomik avantajlar sunması kişisel üretimleri, büyük ölçekli kitlesel üretimlere dönüştürmüştür. Kişiselleştirilebilir ürün beklentisi sanayi devrimi öncesinde olduğu gibi günümüzde de olmasına karşın, bu isteklerin seri üretim yöntemlerine göre ekonomik olarak sunulamaması sebebi ile geleneksel üretim yöntemleri daha sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat katmanlı imalat yöntemlerindeki gelişmeler ile kişiselleştirilebilir ve küçük ölçekli üretimler başta olmak üzere, katmanlı imalat yöntemlerinin kullanımı giderek yaygınlık kazanmaktadır (Öztürk 2019).

2.2. Katmanlı İmalat Yöntemleri

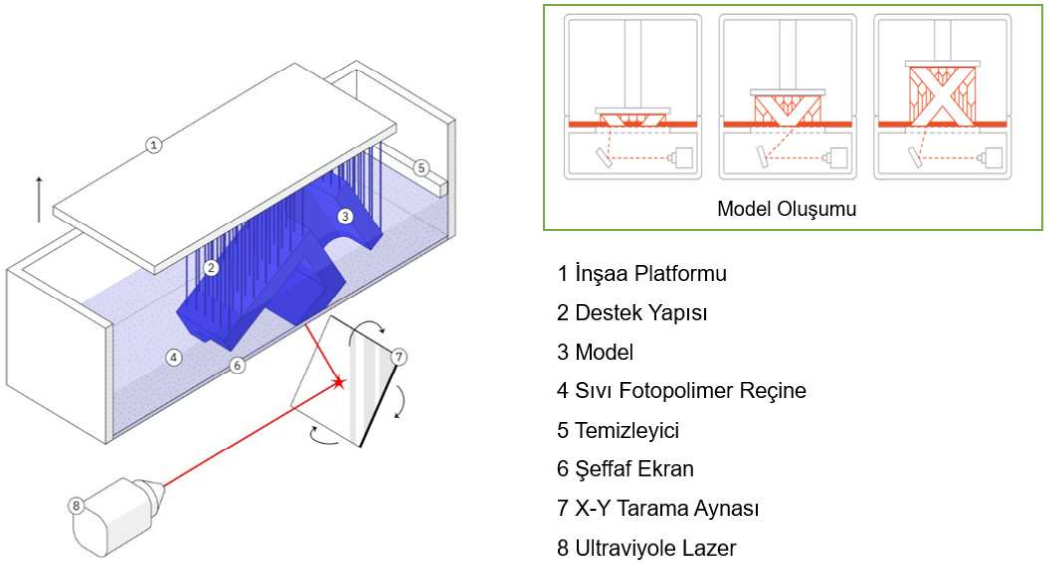
Günümüzde katmanlı imalat yöntemleri, çok farklı malzeme ve tekniğe göre üretim yapabilmektedir. İlk olarak katmanlı imalat yöntemleri bir standarda göre kategorize edilmediği için farklı isimlerle anılabilmekteydi. İlk olarak 2009 yılında ASTM standardı altında katmanlı imalat yöntemleri kategorize edilme çalışmaları başlamış ve günümüzde katmanlı imalat yöntemleri ASTM ve ISO ortak çalışması olarak yayınlanan 'ISO/ASTM 52900' standardına göre kategorize edilmektedir. ISO/ASTM 52900 standardına göre kategorize edilmiş katmanlı imalat yöntemleri Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. ISO/ASTM 52900: 2015 standardına göre katmanlı imalat yöntemleri (Anonim 2015b)

2.2.1. Fotopolimerizasyon Yöntemi

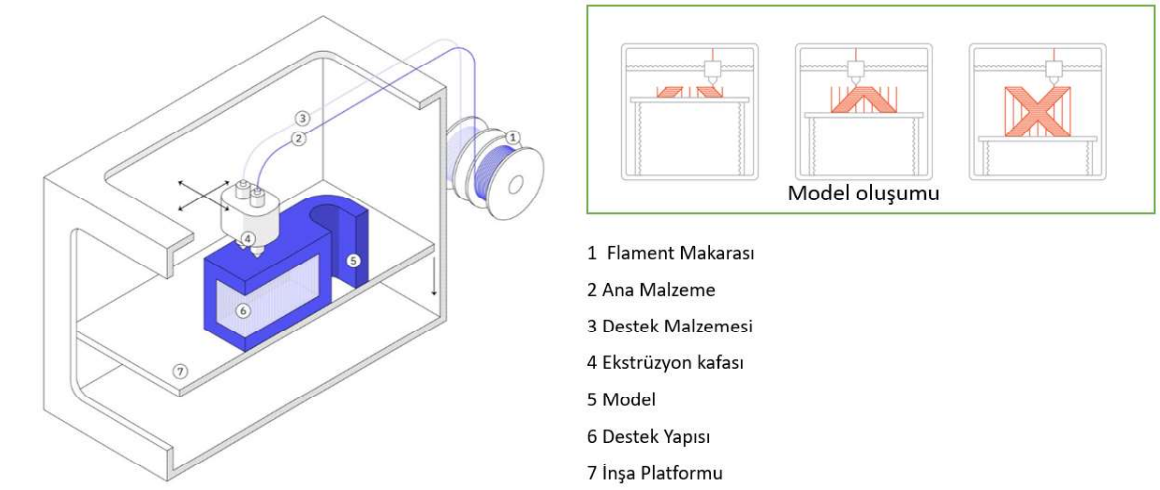
Fotopolimerizasyon Yöntemi (Vat Photopolymerization), ilk olarak kullanılan katmanlı imalat yöntemidir. (Wohlers ve Gornet 2016). Bu yöntemle 3B bir modeli oluşturmak için; ışığa duyarlı polimer reçine, ultraviyole (UV) lazer ışını bir ayna seti kullanarak 3B model katman yörüngesi tarayarak sertleştirilir. Tüm katmanlar için aynı işlemler yapılarak 3B model oluşturulur. Model tam kürlenmesi için ek kürleme işlemine tabi tutulur. Fotopolimerizasyon yöntemi çalışma prensibi Şekil 2.3'te verilmiştir. Oluşturulan parçalar termoset (tekrar sıvı formlarına dönüştürülemezler) bir yapıdadır, ısıtıldığında erimek yerine yanarlar. Şeffaf ve elastik olarak üretilebilirler ve iyi bir yüzey kalitesine sahiptirler. Fotopolimerizasyon yöntemini kullanan genel olarak kabul görmüş iki alt teknik vardır. Bunlar; Stereolitografi (SLA: Stereolithography) ve Dijital Işık İşleme (DLP: Digital Light Processing) teknikleridir. Genel çalışma prensipleri aynı olmakla beraber aralarındaki fark sadece SLA tekniğinde üretilen parçanın her katmanı ultraviyole lazer ışığı ile noktasal olarak taranırken, DLP tekniğinde dijital bir projektör ile tek seferde gönderilen ışın kaynağı ile taranarak katmanlar oluşturulur (Anonim 2020a).



Şekil 2.3. Fotopolimerizasyon Yöntemi çalışma prensibi (Anonim 2020a)

2.2.2. Malzeme Extrüzyonu Yöntemi

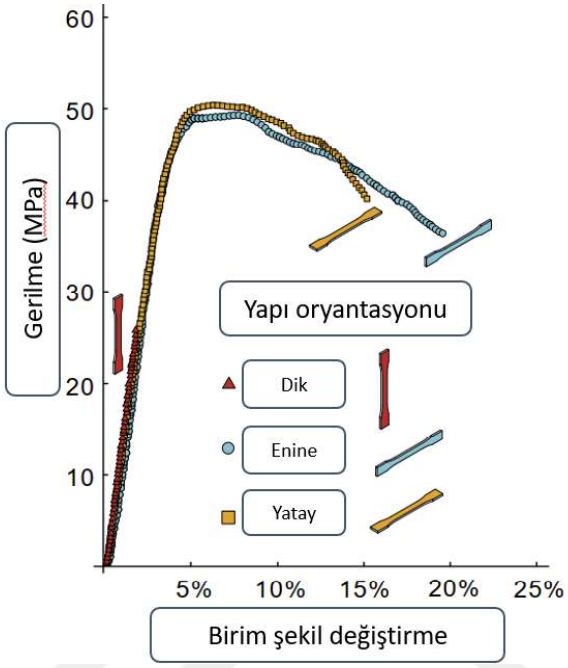
Malzeme Exstrüzyonu Yöntemi (Material Extrusion) 3B modelleri termoplastik malzemenin bir nozul yardımı ile yüksek sıcaklığa ısıtılarak ekstrüze edilmesi ile oluşturur. Bu yöntemle üretim yapan katmanlı imalat tekniğine 'Eriyik Biriktirme Yöntemi (FDM: Fused Deposition Modelling)' ismi verilmektedir (Gibson ve ark. 2015). Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi Şekil 2.4'te verilmiştir. FDM yöntemi en yaygın kullanılan katmanlı imalat yöntemidir. 2009 yılında FDM yönteminin patent süresi dolması ile bu teknoloji 100 kat daha düşük maliyetle temin edilebilir hale gelmesi ile termoplastik malzemeden parça üretmenin en uygun maliyetli yöntemi olmuştur (Anonim 2020a).



Şekil 2.4. Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi (Anonim 2020a)

FDM yöntemi ile 0,05 mm ile 0,4 mm arası bir katman kalınlığına sahip ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip parçalar üretilebilmektedir; fakat FDM yöntemi ile üretilen parçaları, zımparalama, parlatma, astarlama, boyama, soğuk kaynak, buharla yumuşatma, epoksi kaplama ve metal kaplama gibi çeşitli son işlem yöntemleri kullanılarak yüzey kalitesi ve kullanıma uygunluk açısından iyileştirmeler yapılabilir. Model oryantasyonunda çıkıntılara sahip yüzeyler için destek yapılarına ihtiyaç duymaktadır. FDM yönteminin en güçlü yanlarından biri de uygulanabilir malzeme çeşitliliğidir. En yaygın kullanılan FDM malzemeleri PLA (Polilaktik Asit) ve ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)'dir. Ayrıca; termoplastik malzemelerin cam elyaf ve karbon elyaf gibi kompozit

yapılı türevleride kullanılabilmektedir. FDM yöntemi termoplastik malzemeler ile en uygun maliyette parça üretimi yapılabilen yöntemdir. Üretim yönteminden kaynaklı üretilen parçalar anizotrop özellik göstermektedir. Yöne bağlı mekanik özellikleri değişimi Şekil 2.5'te gösterilmektedir (Anonim 2020a).



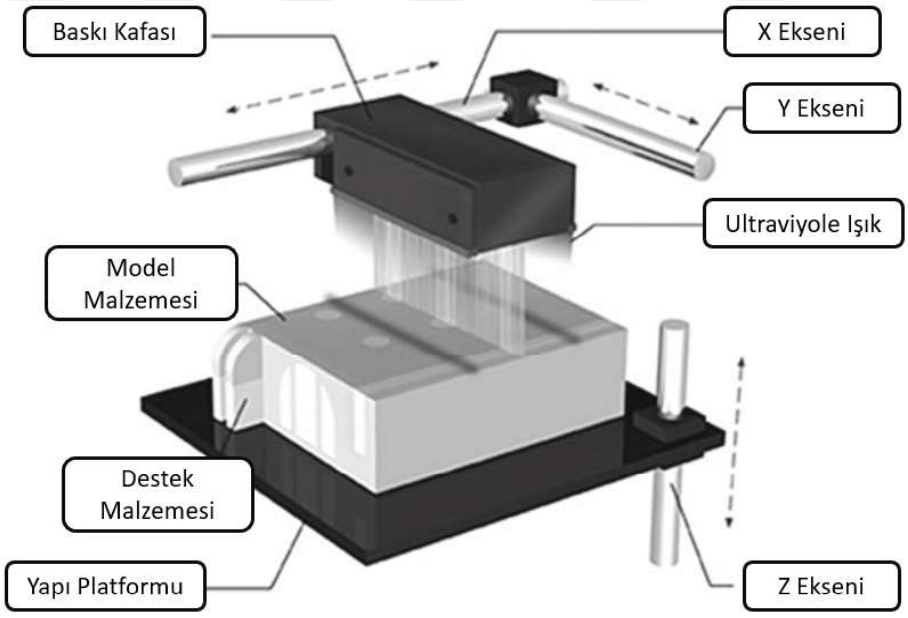
Şekil 2.5. FDM yönteminde yöne bağlı çekme değerlerinin değişimi (Chacón ve ark. 2017)

FDM yönteminde model iç hacmi istenilen yoğunlukta da basılabilmektedir. Dolgu yapısı doğrusal ve üç boyutlu formlarda olabilmekte ve parçanın genel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin bazı dolgu tipleri ile yüksek mekanik özellik elde edilebilir iken, bazı dolgu tipleri ile de modele esnek bir özellik kazandırabilmektedir (Anonim 2020b).

2.2.3. Malzeme Püskürtme Yöntemi

Malzeme Püskürtme Yöntemi (Material Jetting) 2B yazıcılara benzer şekilde çalışan bir katmanlı imalat yöntemidir. Malzeme püskürten, bir yazıcı kafası (standart mürekkep püskürtmeli baskı için kullanılan yazıcı kafalarına benzer şekilde), UV ışığı altında katılaşan ışığa duyarlı bir malzemenin damlacıklarını seçici olarak tarayarak sertleştirir

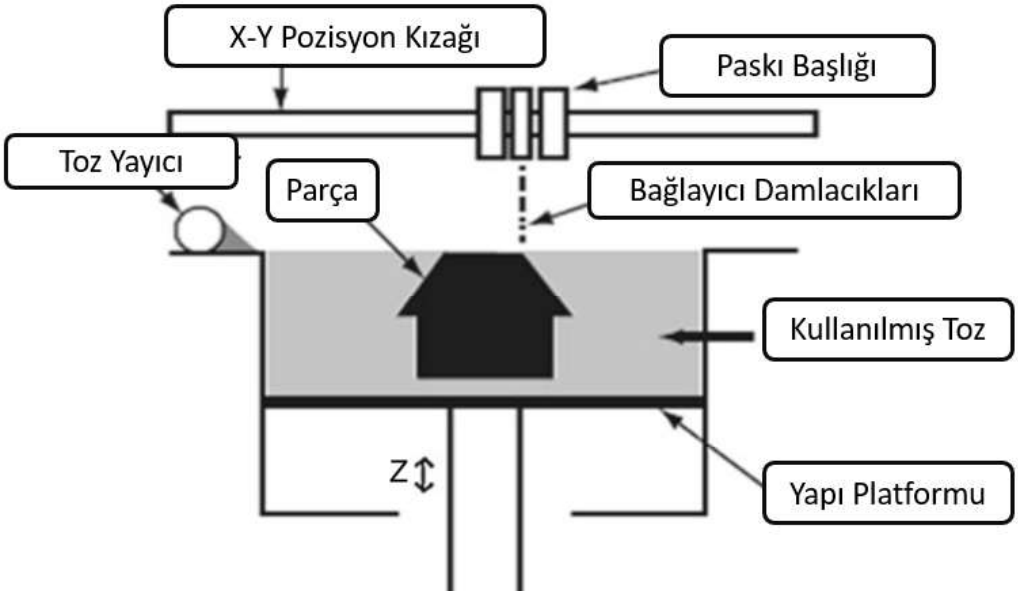
ve model oluşturulur. Bu metodun çalışma prensibi Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Malzeme püskürtme yönteminde kullanılan malzemeler sıvı formda, fotopolimer ve termoset malzemelerdir. Bu yöntem ile çok iyi yüzey kalitesi ve yüksek boyutsal doğrulukta parçalar oluşturulabilir. Ayrıca, parçalar istenildiğinde çok malzemeli, farklı sertlikte, şeffaf ve çok renkli olarak da üretilebilmektedir. Malzeme jeti yönteminin, plastik malzeme kullanarak üretim yapan Malzeme Püskürtme (MJ: Material Jetting), Metal Nano Parçacık Püskürtme (NPJ: Nano Particle Jetting) ve balmumu şeklinde bir yapı malzemesi ile model inşası (DOD: Drop On Demand) yapan çeşitli yöntemleri vardır. Malzeme püskürtme yöntemi her zaman destek yapılarına ihtiyaç duyar; bu destekler çözülebilir malzemelerden basılır. Fakat destek gerektiren yerlerde yüzey parlaklığı azalır. İstenmesi durumunda tüm yüzeyler mat olarak da elde edilebilmektedir. Malzeme püskürtme yönteminde nispeten iyi bir yüzey kalitesi, çok yüksek boyutsal doğruluk ve homojen mekanik ve termal özelliklere sahip parçalar üretebilir; fakat mekanik özellikleri zayıftır ve ışığa maruz kaldıklarında, ışığa da duyarlı olduklarından zamanla model özelliklerinde değişim olur (Anonim 2020a).



Şekil 2.6. Malzeme Püskürtme Yöntemi çalışma prensibi (Gibson ve ark. 2015)

2.2.4. Bağlayıcı Püskürtme Yöntemi

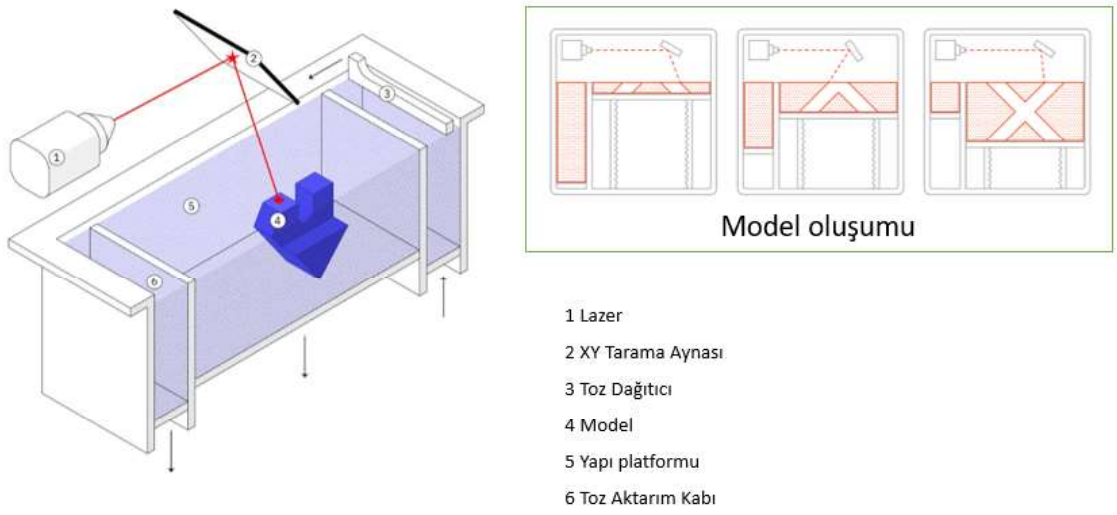
Bağlayıcı Püskürtme Yöntemi (Binder Jetting) ilk olarak 1990 yılında kullanılmıştır. Yöntem bir toz yatağı üzerine bir bağlayıcının seçici olarak püskürtülmesi ile istenilen bölgelerin birbirine yapıştırılması prensibi ile çalışan bir katmanlı imalat yöntemidir (Şekil 2.7). Bağlayıcı püskürtme yönteminde kullanılan ana malzemeler granür formda metal, kum, polimer veya seramiktir. Oluşturulan model ek işlemlerle sertleştirilebilir. Bu işlem metal malzemeler için sinterleme işlemi ile yapılır. Kum düküm prototipleri baskı sonrası genellikle kullanıma hazırdır. İnşa edilen modeli çevreleyen toz, parçaya gerekli tüm desteği sağladığı için ilave herhangi bir destek yapısı gerektirmez ve ayrıca toplam hacim içinde zemine bağlanmadan parça oluşturulabilmesine de imkân sağlamaktadır. Bu sayede baskı hacmi çok etkili kullanılabilmektedir. Yöntem büyük ebatlı modeller için uygulanabilir ve düşük maliyetlidir. Tam renkli modeller elde edilebilir. Parça mukavemetini ile renk canlılığını arttırmak için yapıştırıcı ve ek bir kaplama yapılır; fakat bu işlemler sonrası bile fonksiyonel parça kullanımı için önerilmez. Fakat metal tozu ile üretilerek sinterleme işlemine tabi tutulan ve kum kalıptan elde edilen modeller nihai parça için kullanılabilir (Gibson ve ark. 2015).



Şekil 2.7. Bağdaştırıcı Püskürtme Yöntemi çalışma prensibi (Gibson ve ark. 2015)

2.2.5. Toz Yatağında Birleştirme

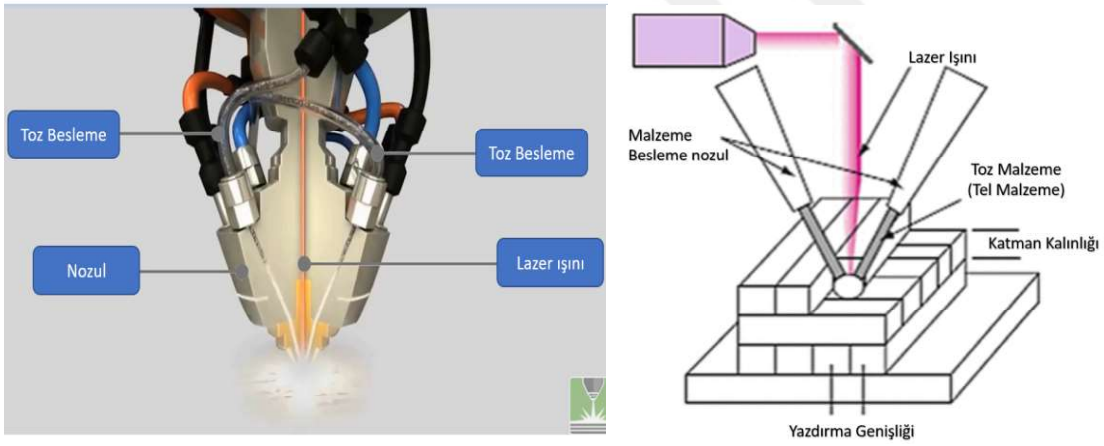
Toz Yatağında Birleştirme Yöntemi (Powder Bed Fusion) bir toz yatağı içindeki partiküllerin seçici olarak lazer veya elektron ışını kullanılarak sinterlenmesi ile birbirine bağlanması prensibi ile çalışan bir katmanlı imalat yöntemidir (Şekil 2.8). Model oluşumu için polimer malzemeleri kullanan yöntemler Çoklu Jet Füzyonu (MJF: Multi Jet Fusion) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS: Selective Laser Sintering) yöntemleridir. Model oluşumu için metal malzemenin kullanıldığı yöntemler ise Seçici Lazer Ergitme (SLM: Selective Laser Melting) Doğrudan Lazer Ergitme (DMLS: Direct Metal Laser Sintering) ve Elektron Işını ile Eritme (EBM: Electron Beam Melting) yöntemleridir. Bu yöntemler ile üretilen parçalar neredeyse izotropik mekanik özelliklere sahiptir, bu nedenle fonksiyonel parçalar ve prototipler için idealdir. Toz yatağı içirisinde oluşturulan parçalar herhangi bir destek yapısına ihtiyaç duymaz ve bu özelliği sayesinde zemin platformu tabanına temas etmeden hacim içinde başka parçaların üretimine de olanak sağlar; fakat kapalı hacimler tam dolu olarak üretilmediği durumlarda sinterlenmemiş malzemenin çıkışı için kaçış deliklerine ihtiyaç duyar (Anonim 2020a).



Şekil 2.8. Toz Yatağında Birleştirme Yöntemi çalışma prensibi (Anonim 2020a).

2.2.6. Doğrudan Enerji Biriktirme Yöntemi

Şekil 2.9'da çalışma prensibi şematik olarak verilmiş olan Doğrudan Enerji Biriktirme Yöntemi (Direct Energy Deposition), elektron ışını veya plazma arkı gibi odaklanmış termal enerji kullanılarak malzemeyi eriterek 3D nesneler oluşturur. Doğrudan enerji biriktirme teknolojisi metal, seramik ve polimer parçalar yapmak için kullanılabilse de ağırlıklı olarak metal parçalar yapmak için kullanılır. İşlem vakum altında veya koruyucu gazlar kullanılarak gerçekleştirilir. Yöntemin geleneksel yöntemler ile birlikte kullanıldığı hibrit yapılar ve model üzerinde tamir işlemleri şeklinde de kullanılabilmektedir. Doğrudan enerji biriktirme yöntemi ile nispeten düşük çözünürlükte yüzey kalitesine sahip ürünler üretebilmektedir. Bunu gidermek için ek işlemlere ihtiyaç duyulur. Fakat model oluşturma hızlı ve iyi mekanik özelliklere sahip parçalar elde edilebilmektedir. Model destek gerektirmeden oluşturulabilmesi sebebi ile malzeme kullanım verimliliği yüksektir; fakat oluşturulabilecek model içinde birtakım sınırlamalar oluşturmaktadır (Anonim 2020c).

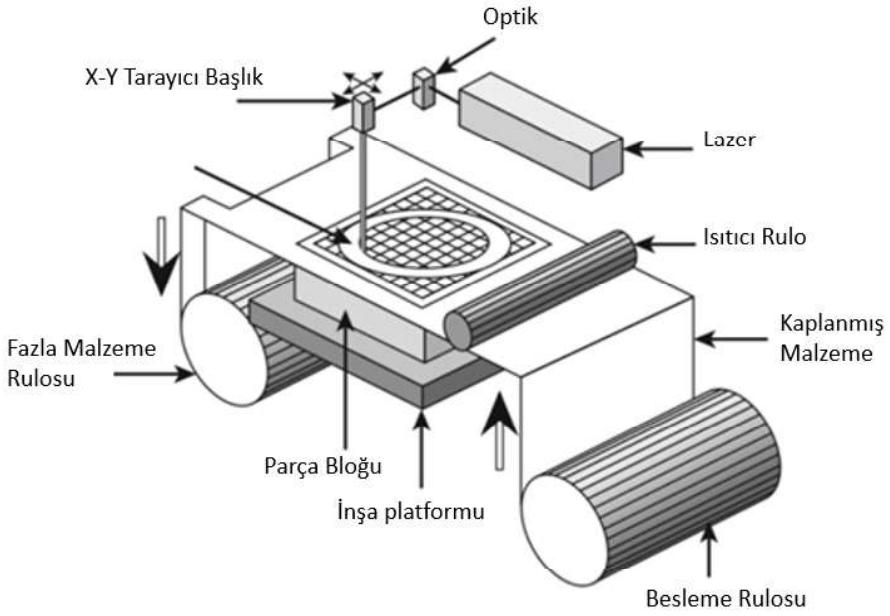


Şekil 2.9. Doğrudan Enerji Biriktirme Yöntemi çalışma prensibi (Anonim 2020c)

2.2.7. Tabaka Laminasyonu Yöntemi

Tabaka Laminasyonu Yöntemi (Sheet Lamination) ince malzeme tabakalarını katman katman keserek birbirine lamine ederek bir 3D nesne oluşturma işlemidir. Şekil 2.10'da bu yöntemin çalışma prensibi verilmiştir. Düşük çözünürlüğe sahip parçalar düşük maliyet ile hızlı bir şekilde elde edilebilir. Tabaka laminasyonu için kâğıt, plastik, metal

veya dokuma elyaf kompozitler gibi malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan malzemelerin kesme işlemleri için CNC, lazer veya su jeti gibi yöntemler kullanılır. Katman laminasyonu için ultrasonik kaynak, lehim veya malzemeye göre uygun kimyasal bağlayıcı madde kullanılabilmektedir. Tabaka laminasyonu daha hızlı yazdırma süresine sahiptir ve standart malzemeler kullandığı için nispeten düşük maliyetlidir. Ancak, model oluşturulduktan sonra ek işlemlere ihtiyaç duymaktadır. Hibrit üretim sistemleri olarak uygulanabilir. Örneğin model içine insört malzemeler katmanların oluşturulması aşamasında parçaya gömülebilir. Destek yapılarına gerek yoktur. Çok malzemeli katmanlar oluşturulabilir. Tam renkli baskılar elde edilebilir. Genelde geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılır. Tabaka kalınlığı katman kalınlığını oluşturur. Model oluşturulduktan sonra fazla malzemenin ayrıştırılması zaman alır ve diğer yöntemlere göre daha fazla atık üretir (Anonim 2020c).



Şekil 2.10. Tabaka Laminasyonu Yöntemi çalışma prensibi (Anonim 2020c)

2.3. Katmanlı İmalat Uygulamaları

2019 yılında 'Reports and Data'nın yaptığı araştırmaya göre özellikle otomobil ve savunma sanayi alanında uygulamaların arttığını ve katmanlı imalatın dünya genelindeki pazar payının 2026 yılında 2018 yılı seviyesinin yaklaşık üç katına çıkacağını öngörmektedir. Katmanlı imalatın kullanımının artmasına karşın üretim hızının düşük ve

ürün maliyetinin geleneksel yöntemlere göre yüksek olması sebebi ile dezavantajını korumaktadır (Anonim 2020ç).

