FDM Tipi Üç Boyutlu SCARA Yazıcının Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Yapısal Tasarımı

Güray GÜNAY

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2026

Structural Design of an FDM-Type Three-Dimensional SCARA Printer Using Topology Optimization

Güray GÜNAY

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

June 2026

FDM Tipi Üç Boyutlu SCARA Yazıcının Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Yapısal Tasarımı

Güray Günay

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Naci Zafer

Haziran 2026

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Güray Günay**'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "FDM Tipi Üç Boyutlu SCARA Yazıcının Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Yapısal Tasarımı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Naci ZAFER

İkinci Danışıman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Naci ZAFER

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sezcan YILMAZ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Eren KAYA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Naci Zafer danışmanlığında hazırlamış olduğum "FDM Tipi Üç Boyutlu SCARA Yazıcının Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Yapısal Tasarımı" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 26/06/2026.

Güray Günay

İmza

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☒ Claude
☐ ChatGPT
☐ DeepSeek
☐ Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir**.**

☒ Metin oluşturma
☐ Literatür tarama
☐ Çeviri
☒ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☒ Kaynakça düzenleme
☐Diğer (Belirtiniz): ……

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Güray Günay
26/06/2026

(İmza)

ÖZET

Endüstriyel üretim süreçlerinde hız ve hassasiyetin ön plana çıkması, robotik sistemlerin üç boyutlu yazıcı teknolojileriyle entegrasyonunu giderek daha cazip kılmaktadır. Bu çalışmada, FDM (Fused Deposition Modeling) tipi bir üç boyutlu yazıcı için SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) kol mekanik sistemi tasarlanmış ve kritik yapısal bileşenler üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. SCARA mimarisi; düşük atalet momenti, yüksek yatay hareket hızı ve mekanik sadeliği nedeniyle geleneksel kartezyen sistemlere kıyasla tercih edilmiştir. Tasarım süreci Siemens NX ortamında gerçekleştirilmiş, yapısal analizler ANSYS R1 2019 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle yürütülmüştür. Topoloji optimizasyonu, PLA malzeme özellikleri ve belirlenen yük koşulları altında kol 1 ve kol 2 bileşenlerinde başlangıç kütlesinin %30 oranında azaltılması hedefiyle uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, optimize edilen geometrilerin yapısal bütünlükten ödün vermeksizin sistem ataletini ve malzeme kullanımını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar, topoloji optimizasyonunun FDM tabanlı robotik baskı sistemlerinde enerji verimliliği ve sürdürülebilir tasarım açısından etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: SCARA Robot, Topoloji Optimizasyonu, FDM, Eklemeli İmalat, Sonlu Elemanlar Analizi

SUMMARY

Recent developments in additive manufacturing have accelerated research on adapting robotic kinematic architectures to 3D printer design. In this study, a SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) mechanical system was designed for an FDM (Fused Deposition Modeling) type 3D printer using Siemens NX software, and SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)-based topology optimization was applied to arm 1 and arm 2 components in ANSYS R1 2019. The SCARA architecture was selected over conventional Cartesian systems due to its low moment of inertia, high horizontal movement speed, and compact structure. Topology optimization was carried out under PLA material properties and defined static load conditions, targeting a 30% reduction in initial component mass. Results demonstrate that the optimized geometries significantly reduce system inertia and material consumption without compromising structural integrity. This study shows that topology optimization is an effective tool for lightweight and sustainable design in FDM-based robotic printing systems.

Keywords: SCARA Robot, Topology Optimization, FDM, Additive Manufacturing, Finite Element Analysis

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimiyle yol gösteren, çalışmanın her aşamasında değerli görüş ve katkılarını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Naci Zafer'e içtenlikle teşekkür ederim.