Katmanlı imalat kullanımı ilk ürünün eldesi için kalıp, aparat, fikstür vb üretim ekipmanı ihtiyacının olmayışı sebebi ile ilk ürünün müşteriye ulaşma süresini önemli ölçüde kısaltmakta ve geleneksel imalat yöntemlerine göre çok büyük bir tasarım özgürlüğü sunmaktadır. Bu teknolojinin kullanılması ile geçmişte zanaatkârların bireysel müşterilerin taleplerine göre istenilen boyutta ve şekilde ürün yapabilmeleri gibi özel imalat yapılabilecek imkânlar sağlamaktadır (Murmura ve Bravi 2017). Şekil 2.11'deki İKEA firmasının tasarladığı oyuncu koltuğunun her kişiye göre ayrı ayrı tasarlanıp üretilmesi hedeflemektedir. Ürünün sınırlı sayıda üretilip 2020 yılı içinde kullanıcılar ile buluşması öngörülmektedir (Anonim 2018a).



Şekil 2.11. IKEA firmasının katmanlı imalat ile üreteceği kişiye özel oyuncu koltuğu (Anonim 2018a).

Katmanlı imalat teknolojisi kullanılarak yapılan üretimler için ürüne özel ilk yatırım maliyeti olmayışı ilk ürün eldesi için avantaj sağlar iken, yüksek adetli üretimler için bu avantajını kaybetmektedir (Thomas ve Gilbert 2014). Kişisel veya küçük kitleler için üretim yapıldığında da geleneksel yöntemler üretim maliyeti avantajını kaybetmektedir. Örneğin; renk, desen, şekil, boyut değişimi, katmanlı imalat yöntemleri için yeni bir kalıp, aparat, fikstür vb. üretim ekipmanı gerektirmektedir. Wilkhahn şirketinin FDM katmanlı

imalat yöntemi ile ürettiği Şekil 2.12'deki tabureleri farklı desen yapılarına sahip olsa da Wilkahn şirketi için ek bir yatırım maliyeti getirmeden kullanıcıya sunulabilmektedir.



Şekil 2.12. Wilkhahn 3D baskılı tabureleri (Anonim 2020d)

Katmanlı imalat yöntemleri birçok endüstride olduğu gibi ofis mobilyaları endüstrisinde de kullanımı giderek artmaktadır. Katmanlı imalat yöntemlerini kullanan şirketler katmanlı imalatın kullanımının bir zorluk getirmediğini ve önemli fırsatlar sunduğunu belirtmektedir. Fakat katmanlı imalatı kullanmayan şirketler katmanlı imalat uygulamalarının kullanımında zorluklar olduğunu düşünmektedirler (Murmura ve Bravi 2017). Katmanlı imalat yöntemleri üzerine akademik ve endüstriyel alanlarda malzeme, makine ve performans geliştirmeleri üzerine birçok araştırma yapılmakla beraber halen keşfedilememiş birçok alanda bulunmaktadır (Keshavamurthy ve ark. 2021). Yapılan araştırma çalışmalarına göre; katmanlı imalat yöntemlerinin kullanımına yönelik yapılacak akademik ve endüstriyel çalışmalar; katmanlı imalat yöntemlerinin kullanımının benimsenmesine ve kullanımın yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

2.4. Ofis Mobilyaları ve Standartları

Anlam olarak mobilya, oturulan yerlerin süslenmesine ve türlü amaçlarla donatılmasına yarayan eşyalardır. Mobilyalar mekânın kullanımını etkileyen ve mekânın güzel veya çirkin gözükmesini sağlayan ürünlerdir. Mobilya denilince ilk akla gelen ahşap

mobilyadır. Günümüzde mobilya yapımında çelik, alüminyum, cam ve plastik gibi diğer malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. İnsan yaşamı çeşitli mekânlar içinde geçmektedir. Bu mekânlar yapılış amaçlarına uygun olmalı, kullanıcısına gerekli konfor düzeyini sağlamalıdır. Örneğin bir ofis için kullanılan mobilyalar insana uygun tasarlanmamışsa, insan vücudunun zarar görmesi kaçınılmazdır (Anonim 2020e).

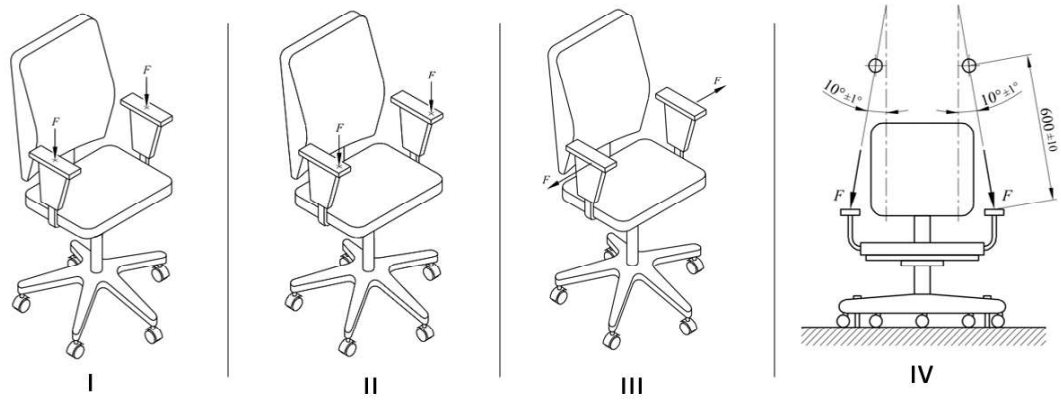
Ofis mekânları insanın zamanının büyük bölümünün içinde geçtiği mekânlardır. Bu mekânların ve kullanılan mobilyaların insan ile uyumu da kullanıcının sağlık ve konforu için önemlidir. Bu sebeple ofis mobilyaları içinde insan antropometrisindeki değişiklikler dikkate alınarak kullanıcı ile uyumu en iyi seviyeye çıkarabilmek için standartlar oluşturulmuştur. Örneğin uluslararası kullanılan ISO (International Organization for Standardization; Uluslarası Standart Organizasyonu), Avrupa ülkeleri için EN (European Standards: Avrupa standartları), ABD için BIFMA (Business and Institutional Furniture Manufacturer's Association: İş ve Kurumsal Mobilya İmalatçıları Birliği) vb. standartlar bölgesel veya uluslararası olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ofis mobilyaları için Avrupa normu olan EN standartları ve ilgili ISO normları benimsenmiş ve Türkçeye çevrilmiş olarak TSE (Türk Standartları Enstitüsü) kurumu üzerinden temin edilebilmektedir. Örneğin TS EN XXXX şeklinde TSE kurumundan temin edilebilmektedir. Ülkemizde genel olarak ofis koltukları için 'TS EN 1335' standardı kullanılmaktadır. Standartlar tanımladıkları geometrik uygunluk sınırlamaları ile ürünü kullanıcı ile ergonomik olarak uyumlu hale getirmeye çalışmakta ve ürünün güvenli bir şekilde fonksiyonunu yerine getirebilmesi içinde test şartları tanımlamaları getirmektedir. Standartlar kitlesel gruplar için uyumluğu hedeflemektedir. Her bir kullanıcı için ürün uygunluk seviyesi özel olarak tanımlanarak arttırılabilir; fakat bu yaklaşım geleneksel üretim yöntemleri için önemli bir ek maliyet getirdiğinden pek tercih edilmemektedir. Katmanlı imalat yöntemlerinde ise ürün çeşitliliğinin artması; geleneksel yöntemlerimdeki gibi bir ek maliyet getirmediği için, kişiselleştirilebilir ürünler için uygulanabilir fırsatlar sunmaktadır.

Ofis mobilyaları için oluşturulan standartlar ürünü kullanıcı ile uyum seviyesini arttırmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda ürünün kişi ile uyumu kullanıcı antropometrik yapısına göre değişim göstermektedir. Ülkemizde ofis mobilyaları sektörü için ağırlıklı

olarak Avrupa standartlardı olan EN normları kullanılmaktadır. EN normları ofis mobilyaları için kullanılan ürün tipi, kullanım alanı vb. kriterlere göre farklı gruplara ayrılmaktadır. Bu kapsamda ofis koltukları genel boyutlar ve test şartları için kullanılan standart TS EN 1335 standardıdır. Bu test standardı ofis koltukları için oturma yüksekliği, arkalık yüksekliği, kolçak yüksekliği, oturma derinliği, bel desteği konumu vb. ölçüsel sınırlamalar ile genel antropemetrik uyumu, arkalık, oturak, amortisör, yıldızayak, kolçak, mekanizme vb. kompanetlerin mekanik performansı için yük altında statik ve dinamik testler ile ürün performansını değerlendirmektedir. Ayrıca ürün öne arkaya ve yanlara kullanım durumundaki emniyetini değerlendirmek için denge testlerini içermektedir. TS EN 1335 standardının ofis koltuğu kolçağı ile ilgili boyutsal sınırları ve test şartları beklentileri aşağıdaki Çizelge 2.1'de listelenmiştir ve Şekil 2.13'te kolçak test uygulamaları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler (Anonim 2020ı)

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)	En az 200mm En çok 250 mm
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Ayarlı)	Alt en fazla 200mm Üst en az 250mm
Kolçak yükseklik kurs ayarı	En az 50 mm
Kolçaklar arası mesafe (Sabit)	En az 460mm En çok 510 mm
Kolçaklar arası mesafe (Ayarlı)	Alt en fazla 460mm Üst en az 510 mm



Şekil 2.13. Kolçak Test Uygulamaları (I-Dik, II- Ön III-Yan, IV Açılı) (Anonim 2020j)

Ürün uygunluk için TS EN 1335 standardı döner ofis koltuğu kolçağı için sağlanması gereken ürün mekanik test şartları aşağıdaki Çizelge 2.2'de verişmiştir.

Çizelge 2.2. Kolçak mekanik testleri (Anonim 2020i,j)

Uygulanan Yük	Çevrim (Adet)	Uygulama
900 N Dik	5	Şekil 2.13. (I)
450 N Ön	5	Şekil 2.13. (II)
400 N Yatay	10	Şekil 2.13. (III)
400 N Açılı	60 000	Şekil 2.13. (IV)
750 N Dik	5	Şekil 2.13. (I)

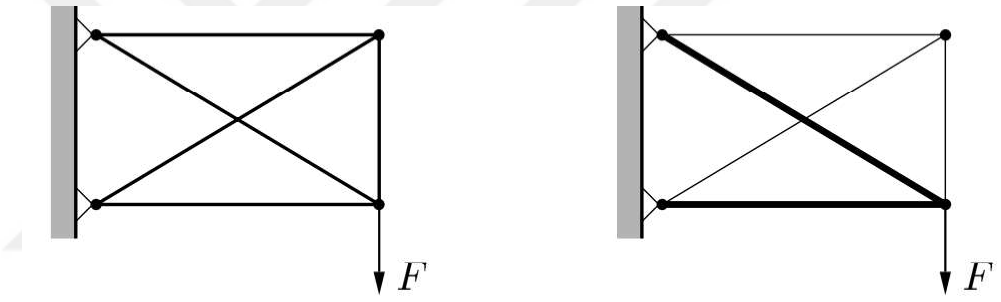
2.5. Yapısal Optimizasyon

Optimizasyon kısaca eniyileme şeklinde ifade edilebilir. Yapılacak optimizasyon çalışması ile en az kaynak kullanımı ile en çok faydayı elde etmeye çalışılmaktadır. Her yapısal optimizasyon çalışması bir tasarım alanına ihtiyaç duymakta, belirli kısıtlar içermekte ve bir amaç için yapılmaktadır. Yapısal optimizasyon çalışmaları kısıt şartlarını yerine getirmek koşulu ile, belirlenmiş tasarım alanı içinde belirli bir yük altında tasarım değişkenlerinin değişimine karşılık en iyi sonucu elde edilmek için yapılmaktadır. Yapısal bir optimizasyon için amaç belirli bir yük altında azaltılmış ağırlık olduğu varsayılırsa, tasarım değişkeni kesit kalınlığı veya model mesh boyutu olabilmekte ve bu tasarım değişimine karşılık oluşan sonuç değişkeni minimum gerilim, gerinim veya maksimum doğal frekans eniyilemesinin yapılması amaçlanmaktadır. Yapısal

optimizasyon genel olarak üç şekilde incelenmektedir. Bunlar Boyut optimizasyonu, Şekil optimizasyonu ve Topoloji optimizasyonudur (Christens ve Klarbring 2009, Kaya 2016).

2.5.1. Boyut Optimizasyonu

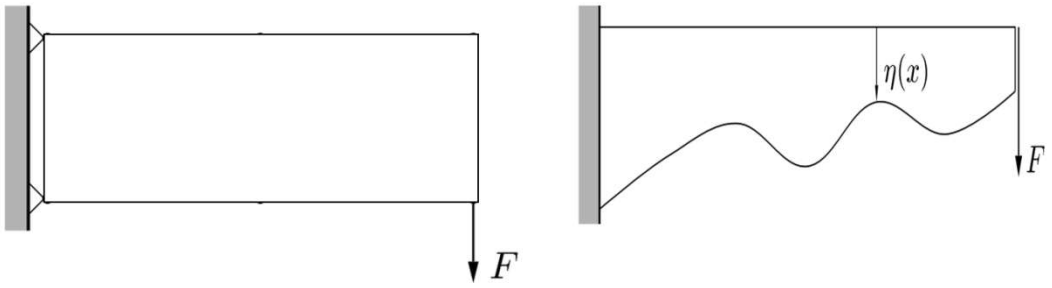
Boyut optimizasyonunda, modelin kesit kalınlığı ve/veya boyutlarını tasarım değişkenleri olarak tanımlanarak en iyi sonucun bulunmasını hedeflenmektedir. Boyut optimizasyonu kesit alanı optimizasyonu olarak da anılmaktadır. Çoğunlukla amaç malzeme kalınlığını optimize ederek malzeme miktarını azaltmak veya kullanılan malzemeyi daha efektif kullanarak daha iyi bir performans elde etmeyi amaçlamaktadır. Örnek bir boyut optimizasyonu çalışması Şekil 2.14'te görülmektedir (Çelik 2013).



Şekil 2.14. Boyut optimizasyonu (Christens ve Klarbring 2009)

2.5.2. Şekil Optimizasyonu

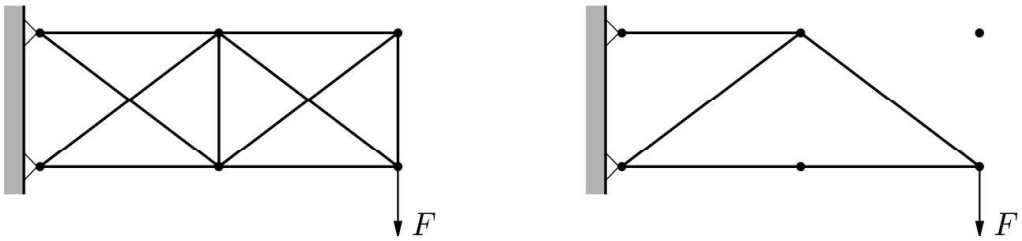
Şekil optimizasyonunda, modelin geometrik sınırlarını tasarım değişkeni olarak tanımlayarak belirlenmiş tasarım alanı içerisinde en iyi sonucun elde edilmesini amaçlamaktadır. Yüzeyler veya eğri hatların optimum şeklini tanımlamaya çalıştığı için boyut optimizasyonunun gelişmiş hali olarak da tanımlanabilir. Şekil optimizasyonunda da çoğunlukla amaç malzeme miktarını azaltmaktır. Tasarım değişkeni olarak çap, uzunluk, köşe açıları, eğriler geometrik parametreler olarak kullanılabilir. Tasarım değişkeni olarak kiriş alt eğrisi tanımlanan bir dikdörtgensel kiriş için örnek bir şekil optimizasyonuna çalışması Şekil 2.15'de görülmektedir. (Çelik 2013).



Şekil 2.15. Şekil optimizasyonu (Christens ve Klarbring 2009)

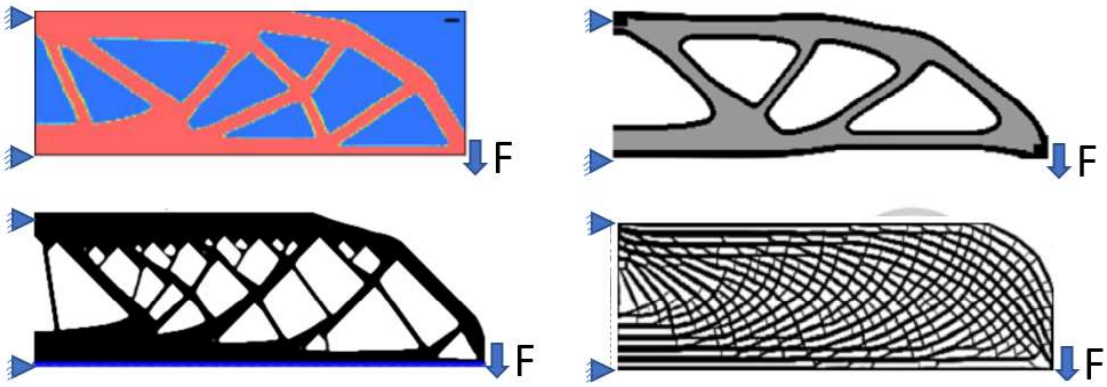
2.5.3. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonunda, modelin tasarım alanı içerisinde malzeme yoğunluk dağılımını optimize ederek en iyi sonucun elde edilmesini amaçlamaktadır. En iyi sonucun elde edebilmesi için tasarım alanının büyük tutulması önemlidir. Genellikle topoloji optimizasyonu için, tasarım alanı içindeki hücre boyutları ve bu hücre alanlarının dolu veya boş olması tasarım değişkeni olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.16'daki örnekte görüldüğü gibi topoloji optimizasyonu yöntemi ekleme yapmaksızın çıkarma işlemine de müsaade edecek şekilde tanımlanabilmektedir Christens ve Klarbring 2009).



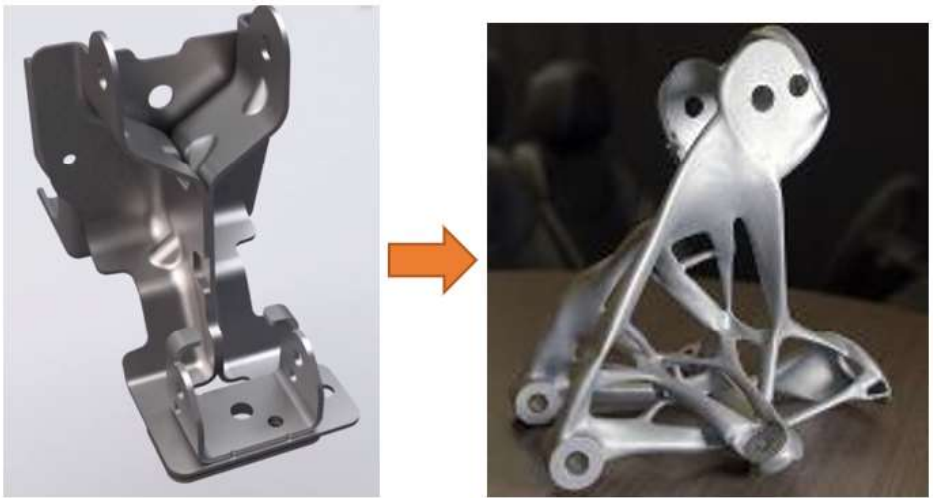
Şekil 2.16. Topoloji optimizasyonu (Christens ve Klarbring 2009)

Topoloji optimizasyonu boyut ve şekil optimizasyonuna göre daha geniş bir çözüm aralığı sunar ve oluşacak geometri herhangi bir şekle ulaşabilir. Genellikle amaç maksimum rijitlik, doğal frekans veya minimum gerilim ile ağırlığın azaltılmasıdır. Topoloji optimizasyonu çok geniş bir sonuç aralığı sunabildiğinden kullanılacak üretim yöntemine veya istenilen özel şartlara göre Şekil 2.17'deki gibi özelleştirilmiş sonuçlar da elde edilebilmektedir.



Şekil 2.17. Farklı kısıtlar altında topoloji optimizasyon uygulamaları (Wu ve ark. 2017)

General Motors tarafından; koltuk zemin bağlantısı ve kullanıcı emniyet kemeri bağlantısı için kullanılan standart bir otomotiv parçasının, katmanlı imalat yöntemine göre tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Standart durumunda 8 parçadan oluşan koltuk braketi katmanlı imalat yöntemi ile üretimi için 150'den fazla alternatif form içinden uygun malzeme ve geometrik form seçilerek Şekil 2.18'deki gibi tek parça halinde üretilebilmiştir. Katmanlı imalat yöntemi kullanılarak üretilen yeni braket % 40 daha hafif ve % 20 daha emniyetli olacak şekilde elde edilebilmiştir. Katmanlı imalat yönteminin kullanılması ile kullanılan malzeme miktarının azalmasına rağmen braket daha emniyetli bir şekilde üretilebilmiştir. Braketin tek parça halinde üretilebilmesi tedarik zinciri açısından önemli bir avantaj da sunmaktadır. Braket üzerinde yapılan ağırlık azaltılması diğer parçalarda da uygulanarak önemli bir ağırlık azaltılması yapılabilir. Bu yapılacak iyileştirme yakıt tüketimini azaltacağından önemli bir rekabet avantajı da sunabilecektir (Anonim 2018b).



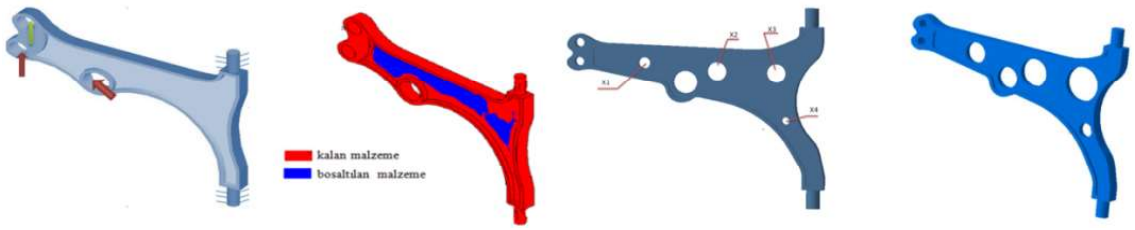
Şekil 2.18. General Motors'un katmanlı imalat yöntemi ile ürettiği koltuk braketi (Anonim 2018b)

Thomas ve Gilbert (2014) katmanlı üretim maliyetleri üzerine yaptığı çalışmada, bu teknolojinin küçük partiler üretmek için uygulanabilir maliyetler ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Mevcut çalışmaların birçoğu sadece parçaların üretim ve montaj açısından incelenmesi sebebi ile bu teknolojinin benimsenmesini yavaşlatmakta olduğu ortaya sürülmüştür. Nakliye ve tedarik zinciri gibi katmanlı imalat yöntemlerinin ön plana çıkacağı diğer boyutlarının da dahil edildiği çok boyutlu bir değerlendirme yapılması durumunda; katmanlı imalat yöntemlerinin daha ön plana çıkacağını belirtmişlerdir. Çalışmada, katmanlı imalat ürün maliyetinin büyük bölümünün malzeme maliyeti olduğu ve bu maliyetin bir dezavantaj oluşturduğu belirtilmektedir. Lakin katmanlı imalat kullanımının artması ve yeni gelişmeler ile üretim maliyetleri 2001 ve 2010 yılları arasında % 51 azaldığını bildirmektedirler. Araştırmacılar, katmanlı imalat malzemelerinin daha düşük maliyette temin edilmesi ve katmanlı imalat yöntemlerinin avantajlarının etkin kullanılması ile teknolojinin benimsenmesinin hızlanacağını ifade etmişlerdir.

Murmura ve Bravi (2017) tarafından katmanlı imalat teknolojilerinin mobilya sektöründe kullanımına yönelik bir araştırma yapılmıştır. Araştırmada katmanlı imalat yöntemlerinin prototipleme için yararlı bir araç olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bir kısım katılımcılarda müşteri ihtiyaçlarını hızlı bir şekilde karşılanabileceğini, yöntemin önemli bir tasarım özgürlüğü sunduğunu ve küçük ölçekli bitmiş ürünler için bu teknolojilerin

kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Katmanlı imalat teknolojileri ile üretim sisteminde geleneksel yöntemlerdeki gibi stok tutulmasına ihtiyaç olmadan ürünlerin dijital olarak saklanabileceği, ürün veya yedek parça ihtiyaçlarında direk olarak ihtiyaç bölgesine en yakın bölgede aynı gün içinde üretilerek müşteriye sunulabileceği bir sistem oluşturma potansiyeli taşıdığı belirtilmiştir. Ürünün istenilen boyut ve şekilde üretilmesi de ek bir yatırım maliyeti getirmemesi sebebi ile ürünlerin kişiselleştirilebilme potansiyelinin arttırıldığı belirtilmiştir. Araştırmada katılımcılar dezavantaj olarak teknolojinin kullanımında daha fazla bilgi, yatırım ihtiyacı gibi dezavantajlar sunmuşlardır; fakat teknolojiyi kullanan firmalar bunların bir dezavantaj oluşturduğunu düşünmediklerini bildirmişlerdir.

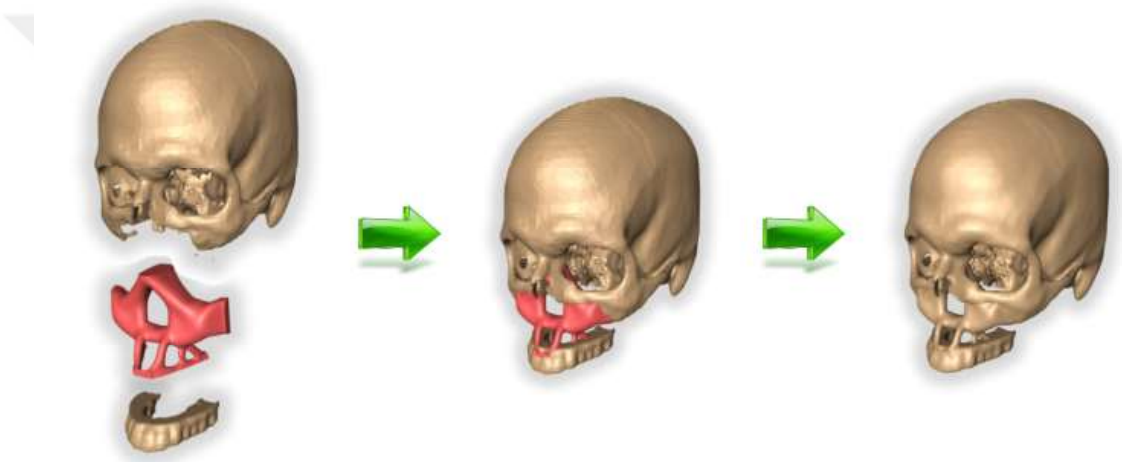
Yıldız (2017), çalışmasında bir otomotiv salıncak kolu tasarımını; topoloji optimizasyonu yöntemi ve şekil optimizasyonu yöntemi kullanılarak optimum tasarım eniyilemesi yapmıştır. İlk olarak topoloji optimizasyonu yöntemi sonuçlarına göre dört adet delik için tasarım değişkeni tanımlaması yapılmıştır. Tasarım değişkenlerinin eniyilemesi içinde genetik algoritmalar ve interior arama algoritması (Şekil optimizasyonu) kullanılarak yüz farklı salıncak kolu tanımlaması yapılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile gerilim için belirlenen üst sınırı aşmayacak şekilde 275 g olan ağırlık değeri 198 g a düşürülerek % 28 ağırlık hafiflemesi elde edilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Interior arama algoritması kullanarak salıncak kolu şekil optimizasyonu (Yıldız 2017)

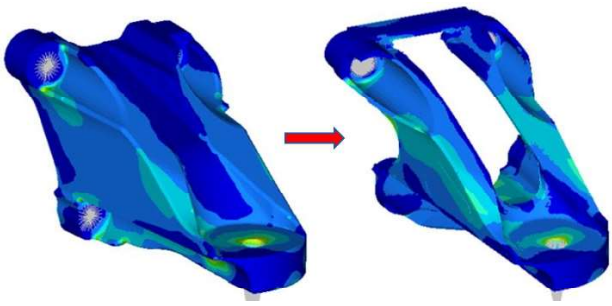
Park (2013) yaptığı tez çalışmasında, yüz iskeletinde oluşabilecek hastalık veya kaza sebebi ile kayıpların en ideal şekilde benzer fonksiyonunu yerine getirebilecek formların eldesi için topoloji optimizasyon yöntemi kullanmıştır (Şekil 2.20). Çalışmada FDM katmanlı imalat yöntemi tercih edilmiştir. Çalışma için maksimum çiğneme yükü

araştırmacı tarafından literatürden alınmıştır. Araştırmacı, malzeme mekanik performansı tespiti için; FDM katmanlı imalat yöntemini kullanarak ABS malzemeden üretilen test numunelerini bası testlerine tabi tutup çalışma için kullanılacak olan sınır değerlerini tespit etmiştir. Bu değerlere göre optimizasyon çalışmasını yapmış ve uygun modeli yine FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretip analiz için kullanılan gerçek mekanik testlere tabi tutmuştur. Araştırmacı gerçekleştirdiği çalışma neticesinde; katmanlı imalat yöntemi kullanılarak -optimum ağırlık ve performansta- istenilen fonksiyonu yerine getirebilecek eksik iskelet yapının elde edilebileceğini ve medikal çalışmalarda örnek uygulamalar için kullanılabileceğini belirtilmiştir.



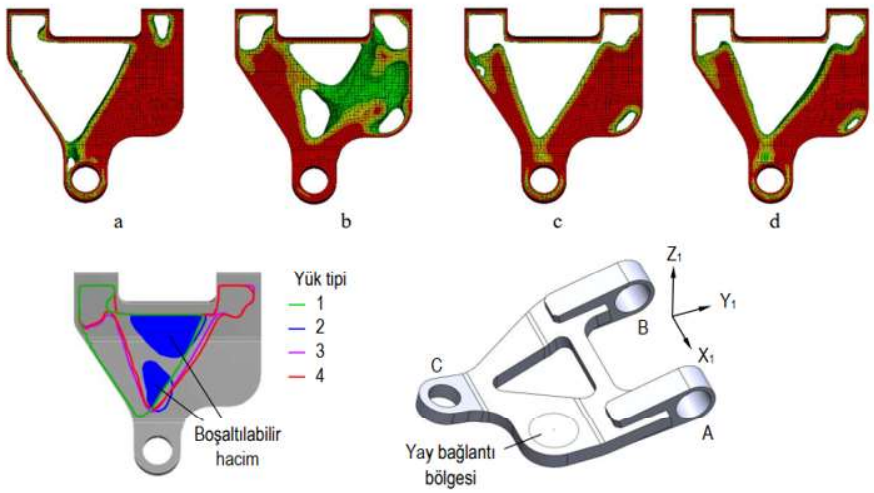
Şekil 2.20. Topoloji optimizasyonu medikal uygulama (Park 2013)

Öztürk (2016) çalışmasında, taşıtlarda kullanılan bir motor takozu için döküm yöntemi üretim koşullarına göre, topoloji optimizasyon yöntemi uygulanarak eniyileme çalışması yapmıştır. Yapılan çalışmada döküm brakette Fx, Fy ve Fz olarak 3 farklı yünde yük uygulama durumu için gerilim ve yer değiştirmenin belirlenen sınır değerlerini aşmadan, model doğal frekansının düşürerek ağırlık azaltma çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonunda doğal frekans % 14,4 ve ağırlıkta % 22,6 iyileştirme sağlanmıştır (Şekil 2.21). Ayrıca, Fy yönünde model ağırlığı azalırken gerilim değerinde de düşüş gözlemlenmiştir.



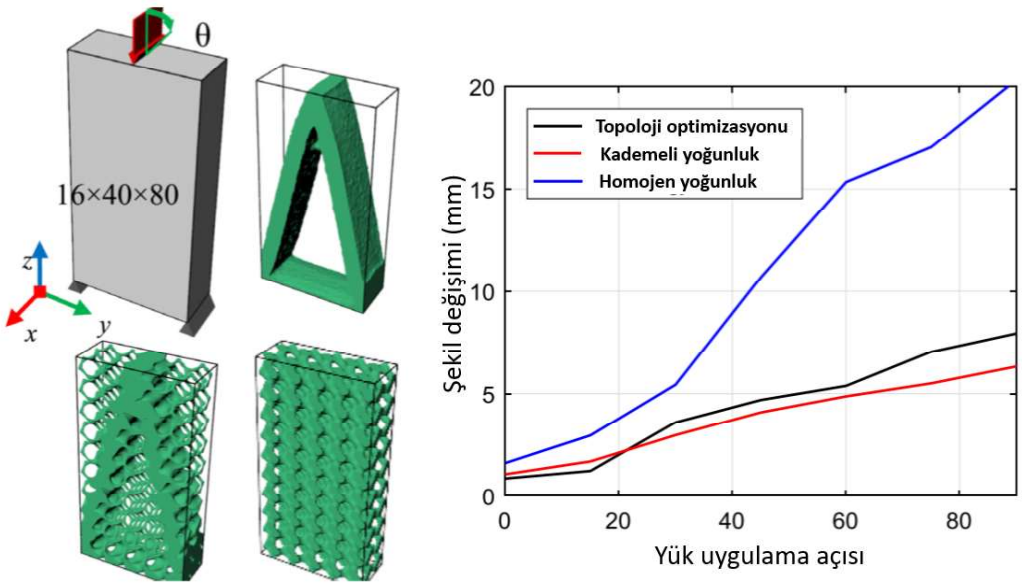
Şekil 2.21. Otomotiv motor takozu topoloji optimizasyonu (Öztürk 2016)

Topaç ve ark. (2017) çalışmalarında, bir askeri araca ait salıncak kolu kullanım yerine uygun tasarım alanı tanımlaması yapılıp topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak model eniyilemesi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada tümsek atlama, boyuna darbe, yanal darbe ve virajda frenleme olmak üzere dört pozisyon durumu için salıncak kolu davranışı incelemişlerdir. Kullanım durumlarına ait yükler literatürden alınarak statik yük olarak kabul edilip her durum için ayrı ayrı topoloji optimizasyonu yapılarak, her model için eksiltilebilir alan tanımlaması yapmışlardır. Dört farklı optimizasyon sonuçları birleştirilerek her durum şartlarını da sağlayacak bir model oluşturularak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Yapılan bu çalışma ile her dört durum içinde istenilen emniyet şartlarını sağlayarak modelde % 19,25'lik bir kütle azalımı gerçekleştirebilmişlerdir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Askeri araç salıncak kolunun dört farklı kullanım duruma göre topoloji optimizasyonu (Topaç ve ark. 2017)

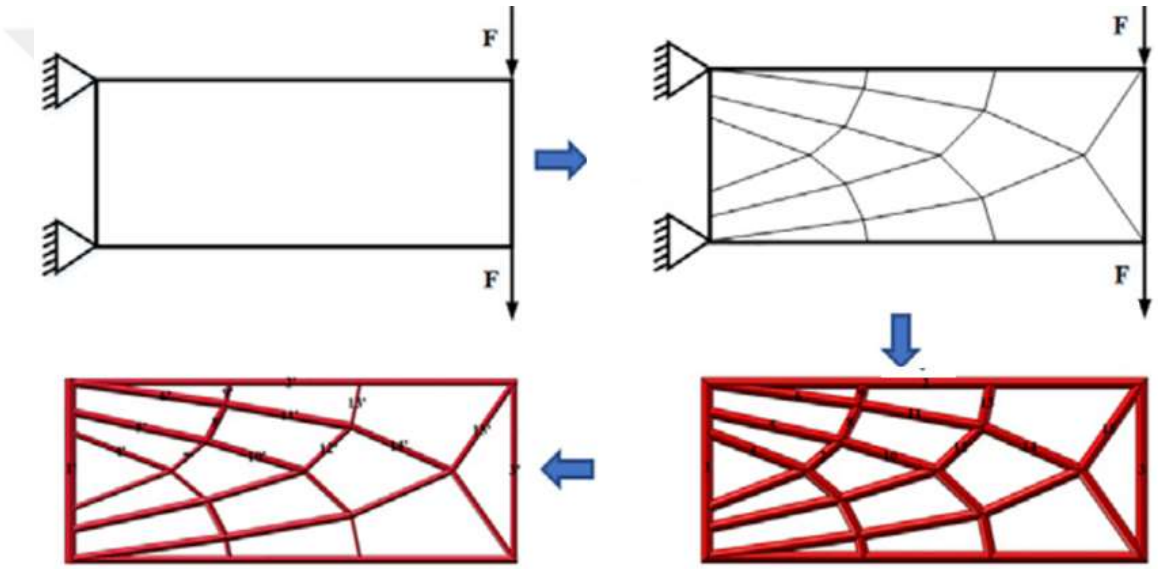
Li ve ark. (2018) çalışmalarında; bir model için homojen yoğunluklu dolgu, topoloji optimizasyonu referanslı dolgu ve bölgesel yoğunluk arttırılmış dolgu yapılarını karşılaştırmışlardır (Şekil 2.23). Dolgu yapısı için gyroid formu kullanılmış ve kullanılan dolgu tipini ihtiyaç duyulan bölgelerde yoğunluğu arttırılarak ve ihtiyacın az olduğu bölgelerde de yoğunluğu azaltarak optimizasyon çalışması yapmışlardır. Yapılan çalışmada standart topoloji optimizasyonun doğrusal yükler altında en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir. Bölgesel yoğunlaştırılan dolgulu model standart dolgu yapısına göre oldukça başarılı fakat topoloji optimizasyonu sonuçlarının altında bir performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bölgesel yoğunluklu dolgu yapısı katmanlı imalat yöntemi için dolgu malzemesi gerektirmeden üretilebilecek bir avantaj sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, bölgesel yoğunluklu yapının sonuç değerleri topoloji optimizasyon sonuçlarına yakın ve yükün doğrultusu değiştiğinde belirli bir açı değerinden sonra bölgesel yoğunluklu yapının sonuçları daha iyi bir performans sağlayabileceğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.23. Homojen, bölgesel ve topoloji optimizasyon sonuçları karşılaştırması (Li ve ark. 2018)

Wang ve ark. (2020) çalışmalarında; katmanlı imalat yöntemleri kullanarak 3B modellerde katı modellerin yerine kafes yapılar kullanılarak daha hafif modeller elde edilebileceğini belirmektedirler. Homojen kafes yapıları ile gerilme büyüklük ve

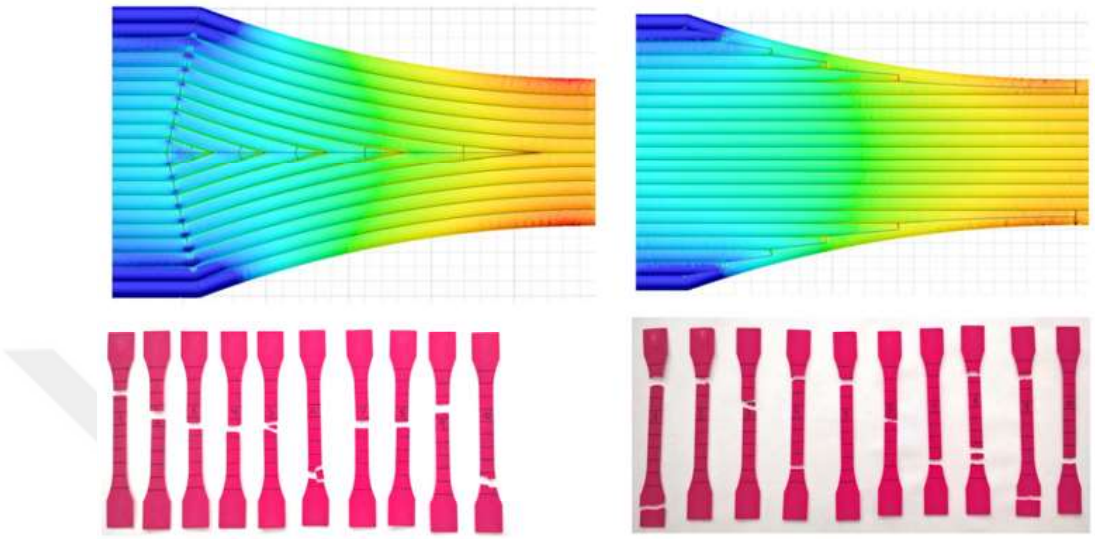
yönelimleri dikkate alınmadan optimum bir yapıya ulaşılamayacağını ifade etmektedirler. Bu sebeple gerilim büyüklük ve yön dağılımının dikkate alındığı bir optimizasyon yöntemi kullanarak bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Yapılan çalışma FDM yöntemi ile elde edilen modellerde oluşan malzeme anizotropisininde dikkate alındığı bir optimizasyon çalışması ile de geliştirilmiştir. Bu sayede malzeme yapısının izotrop olarak kabul edildiği yapılarda oluşan fazla emniyetli kesit kalınlıklarını da optimize etmişlerdir. Malzeme aniztropisinin de katıldığı optimizasyon çalışmasında malzeme anizotropisinin dikkate alınmadığı yapıya göre kuvvet ağırlık oranında % 11,8 ve rijitlik ağırlık oranında da % 41,8 lik bir iyileştirme elde etmişlerdir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Gerilme yönü, büyüklüğü ve malzeme aniztropisinin dikkate alındığı optimizasyon çalışması (Wang ve ark. 2020)

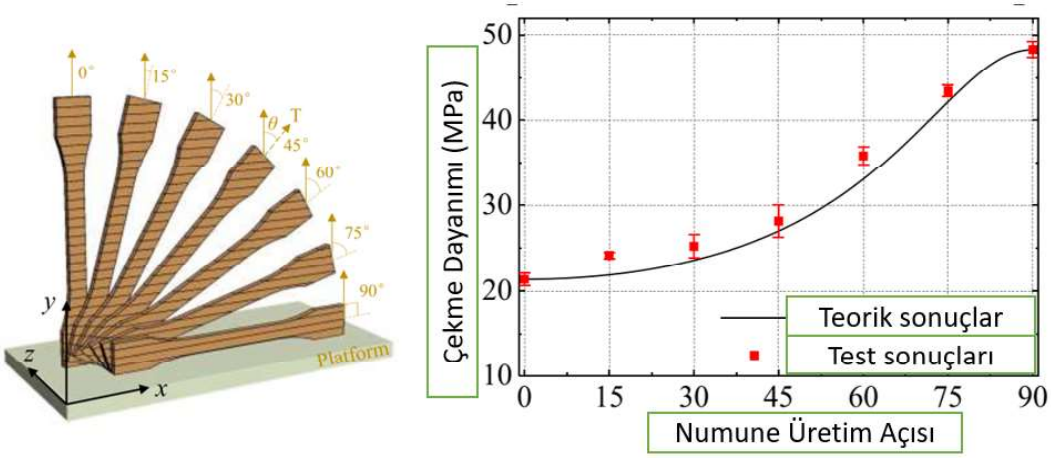
Wendt ve ark. (2017) çalışmalarında; FDM katmanlı imalat yöntemi için farklı dolgu yapılarının hasar oluşumuna etkilerini, çekme numuneleri testleri ve sonlu elemanlar analizleri yapılarak incelemişlerdir. Çalışmalarında eş merkezli ve paralel yörüngeli iki dolgu tipi kullanmışlardır. FDM yöntemi ile elde edilen modelin yörüngeye bağlı ve engebeli formu, çekme test parça modeline yansıtılarak modelleme çalışması yapılıp, sonlu elamanlar analizleri için bu model kullanılmıştır. Her iki dolgu tipine göre yapılan çekme modellerinin sonlu elemanlar analizlerinde gerilmenin maksimum olduğu bölgenin en ince kesitte gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Numune çekme test sonuçlarında

ise eş merkezli olan numuneler analiz sonuçları ile yüksek oranda tutarlı olurken paralelkenar yörüngeli numunede hasar bölgesi genellikle ince kesite değil de kalın kesitten ince kesite geçiş bölgesinde gerçekleştiğini tespit etmişlerdir (Şekil 2.25).



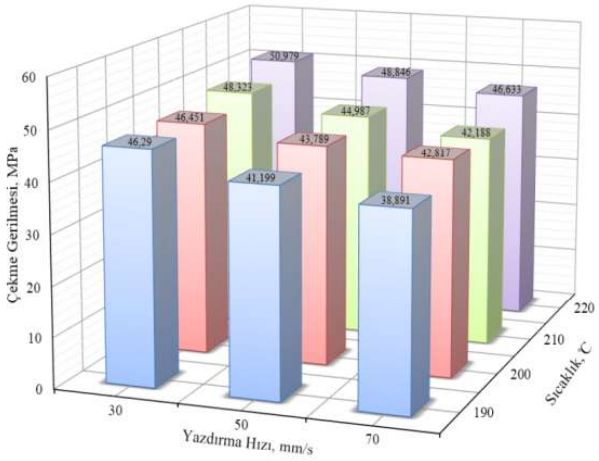
Şekil 2.25. FDM yöntemi için eş merkezli (solda) ve paralel yörüngeli (sağda) modeller için hasar durum incelemesi (Wendt ve ark. 2017)

Zhao ve ark. (2019) çalışmalarında; FDM katmanlı imalat yöntemi kullanarak PLA malzemesinin çekme mukavemeti ve elastisite modülünü teorik çalışmalar ile tespit etme çalışması yapmışlardır. Farklı açılarda konumlandırılmış numuneler farklı katman kalınlıklarında üretilip çekme testleri yapılmıştır. Test verileri, baskı açısı arttıkça veya tabaka kalınlığı azaldıkça çekme dayanımı ve elastisite modülünün arttığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada ayrıca testleri yapılan malzemelerin çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerine, iki farklı teorik yöntemden yararlanılarak elde edilmeye çalışmışlardır. Elde edilen teorik sonuçlar ile test verileri çok küçük farklarla gerçekleşmiş ve sonuçların mühendislik uygulamaları için kullanılabilir nitelikte olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.26).



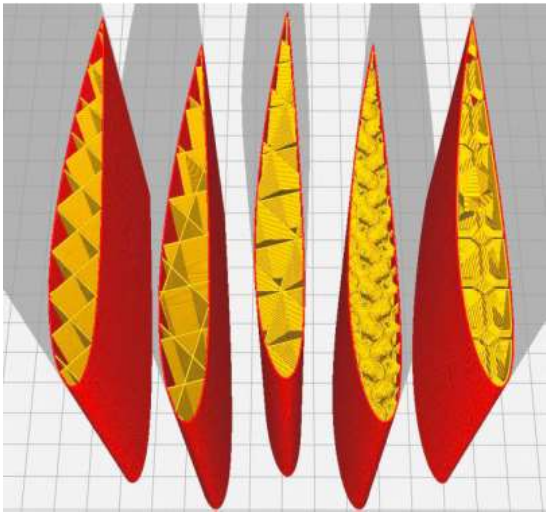
Şekil 2.26. FDM yöntemi ile PLA malzemeden üretilen farklı doğrultulardaki numunelerin mekanik performansı (Zhao ve ark. 2019)

FDM katmanlı imalat yönteminde kullanılan parametreler malzeme özelliklerin önemli ölçüde değişikliğe sebep olabilmektedir. PLA malzeme için yazdırma sıcaklığının 220 ºC sıcaklığa kadar artması çekme dayanımını arttırmaktadır. Yazdırma sıcaklığının daha fazla artması ise malzeme özelliklerinde bozulmaya sebep olacağı için önerilmemektedir. Yazdırma sıcaklığının düşmesi ise çekme dayanımını azaltmasına ve bunun yanında 200 ºC sıcaklık altında seçilmesi ise düşük viskozite sebebi ile akışı da zorlaştırdığından önerilmemektedir. Yazdırma hızının artması ise çekme dayanımını düşürmekte, azalması ise çekme dayanımı arttırmaktadır. FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilen PLA malzeme için en iyi sonuçlar 220 ºC sıcaklık ve 30 mm/s değerinde elde edilebilmektedir. Fakat yazdırma hızının düşük seçilmesi çekme dayanımını arttırmasına karşın üretim zamanının uzatacağını belirtmişlerdir. FDM katmanlı imalat yöntemi için PLA malzemenin yazdırma sıcaklığı ve yazdırma hızının değişiminin çekme dayanıma etkisi Şekil 2.27'de verilmiştir (Aydın ve ark. 2019).



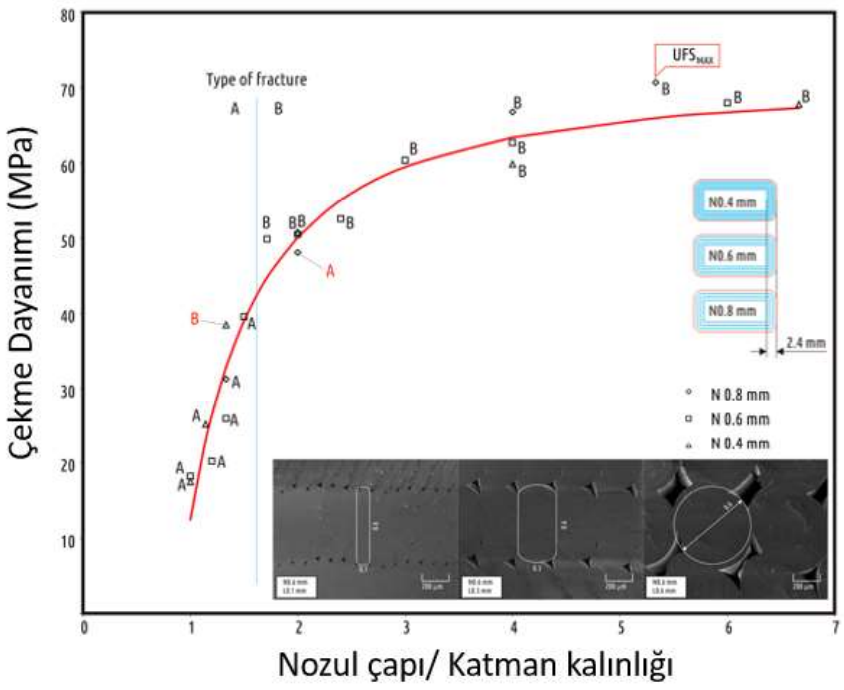
Şekil 2.27. FDM katmanlı imalat yöntemi için PLA malzemenin yazdırma sıcaklığı ve yazdırma hızının değişiminin çekme dayanıma etkisi (Aydın ve ark. 2019)

Pecho ve ark. (2019) tarafından insansız hava araçları kanat tasarımında kanat iç dolgu tipine göre optimum rijitlik/ağırlık oranı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmada Grid, Grid 90, TriHexagon, Cubic, Gyroid, Cross-3D, Standart delikli dolgu tipleri ile kanat iç hacmi modellenerek numuneler üretilmiştir (Şekil 2.28). Yapılan numunelerin üç nokta eğme yükü altında performansları incelenmiş ve yapılan çalışmada TriHexagon, Grid ve Grid90 dolgu tiplerinin standart duruma göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada Gyroid dolgu yapısının kullanıldığı numunenin de en esnek yapıya sahip dolgu tespit edilmiştir.



Şekil 2.28. İnsansız hava aracı kanadı iç dolgu çalışması (Pecho ve ark.2019)

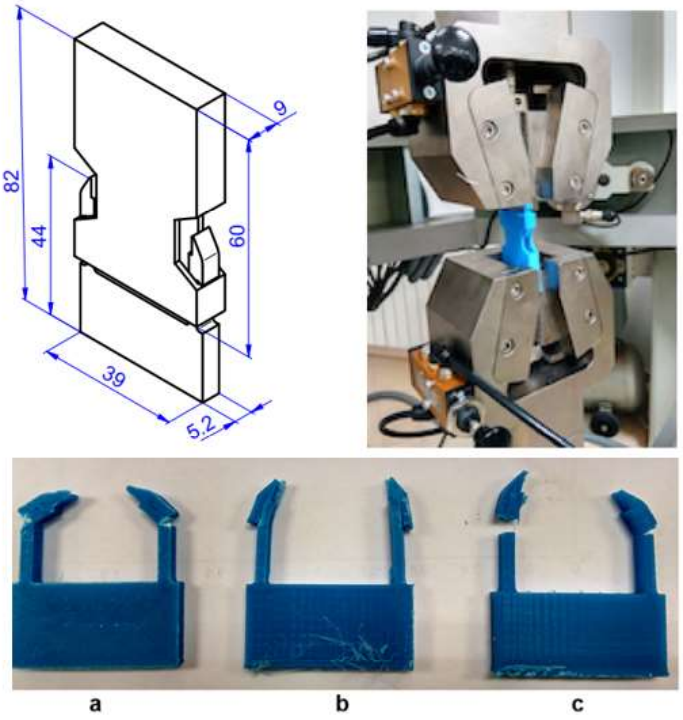
Kuznetsov ve ark. (2018)'nın çalışmalarında, FDM katmanlı imalat yönteminde, yazdırma genişliği ve katman kalınlığı değişiminin malzeme mekanik performansına etkisini farklı nozul çapları kullanılarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada PLA malzeme kullanılmıştır ve aynı kesit alanına sahip numuneler 0,4, 0,6 ve 0,8 mm nozul çapları ile üretilip çekme testleri yapılmıştır. Katman kalınlığı olarak da 0,05 ile 0,6 mm arasında farklı katman kalınlıkları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada katman kalınlığı aynı olup yazdırma genişliği büyük olan çalışmalarda daha iyi çekme dayanımı elde edilmiştir (Şekil 2.29). Başka bir bakış açısı ile nozul çapı sabit olduğu durumlar için katman kalınlığı azaldıkça daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yazdırma genişliğinin katman kalınlığına oranı yaklaşık 3 değerine ulaştıktan sonra bu oranın büyümesinin etkisinin azalmakta olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.29. Nozul çapı/katman kalınlığı değişiminin çekme dayanımına etkisi (Kuznetsov ve ark. 2018)

Chacón ve ark. (2017) çalışmalarında, FDM katmanlı imalat yöntemi için yapı oryantasyonunu, katman kalınlığını üretim hızı parametrelerinin değişiminin yapı mekanik performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada daha önce yapılan çalışmalar ile benzer olarak dikey oryante edilmiş numunelerin performansının diğer

yönlere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Katman kalınlığının artması dikey üretilen numunelerde mekanik performansı olumlu yönde etkilemekte iken diğer yönelimlerde katman kalınlığı artması mekanik performansının düşmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Yazdırma hızı değişimi ise dikey numunelerde hızın artması ile mekanik performansı olumsuz yönde etkilediği çekme ve eğme mukavemetinin düşmesine sebep olduğu saptanmıştır. Diğer yönlerde yazdırma hızının değişimi önemli bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir (Sadece 0,06 mm katman kalınlığında yan üretilen numune de yazdırma hızı 80 mm/s hızında belirgin bir şekilde daha iyi sonuç vermiştir.). Ayrıca, benzer parametreler ile bir kilit mekanizması üretilip çekme testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 2.30). Kilit mekanizması çekme test sonuçları; çekme numunesi test sonuçları ile benzerlik gösterdiğini tespit etmişlerdir.



Şekil 2.30. FDM katmanlı imalat ile üretilen kilit mekanizması çekme testi (Chacón ve ark. 2017)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında FDM katmanlı imalat yönetimi kullanılarak bir ofis koltuğu kolçağının, kullanıcı ürünü olarak üretilmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın etkinliğini arttırmak için yapısal optimizasyon yöntemleri kullanılmış ve üretim parametreleri literatürdeki değerler de göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Kullanılan malzemenin mekanik performansını tespit etmek için farklı yönlerde çekme ve eğme numuneleri üretilip testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan test sonuçları sonlu elemanlar verileri ve emniyet şartları parametrelerini oluşturmada kullanılmıştır. Model optimizasyonu için kolçak dış formu değişmeyecek şekilde iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre en uygun sonuçların elde edildiği model PLA malzemeden FDM katmanlı imalat yöntemi kullanılarak üretilmiş ve nihai testleri TS EN 1335 standardına göre gerçekleştirilip ürün doğrulaması yapılmıştır.

3.1. Kolçak Modelinin Oluşturulması

Ofis mobilyaları standartları antropometrik ölçülerin bölgesel olarak farklılık göstermesi sebebi ile bölgelere göre farklı tanımlanabilmektedir. Örneğin ABD için BIFMA standartları kullanılırken Avrupa ve Türkiye'nin de içinde bulunduğu bölgeler için EN normları kullanılmaktadır. Döner ofis koltukları kolçak testleri için ilgili standart TSE kurumu tarafından TS EN 1335 adı ile ülkemizde yayınlanmaktadır. Çalışmada, bir ofis koltuğu kolçağı bu standart referans alınarak boyutlandırılmış ve mekanik testler de bu standarda göre yapılmıştır. Kolçak boyutsal ölçüm ve mekanik performans testleri için; daha önce EN 1335 standardı test şartlarını geleneksel yöntemler ile üretilen bir kolçak ile sağlamış olan Şekil 3.1'de görülen tasarım tescili 'Bürosit Büro Donanımları San. ve Tic. A.Ş.' firmasına ait 'Dorado' ürün gövdesi seçilmiştir; ve ayrıca kolçak boyutsal ölçüm ve mekanik performans testleri bu ürün üzerinden gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kolçak modelinin boyutsal ölçümleri 3D model üzerinden yapılmış olup Çizelge 3.1'de görülmektedir. Bu çalışma için belirlenen kolçak modelinin sabit olması sebebi ile Çizelge 3.1'de ayarlı kolçak için tanımlanan maddeler kapsam dışı olarak tanımlanmıştır. Boyutsal ölçümlerde oturak üzerinden kolçak yüksekliği ölçüsü 65 kg yük altında yapıldığı için; oturak süngerin 20 mm ezileceği öngörüsü ile 3D model ölçümüne 20 mm eklenmiştir. Yapılan ölçümlere göre hazırlanan 3D modelin TS EN 1335-1 standardının

gerekliliklerini sağlayacağı öngörüsü ile kolçak modelinin dış formunun uygun olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 3.1. Kolçak uygulamasının yapılacağı ofis koltuğu gövdesi (Anonim 2020h)

Çizelge 3.1. Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler ve 3D model ölçümleri

Tanım	**İstekler (Anonim 2020ı)**	**3D Model**
Kolçak kullanım uzunluğu	En az 200 mm	332 mm
Kolçak kullanım genişliği	En az 40 mm	46 mm
Kolçak ön kenarından uzaklığı	En az 100 mm	160 mm
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Sabit)	En az 200mm En çok 250 mm	245 mm
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Ayarlı)	Alt en fazla 200mm Üst en az 250mm	Kapsam dışı
Kolçak yükseklik kurs ayarı	En az 50 mm	Kapsam dışı
Kolçaklar arası mesafe (Sabit)	En az 460mm En çok 510 mm	495 mm
Kolçaklar arası mesafe (Ayarlı)	Alt en fazla 460mm Üst en az 510 mm	Kapsam dışı

Bu çalışma için üretim metodu olarak FDM yöntemi tercih edilmiştir. Malzeme olarak; FDM yönteminde yaygın olarak kullanılan mısır, şeker kamışı ve şeker pancarı gibi

malzemelerin fermante nişastasından elde edilen PLA (Polilaktik Asit) termoplastik malzemesi seçilmiştir.