Eğitim hayatım süresince maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Güray Günay

Eskişehir, 2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vii**

SUMMARY ..... **viii**

TEŞEKKÜR ..... **ix**

İÇİNDEKİLER ..... **x**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiii**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. 3B YAZICILAR VE TİPLERİ **3**

2.1. FDM 4

2.2. Toz Yatak İle Birleştirme 5

2.3. Binder Jet 6

2.4. VAT Polimerizasyon 6

2.4.1. SLA 7

2.4.2. DLP 7

2.5. Malzeme Jet 8

2.6. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması 9

2.7. Eklemeli İmalatın Avantajları Ve Sınırlılıkları 9

2.8. Eklemeli İmalatın Uygulama Alanları 10

3. ROBOT KOLLARI VE TİPLERİ **12**

3.1. SCARA Robot 13

3.2. Delta Robot 14

3.3. Kartezyen Robot 15

3.4. Mafsallı Robot 16

3.5. Silindirik Robot 17

3.6. SCARA Robot Kinematiği 17

3.7. Robot Kollarında Yapısal Tasarım Ve Hafifletme 18
4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU 21
4.1. Literatür Taraması 22
4.2. Matematiksel Formülasyon 24
4.3. Topoloji Optimizasyonu Ve Eklemeli İmalatın Birlikteliği 26
4.4. Yapısal Optimizasyon Türleri 26
5. MATERYAL VE YÖNTEM 28
5.1. Sistem Tasarımı 28
5.1.1. Taban tasarımı 29
5.1.2. Gövde tasarımı 29
5.1.3. Kol tasarımı 29
5.1.4. Tabla tutucu tasarımı 30
5.1.5. Yazılım, motor ve elektronik aksam seçimi 30
5.2. Malzeme Özellikleri 32
5.3. Sonlu Elemanlar Analizi 33
5.4. Topoloji Optimizasyonu 34
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 38
6.1. Kol 1 Optimizasyon Sonuçları 38
6.1.1. Kol 1 yapısal analiz sonuçları 39
6.2. Kol 2 Optimizasyon Sonuçları 41
6.2.1. Kol 2 yapısal analiz sonuçları 42
6.3. Hareketli Şase Optimizasyon Sonuçları 44
6.4. Sayısal Sonuçlar 46
6.5. Sistem Performansına Etkisi 48
6.6. Tartışma 50
6.7. Çalışmanın Sınırlılıkları 52
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 54
KAYNAKLAR DİZİNİ 57
EK AÇIKLAMALAR

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. FDM yönteminin çalışma prensibi 4
2.2. Toz yatak ile birleştirme düzeneği 6
2.3. Binder Jet düzeneği 6
2.4. SLA yönteminin çalışma prensibi 7
2.5. DLP yönteminin çalışma prensibi 8
2.6. Malzeme jet yönteminin çalışma prensibi 9
3.1. Robot tiplerinin kinematik zincir ve çalışma uzaylarına göre karşılaştırması 13
3.2. Delta robot kolu 14
3.3. Kartezyen robot düzeneği 15
3.4. Mafsallı robot kolu ve hareket alanı 16
5.1. SCARA kolu FDM yazıcı — Siemens NX montaj görünümü 28
5.2. SCARA yazıcı sisteminin izometrik görünümü 29
6.1. Kol 1 — topoloji optimizasyonu yoğunluk dağılımı (ANSYS R1 2019, iterasyon 14) 38
6.2. Kol 1 — toplam deformasyon dağılımı (ANSYS R1 2019) 40
6.3. Kol 1 — eşdeğer elastik gerinim dağılımı (ANSYS R1 2019) 41
6.4. Kol 2 — topoloji optimizasyonu yoğunluk dağılımı (ANSYS R1 2019, iterasyon 18) 42
6.5. Kol 2 — toplam deformasyon dağılımı (ANSYS R1 2019) 43
6.6. Kol 2 — eşdeğer elastik gerinim dağılımı (ANSYS R1 2019) 43
6.7. Hareketli şase — topoloji optimizasyonu yoğunluk dağılımı (ANSYS R1 2019, iterasyon 6) 45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Başlıca eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırması....9
3.1. Robot tiplerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi....20
5.1. PLA malzeme özellikleri....32
6.1. Topoloji optimizasyonu sonuçları....47
6.2. Kol 1, Kol 2 ve şase yapısal analiz sonuçlarının karşılaştırması....48
A.1. Sistem bileşenleri listesi....61
B.1. Tasarım parametreleri....62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
E	Elastisite modülü (MPa)
v	Poisson oranı
σy	Çekme akma dayanımı (MPa)
σu	Çekme nihai dayanımı (MPa)
ρ	Yoğunluk (kg/m³)