3.2. Üretim İçin Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi

Uygun malzeme parametrelerinin seçimi, yapılacak çalışmanın performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu sebeple çalışmada kullanılacak parametreler literatür araştırması sonucunda tespit edilen önermeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada nihai kolçak modeli malzemesi olarak 'ESUN' marka 'PLA' ürünü tercih edilmiştir. Yoğunluk ve tabla sıcaklığı gibi ihtiyaç duyulan bazı özellik ve parametreler için de üretici verilerinden yararlanılmıştır.

Çekme ve eğme numuneleri için model doluluk oranı %100 dolu olacak şekilde tanımlanmıştır. Kolçak modeli için ise iç hacimde boşluklu yapılar kullanılarak kolçak ağırlığını azaltıp yapılan çalışma daha efektif hale getirilmeye çalışılmıştır. Kolçak modelinin fonksiyonel olarak kullanılması düşünülmekte ve bu tür çalışmalar için katmanlı imalat parça üreticileri 0,8 mm ve üzeri bir et kalınlığı kullanılmasını önermektedir (Anonim 2020a,f). Bu sebeple yapılan çalışmalarda dış kabuk et kalınlığı için 1,2 mm ve üzeri, iç dolgu et kalınlığı içinde 0,8 mm ve üzeri et kalınlığı üzerinden çalışmalar planlanmıştır.

Yapılan literatür araştırmasında FDM katmanlı imalat yönteminde yazdırma genişliğinin katman kalınlığına oranının artmasının mekanik performansı arttırdığı bildirilmekte ve bu oranın 2 ve üzerinde olması tavsiye edilmektedir (Kuznetsov ve ark. 2018). Yazdırma genişliği değeri için ise nozul çapı oranında olması önerilmektedir (Chacón ve ark. 2017, Kuznetsov ve ark. 2018). Bu sebeple 0,4 mm olan nozul çapı için 0,1 mm katman kalınlığı ideal bir mekanik özellik sunacağı öngörülmektedir. Fakat katman kalınlığının azalması üretim zamanını da aynı oranda arttırmaktadır. Aynı zamanda yöne bağlı bu mekanik özellikler de farklı eğilim gösterebilmektedir. Örneğin Chacón ve ark. (2017)'nin yaptığı çalışmada katman kalınlığın artması dikey yönde mekanik performansı arttırmıştır. Bu sebep ile 0,2 mm lik bir katman kalınlığı seçildiğinde mekanik özellikler ve malzeme üretim zamanı açısından uygun sonuç vereceği öngörülmüştür. Chacón ve ark. (2017)'nin

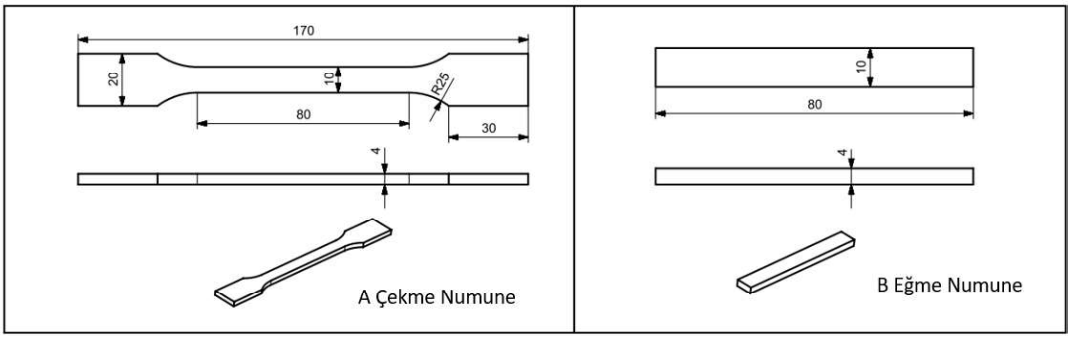
yaptığı çalışmada yazdırma hızının artması genel olarak mekanik özelliklerin azaltmasına sebebiyet verdiği bildirilmiştir. Yapılan çalışmanın fonksiyonel bir çalışma olması ve mekanik performans beklentisinin yüksek olması sebebi ile 25 mm/s'lik düşük bir hız dış katman baskısı için ve 50 mm/s'lik ortalama bir hız da iç dolgu baskı parametresi olarak seçilmiştir. Aydın ve ark. (2019) yaptığı çalışmada PLA+ malzeme için yüksek sıcaklıklarda düşük hızlarda üretilen çalışmaların mekanik performansının arttığını tespit etmişlerdir. Numune üretimi ve analizinde malzeme tanımı için kullanılacak PLA malzemesi parametreleri Çizelge 3.2'de tablo haline getirilmiştir.

Çizelge 3.2. PLA malzeme çalışma parametreleri

Parametreler	Uygulama
Malzeme	PLA ESUN
Yoğunluk (g/cm^3)	1,24
Flamet capı (mm)	1,75
Poisson oranı	0,36
Nozul çapı (mm)	0,4
Yazdırma genişliği (mm)	0,4
Kabuk et kalınlığı (mm)	min 1,2
Dolgu et kalınlığı (mm)	min 0,8
Katman kalınlığı (mm)	0,2
Baskı sıcaklığı (°C)	210
Tabla sıcaklığı (°C)	50
Baskı hızı (mm/s)	25 - 50

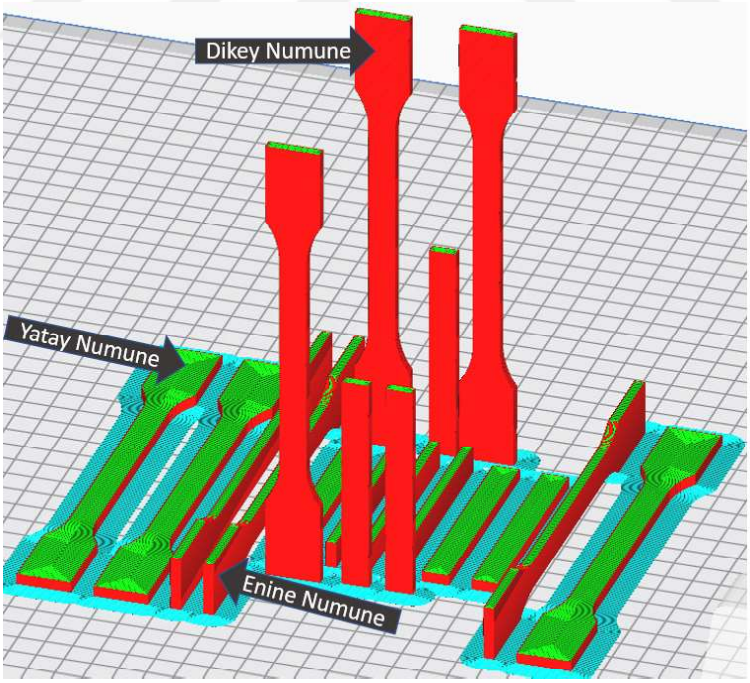
3.3. Çekme ve Eğme Numune Üretimi ve Testleri

Çalışmada kullanılacak malzeme için genel mekanik değerleri üreticiler tarafından verilebilmektedir. Fakat FDM yöntemi için kullanılan cihaz ve üretim parametreleri malzeme mekanik performansını önemli ölçüde değişikliğe sebep olabilmekte ve üretici verilerine göre önemli farklılıklar oluşabilmektedir. Bu sebeple çalışmada kullanılan parametreler ile malzeme çekme ve eğme numuneleri üretilip testleri yapılarak çalışma şartlarındaki mekanik performansı tespit edilmiştir. Çalışmada çekme numunesinin ISO 527-1:2019 standardına göre, eğme numunesi de ISO 178:2019 standardı referans alınarak Şekil 3.2'deki gibi 3D modeli hazırlanmıştır.



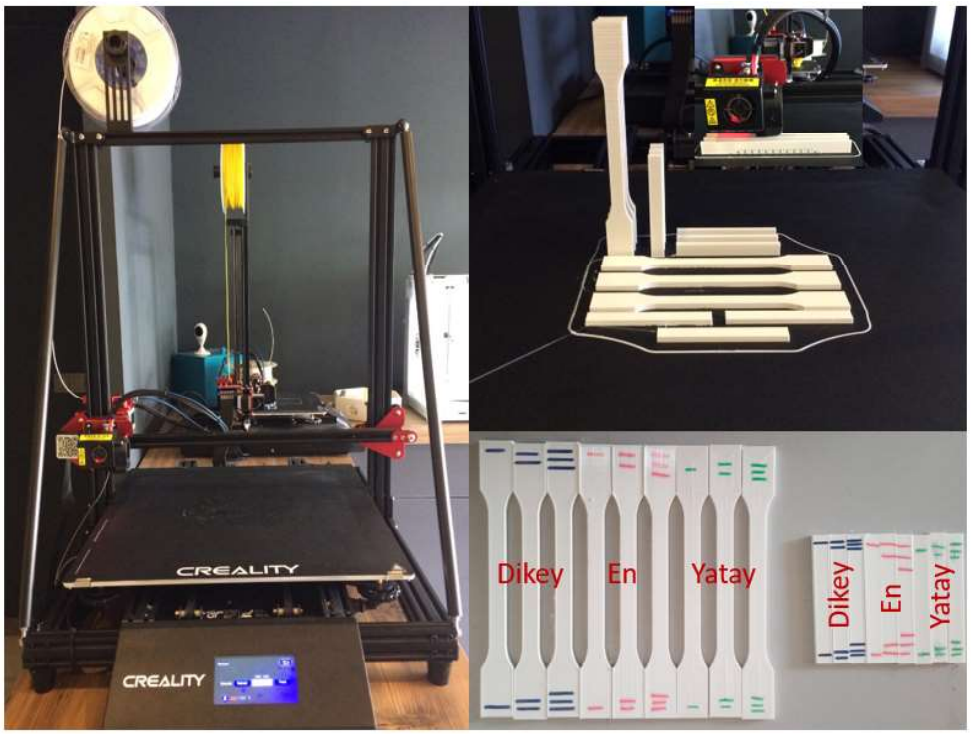
Şekil 3.2. Çekme (ISO 527-1:2019) ve eğme (ISO 178:2019) test numune ölçüleri (Anonim 2019a,b)

FDM Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen parçaların anizotrop özellik göstermesi sebebi ile çekme ve eğme numuneleri Şekil 3.3'teki gibi dikey, en ve yatay konumlandırılmış üç farklı pozisyonda test numunesi üretimleri yapılmıştır. Numune üretimi % 100 dolulukta eş merkezli yörünge izleyecek şekilde tanımlanmıştır. Diğer üretim parametreleri için de Çizelge 3.2'deki parametreler (katman kalınlığı, baskı sıcaklığı, tabla sıcaklığı ve üretim hızı vd.) kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Çekme ve eğme test numuneleri dolgu yapıları ve üretim pozisyonları

Çekme ve eğme test numune üretimi için 450 mm x 450 mm x 450 mm boyutsal ölçülere sahip Şekil 3.4'teki FDM katmanlı imalat cihazı kullanılarak dikey, en ve yatay doğrultularda üçer adet üretimleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Micron 3D FDM kolçak baskısı cihazı çekme ve eğme numune üretimi

PLA+ Malzeme ile üretilen test numuneleri Şekil 3.5'te verilen 'Universal Zwick/Roell Z020' çekme test cihazının çekme ve eğme test alanı kullanılarak numune testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme ve eğme testleri oda sıcaklığında ve 50 mm/dk çene hareket hızında yapılmıştır. Çekmedeki uzama değerleri de mekanik bir ekstansometre yardımı ile elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Çekme ve eğme testlerinde kullanılan Universal Zwick/RoellZ020 çekme cihazı

3.4. Kolçak Model Optimizasyonu

Ofis koltuğu kolçağının FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilmesi geleneksel yöntemlere göre farklı işlem adımları gerektirmektedir. FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilen modellerin yöne bağlı farklı mekanik özellikler göstermesi (Chacón ve ark. 2017, Zhao ve ark. 2019) bu yöntemlerin uygulaması için bir zorluk oluşturmaktadır. Fakat katmanlı imalat yönteminin geleneksel yöntemlere göre üretimi mümkün olmayan yapıların üretiminin gerçekleştirilebilmesi de bir avantaja dönüştürülebilmektedir (Thomas ve Gilbert 2014).

Kolçak modelinin optimizasyon çalışmalarında FEM analizleri için ANSYS yazılımı ve modelleme çalışmaları içinde Siemens NX yazılımı kullanılmıştır. FEM analizleri Çizelge 2.2'teki sıraya göre Şekil 2.13'te belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir.

Kolçak modeli geometrisi dış formu; kullanım bölgesi olması ve yalın bir formda olması istendiği için, dış formu değişikliğe uğramadan optimizasyon çalışması kolçak iç hacminde yapılmıştır. Kolçak iç hacmi optimizasyon çalışması için iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlar; homojen yoğunluklu iç dolgu ve bölgesel yoğunluklu iç dolgu şeklinde çalışılmıştır. Bu çalışmalarda tam dolu model için tanımlanan model ağırlığının, optimizasyon çalışmaları ile %50 ve üzerinde bir ağırlık azaltılması hedeflenmektedir.

FDM katmanlı imalat ile üretilen parçaların üretim yöntemi kaynaklı anizotropik bir yapıya sahiptir. Bu sebeple yapısal olarak modellemesi için birtakım kabuller yapılması gerekmektedir. Bu kabuller ile oluşturulan yapısal model ile nihai ürün performansı yakınsanabilmektedir. Yapısal modelleme için 4 farklı yöntem kullanılabilmektedir. Bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır (Anonim 2016).

- Emniyetli yaklaşım: anizotrop yapının en zayıf özelliklerini diğer yönlerde de sağlayabileceği yaklaşımıdır. Bu yaklaşım yapısal olarak modellenmesi kolay fakat sonuçlar nihai sonuçlar ile karşılaştırıldığında sapma oranı yüksek olacaktır.

- Ortotropik yaklaşım: Bu yaklaşım ise; malzemenin ortotropik özellik gösterdiği varsayımı ile model lif yönü daha güçlü diğer yönler daha zayıf olduğu kabulü üzerine yapısal modelleme yöntemidir. Bu modelleme yöntemi emniyetli yaklaşıma göre basit doğrusal modeller için daha doğru sonuç verecektir. Fakat model dış ve iç dolgunun doğrusal olmadığı durumlarda bu yöntem sonuçlarında sapma oranı yine yüksek olacaktır.

- Kompozit yaklaşım: Parça katman katman benzer özellikleri göstereceği yaklaşımı ile her katman özel olarak tanımlanarak oluşturulan bir yapısal modelleme yaklaşımıdır. Bu yöntemde katmanların standart olduğu durumlar için ortotropik yaklaşım gibi iyi sonuçlar verecektir. Fakat katman homojen durumu bozulunca bu sonuçlarda gerçek sonuçlara göre sapma oluşturmaya başlayacaktır. Aynı zamanda bu yöntem için malzeme tanımlamak emniyetli yaklaşıma göre daha fazla zaman alacaktır.

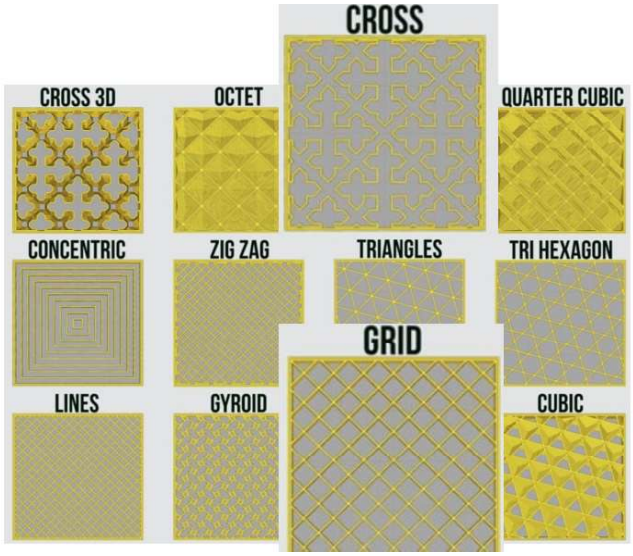
- Takım yolu tanımlanmış model yaklaşımı: Bu yöntem model takım yolunun bilgilerinin yapısal model bilgileri içine tanımlanarak mevcut durumun en iyi tanımlandığı yaklaşımdır. Bu yaklaşımın en iyi sonucu vereceği görülmekte fakat yazılımsal olarak farklı yapıların entegrasyonu ile yapılabilecek bir yaklaşımdır. İleriki yıllarda bu yöntemin yazılımsal geliştirmeler ile daha uygulanabilir hale geleceği öngörülmektedir.

Bu çalışma FEM analizleri uygulamaları için ortotropik model yaklaşımı; takım yolları doğrusal olmayıp çok farklı yörüngeler izlediği için kolçak modeli için ortotropik malzeme tanımı yapılamamaktadır. Kompozit malzeme yaklaşımı da; katmanların homojen olmayıp farklılık içermesinden dolayı çalışma için uygun görülmemiştir. Takım yolu tanımı yaklaşımı da; kolçak modelimizin geometrisinin takım yolu tanımlaması yazılımsal olarak yapılamaması ve manuel modelleme için çok büyük olmasından dolayı; tez çalışmasındaki FEM analizleri için emniyetli model yaklaşımının kullanılması uygun görülmüştür. Bu çalışma için kullanılacak PLA malzemenin mekanik özellikleri için literatür araştırma sonuçlarından elde edilen bilgiler ve test sonuçları ile lineer izotrop bir malzeme tanımı yapılmıştır. FEM analiz sonuçlarını değerlendirmek için de, von-Mises gerilme değerinin katmanlı imalat örme yönüne dik (z yönündeki) en düşük çekme gerilme dayanım performansı değeri aşılmadığı durumda model tam emniyetli olacağı öngörülmektedir. Emniyetli yaklaşıma göre değerlendirdiğimizde yük doğrultusuna bakmadan bir değerlendirme yapılmaktadır. Fakat Zhao ve ark. (2019)'nın yaptığı çalışmadaki verilere göre; FDM yöntemi ile üretilen modellerin örme yönüne dik olarak gelmeyen gerilme durumlarında daha iyi mekanik performans gösterdiği ve gerilme yönü örme yönünde oluştuğu durumlarda en zayıf yön emniyet sınırının emniyet iki katına ulaşan gerilmelerde bile modelde hasar oluşmadan emniyetli olabileceği görülmektedir. Ayrıca Wang ve ark. (2020)'nin yaptığı çalışmada malzeme aniztropisinin dikkate alındığı durumlarda modellerde fazla emniyetli bölgeler de optimize edilebilmektedir. Bu sebeple tez çalışması için emniyetli yaklaşıma ek olarak bir model emniyet tanımlaması daha yapılarak en zayıf doğrultuda gelmeyen yük durumları için kullanılabilir emniyetli gerilme şartları tanımlanmaya çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma ile model optimizasyonunun etkinliğinin arttırılacağı öngörülmektedir. Öngörülen emniyetli gerilme yaklaşımı şu şekilde tanımlanmıştır. FEM analizleri sonucu oluşan maksimum

von-Mises gerilme değeri emniyetli gerilme değerini aştığı, yatay ve en emniyetli gerilme değerini aşmadığı durumlar için; FEM analizlerinde z yönünde oluşan normal gerilme (imalat örme yönüne göre dik) değerinin en düşük emniyetli gerilme değerini aşmadığı durumlarda da modelin emniyetli olacağı öngörülmüştür. FDM katmanlı imalat yönteminde üretilen malzemeler örme yönüne dik doğrultuda basma gerilmesine maruz kaldığında en yüksek çekme değerinden de iyi performans göstermektedir (Park 2013). Bu sebeple yapılan çalışmada dikey doğrultuda basma yönünde gelen gerilmeler için en yüksek çekme gerilmesini geçmediği durumlar emniyetli kabul edilmiştir. Çalışmada, FEM analizlerinde ve model uygunluk değerlendirmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

3.4.1 Homojen Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu Optimizasyonu

FDM katmanlı imalat yöntemi modelin katman katman oluşturması sebebi ile model iç hacminde kalan kısmın da istenilen yoğunlukta elde edilmesine imkân sunmaktadır. FDM katmanlı imalat 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 (Pecho ve ark. 2019). FDM katmanlı imalat yönteminde 3D modeli oluşturmak için izleyeceği yörünge tanımı için farklı ara yazılımlar kullanılabilmektedir. Bu yazılımlar için model dış geometrisi tanımı yapıldıktan sonra iç hacim için farklı seçeneklerde modeli oluşturabilecek dolgu tip seçenekleri standart olarak bulunmaktadır. Bu kullanılan yazılımların her kullanıcının ücretsizce temin edebileceği ve en yaygın olarak kullanılanı 'cura' yazılımıdır. Bu yazılımın standart olarak sunduğu dolgu tipleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Bir 3D model iç hacmi oluşturmak için bu dolgu tiplerinden 'Cross' yapısı seçilmesi durumunda 3D modele esnek özellikler kazandırması için önerilir iken 'Grid, Cubic, Triangles, Trihexagon' dolgu ise 3D modele yüksek mekanik performans için önerilmektedir (Anonim 2020b).



Şekil 3.6. Cura yazılımı standart dolgu tipleri (Anonim 2020b)

Bu çalışmada elde edilecek kolçak modeli prototip uygulaması için olmayıp uygulamaya dönük bir çalışma olması için çalışmanın mekanik test şartlarını karşılayabilmesi beklenmektedir. Bu sebeple model iç dolgusu olarak yüksek mekanik performans için önerilen "Grid dolgu" yapısı seçilmiştir. Dış ve iç kesit kalınlığı ve iç dolgu hücresel boyut parametrelerinin en uygun dağılımının bulunması için de aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

FDM katmanlı imalat ile üretilecek modelin yazdırma genişliğinin nozul çapının katları olması önerilmektedir (Chacón ve ark. 2017, Kuznetsov ve ark. 2018). Bu sebeple, dış kabuk ve iç dolgu için nozul çalının 0,4 mm seçilmesi sebebi ile yazdırma genişliği de 0,4 mm'nin katları olarak alternatiflendirilmiştir. Oluşturulan alternatifler ile ilgili kolçak çalışması için en uygun model yoğunluk dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada iç dolgu yapılarının kalınlığı 0,8 mm ve 1,2 mm olarak iki farklı şekilde oluşturulmuştur.

Mekanik performans istenen çalışmalar için kabuk et kalınlığı 0,8 mm üzeri kullanılması önerilmektedir (Anonim 2020a). Mekanik performans istenen parçanın boyutları 250 mm x 250 mm üzeri olması durumunda da 1,2 mm ve üzerinde et kalınlığı önerilmektedir (Anonim 2020f). Bu çalışmada da boyutlar 250 mm x 250 mm üzerinde olduğundan et kalınlığı için 1,2 mm'den başlanarak 2,8 mm'ye kadar alternatif yapılar

oluşturulmuştur. İç dolgu et kalınlığı içinde 0,8 mm ile 1,2 mm kalınlık alternatifleri üzerinden çalışma yapılmıştır. Çalışmanın eşdeğer ağırlık kısıtı altında yapılması planlandığından ağırlığı eş değer kılabilmek için dolgu yapısı hücresel boyutu değiştirilerek kolçak ağırlıkları eşdeğer kılınmıştır. Bu şekilde yapılan çalışma eşit dolum oranına sahip olarak alternatiflendirilmiştir. Her bir eş ağırlığa sahip alternatif kolçak için ayrı ayrı TS EN 1335 kolçak test yükleri FEM analizleri yapılarak en uygun sonuç veren dış ve iç dolgu et kalınlığı ve hücresel boyutu tespit edilmeye çalışılmıştır.

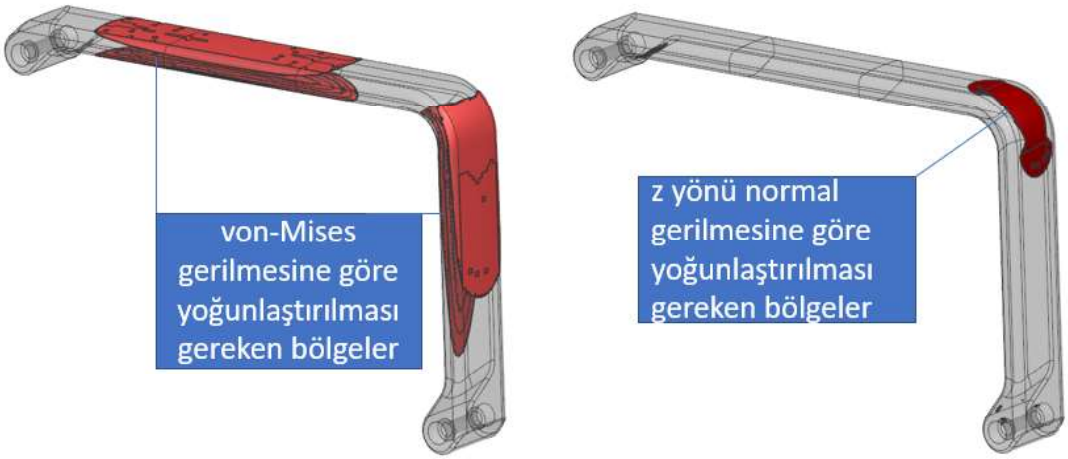
3.4.2 Bölgesel Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu Optimizasyonu

FDM yöntemi için 3D modeli dilimleme yazılımları kullanılarak dış kabuk kalınlığı istenilen kalınlıkta ve iç dolgu içinde istenilen kalınlık, istenilen dolgu tipi ve istenilen yoğunlukta elde edilebilmektedir. Farklı iç dolgu tipi yoğunluğu ve dolgu kalınlığı gibi parametreler ile optimizasyon çalışması ile ulaşılabilecek iyileştirmeler sınırlı olabilmektedir. Bir model için ihtiyaç duyulan bölgelerin daha yoğun, ihtiyacın az olduğu bölgelerin düşük yoğunlukta oluşturulabilmesi istenilen modelin malzeme kullanımını daha efektif hale getirecektedir. Bölgesel yoğunluk uygulanmış model çalışmalarının, homojen yoğunluklu çalışmalara göre belirgin farklar oluşturduğu birçok çalışmada ortaya konulmuştur (Li ve ark. 2018, Wang ve ark. 2018, 2020).

Bölgesel yoğunluklu kolçak iç dolgu optimizasyonu çalışmasında da bir önceki bölümdeki homojen yoğunluklu dolgu optimizasyonunu çalışmasına benzer toplam kolçak ağırlığı %50 azaltılacak şekilde bir çalışma yapılmıştır. Kolçak modelinin dış kabuk et kalınlığı için 1,2 mm altı kalınlıklar önerilmediği için bu kalınlık dış kabuk et kalınlık değeri 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 yoğunlaştığı bölgeleri kolçak modelinde tam dolu olarak tanımlanmış ve gerilmenin düşük olduğu bölgelerde de düşük yoğunluklu bir dolgu yapısı kullanılmıştır. Bu yapılan çalışma ile homojen yoğunluklu iç dolgu çalışmasına göre daha iyi bir sonuç elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bölgesel yoğunluklu kolçak iç dolgusu yoğunlaştırılacak bölgelerin sınırlarının tespiti için analiz sonuçları değerlendirilmiş ve bu değerlendirme sonucuna göre bir sınır değerleri belirlenmiştir. Kolçak modeli homojen yoğunluklu modeldeki gibi dolu modelin ağırlığının %50 ve üzerinde bir ağırlık azaltma hedefi ile sınır değerler; 900 N dik yük durumundaki von-Mises gerilmesinin üçte biri olarak alınmıştır. FDM yöntemi ile elde edilecek kolçak modelinde; çekme testlerindeki sonuçlarda da görüldüğü gibi z yönünde (kolçak katman düzlemine dik ve en zayıf mekanik özelliklere sahip yön) mekanik özellikler diğer doğrultulara göre oldukça düşük gerçekleşmektedir. Bu sebepten sadece von-Mises gerilmeleri değil z yönünde oluşan gerilim karakteristikleri de kolçak bölgesel yoğunluk çalışmasına eklenerek, z yönünde oluşacak gerilme yığılmalarının azaltılması hedeflenmiştir. FEM analizleri altında dolu model gerilme yığılmalarının oluştuğu bölge tespiti için belirlenen gerilme sınırları von-Mises için 8 MPa ve z normal gerilmesi için de 0,7 MPa olarak belirlenmiştir. Belirlenen sınır değerler toplam parça ağırlığı için belirlenen %50 hedef seviyesine aşmayacak ve gerime yığılmalarının oluştuğu bölgeleri karakterize edebilecek bir sınır değer olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. TS EN 1335 standardı test yükleri FEM analizlerine göre gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerin görselleri Şekil 3.7. ve Şekil 3.8'de görülmektedir.

900 N test yükü için, malzemenin dolu olarak tanımlanması gereken bölgeler Şekil 3.9'da görülmektedir. Belirlenen sınır değerleri 900 N yük için çalışmada kullanılabilecek sonuçlar elde edilmiştir. 450 N ön, 400 N açılı ve 400 N yan test yükleri için belirlenen sınır değerleri dolu bölge tespit çalışması için Şekil 3.10'da görüldüğü gibi yüksek kalmış ve bu üç yük için yoğunlaştırılması gereken alan tanımlaması yapılamamıştır.



Şekil 3.7. 900 N dik yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 8 MPa ve üzeri, z normal 0,7 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri)



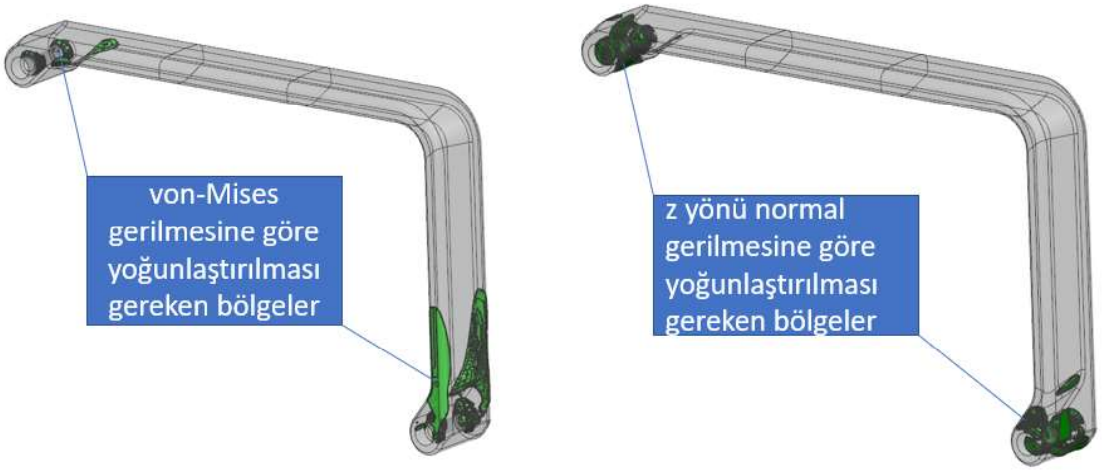
Şekil 3.8. 450 N ön, 400 N açılı ve 400 N yan yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 8 MPa ve üzeri, z normal 0,7 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri)

450 N ön, 400 N açılı ve 400 N yan test yükleri için sınır gerilme değerlerinin düşürülmesi ile daha büyük alan tanımlaması yapılabilecek ve bu şekilde bu yükler için ihtiyaç duyulan dolu alan tanımlaması daha uygun bir sonuç vereceği gözükmektedir. Bu sebeple bu üç test şartı için gerilme sınır değerleri von-Mises gerilmeleri için 5 MPa ve z normal

gerilimleri için 0,4 MPa'a düşürülmüştür. Bu sınır değerlerine göre yoğunlaştırılması gereken bölgeler Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de görülmektedir. Belirlenen yeni sınır değerleri daha uygun sonuç verdiği için çalışmaya bu sonuçlar üzerinden devam edilmiştir.



Şekil 3.9. 450 N ön yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 5 MPa ve üzeri, z normal 0,4 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri)



Şekil 3.10. 400 N yatay yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 5 MPa ve üzeri, z normal 0,4 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri)



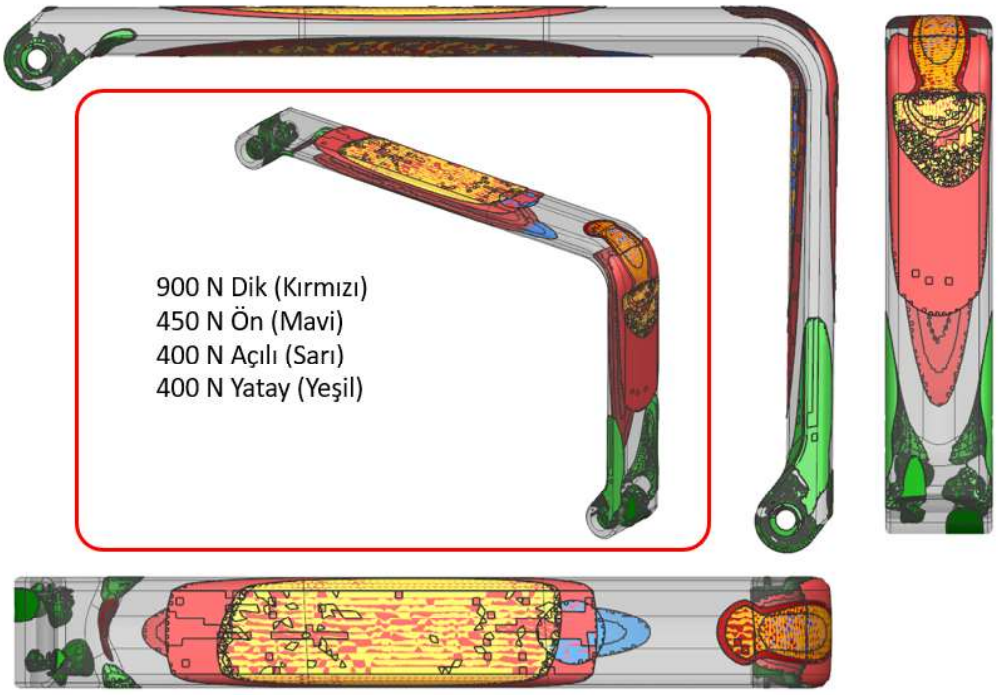
Şekil 3.11. 400 N açılı yük için kolçak modelinin yoğunlaştırma ihtiyacı olan bölgeleri (von-Mises 5 MPa ve üzeri, z normal 0,4 MPa ve üzeri gerilme bölgeleri)

750 N dik yük için gerim yığılmaları 900 N dik ile aynı karaktere sahip olduğundan 900 N dik yük için tanımlanacak dolu alanlar 750 N dik yük için yapılacak çalışmayı kapsayacaktır. Bu sebeple 750 N yük bölgesel yoğunluklu kolçak model çalışması için kapsam dışı tutulmuştur. Dolu model yüklere göre gerilme değerleri ve bölgesel yoğunluk için tanımlanan sınır gerilme değerleri Çizelge 3.3'te toplu olarak verilmiştir. Tüm test yüklerinin sınır değerlerine göre kolçak modeli üzerindeki yoğunluk ihtiyacı olan bölgeleri Şekil 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bölgesel yoğunluk tespiti için analiz gerilme sınırları

Test	Max von-Mises Gerilmesi (MPa)	Max z normal Gerilme (MPa)	von-Mises Gerilme sınırı (MPa)	z normal Gerilme sınırı (MPa)
900N Üst	27	2	8	0,7
450N On	10	2	5	0,4
400N Yatay	17	10	5	0,4
400N Açılı	12	1	5	0,4
750N Üst	22	2	Kapsam dışı	Kapsam dışı

Analiz sonuçlarına göre model yoğunlaştırılması için belirlenen bölgeler 'ANSYS' yazılımı üzerinden '.stl' uzantısı olarak alınmış ve bölgesel yoğunluklu nihai kolçak modeli oluşturmak için referans alınmak üzere 'Siemens NX' yazılımına aktarılmıştır.



Şekil 3.12. Tüm test yüklerinin sınır değerlerine göre kolçak modeli üzerindeki yoğunluk ihtiyacı olan bölgeleri

Kolçak modeli simetrik bir yapıya sahip olup, aynı kolçak modeli koltuk gövdesinin sağ ve sol her iki yönüne de montajlanabilmektedir. Bu durumda 400 N açılı ve 400 N yatay yükleri sağ tarafa montajlanan kolçağa ve sol tarafa montajlanan kolçağa farklı gelmektedir. Bir kolçağa yük sol taraftan gelir iken diğer kolçağa sağ tarafından gelmektedir. Bu sebeple kolçak modelini simetrik hale getirebilmek için; 400 N açılı ve 400 N yan yükleri için ihtiyaç duyulan yoğunlaştırılmış bölgelerin yükün karşıt yönden gelme durumları da dikkate alınarak oluşturulmuştur. Tüm test yüklerine göre yoğunluk ihtiyacı olan bölgelerin ara geçişleri de gerilme yığılmaları olmaması için yumuşatılarak kolçak modeli oluşturulmuştur. Kolçak modelinde yüklere göre gerilmenin yüksek olduğu bölgeler dolu olarak tanımlanmıştır. Diğer bölgeler ise homojen yoğunluklu çalışmadaki gibi düşük bir yoğunluk oranı ile kolçak modeli oluşturulmuştur. İç dolgu için et kalınlığı 0,8 mm olarak seçilmiş ve bu kalınlığa göre %50 ağrılık azalması hedefini aşmayacak şekilde bir hücre boyutu tanımlaması yapılarak nihai bölgesel yoğunluklu kolçak modeli elde edilmiştir.

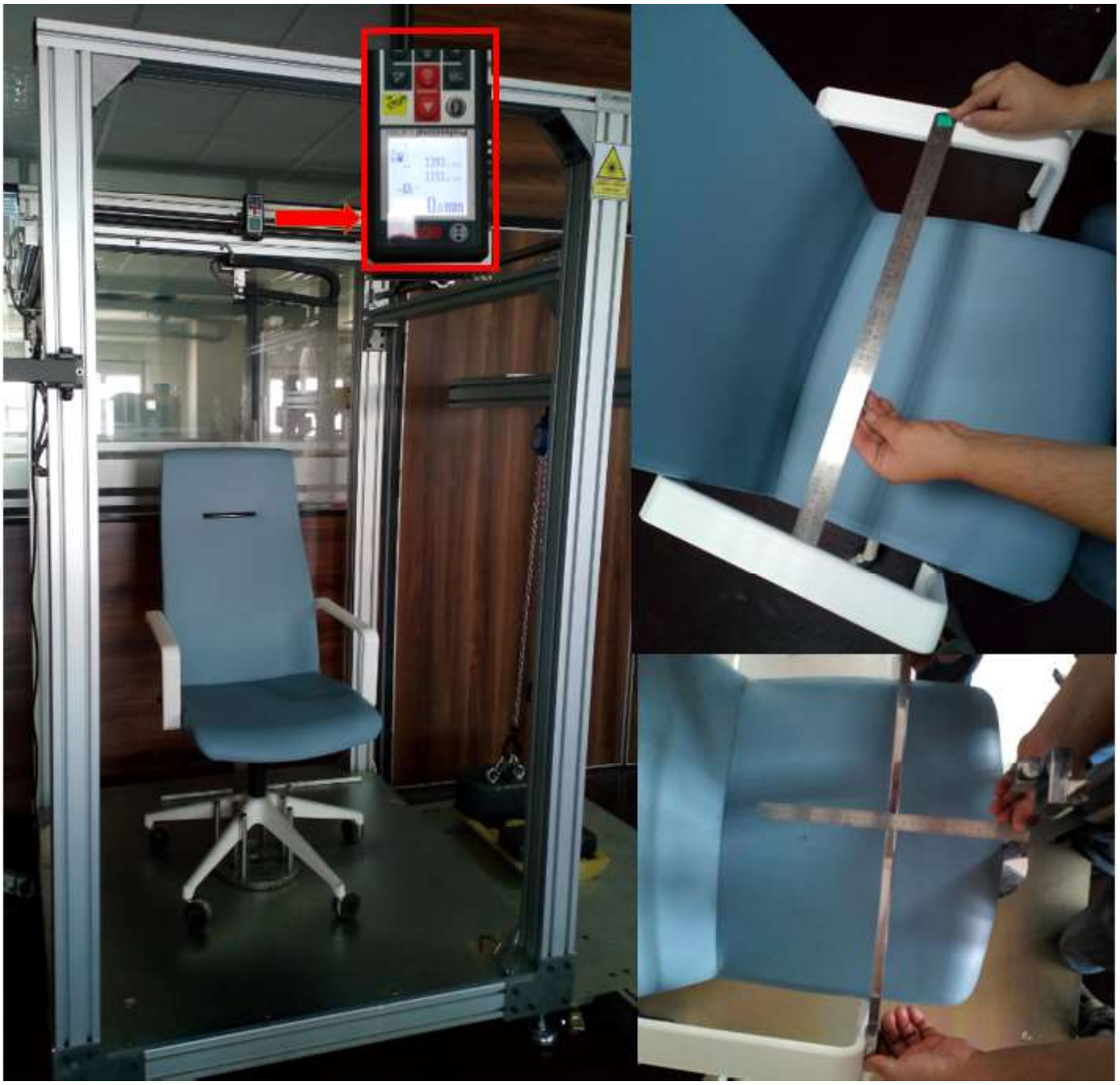
3.5. Nihai Kolçak Modelinin Üretimi ve Doğrulama Testleri

Optimizasyon çalışması sonrası en uygun sonuçların elde edildiği bölgesel yoğunluklu kolçak modelinin üretim ve doğrulama testleri yapılması için seçilmiştir. Seçilen kolçak modelinin çekme ve eğme numunelerinde olduğu gibi model Şekil 3.4'teki FDM katmanlı imalat cihazı kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim için de yine çekme ve eğme numuneleri için kullanılan Çizelge 3.2'deki parametreler kullanılmıştır. Optimize edilmiş kolçak modelinin üretimi ve elde edilen model görseli Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.13. Optimize edilmiş kolçak modelinin FDM yöntemi ile üretimi

Kolçak modelinin doğrulama testleri için Şekil 3.1'deki 'Bürosit Büro Donanımları San. ve Tic. A.Ş.' firmasının 'Dorado' ürünü TS EN 1335 doğrulama testleri 'Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı'nda yer alan; Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'daki test ekipmanları ile gerçekleştirilmiştir. Ürünün kolçak kullanım uzunluğu, kolçak kullanım genişliği, kolçaklar arası mesafe direk ölçüm aletleri ile yapılır iken, kolçak oturak üzerinden yüksekliği ölçümü 65 kg'lık bir yük altında yapılması gerektiği ve kolçak oturak ön kenarından uzaklığı da yardımcı ekipmanlar gerektirdiği için bu ölçümler Şekil 3.14'teki ölçüm ekipmanı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. TS EN 1335 ölçüsel kontrol cihazı (Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı)

TS EN 1335 standardı kolçak doğrulama testleri için 900 N dik test yükü 400 N açılı dinamik test yükü sonrası, 750 N dik test yükü de yine 400 N açılı dinamik test yükü öncesi yapılmasını istemektedir. Diğer testlerin yapılış sıralaması için bir sınırlama getirilmemektedir. Ürünün test uygulamasına 400 N yan yük testi ile başlanmıştır. Bu test kolçak kullanım yeri orta noktasından, yatay doğrultuda, 400 N yük altında 10 s bekleme yapılacak şekilde ve 10 tekrar olarak Şekil 3.15'teki kolçak içten açma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. TS EN 1335 kolçak içten açma test cihazı (Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı)

Doğrulama testlerine 450 N ön yük ile devam edilmiştir. Bu test yükü kolçak ön kenarından 75 mm geride olacak şekilde, düşey yönde, 450 N yük altında 10 s bekleme yapacak şekilde ve 5 kez tekrar edilerek Şekil 3.16'daki test cihazı ile yapılmıştır. Doğrulama testlerinde üçüncü olarak 750 N test yükü; kolçak ön kenarından 100 mm ve üzeri bir yerden (kolçak geometrisince en riskli olacak bölgeden), 750 N dik test yükü altında 10 s bekleyecek şekilde ve 5 kez tekrar edilerek Şekil 3.16'daki test cihazı ile yapılmıştır. 400 N açılı test yükü 750 N dik yük testi sonrası tanımlandığından çalışmaya bu test ile devam edilmiştir. 400 N açılı test uygulaması kolçak ön kenarından 100 mm ve üzeri bir mesafeden düşey doğrultuya 10° açı yapacak şekilde, 400 N yük altında 1 s bekleme yapacak ve 60000 defa tekrar edecek şekilde Şekil 3.16'daki test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kolçak doğrulama testlerinin en son uygulaması ve en yüksek yük değerine sahip testi olan 900 N dik test yükü de 750 N dik yük test uygulaması ile benzer şekilde yapılmış, sadece uygulama yükü olarak 900 N yük değeri kullanılmıştır.



Şekil 3.16. TS EN 1335 kolçak dik, ön ve açılı test uygulama cihazı (Ermetal A.Ş. - Arge Merkezi Ofis Mobilyaları Test Laboratuvarı)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kolçak ürün doğrulama çalışması için araştırma çalışmaları sonrası ilk olarak çekme ve eğme numune üretimi ve testleri yapılmıştır. Bu sonuçlar referans alınarak kolçak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışması sonucu en uygun alternatif model çalışması FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilip ürün doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Çekme Eğme Test Sonuçları

Çekme ve eğme testleri FDM katmanlı imalat yöntemi yöne bağlı farklı özellik göstermesinden dolayı dikey, en ve yatay olacak şekilde üç farklı yönde üretimi yapılıp testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ISO 527-1:2019 standardına göre ve eğme testleri ise ISO 178:2019 standardına göre yapılmıştır. Yapılan testler ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

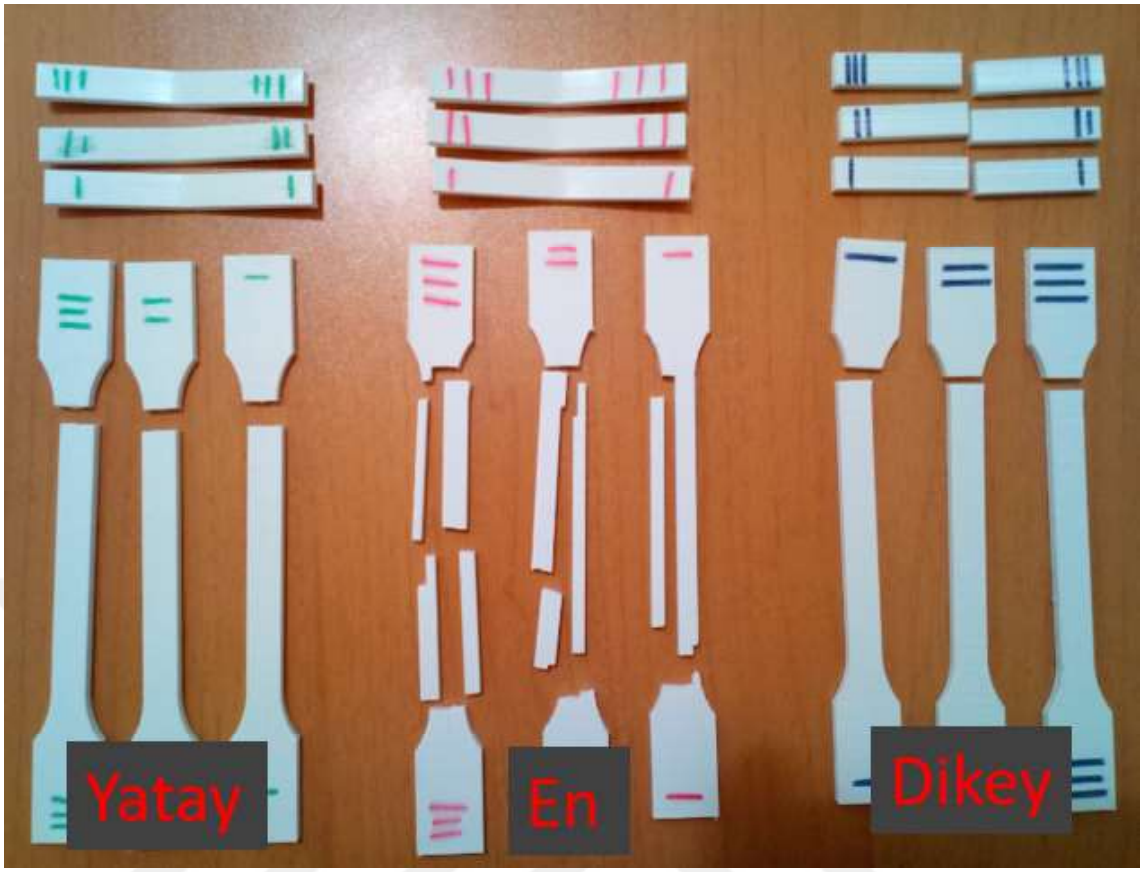
Çizelge 4.1. PLA yöne bağlı çekme dayanım ve modül sonuçları

Numune	Dikey Yöndeki Çekme Dayanımı σ (MPa)	Dikey Yöndeki Çekme Modülü E (MPa)	Enine Yöndeki Çekme Dayanımı σ (MPa)	Enine Yöndeki Çekme Modülü E (MPa)	Yatay Yöndeki Çekme Dayanımı σ (MPa)	Yatay Yöndeki Çekme Modülü E (MPa)
N1	16,5	2861,2	59,3	4118,4	66,5	3313,0
N2	16,7	2891,2	59,7	2911,2	67,5	3358,8
N3	14,8	3055,8	60,6	3148,0	64,7	3158,9
Ort.	16,0	2936,1	59,9	3392,5	65,9	3276,9
Std.	1,5	148,2	0,9	904,6	1,5	148,1

Çizelge 4.2. PLA yöne bağlı eğme dayanım ve modül sonuçları

Numune	Dikey Yöndeki Eğme Dayanımı σ (MPa)	Dikey Yöndeki Eğme Modülü E (MPa)	Enine Yöndeki Eğme Dayanımı σ (MPa)	Enine Yöndeki Eğme Modülü E (MPa)	Yatay Yöndeki Eğme Dayanımı σ (MPa)	Yatay Yöndeki Eğme Modülü E (MPa)
N1	27,0	2576,0	108,1	3076,8	105,7	3121,1
N2	27,8	2685,0	107,7	3057,7	103,3	3222,0
N3	29,2	2603,4	108,0	3040,3	104,6	3113,9
Ort.	28,0	2621,5	107,9	3057,9	104,5	3152,3
Std.	1,4	80,2	0,3	25,1	1,7	85,5

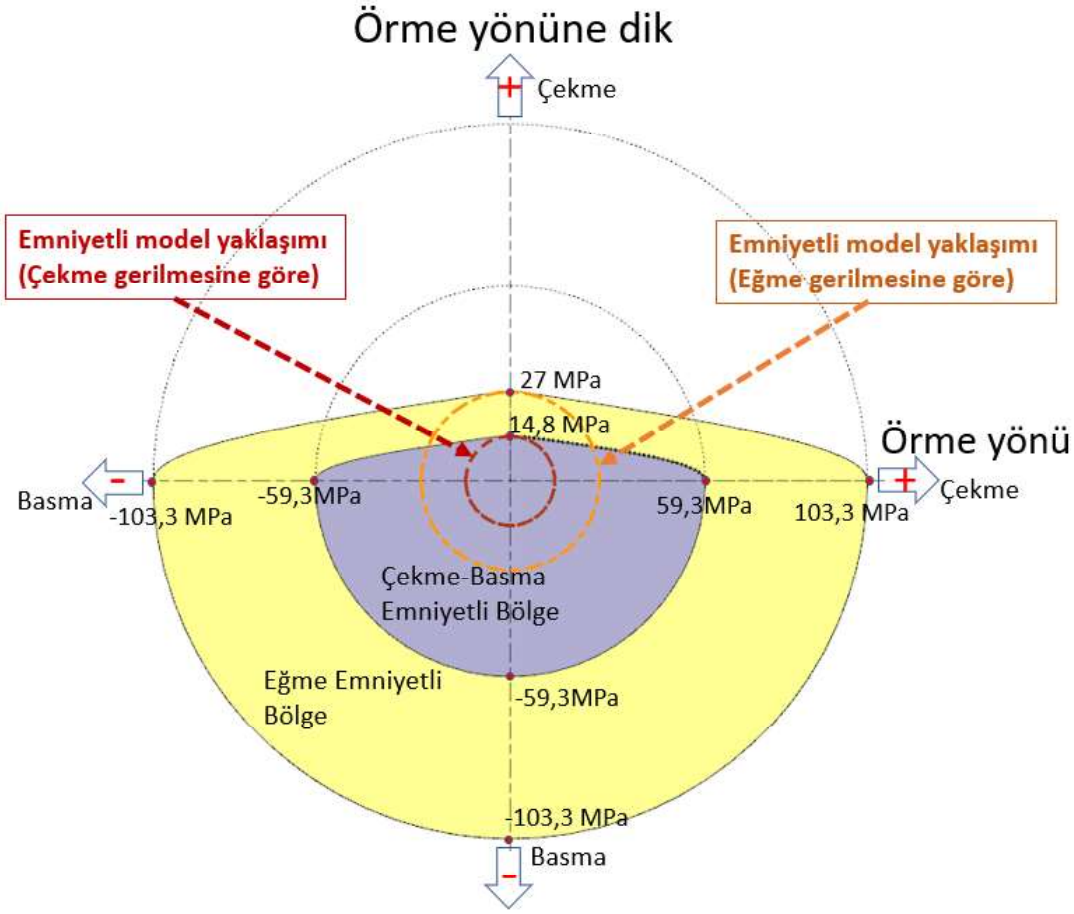
Çekme test sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımı yatay yönde üretilen numunelerde 65,9 MPa ± 1,5 MPa ortalaması ile elde edilmiştir. Enine doğrultusu'nda üretilen numunelerin ortalama çekme değeri 59,9 MPa ± 0,9 MPa olarak gerçekleşmiştir. En düşük çekme dayanımı değeri, dikey yönünde üretilen numunelerde gerçekleşmiş olup 16,0 MPa ± 1,5 MPa'dır. Çekme numunelerinde yatay yönde ve dikey yöndeki çekme numuneleri test sonucunda doğrusal ve tek noktadan kırılır iken enine yöndeki çekme numuneleri Şekil 4.1'de görüldüğü gibi çoklu parçalanma şeklinde sonuçlanmıştır. Bu eğilim gerilimlerin en dış hatlarda oluşması ve en yönü çekme numunelerinde kenar hattında çok fazla takım yolu kesişmesi olmasından dolayı çekme numunesinde çentik etkisi gösterdiği düşünülmektedir. Literatür araştırmasından da 'en yönü' doğrultusunda üretilen numuneler ile benzer takım yoluna sahip çalışmalar için; çekme numunelerinin kırılma şekillerinde değişkenliklerin olduğu belirtilmiş ve eş merkez yörüngeli takım yoluna sahip yatay yöndeki numunelerin daha düzenli ve doğrusal bir kırılma eğiliminde olduğu belirtilmiştir (Wendt ve ark. 2017). Yapılan çalışmada da yatay yönde üretilen numunelerin kırılma eğilimleri literatür çalışması ile benzer şekilde daha doğrusal bir kırıma şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme ve eğme test numunelerinin test sonucu görselleri

Eğme testlerinde en yüksek eğilme dayanımı yatay doğrultuda üretilenler değil bu sefer enine doğrultusunda üretilmiş numunelerde 107,9 MPa ± 0,3 MPa olarak elde edilmiştir. Yatay doğrultuda üretilen numunelerde de 104,5 MPa ± 1,7 MPa olarak gerçekleşmiştir. En düşük eğilme dayanımı çekme numunelerinde olduğu gibi yine dikey yöndeki üretilen numunelerde 28 MPa ± 1,4 MPa olarak elde edilmiştir. Çekme ve eğme testleri için elastisite modülü ortalaması 3073 MPa olarak saptanmıştır. Yalnız en yönünde üretilen bir çekme numunesinde bu değer 4118,4 MPa değerine ulaşırken dikey doğrultuda üretilmiş bir eğme numunesinde de 2576 MPa olarak tespit edilmiştir. Eğme ve çekme numuneleri için en ve yatay doğrultuları model oluşturma yörüngeleri birbirine yakın olduğundan sonuçlar birbirine yakın gerçekleşmiştir. Fakat çekme testlerinde 'en yönü'ndeki numunelerde örme yönünden kaynaklı dış hatta keskin kenarlar bulunmakta bu geometrik durum kırılma geometrisini de etkilediği düşünülmektedir. 'Dikey yön' model oluşturma yörüngesindeki farklılık çekme ve eğme test sonuçlarında çok açık bir şekilde görülebilmektedir. Çekme ve eğilme dayanımlarında da dört kata kadar farklar

oluşabilmektedir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilen parçalar için, model oluşum yörüngesi, mekanik sonuçlara en çok etkisi olan parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple FDM yöntemi için model oluşturmak için yapılacak konumlandırmanın uygun seçilmesinin çok önemli olduğu tespit edilmiştir. 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, eğme testi esnasında numunelerin alt bölgesinde çekme yükü oluşurken üst bölgesinde basma yükü oluşması sebebi ile 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. Park (2013)'ün yaptığı çalışmada FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilen ve basma yüküne maruz kalan malzemeler için dikey (örme yönüne dik) yöndeki mekanik performansı örme yönü doğrultusu kadar iyi sonuçlar vermektedir. Bu sonuca göre örme yönüne dik olan z yönü doğrultusunda en düşük 14,8 MPa olarak elde edilen çekme dayanımı, basma yükü durumunda 59,3 MPa değerine kadar emniyetli olacağı öngörülmektedir. Yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçların daha kolay anlaşılabilir olabilmesi için Şekil 4.2'deki yöne ve yük durumuna göre emniyetli bölge alan tanımlamaları yapılmıştır. Yatay ve enine doğrultuları aralarında çok küçük farklılıklar olmakta ve elde edilen sonuçlarda birbirine çok yakın gerçekleşmektedir. Yatay ve enine doğrultularında model oluşturma yörüngeleri boyuna doğrultuda olduğu için Şekil 4.2'deki 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. (2019) 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 her yönde sağlanacağı emniyetli model yaklaşımının çekme ve eğme gerilmesine göre kullanılabilir emniyetli bölge tanımlamaları da Şekil 4.2'deki elde edilen grafiğe eklenmiştir.



Şekil 4.2. Yöne Bağlı Mekanik Özelliklerin Tahminleri Dairesi (YMETAD)

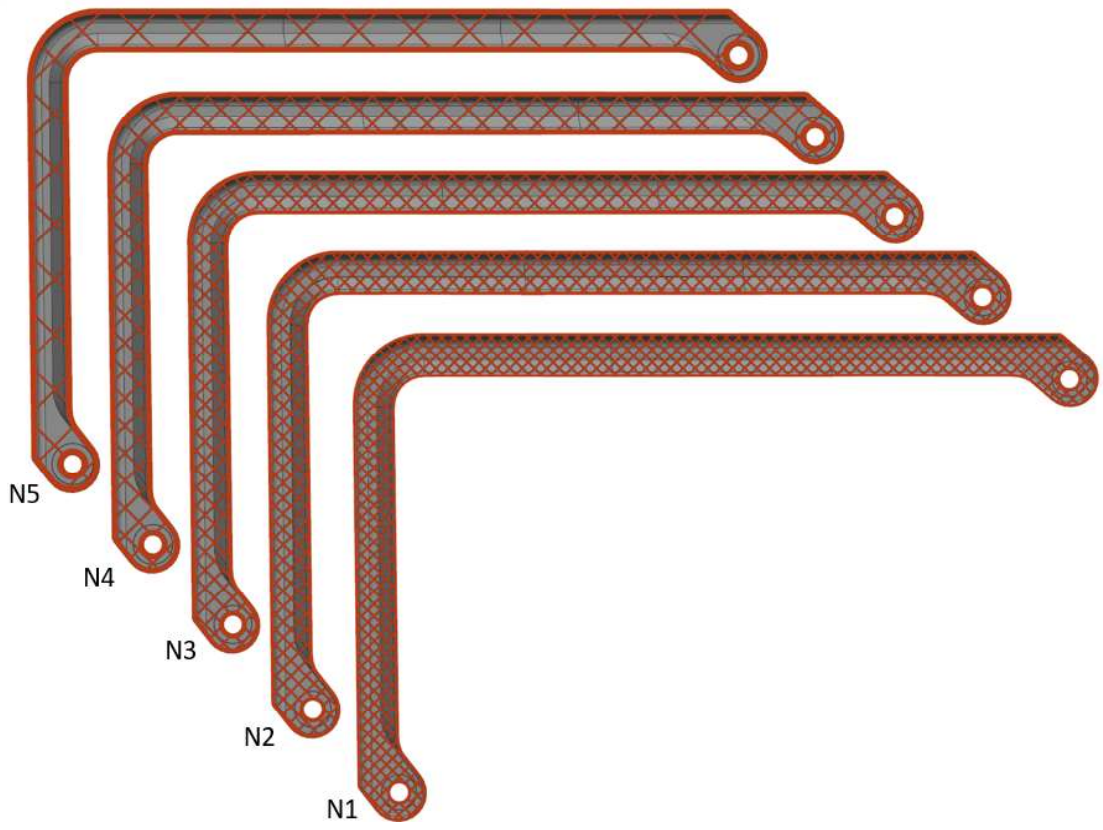
4.2. Optimizasyon Çalışması Sonucu Elde Edilen Kolçak Modelleri

4.2.1 Homojen Yoğunluklu Kolçak Model Sonuçları

Optimizasyon çalışmasına referans modellerin oluşturulması için belirlenen hücresel boyut değerleri ile kolçak modelleri arasında en fazla 7 g ağırlık farkı oluşmuştur. Çalışması yapılan alternatiflerin ağırlık, dış kabuk ve iç dolgu yazdırma genişlikleri ve hücresel yapı boyutsal değerleri aşağıdaki Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te de verilmiştir. Aynı şekilde homojen yoğunluklu optimizasyon çalışması için oluşturulan kolçak model alternatifleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Kolçak modelinin 0,8 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri

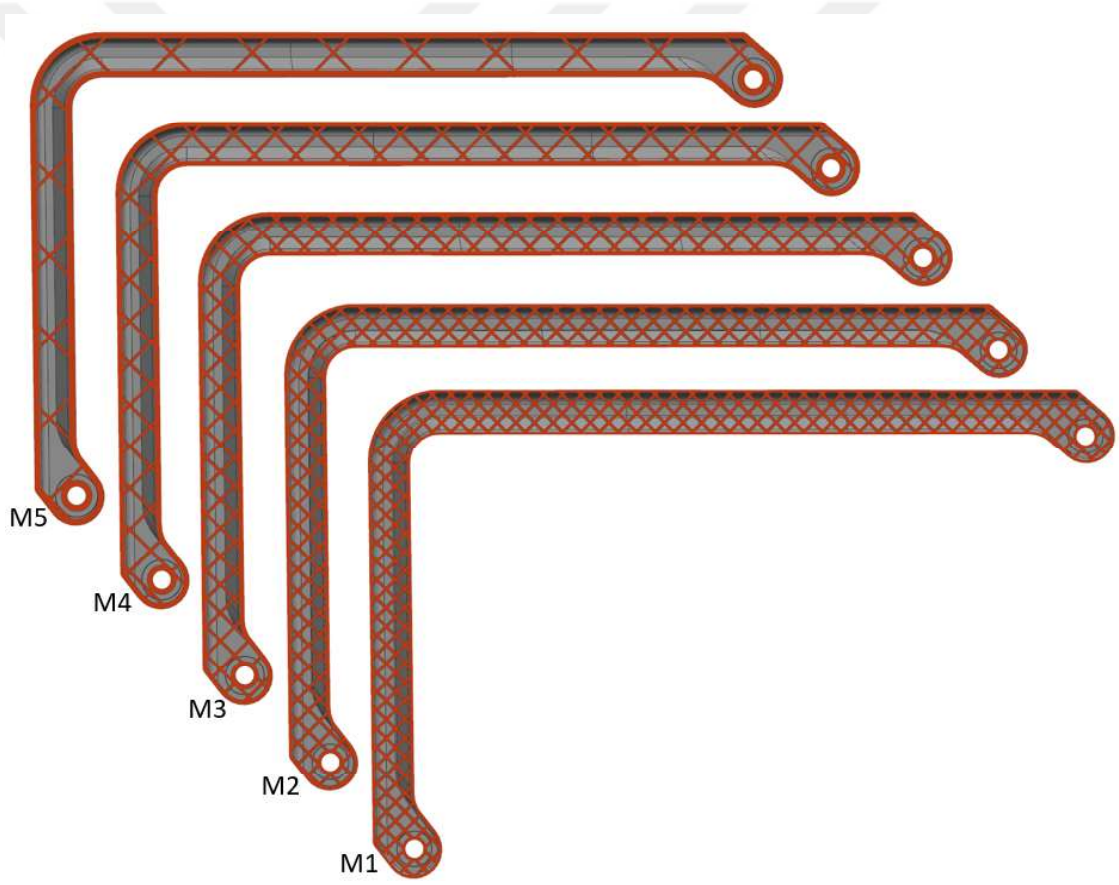
Numune	Dış Kabuk Genişliği (mm)	İç Dolgu Genişliği (mm)	Hücresel Boyut (mm)	Ağırlık (g)
Dolu Model	-	-	-	521
N1	1,2	0,8	4	250
N2	1,6	0,8	5	244
N3	2	0,8	6	249
N4	2,4	0,8	9	244
N5	2,8	0,8	18	244



Şekil 4.3. Kolçak modelinin 0,8 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri

Çizelge 4.4. Kolçak modelinin 1,2 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri

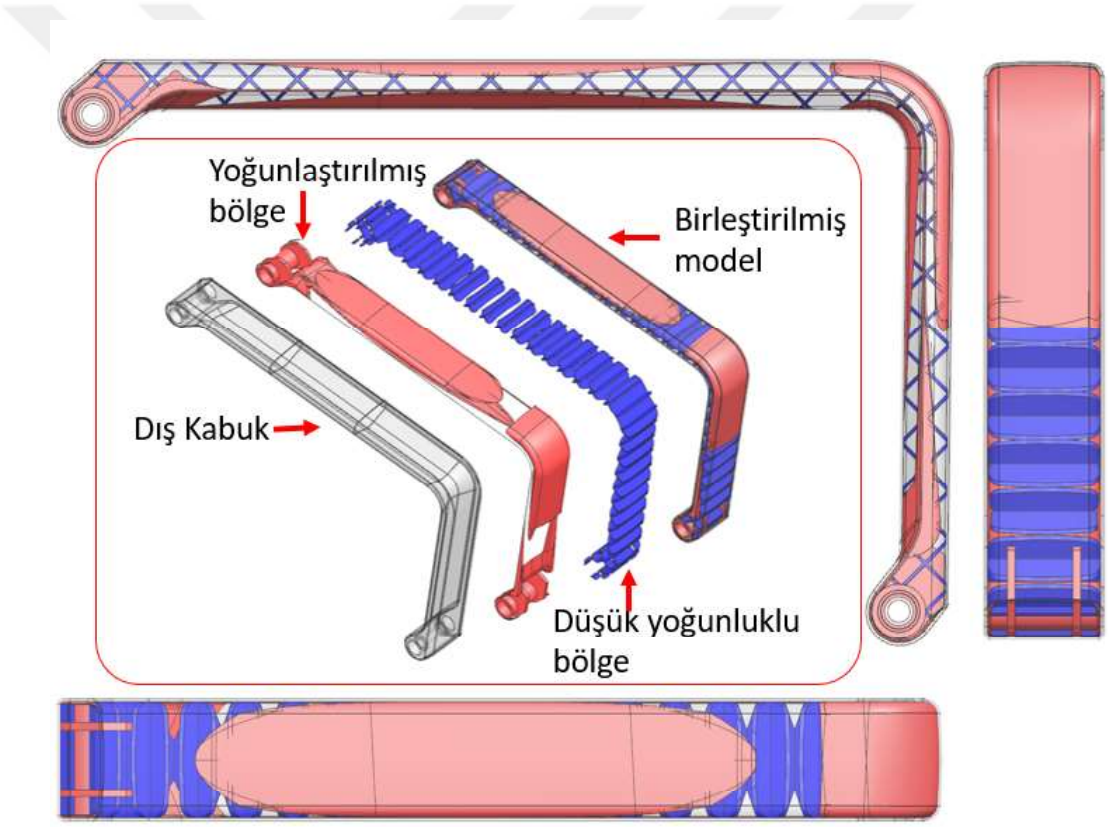
Numune	Dış Kabuk Genişliği (mm)	İç Dolgu Genişliği (mm)	Hücresel Boyut (mm)	Ağırlık (g)
Dolu Model	-	-	-	521
M1	1,2	1,2	6	250
M2	1,6	1,2	7	251
M3	2,0	1,2	9	248
M4	2,4	1,2	13,5	244
M5	2,8	1,2	26	245



Şekil 4.4. Kolçak modelinin 1,2 mm genişliğindeki homojen dolgulu alternatifleri

4.2.2 Bölgesel yoğunluklu kolçak model sonuçları

Bölgesel yoğunluklu kolçak modeli çalışması için her bir test yükü için yapılan FEM analizlerine göre bölgesel yoğunlaştırma için belirlenen gerilme sınır değerlerinin üzerinde kalan bölgeler birleştirilerek bu bölgeler kolçak modeli için dolu olarak tanımlanmıştır. Gerilme değerinin düşük olduğu alanlar ise kolçak modeli için belirlenen % 50 ağırlık azaltma hedefine ulaşabilmek için 13 mm hücresel boyut ve iç dolgu kalınlığı da 1,2 mm olacak şekilde bir tanımlama yapılmıştır. Yapılan çalışma ile bölgesel yoğunluklu kolçak modeli 249 g olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışma adımları şematik olarak Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Bölgesel yoğunluklu kolçak modelinin iç yapısı

4.3. FEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

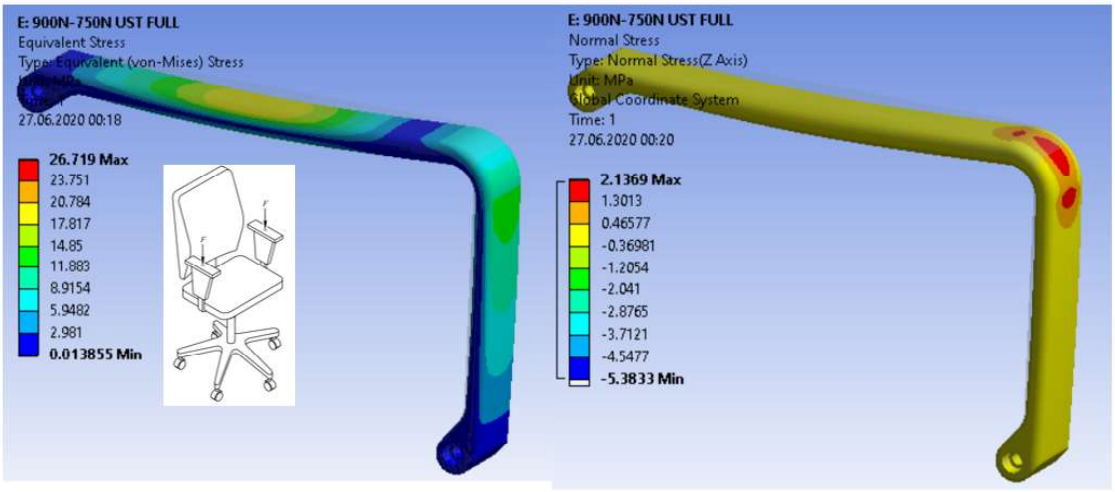
Yapılan testlerde çekme ve eğme modül değerleri için yöne bağlı büyük farklılıkların oluştuğu gözlemlenmiştir. Analizlerde test edilecek yüklerin farklı doğrultularda olması

sebebi ile oluşan gerilimlerde çekme, eğme, basma, gibi farklı karakterde olacaktır. FEM analizleri emniyetli yaklaşımına göre değerlendirilecek olup, malzeme tanımı da lineer izotrop olarak yapılmıştır. Çekme ve eğme test sonuçlarından elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olması sebebi ile FEM analizleri için test sonuçlarından elde edilen modül değerlerinin ortalaması olarak bir elastisite modülü (E) tanımlaması yapılmıştır. Poisson oranı literatürden alınmış, PLA malzeme yoğunluk değeri için de üretici verileri kullanılmıştır. Emniyetli gerilme için dikey yön çekme ve eğme sınırları çekme testlerinden elde edilen en düşük değere göre tanımlanmıştır. Diğer 'yatay' ve 'en' doğrultuların ayrımı büyük boyutlu ve farklı geometrik yapılara sahip modellerde net yapılamayacağı için bu iki yönün en zayıf mekanik sonuçlarına göre emniyetli gerilme sınır tanımlaması yapılmıştır. Yatay ve enine doğrultu örme yönü ve dikey doğrultuda örme yönüne dik olarak tanımlaması yapılmıştır. FEM analizleri için; model değerlendirme kriterleri ve model tanımlama parametreleri toplu olarak Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. PLA malzeme FEM analiz verileri ve kontrol parametreleri

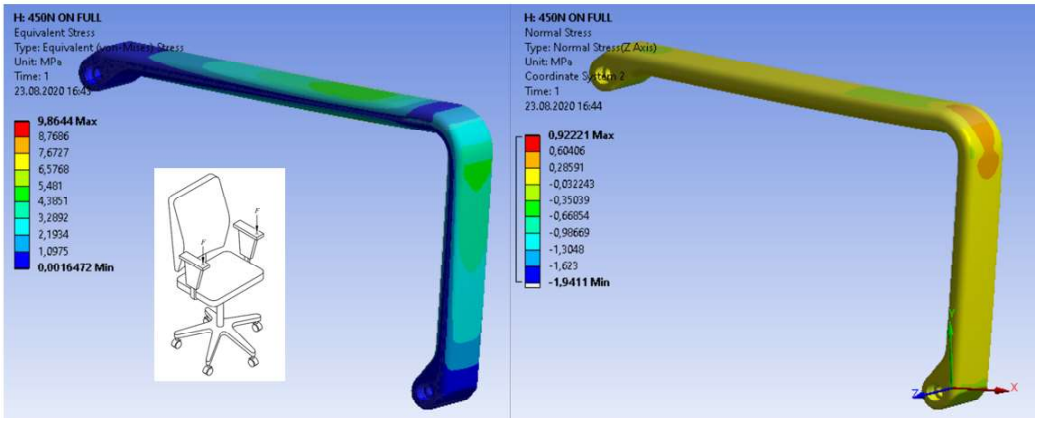
Parametreler	**Değer**	**Referans**
Yoğunluk (g / cm^3)	1,24	Anonim 2020g
Poisson oranı	0,36	Farah ve ark. 2016
Ortalama Elastisite Modülü (E) MPa	3073	Testler
Örme Yönüne Dik Çekme Dayanımı (σ) MPa	14,8	Testler
Örme Yönüne Dik Basma Dayanımı (σ) MPa	59,3	Testler ve (Park 2013)
Örme Yönüne Dik Eğmedeki Çekme Dayanımı (σ) MPa	27	Testler
Örme Yönüne Dik Eğmedeki Basma Dayanımı (σ) MPa	59,3	Testler ve (Park 2013)
Örme Yönünde Çekme Dayanımı (σ) MPa	59,3	Testler
Örme Yönünde Basma Dayanımı (σ) MPa	59,3	Testler ve (Park 2013)
Örme Yönünde Eğmedeki Çekme Dayanımı (σ) MPa	103,3	Testler
Örme Yönünde Eğmedeki Basma Dayanımı (σ) MPa	103,3	Testler

En düşük mekanik özelliklerin her yönde sağlanacağı emniyetli model yaklaşımına göre kolçak analizleri değerlendirmeye başlanmıştır. Tam dolu kolçak modelinin ilk olarak 900 N dik yük altında FEM analizi yapılmış olup sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. (Emniyetli model yaklaşımı için, örme yönüne dik olan dikey yön çekme değeri emniyetli sınır gerilme değeri olarak belirlenmiştir.) İlk olarak 900 N dik test yükleme durumu için; FEM analizlerinde en yüksek von-Mises gerilme değeri 26,7 MPa olarak gerçekleşmiştir. Oluşan bu gerilme değeri en zayıf yön emniyetli gerilme değeri 14,8 MPa'ın üzerinde gerçekleşmiş ve kolçak modeli bu yaklaşıma göre uygun sonuç verememiştir. Şekil 4.2'de elde edilen YMETAD'de emniyetli model yaklaşımı ile model için kullanılabilir emniyetli alanın küçük bir bölümü kullanıldığı için tam dolu kolçak modeli bile bu yaklaşıma göre emniyetli gözükmemektedir. Emniyetli model yaklaşımına göre emniyetli bölgenin daha büyük bir aralığını kullanacak bir yaklaşım önerilmektedir. Öngörülen yaklaşım şu şekildedir. von-Mises gerilme değeri örme yönüne dik çekme emniyetli gerilme değerini aştığı fakat örme yönü emniyetli gerilme değerini aşmadığı durumlar için; örme yönüne dik doğrultuda çekme yönünde oluşan z normal gerilme değerinin örme yönüne dik çekme emniyetli gerilme değerini aşmadığı durumlarında bu yaklaşıma göre emniyetli olacağı öngörülmüştür. Kolçak modeli için yapılan FEM sonucuna göre; von-Mises gerilme değeri örme yönüne dik emniyetli gerilme değerini aştığı için kolçak modeli için örme yönüne dik z yönü normal gerilme (çekme numunelerinde dikey yön çekme doğrultusu) değerlerine bakılmıştır. 900 N dik yükleme durumu için oluşan gerilmelerin yöne göre dağılımları incelendiğinde kolçak z yönü normal doğrultusunda 2,1 MPa çekme ve 5,4 MPa basma gerilmeleri olarak geçekleştiği Şekil 4.6'da görülmektedir. Örme yönüne dik basma emniyetli gerilme değeri 59,3 MPa olduğundan yapılan değerlendirmelerde z normal gerilme değerlerinin sadece çekme yönünde oluşan gerilme değerleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Kolçak modelimizde örme yönüne dik doğrultuda oluşan 2,1 MPa'lık çekme gerilmesi 14,8 MPa olan emniyetli gerilme sınırlarının altında gerçekleştiğinden kolçak modeli önerilen yaklaşıma göre uygun sonuç vermiştir. Bu yaklaşım kolçak modeli için yapılan tüm FEM analizlerinde benzer şekilde uygulanmıştır. Tam dolu kolçak modeli için yapılan FEM analizleri sonuçları von-Mises gerilmeleri ve z yönü normal gerilmeleri şeklinde Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülmektedir.

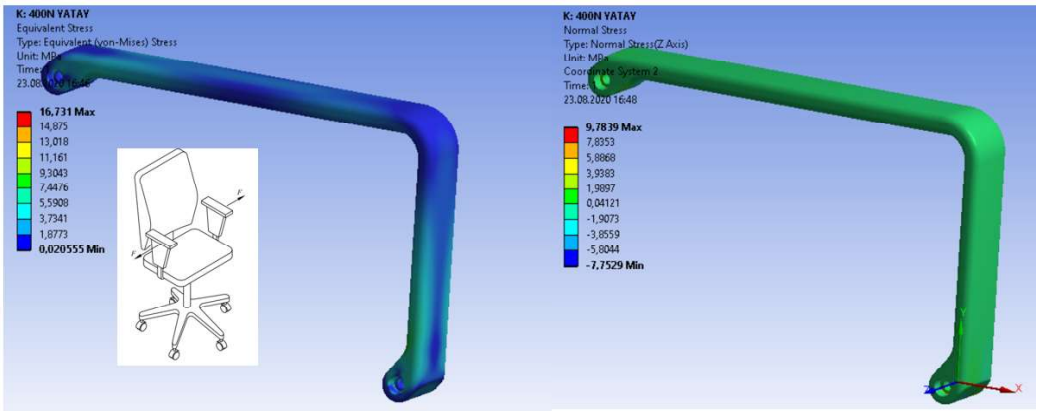


Şekil 4.6. 900 N dik test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

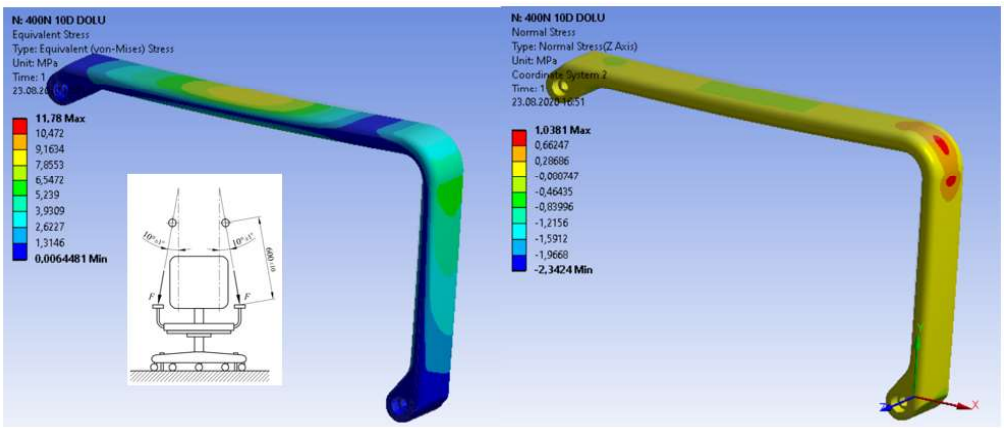
450 N ön yükleme durumu için en yüksek von-Mises gerilme değeri 9,9 MPa değeri en zayıf yön emniyetli gerilme değeri 14,8 MPa değerini geçmediği için kolçak modeli bu yük şartlarında FEM analiz sonuçlarına göre emniyetli görülmektedir. 400 N yatay yük durumu için oluşan en yüksek von-Mises gerilme değeri 16,7 MPa olarak gerçekleşmiştir. Bu değer en zayıf yön 14,8 MPa olan emniyetli gerilme değerini aştığı için z yönü normal gerilme değerine bakılmış bu yönde 9,8 MPa lik bir gerilme değeri 14,8 MPa lik emniyetli gerilme değerini aşmadığı için kolçak modeli bu yük altında da emniyetli kabul edilmiştir. 400 N açılı yükleme durumu için en yüksek von-Mises gerilme değeri 11,8 MPa değeri en zayıf yön emniyetli gerilme değeri 14,8 MPa değerini geçmediği için kolçak modeli bu yük şartlarında FEM analiz sonuçlarına göre emniyetli gözükmektedir.



Şekil 4.7. 450 N ön test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri



Şekil 4.8. 400 N yan test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri



Şekil 4.9. 400 N açılı test yükü altında kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

750 N dik test yükü, uygulama şekli olarak 900 N dik test yükü ile aynı şekilde uygulanmaktadır. 750 N test yükü değerinin 900 N test yük değerinden düşük olduğundan ve yapılan FEM analizlerinin lineer elastik bölgede statik olarak yapıldığından sonuçları etkileyecek bir veri oluşmamaktadır. Yapılan çalışmada 750 N test yükü için gerilme değerleri, sonuçları etkileyecek bir etki oluşturmadığından ilgili test yükü için sadece gerilme değerleri sunulmuştur. Gerilme değerleri de FEM analizleri lineer elastik bölgede yapıldığından FEM analizleri yapılmadan 900 N test yükü değerlerinden dönüştürülerek elde edilmiştir. Yapılan tüm FEM analizlerinde elde edilen gerilme değerleri Çizelge 4.6'te de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.6. Dolu kolçak modelinin test yüklerine göre von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

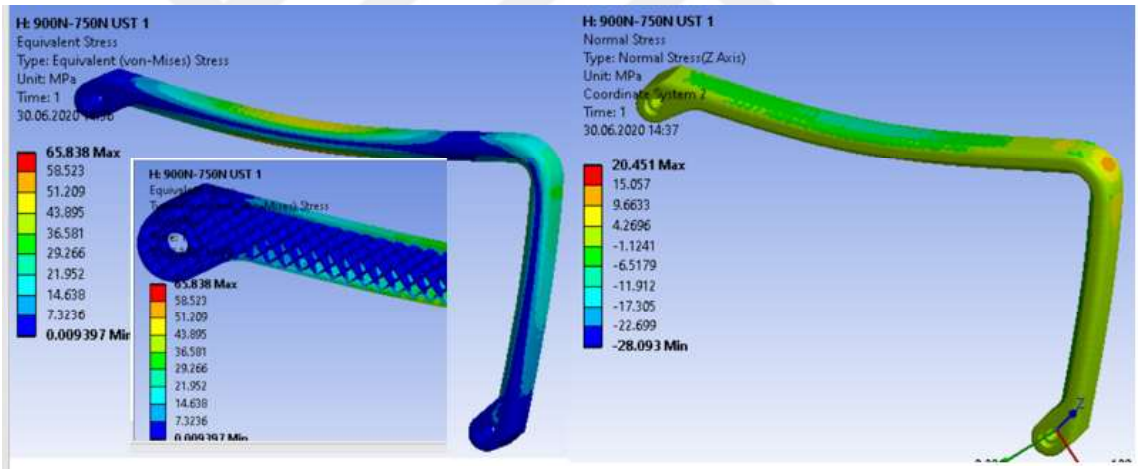
	von-Mises Gerilmesi (MPa)	z normal Gerilmesi (MPa)
900 N Üst	26,7	2,1
450 N On	9,9	0,9
400 N Yatay	16,7	9,8
400 N Açılı	11,8	1,0
750 N Üst	22,3	1,8

Tüm FEM analiz sonuçları z yönü normal gerilme ve diğer yönler von-Mises gerilme sınır değerlerini karşıladığı için belirlenen koşullara göre model emniyetli olduğu görülmektedir. Fakat FDM katmanlı imalat yöntemi uygulamalarında malzeme miktarı hem hammadde hem de üretim zamanı açısından en önemli iki parametreyi oluşturmaktadır. Öngörülen emniyetli yaklaşım durum şartlarını sağlayacak şekilde kolçak modeli malzeme miktarını azaltılması için iki farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bunlar homojen yoğunluklu iç dolgu optimizasyonu ve bölgesel yoğunluklu iç dolgu optimizasyonu çalışmalarıdır. Yapılan çalışmalar ile elde edilen en uygun alternatif seçilip nihai ürün testleri ile ürün doğrulama testlerine tabi tutulmuştur.

4.3.1 Homojen Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu FEM Analizleri

Dolu model FEM analizlerinde olduğu gibi oluşturulan alternatiflerin analizleri dolu model ile aynı sıra ile yapılmıştır. PLA malzeme mekanik özellikleri için de dolu model

için tanımlanan bkz. Çizelge 4.3'teki değerler kullanılmıştır. Yapılan analizler ile kolçak için en uygun homojen kesit yoğunluk dağılımı tespit edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak analizlerde von-Mises eşdeğer gerilme ve z yönü normal gerilme değerleri tablo haline getirilmiş. TS EN 1335 kolçak mekanik testleri için tanımlanan 900 N dik, 450 N dik ön yük, 400 N yatay, 400 N açılı analizleri ayrı ayrı yapılır iken; 750 N dik yük uygulama şekli 900 N dik yük uygulama şekli ile aynı olduğu ve analizler lineer elastik bölgede yapıldığı için; 750 N test yükü için analiz yapılmamıştır. Sonuç değerleri dolu modelde olduğu gibi 900 N dik test sonuçlarından dönüştürülerek alınmıştır. Her bir alternatif için Şekil 4.10'da 900 N için yapılmış test sonuçlarında görüldüğü gibi testleri yapılmış olup, tüm yük durumlarına ve tüm alternatiflere göre analiz sonuçları Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de özetlenerek sunulmuştur. Ayrıca, her bir test yükü altında alternatiflerin aralarındaki değişimler grafiksel olarak incelenerek farklı durumlara göre alternatiflerin gösterdiği eğilimler tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.10. 900 N dik test yükü altında homojen yoğunluklu 1,2 mm kabuk ve 0,8 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

Toplu olarak sonuçların verildiği Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'deki alternatiflerin FEM analizleri sonucunda von-Mises gerilmesi en zayıf yön emniyetli gerilme sınırı altında gerçekleşmesi durumunda renklendirme tanımlaması yapılmamış, en zayıf yön emniyetli gerilme sınırını aştığı fakat en ve yatay (örme yönünde) emniyetli gerilme sınırını aşmadığı durumlar için şartlı kabul (sarı olarak renklendirilmiştir), en ve yatay emniyetli gerilme sınırını aştığı durumlar için red (kırmızı olarak renklendirilmiş) olarak

tanımlanarak renklendirilmiştir. z yönü normal gerilmeleri ise en zayıf yön emniyetli gerilme sınırı altında gerçekleşmesi durumunda renklendirme tanımlaması yapılmamış, en zayıf yön emniyetli gerilme sınırını aştığı durumlar için red (kırmızı olarak renklendirilmiş) olarak tanımlanarak renklendirilmiştir.

Çizelge 4.7. Homojen yoğunluklu 0,8 mm genişliğindeki iç dolgulu kolçak modelleri von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

			Dolu Model	Homojen yoğunluklu 0,8 mm genişliğindeki iç dolgu alternatifleri				
				N1	N2	N3	N4	N5
Ağırlık (g)			521	250	244	249	244	244
Test Yükleri	900N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	26,7	65,8	58,6	48,8	46,9	45,9
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	2,1	20,5	12,7	14,0	15,0	19,0
	450N Ön	von-Mises Gerilmesi (MPa)	9,9	25,2	21,8	18,8	17,4	14,3
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	0,9	6,2	5,2	5,6	5,6	6,5
	400N Yatay	von-Mises Gerilmesi (MPa)	16,7	49,0	30,1	42,6	34,9	25,4
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	9,8	24,7	16,4	18,8	20,4	14,1
	400N Açılı	von-Mises Gerilmesi (MPa)	11,8	28,7	25,8	21,3	20,5	19,9
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,0	9,1	5,6	6,1	6,6	14,8
	750N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	22,3	54,9	48,9	40,7	39,1	38,3
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,8	17,0	10,6	11,6	12,5	15,9

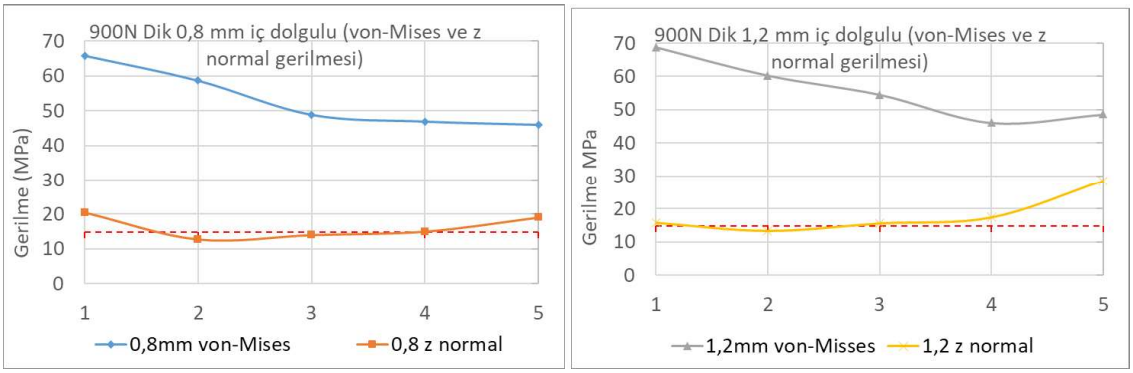
*	Şartlı Kabul		Red

Çizelge 4.8. Homojen yoğunluklu 1,2mm genişliğindeki iç dolgulu kolçak modelleri von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

			Dolu Model	Homojen yoğunluklu 1,2 mm genişliğindeki iç dolgu alternatifleri				
				M1	M2	M3	M4	M5
Ağırlık (g)			521	250	251	247,6	244	245
Test Yükleri	900N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	26,7	68,7	60,2	54,5	46,1	48,6
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	2,1	15,7	13,2	15,5	17,3	28,5
	450N Ön	von-Mises Gerilmesi (MPa)	9,9	23,4	19,1	21,4	18,0	16,7
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	0,9	6,1	4,8	5,5	6,5	8,3
	400N Yatay	von-Mises Gerilmesi (MPa)	16,7	48,0	37,9	41,4	32,8	30,9
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	9,8	27,4	15,1	18,1	14,5	13,4
	400N Açılı	von-Mises Gerilmesi (MPa)	11,8	30,0	26,3	24,2	20,2	21,3
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,0	6,9	5,8	6,8	7,6	12,5
	750N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	22,3	57,2	50,2	45,4	38,4	40,5
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,8	13,1	11,0	12,9	14,4	23,8

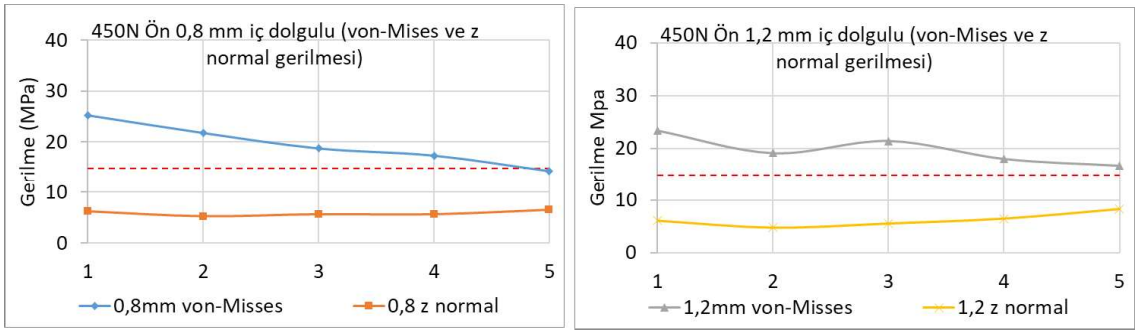
*	Şartlı Kabul		Red

En uygun alternatifin seçimi de analiz sonuç grafiklerinin incelenmesinin ardından yapılmıştır. İlk olarak kolçak modeli kesit kalınlık değişimlerinin herbir yük durumu için von-Mises ve z yönü normal gerilimlerine etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Bu şekilde her bir yük durumu için en uygun hücresel kesit kalınlığı ve en uygun dış et kalınlığı tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.11. 900 N dik yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

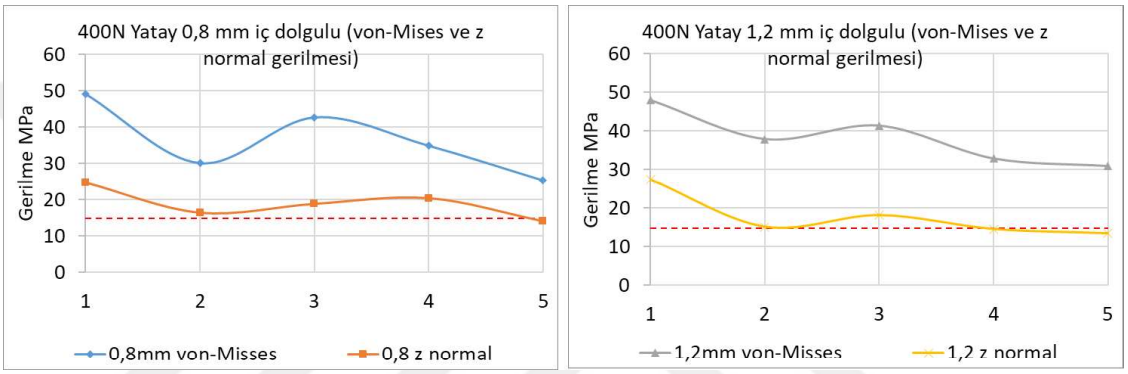
900 N dik yük durumu için oluşturulan Şekil 4.11'deki grafiklerde 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı kolçak modelleri için dış kabuk et kalınlığının artışı ilk dört numune için benzerlik göstermekte ve von-Mises gerilmelerinin düşmesine sebep olmakta olduğu gözlemlenmektedir. Fakat 2,8 mm lik dış et kalınlığına sahip numunelerde ise 0,8 mm iç hücresel kesitte gerilme değerinde düşüş azalarak devam ederken 1,2 mm iç hücresel kesit kalınlıklı modelde ise von-Mises gerilmesinde yükselme eğilimi görülmektedir. Z yönü normal gerilme değerleri ise 1,6 mm dış et kalınlıklı kolçak modellerinde en düşük gerilme değerlerine ulaşmış ve dış et kalınlığının artması ile z yönü normal gerilme değeri artış eğilimi göstermeye başlamıştır.



Şekil 4.12. 450 N ön yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

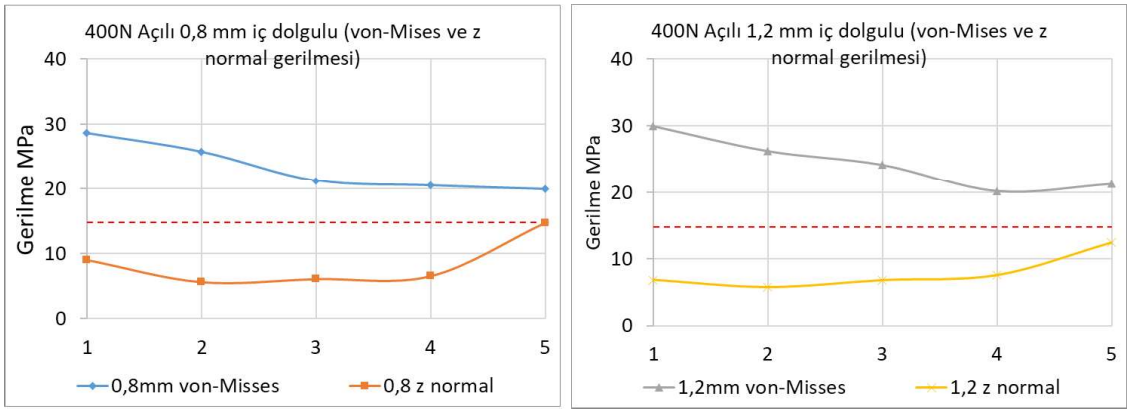
450 N ön yük durumu için oluşturulan Şekil 4.12'deki grafiklerde 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı kolçak modelleri için dış kabuk et kalınlığının artışı genel olarak von-Mises gerilmelerinin düşmesine sebep olmakta olduğu gözükmektedir. Sadece 1,2

mm hücresel et kalınlıklı model çalışmalarının 2 mm dış et kalınlıklı kolçak modeli için analiz sonuçlarında küçük bir miktar artış eğilimi olmuştur. 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı model çalışmalarında da 2,8 mm'lik dış et kalınlıklı model çalışmaları en düşük gerilme değerlerini vermektedir. Z yönü normal gerilme değerleri ise 0,8 mm hücresel et kalınlıklı model çalışmalarında önemli bir etki oluşturmamıştır. Fakat 1,2 mm hücresel kesit kalınlıklı model çalışmalarında ise 1,2 mm'den 1,6 mm dış et kalınlığına kadar gerilme değerinde düşüş izlenmekte ve ardından 2,8 mm dış et kalınlığı değerine kadar da bir yükseliş eğilimi gözlemlenmektedir.



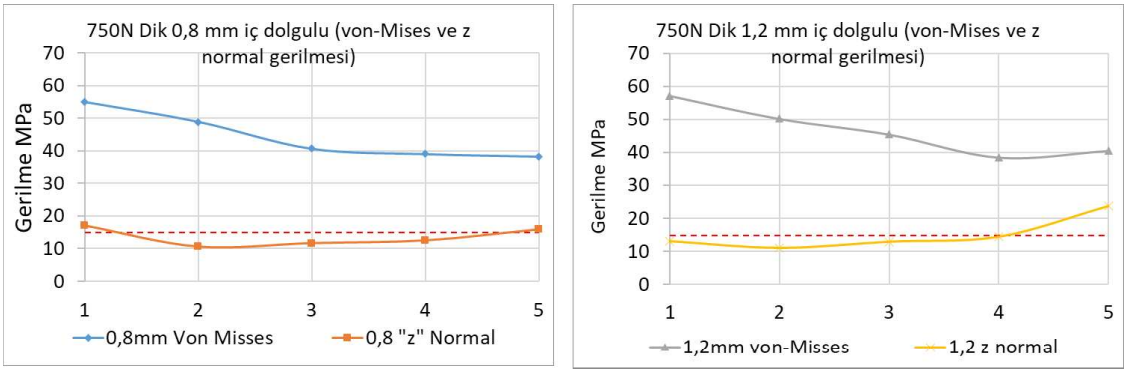
Şekil 4.13. 400 N yan yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

400 N yan yük durumu için oluşturulan Şekil 4.13'teki grafiklerde 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı kolçak modelleri için dış kabuk et kalınlığının değişimi benzer karakterde olduğu görülmektedir. Dış et kalınlığının artışı ilk olarak önemli bir etki gösterip von-Mises gerilmesinin düşür iken, dış et kalınlığının artışı devam ederken 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı modellerinin her ikisinde de tekrar von-Mises gerilmesi yükselme ve ardından tekrar bir düşüş eğilimi gözlenmektedir. Z yönü normal gerilmelerinde de çoğunlukla von-Mises gerilmesine benzer eğilimler bulunmaktadır. Grafikler incelendiğinde dış et kalınlığı 1,2 mm'den 2,8 mm ye kadar arttırılması değişken bir seyir izlemektedir. 400 N yan yük için en uygun sonuçlar 2,8 mm dış et kalınlıklı modellerde elde edilmiştir.



Şekil 4.14. 400 N açılı yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

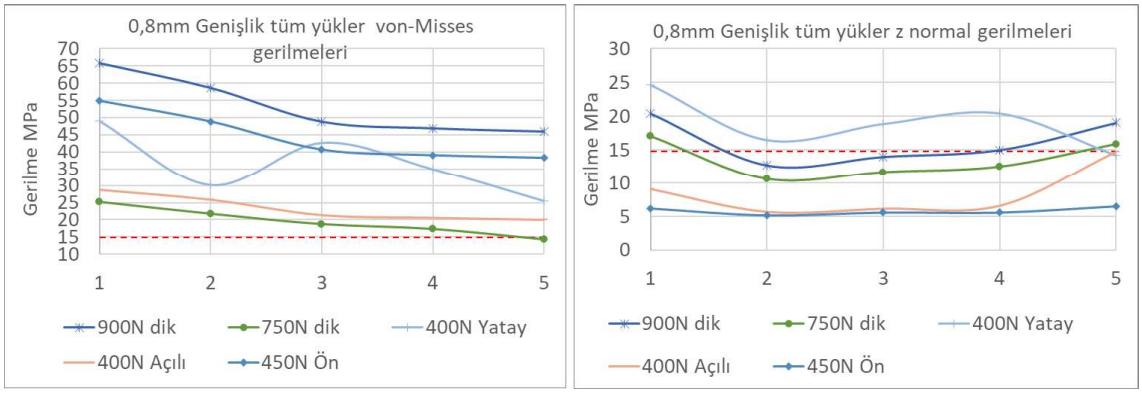
400 N açılı yük durumu için oluşturulan Şekil 4.14'teki grafiklerde 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı kolçak modelleri için FEM analiz sonuçları benzer eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Kolçak modellerinde dış et kalınlığının artması 900 N dik yük durumu ile benzer eğilimler göstermekte ve dış kabuk et kalınlığının artışı ilk dört numune için von-Mises gerilmelerinin düşmesine sebep olmakta olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 2,8 mm'lik dış et kalınlığına sahip numunelerde ise 0,8 mm iç hücresel kesitli modelde gerilme değerinde düşüş azalarak devam ederken 1,2 mm iç hücresel kesit kalınlıklı modelde ise von-Mises gerilmesinde yükselme eğilimi saptanmıştır. Z yönü normal gerilme değerleri ise 1,6 mm dış et kalınlıklı kolçak modellerinde en düşük gerilme değerlerine ulaşmış ve dış et kalınlığının artması ile z yönü normal gerilme değeri artış eğilimi göstermeye başlamıştır. Dış et kalınlığı 2,4 mm'den 2,8 mm'ye yükselmesi z yönü normal gerilmesinde ani bir yükselişe sebep olmuştur. Bu eğilim 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel kesitli modellerin ikisinde de görülmektedir.



Şekil 4.15. 750 N dik yük altında 0,8 mm ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

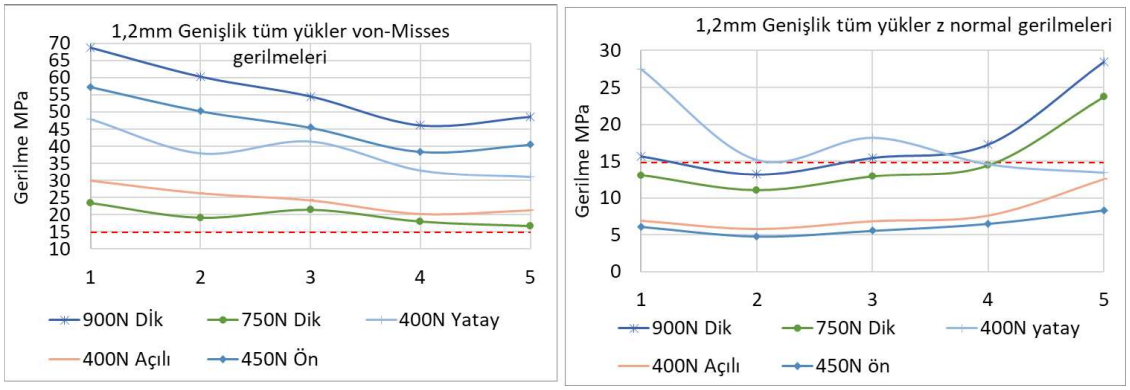
750 N dik yük durumu için oluşturulan Şekil 4.15'teki grafiklerde 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel et kalınlıklı kolçak modelleri için dış kabuk et kalınlığının artışı ilk dört numune için benzerlik göstermekte ve von-Mises gerilmelerinin düşmesine sebep olmakta olduğu saptanmıştır. Fakat 2,8 mm'lik dış et kalınlığına sahip numunelerde ise 0,8 mm iç hücresel kesitte gerilme değerinde düşüş azalarak devam ederken 1,2 mm iç hücresel kesit kalınlıklı modelde ise von-Mises gerilmesinde yükselme eğilimi gözlemlenmiştir. Z yönü normal gerilme değerleri ise 1,6 mm dış et kalınlıklı kolçak modellerinde en düşük gerilme değerlerine ulaşmış ve dış et kalınlığının artması ile z yönü normal gerilme değeri artış eğilimi göstermeye başlamıştır.

Yük durumlarına göre ayrı ayrı oluşturulan grafikler ile dış et kalınlığı değişiminin kolçak FEM gerilme sonuçlarına etkisi incelenmiştir; fakat bu incelmelerde bir yük durumu için uygun sonuç veren alternatif diğer yük durumu için kötü sonuç verebilmekte olduğundan, bu şekilde uygun alternatifin seçimi yapılamamaktadır. Uygun alternatifin seçimi içinde tüm yük durumlarının birlikte incelenebileceği grafiksel gösterim daha geniş bakış açısı kazandıracaktır. Bu sebeple 0,8 mm ve 1,2 mm hücresel kesit kalınlıklı kolçak modelleri için Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki grafikler oluşturmuştur. Homojen yoğunluklu iç dolgu yapısı için uygun alternatif seçimi de bu grafikler üzerinden yapılmıştır.



Şekil 4.16. Tüm yükler için 0,8 mm dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

0,8 mm iç dolgu kalınlıklı modellerin tüm yükler altındaki sonuçları incelendiğinde dış et kalınlığı 2,8 mm olan alternatif tüm yük koşulları için von-Mises gerilmesinin en düşük olduğu alternatif olmasına karşın z yönü normal gerilme değerleri, emniyetli z yönü gerilme değerini aşmıştır. 1,2 mm dış et kalınlıklı model emniyetli von-Mises gerilme değerini aştığı saptanmıştır. 1,6 mm, 2,0 mm ve 2,4 mm dış et kalınlıklı modelleri de z yönü normal gerilmeleri emniyetli gerilme sınırı olan 14,8 MPa değerini aşmaktadır. Belirlenen sınır koşullarına göre 0,8 mm dolgu kalınlıklı uygun alternatif oluşmamaktadır. Homojen yoğunluklu model çalışmaları %50 ağırlık azaltılması hedefine ulaşacak şekilde 0,8 mm iç dolgu kalınlıklı tüm alternatifler için uygun sonuç verememektedir.

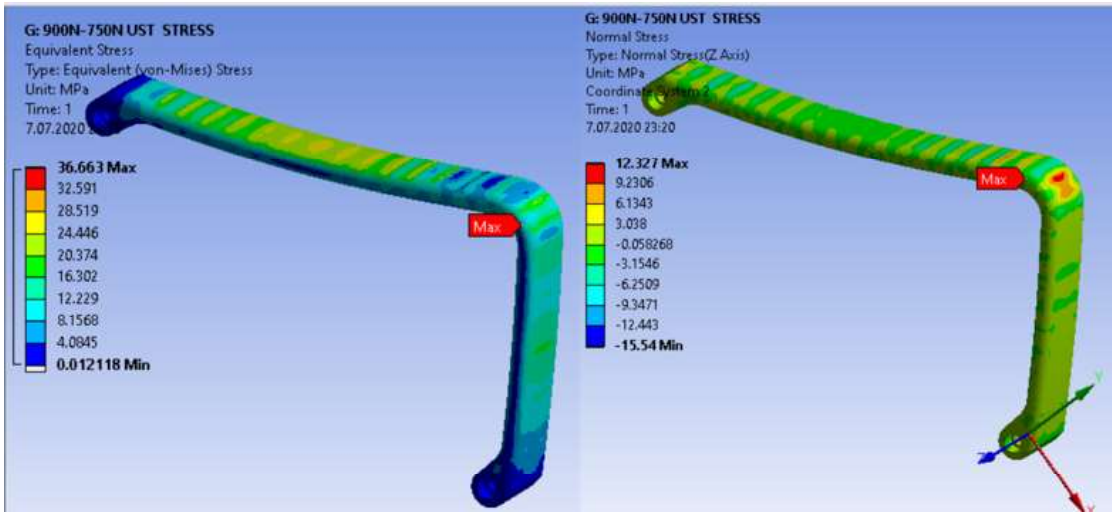


Şekil 4.17. Tüm yükler için 1,2 mm dolgu kalınlıklı kolçak modellerinin von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları

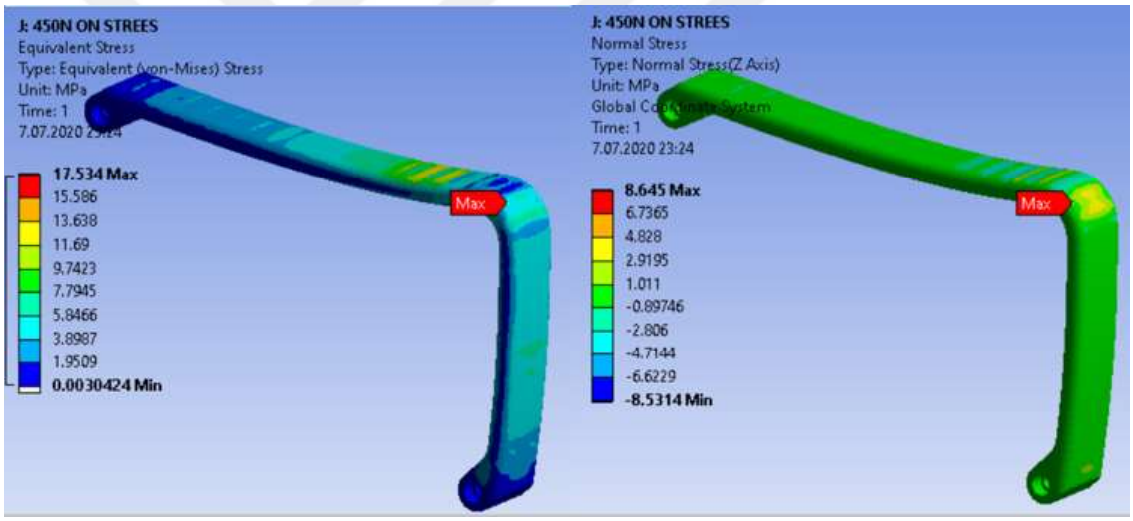
1,2 mm iç dolgu kalınlıklı modellerin tüm yükler altındaki sonuçları incelendiğinde dış et kalınlığı 1,2 mm de 1,6 mm ye çıkması 0,8 mm dolgu kalınlıklı modellerde olduğu gibi her yük durumu için de von-Mises gerilmesini ve z yönü normal gerilme değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Et kalınlığının daha da artması von-Mises gerilme değerinin düşür iken z yönü normal gerilme değerinin artmasına sebep olmaktadır. von-Mises gerilmesinin en düşük olduğu 2,4 mm dış et kalınlıklı model von-Mises gerilmesi yönünden uygun görünmesine karşın 900 N yük durumu için z yönü normal gerilme değerleri emniyetli gerilme sınırı olan 14,8 MPa gerilme değerini aşmaktadır. 1,2 mm dış et kalınlığına sahip model 900 N yük surumu için von-Mises için belirlenen en yüksek gerilme değeri olan 60 MPa değerini aşmıştır. 1,6 mm, 2,0 mm ve 2,8 mm dış et kalınlıklı modeller de z yönü normal gerilme sınırı olan 14,8 MPa değerini aştığı için uygun sonuç verememektedir. Homojen yoğunluklu model çalışmaları %50 ağırlık azaltılması hedefine ulaşacak şekilde 1,2 mm dolgu kalınlıklı tüm alternatifler için uygun sonuç verememektedir.

4.3.2. Bölgesel Yoğunluklu Kolçak İç Dolgu FEM Analizleri

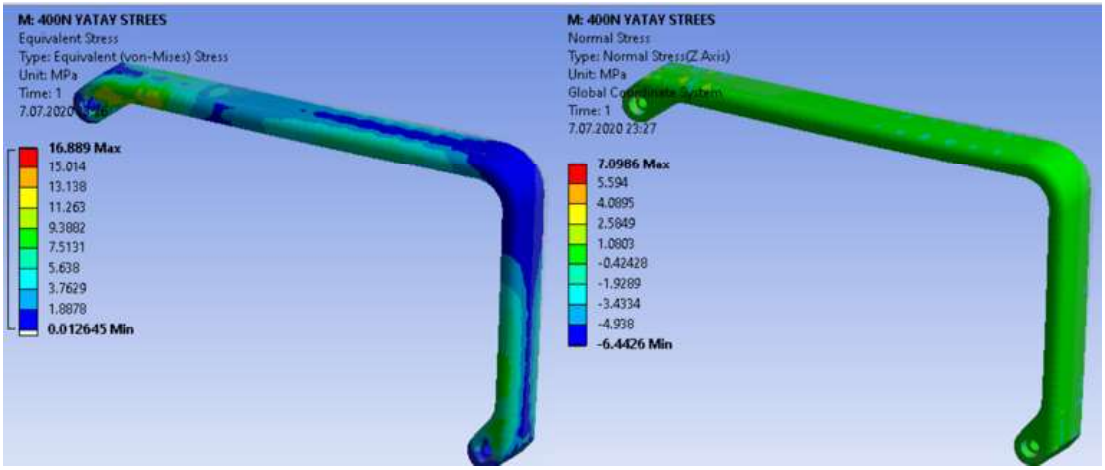
Dolu model FEM analizlerinde olduğu gibi oluşturulan alternatiflerin analizleri dolu model ve homojen yoğunluklu model çalışmaları ile aynı sıra ile yapılmıştır. PLA malzeme mekanik özellikleri için de dolu model için tanımlanan Çizelge 4.3'teki değerler kullanılmıştır. Yapılan analizler ile kolçak için en uygun homojen kesit yoğunluk dağılımı tespit edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak analizlerde von-Mises eşdeğer gerilme değerleri ve z yönü normal gerilme değerleri tablo haline getirilmiş. TS EN 1335 kolçak mekanik testleri için tanımlanan 900 N dik, 450 N dik ön, 400 N yatay, 400 N açılı analizleri ayrı ayrı yapılır iken; 750 N dik yük uygulama şekli 900 N dik yük uygulama şekli ile aynı olduğu ve analizler lineer elastik bölgede yapıldığı için; 750 N test yükü için analiz yapılmamıştır. Sonuç değerleri dolu modelde olduğu gibi 900 N dik test sonuçlarından dönüştürülerek alınmıştır. Tüm yük durumlarına göre analiz sonuçları Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21'de ayrı ayrı verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.9'de toplu olarak sunulmuştur.



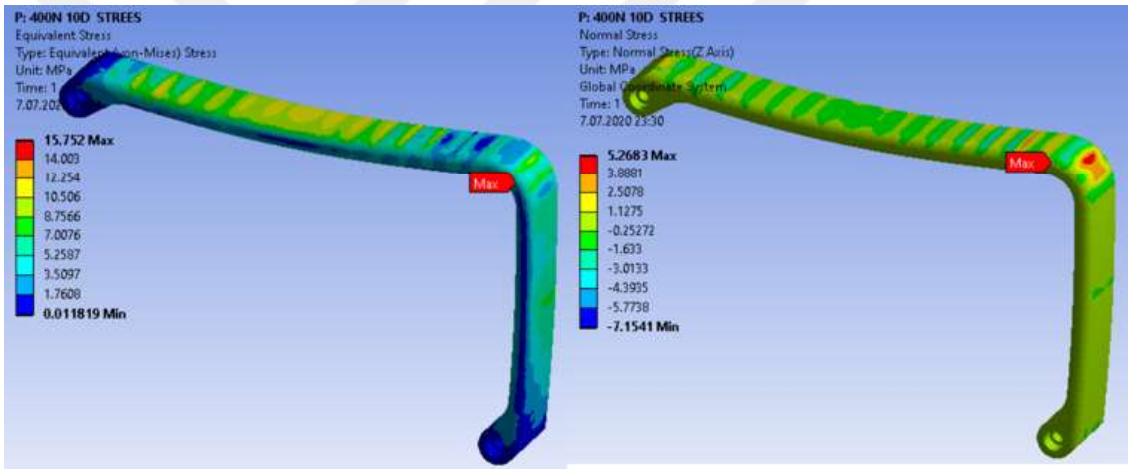
Şekil 4.18. 900 N dik test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri



Şekil 4.19. 450 N ön test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri



Şekil 4.20. 400 N yatay test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri



Şekil 4.21. 400 N açılı test yükü altında bölgesel yoğunluklu kolçak modelinde oluşan von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

Toplu olarak sonuçların verildiği Çizelge 4.9'daki alternatiflerin FEM analizleri sonucunda von-Mises gerilmesi en zayıf yön emniyetli gerilme sınırı altında gerçekleşmesi durumunda renklendirme tanımlaması yapılmamış, en zayıf yön emniyetli gerilme sınırını aştığı fakat en ve yatay (örme yönü) emniyetli gerilme sınırını aşmadığı durumlar için şartlı kabul (sarı olarak renklendirilmiştir), en ve yatay emniyetli gerilme sınırını aştığı durumlar için red (kırmızı olarak renklendirilmiş) olarak tanımlanarak renklendirilmiştir. z yönü normal gerilmeleri ise en zayıf yön emniyetli gerilme sınırı altında gerçekleşmesi durumunda renklendirme tanımlaması yapılmamış, en zayıf yön

emniyetli gerilme sınırını aştığı durumlar için red (kırmızı olarak renklendirilmiş) olarak tanımlanarak renklendirilmiştir.

Çizelge 4.9. Bölgesel yoğunluklu kolçak modelleri von-Mises ve z yönü normal gerilmeleri

			Dolu Model	Bölgesel yoğunluklu
Ağırlık (g)			521	249
Test Yükleri	900N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	26,7	36,7
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	2,1	12,1
	450N Ön	von-Mises Gerilmesi (MPa)	9,9	18,3
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	0,9	7,7
	400N Yatay	von-Mises Gerilmesi (MPa)	16,7	24,8
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	9,8	9,9
	400N Açılı	von-Mises Gerilmesi (MPa)	11,8	16,0
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,0	5,4
	750N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	22,3	30,6
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,8	10,1

*	Şartlı Kabul		Red

Bölgesel yoğunluklu analiz sonuçları %52'lik bir ağırlık azaltarak belirlenen hedef koşullarını sağlamıştır. Ağırlık azaltılması ile 900 N dik yük altına oluşan en kritik von-Mises gerilmesi %37'lik bir artış göstermiş ve 36,7 MPa değerine yükselmiştir. Aynı karakterdeki 750 N dik yük içinde aynı yüzdelik artışla von-Mises gerilmesi 30,6 MPa değerine yükselmiştir. 450 N ön yük için von-Mises gerilme değerinde %85'lik bir artış ile 18,3 MPa değerine gelmiştir. 400 N yatay yük için von-Mises gerilme değeri de %49'lik bir artışla 24,8 MPa değerine çıkmıştır. 400 N açılı yük için von-Mises gerilme değeri de %36'lik bir artış ile 16 MPa değerine ulaşmıştır. Z yönü normal gerilme değerlerinde artış genelde dört kat ve üzerinde gerçekleşmiştir. Yalnız 400 N yatay yük değeri için z yönü normal gerilim değeri optimizasyon çalışmasında ağırlığın % 52

azaltılmasına karşın gerilme değerinde sadece %1'lik bir değişim ile 9,9 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan bölgesel yoğunlaştırma çalışması ile von-Mises gerilme değerleri artışı için gerilme değerlerindeki artış ağırlık azaltılması yapılan yüzde oranına göre daha düşük olarak gerçekleşmiştir. 400 N yatay yönde von-Mises gerilmesindeki %48'lik artış değerinin azaltılması için yatay yönde ihtiyaç duyulan yoğunlaştırma miktarının arttırılması gerilim değerini düşürebilecektir. Ayrıca z yönü normal gerilme değerlerinde 400 N yük durumu haricindeki yük koşullarında gerilimin azaltılması için sınır gerilim değerleri düşürülerek yük durumunu karakterize edecek malzeme miktarı arttırılarak gerilim değerlerinin düşürebileceği öngörülmektedir. Yapılan çalışma tüm yük koşulları için von-Mises gerilmesi için belirlenen emniyetli gerilme değeri 59,3 MPa ve z yönü normal gerilme değerleri için belirlenen 14,8 MPa gerilme değerinin altında gerçekleşmiştir. Belirlenen emniyet şartlarına ve sınır koşullarına göre kolçak modelinin uygun sonuç verdiği öngörülmektedir.

4.3.3. FEM Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada FDM katmanlı imalat yönteminde PLA malzeme kullanılarak yapılan optimizasyon çalışması için iki ayrı yöntem kullanılmıştır. %50 ve üzeri bir ağırlık iyileştirmesi sınır koşulu altında homojen yoğunluklu optimizasyon ve bölgesel yoğunluklu optimizasyon için yapılan çalışmalar ve analizler bir önceki bölümlerde ayrı ayrı verilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde en iyi sonucun yeşil en kötü sonucun kırmızı renkte olacağı şekilde derecelendirilerek sonuçlar toplu olarak değerlendirilerek homojen yoğunluklu ve bölgesel yoğunluklu çalışma sonuçları arasındaki değişim Çizelge 4.10'da incelenmiştir.

Çizelge 4.10. Kolçak modelinin tüm yükler altında homojen yoğunluklu ve bölgesel yoğunluklu von-Mises ve z yönü normal gerilme analiz sonuçları derecelendirmesi

			Dolu Model	Homojen yoğunluklu 0,8 mm genişliğindeki iç dolgu alternatifleri					Homojen yoğunluklu 1,2 mm genişliğindeki iç dolgu alternatifleri					Bölgesel yoğunluklu
				N1	N2	N3	N4	N5	M1	M2	M3	M4	M5	
Ağırlık (g)			521	250	244	249	244	244	250	251	247,6	244	245	249
Test Yükleri	900N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	26,7	65,8	58,6	48,8	46,7	45,9	68,7	60,2	54,5	46,1	48,6	36,7
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	2,1	20,5	12,7	14,0	15,0	19,0	15,7	13,2	15,5	17,3	28,5	12,1
	450N Ön	von-Mises Gerilmesi (MPa)	9,9	25,2	21,8	18,8	17,4	14,3	23,4	19,1	21,4	18,0	16,7	18,3
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	0,9	6,2	5,2	5,6	5,6	6,5	6,1	4,8	5,5	6,5	8,3	7,7
	400N Yatay	von-Mises Gerilmesi (MPa)	16,7	49,0	30,1	42,6	34,9	25,4	48,0	37,9	41,4	32,8	30,9	24,8
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	9,8	24,7	16,4	18,8	20,4	14,1	27,4	15,1	18,1	14,5	13,4	9,9
	400N Açılı	von-Mises Gerilmesi (MPa)	11,8	28,7	25,8	21,3	20,5	19,9	30,0	26,3	24,2	20,2	21,3	16,0
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,0	9,1	5,6	6,1	6,6	14,8	6,9	5,8	6,8	7,6	12,5	5,4
	750N Üst	von-Mises Gerilmesi (MPa)	22,3	54,9	48,9	40,7	39,1	38,3	57,2	50,2	45,4	38,4	40,5	30,6
		z yönü normal Gerilmesi (MPa)	1,8	17,0	10,6	11,6	12,5	15,9	13,1	11,0	12,9	14,4	23,8	10,1

Analiz sonuçlarında da anlaşılacağı gibi bölgesel yoğunluklu yapı analiz sonuçları 450 N ön yük durumu hariç diğer yük durumları için hem von-Mises gerilmesi hem de z yönü normal gerilmesi açısından en düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. 450 N ön yük durumu için 2,8 mm dış et kalınlıklı ve 0,8 mm iç dolgu kalınlıklı homojen yoğunluklu model en düşük von-Mises gerilmesinin elde edildiği ve 1,6 mm dış et kalınlıklı ve 1,2 mm iç dolgu kalınlıklı homojen yoğunluklu kolçak modeli için de en düşük z yönü normal gerilme değeri elde edilmiştir. 450 N ön yük durumu için bölgesel yoğunluklu yapı en iyi sonucu veremese de belirlenen sınır koşullarını sağlamış ve diğer dört yük durumu için en düşük gerilme değerleri bu yöntem sonuçları ile elde edilmiştir. FDM yöntemi ve PLA malzeme kullanımı durumu için bölgesel yoğunluklu kolçak model çalışması literatürdeki yapılmış çalışmalara (Li ve ark. 2018, Wang ve ark. 2018, 2020) paralel bir sonuç ortaya koyup, daha uygulanabilir bir alternatif olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalar ile bölgesel yoğunluklu model uygun bulunmuş ve bu model üzerinden FDM baskısı alınıp test çalışması yine bu model üzerinden yapılmıştır.

4.4. Nihai Ürün Test Sonuçları

Kolçak modelinin Şekil 3.4'teki FDM cihazı ile üretimi yapılmış ve sonrasında ilk olarak elde edilen model destek yapılarından arındırılmıştır (model iç hacminde destek yapıları kullanılmamış sadece dış kenar radyüs hattının daha iyi elde edilmesi için model dış hattında destek yapısı kullanılmıştır). Destek yapısından ayrıştırılan kolçak modelleri ağırlık ölçümleri yapılmış ve 3D model ağırlığı 249 g olan kolçak modeli 246 g ve 243 g olarak elde edilmiştir. TS EN 1335 standardı için alınan ölçüm sonuçları üretim toleransları, montaj toleransları, ölçümü yapılan ürünlerin esnek bir yapıda olabilmesi ve bazı ölçümlerin tanımlı bir yük altında yapılması sebebi ile ölçüm sonuçlarında 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 ±5 mm sapmaların olabileceğini kabul etmektedir. Yapılan ölçümlerde kolçak kullanım uzunluğu ve kolçak genişliği önemli bir

değişiklik olmadan gerçekleşmiştir. Nihai ürün yük altında yapılan ölçümlerde kolçak 3D modeli üzerinden 20 mm süngerin ezileceği öngörüsü ile ölçüm sonuçları alınmış ve gerçekleşen sonuçlar öngörülen ölçüm değerlerinden pek sapma olmadan çok yakın elde edilmiştir. Kolçaklar arası mesafe ölçüsünde de pek sapma olmadan gerçekleşmiştir. Kolçak ön kenardan uzaklığı üretim, montaj ve sünger yapısından kaynaklı farklardan dolayı 10 mm'lik bir sapma ile gerçekleşmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 4.11'de de tablo halinde sunulmuştur. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre nihai kolçak modeli 3D Model üzerinde öngörüldüğü gibi ölçüsel yeterlilikleri sağlamıştır.

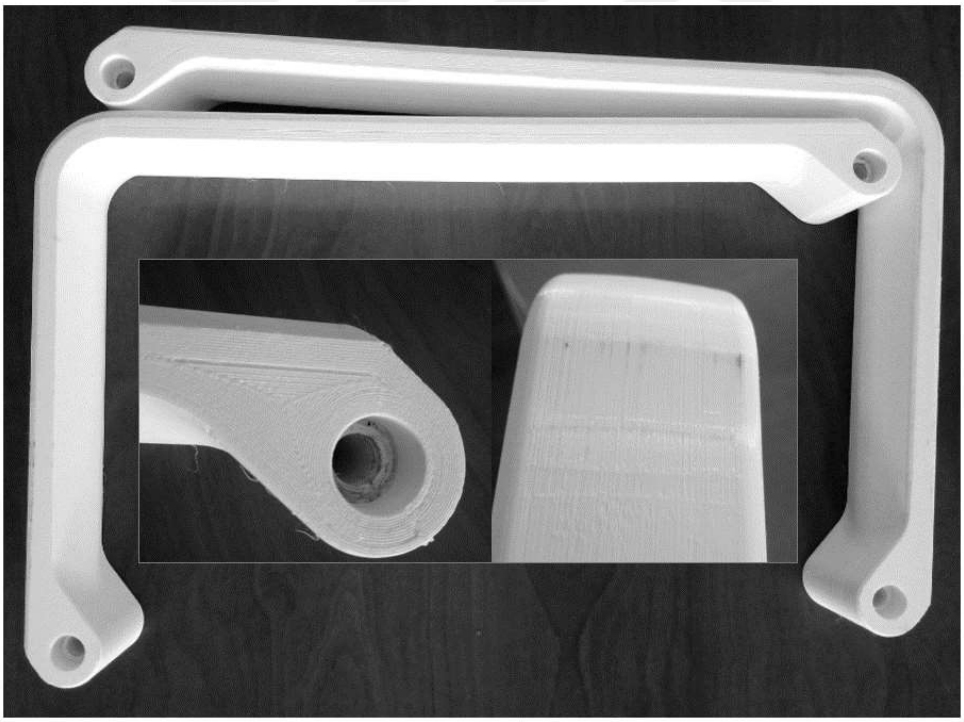
Çizelge 4.11. Ofis koltuğu kolçağı boyutsal gereklilikler öngörülen ve gerçekleşen sonuçlar

Tanım	3D Model	Nihai Model
Kolçak kullanım uzunluğu	332 mm	330 mm
Kolçak kullanım genişliği	46 mm	46 mm
Kolçak ön kenarından uzaklığı	160 mm	170 mm
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Sabit)	245 mm	242 mm
Kolçak oturak üzerinden yüksekliği (Ayarlı)	-	-
Kolçak yükseklik kurs ayarı	-	-
Kolçaklar arası mesafe (Sabit)	495 mm	495 mm
Kolçaklar arası mesafe (Ayarlı)	-	-

Nihai kolçak modeli ile ilgili ölçümler sonrası doğrulama testlerine geçilmiştir. İlk olarak 400 N yan yük testi 10 tekrar ve test yükü altında 10 s bekleyecek şekilde yapılmış ve nihai model bu test gerekliliğini sağlamış ve testi başarı ile geçmiştir. İkinci olarak 450 N ön yük testi 5 tekrar ve test yükü altında 10 s bekleyecek şekilde yapılmış ve nihai kolçak bu test şartlarını da sağlamıştır. Üçüncü olarak 750 N dik yük testi 5 tekrar ve yük altında 10 s bekleyerek yapılmış ve bu test şartlarını da sağlamıştır. Dördüncü olarak 400 N açılı yük testi 60000 tekrarlı şekilde uygulanmış ve bu testi de başarı ile geçmiştir. Son test olan 900 N test yükü 5 tekrar ve test yükü altında 10 s bekleyecek şekilde uygulanmış nihai kolçak bu test şartlarını da sağlamıştır. Kolçak modeli öngörüldüğü şekilde TS EN 1335 standardının tüm test yük şartlarını sağlamıştır.

Yapılan çalışmada von-Mises gerilmesi ile emniyetli model yaklaşımı ve bu şartı sağlamayan durumlar için von-Mises gerilmesi en ve yatay yön emniyetli gerilme sınırını geçmeyen durumlar için z yönü normal (en zayıf yöndeki) gerilme değeri en zayıf

yöndeki gerilme değerini geçmediği durumlar için model emniyetli yaklaşımı tanımlaması FDM katmanlı imalat yöntemi için uygun sonuç vermiştir. Kolçak modelinin çok farklı yönlerdeki yükler altında test ve analizlerinin yapılması bu yaklaşımın uygulanabilirliğini güçlendirmektedir. Ayrıca çalışma analizleri 400 N açılı yük için 60000 çevrimli dinamik yük şartlarını da sağlamıştır. Fakat FEM analizleri statik olarak yapıldığından kolçak modeli FEM analizlerinden daha büyük bir zorlamaya maruz kalmıştır. Ayrıca tüm yüklerin ardı ardına aynı kolçak modeli için uygulanması da kolçak modelini analiz sonuçlarına göre daha fazla zorlamaya maruz bırakmıştır. Bu duruma rağmen kolçak modelinde bir deformasyon olmadan ürün test şatlarını sağlamış ve ürünün kullanımına engel bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Test sonrası kolçak modeli görseli Şekil 4.22'de görülebilmektedir. Test sonrası kolçak modelinin test uygulama bölgelerinde ve montaj bölgelerinde küçük yüzeysel çizikler oluşmuş fakat bunlar kolçak modelinin fonksiyonel olarak kullanımını engellememektedir.



Şekil 4.22. Test sonrası nihai kolçak modeli

5. SONUÇ

Elde edilen sonuçlara göre FDM yönteminde elde edilen ürünlerin, üretim parametreleri ve yöne bağlı mekanik özelliklerin çok farklı olsa da TS EN 1335 test şartlarını karşılayıp nihai ürün olarak kullanılabileceği göstermiştir.

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'ın üzerinde gerilmeler oluşmuş ve kolçak modeli 521 g olarak elde edilecek tam dolu hali ile bile bu kritere göre uygun sonuç verememiştir.

Homojen yoğunluklu optimizasyon çalışması için yatay ve dikey yön (örme yönü) emniyetli gerilme (59,3 MPa) sınırının von-Mises gerilmesi olarak aşılmaması ve en zayıf yön emniyetli gerilme (14,8 MPa) sınırının von-Mises gerilmesi olarak aşıldığı durumlar içinde z normal (kolçak modeli için en zayıf yön doğrultusu) gerilme değerinin en zayıf yön emniyetli gerilme değerini aşmaması durumu emniyetli olacağı kabulüne göre bir değerlendirme yapılmıştır. FEM analizlerine göre aynı ağırlığa sahip farklı kabuk kalınlığı ve hücresel boyut çalışması ile elde edilen 10 alternatif içinde belirlenen sınır gerilme değerlerinin aşılmadığı uygun sonuç elde edilememiştir.

Homojen yoğunluklu alternatifler ile yapılan optimizasyon çalışmalarında 900 N dik yük durumu için aynı ağırlığa sahip alternatiflerde 1,2 mm dış kabuk kalınlıklı bir modeldeki 68,7 MPa olarak elde edilen gerilme değeri dış et kalınlığının 2,8 mm'ye yükseldiği başka bir alternatif ile 45,9 MPa değerine kadar düşürülmüş fakat bu alternatif içinde z normal gerilme değeri sınırı 14,8 MPa sınırının üzerinde 19 MPa olarak gerçekleşmiştir. Optimizasyon çalışması kapsamında oluşturulan tüm alternatifler bir kriter için uygun sonuç verir iken diğer kriter için uygun sonuç verememiş ve bu yöntem ile yapılacak iyileştirmeler koçak modeli için sınırlı kalmıştır.

Bölgesel yoğunluklu optimizasyon çalışması ile 249 g olarak elde edilen model çalışması içinde yatay ve dikey yön (örme yönü) emniyetli gerilme sınırının von-Mises gerilmesi olarak aşılmaması ve en zayıf yön emniyetli gerilme sınırının von-Mises gerilmesi olarak aşıldığı durumlar içinde z normal gerilme değerinin en zayıf yön emniyetli gerilme değerini aşmaması durumu emniyetli olacağı kabulüne göre bir değerlendirme yapılmıştır. FEM analizlerinde belirlenen kriterlere göre tüm test yük durumları için belirlenen sınır gerilme değerleri aşılmamış ve bölgesel yoğunlaştırılmış model çalışması ile belirlenen kriterlere uygun sonuçlar elde edilebilmiştir. Ayrıca beş test şartının dört tanesinde hem von-Mises hem de z normal gerilmeleri yönünden homojen yoğunluklu 10 alternatif modelden daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. 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 oranının 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 yük durumu harici bu sınır değerinde yeterli yoğunlaştırılacak bölge oluşmadığından 450 N Ön, 400N Açılı ve 400 N Yatay yük durumu için von-Mises gerilme sınırı 5 MPa ve z normal gerilme sınır 0,4 MPa olarak revize edilmiş 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.

FDM katmanlı imalat yöntemi ile elde edilen parçaların yöne bağlı mekanik özelliklerinin değişimi Şekil 4.2'de verilen Yöne Bağlı Mekanik Özellikler Tahminler Dairesi (YMETAD) olarak isimlendirilen görsel ile daha etkili bir anlatıma kavuşturulduğu düşünülmektedir. Yapılan bu çalışmanın geliştirmeye açık yönleri olmakla birlikte FDM katmanlı imalat yöntemi ile üretilecek parçaların daha etkin bir şekilde elde edilebilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2015a. American Society for Testing and Materials. ASTM F2792-12a standardı: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, https://02124v3kd-y-https-compass-astm-org.proxy.uludag.deepknowledge.net/Standards/WITHDRAWN/F2792.htm,(Erişim tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2015b. International Organization for Standardization **ve** American Society for Testing and Materials. ISO/ASTM 52900: 2015 standardı: Additive manufacturing — General principles — Terminology. https://www.iso.org/standard/69669.html, (Erişim tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2016. Ansys. Constitutive Modeling of 3D Printed FDM Parts: Part 2. https://www.ansys.com/blog/constitutive-modeling-of-3d-printed-fdm-parts, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2018a. 3dprint. IKEA Debuts 3D Printed Gaming Chair Prototype, Developed in Collaboration with UNYQ and Area Academy. https://3dprint.com/216438/3d-printed-gaming-chair/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2018b. Autodesk. GM Daha Hafif ve Verimli Otomotiv Parçası Tasarımına Öncülük Ediyor. https://www.autodesk.com.tr/redshift/otomotiv-tasarimi/, (Erişim tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2019a. International Organization for Standardization. ISO 178:2019 standardı: https://www.iso.org/standard/70513.html, (Erişim tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2019b. International Organization for Standardization. ISO 527-1:2019 standardı: https://www.iso.org/standard/75824.html, (Erişim tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020a. 3dhubs. How to design parts for FDM 3D printing, 3Dprinting. https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3dprinting/, https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020b. The3dbros. 3D Print Infill Patterns Explained.https://the3dbros.com/3d-print-infill-patterns-explained/,(Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020c. Engineeringproductdesign. Direct Energy Deposition (DED). https://engineeringproductdesign.com/knowlegebase/direct-energy-deposition/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020ç. Reportsanddata. 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, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020d. Wilkhahn. Printstool One-3D printed stool. https://www.wilkhahn.com/en/products/conference-and-visitor-chairs-seating/printstool/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020e. Birofis Mobilya Nedir ?. https://www.birofis.com/mobilya-nedir.shtm, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020f. Materialise. Design Guidelines-ABS–FDM. https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/abs/design-guidelines, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020g. Download center. http://www.esun3d.net/DownLoad/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020h. 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).

Anonim, 2020ı. Türk Standartları Enstitüsü. TS EN 1335-1 standardı: Büro mobilyası-Büro çalışma sandalyesi standardı Bölüm 1: Boyutlar-Boyutların tayini, https://intweb.tse.org.tr/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020i. Türk Standartları Enstitüsü.TS EN 1335-2 standardı: Büro mobilyası-Büro çalışma sandalyesi standardı Bölüm 2: Emniyet gerekleri, https://intweb.tse.org.tr/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Anonim, 2020j. Türk Standartları Enstitüsü. TS EN 1335-3 standardı: Büro mobilyası-Büro çalışma sandalyesi standardı Bölüm 3: Deney yöntemleri, , https://intweb.tse.org.tr/, (Erişim Tarihi: 10.09.2020).

Attaran, M. 2017. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5): 677-688

Aydın, M., Yıldırım, F., Çantı, E. 2019. Farklı Yazdırma Parametrelerinde PLA Filamentin İşlem Performansının İncelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry,* 3(2): 102-115.

Chacón, J.M., Caminero, M.A., García-Plaza, E., Núñez P.J. 2017. 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.

Christensen, P.W., Klarbring, A. 2009. An Introduction to Structural Optimization. Springer Netherlands, Hollanda, 214 s.

Çelik, H.K. 2013. Tarım makineleri tasarımında yapısal optimizasyon tekniklerinin uygulanması üzerine bir araştırma: Tamburlu çayır biçme makinesi örneği. *Doktora Tezi*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.

Farah, S., Anderson, D.G., Langer, R. 2016. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107: 367–392.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, New York, 509 s.

Kaya, N. 2016. Nümerik Analiz ve Optimizasyon Dersi Ders Notları. Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.

Keshavamurthy, R., Tambrallimath, V., Saravanabavan, D. 2021. Development of Polymer Compositesby Additive Manufacturing Process. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*

Kuznetsov, V.E., Solonin, A.N., Urzhumtsev, O.D., Schilling, R., Tavitov, A. 2018. 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.

Li, D., Liao, W., Dai, N., Dong, G., Tang, Y., Xie, Y.M. 2018. Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing; *Computer-Aided Design*, 104: 87–99.

Murmura, F., Bravi, L. 2017. Additive manufacturing in the wood-furniture sector: Sustainability of the technology, benefits and limitations of adoption. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(2): 350-371.

Öztürk, P. 2019. 3 Boyutlu Yazıcıların Tasarımcı-Kullanıcı İlişkisi Kapsamında Değerlendirilmesi ve Endüstriyel Ürünlerin Kişiselleştirilmesine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi,* Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, İstanbul.

Öztürk, U.E. 2016. Döküm Braketlerin Bilgisayar Destekli Tasarım Eniyilemesi İçin Yeni Bir Yaklaşım. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*; 18(3): 521-534.

Park, J. 2013. 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, Amerika Birleşik Devletleri.

Pecho, P., Ažaltovič, V., Kandera, B., Bugaj, M. 2019. 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.

Thomas, D.S., Gilbert, S.W. 2014. 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, 90 s.

Topaç, M.M., Bahar, E., Kaplan, A., Sarıkaya, E.Z. 2017. Topoloji Optimizasyonu Yardımıyla, Askeri Taşıt Bağımsız Ön Süspansiyonu için Alt Salıncak Tasarımı. 2. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, 06-08 Nisan 2017, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.

Wang, Y., Li, S., Yu, Y., Xin, Y., Zhang, X., Zhang, Q., Wang, S. 2020. Lattice structure design optimization coupling anisotropy and constraints of additive manufacturing. *Materials and Design*, 196: 109089.

Wang, Y., Zhang, L., Daynes, S., Zhang, H., Feih, S., Wang, M.Y. 2018. Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing. *Materials and Design*, 142: 114–123.

Wendt, C., Valerga, A.P., Droste, O., Batista, M., Marcos, M. 2017. FEM based evaluation of Fused Layer Modelling monolayers in tensile testing. *Procedia Manufacturing,* 13: 916–923.

Wohlers, T., Gornet, T. 2016. History of additive manufacturing. Wohlers Report 2016. https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf (Erişim tarihi: 10.09.2020).

Wu, J., Aage N., Lefebvre S., Wang C. 2017. Topology Optimization for Computational Fabrication. Eurographics2017 Konferansı, Nisan 2017, Eurographics2017 Konferansı, Fransa

Yıldız, A.R. 2017. Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri ile Optimum Tasarımı. *Politeknik Dergisi*, 20(2): 319-323.

Zhao, Y., Chen, Y., Zhou, Y. 2019. Novelmechanicalmodels of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses. *Materials and Design*, 181: 108089.