Kısaltmalar	**Açıklama**
ANSYS	Analysis System
CAD	Computer-Aided Design
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite Element Analysis
PLA	Polylactic Acid
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Son yıllarda eklemeli imalat, yalnızca hızlı prototipleme aracı olmanın ötesine geçerek fonksiyonel parça üretiminde de ciddi bir yer edinmiştir. Geleneksel talaşlı imalatta geometrik karmaşıklık doğrudan maliyet ve süre anlamına gelirken eklemeli imalatta bu ilişki büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. FDM (Fused Deposition Modeling), bu alandaki en erişilebilir yöntem olmayı korumaktadır. Düşük donanım maliyeti ve geniş malzeme seçeneği, FDM'yi amatör ve küçük işletmeler için uygun bir seçenek haline getirmiştir.

Klasik kartezyen FDM yazıcılarda baskı kafası, X ve Y eksenlerinde bağımsız kılavuz rayları boyunca hareket eder. Hareketli kütle büyüdükçe atalet momenti artar, sistem yüksek hızda titreşmeye ve baskı kalitesi düşmeye başlar. Bu sınırlılığın giderilmesi amacıyla SCARA mimarisinin yazıcıya uyarlanması değerlendirilmiştir (Ankara vd., 2018; McClinton vd., 2019). SCARA'nın döner eklem temelli yapısı, yatay düzlemdeki hareketli kütleyi önemli ölçüde azaltmakta ve atalet momentini düşürmektedir (Siciliano vd., 2016; Hussein, 2018).

Kol bileşenlerini hafifletmek için sezgisel yöntemlerle malzeme kaldırmak yerine bu çalışmada topoloji optimizasyonuna başvurulmuştur. Topoloji optimizasyonu, verilen yük koşulları altında bir tasarım uzayında malzemenin nereye konulup konulmayacağına matematiksel olarak karar verir. Bendsøe ve Sigmund (2004) tarafından kapsamlı biçimde aktarılan SIMP yöntemi bu çalışmada kullanılan yaklaşımın temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, Siemens NX ile tasarlanan SCARA kolu FDM yazıcı sistemi ve ANSYS R1 2019 ortamında uygulanan SIMP tabanlı topoloji optimizasyonu bir araya getirilmiştir. Sistemin hareketli bileşenlerinde (iki kol ve hareketli şase) topoloji optimizasyonu uygulanarak kütle azaltımı hedeflenmiş; enerji verimliliği artırılarak daha sürdürülebilir bir üretim yaklaşımına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk

bulguları, IX. Bilsel Uluslararası Truva Bilimsel Araştırmalar Kongresi'nde bildiri olarak sunulmuştur (Günay ve Zafer, 2026).

Eklemeli imalatın geleneksel üretime kıyasla sunduğu en belirgin üstünlük, geometrik karmaşıklığın maliyete neredeyse hiç yansımamasıdır. Attaran (2017), bu paradigmanın tasarım özgürlüğünü artırdığını ve karmaşık iç yapıların ek maliyet olmaksızın üretilebildiğini vurgulamaktadır. Bu özellik, topoloji optimizasyonu gibi karmaşık organik geometriler üreten yöntemlerle eklemeli imalatın doğal bir ortaklık kurmasını sağlamaktadır; çünkü optimizasyonun ürettiği boşluklu ve değişken kesitli formlar talaşlı imalatla çoğu zaman üretilemezken FDM ile doğrudan basılabilmektedir.

Tezin kapsamı; sistemin mekanik tasarımı, kritik kol bileşenlerinin topoloji optimizasyonu ve bu optimizasyonun yapısal ve dinamik etkilerinin değerlendirilmesiyle sınırlandırılmıştır. Kontrol algoritmalarının ayrıntılı tasarımı, gerçek zamanlı hareket planlaması ve kapsamlı deneysel doğrulama bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş; bu konular gelecek çalışmalara bırakılmıştır. Çalışma, tasarım ve sayısal analiz odaklı bir yöntem izlemektedir.

Bu tezin özgün yönü, üç farklı mühendislik alanını tek bir tasarım problemi etrafında birleştirmesidir: robotik kinematik (SCARA mimarisi), yapısal optimizasyon (SIMP tabanlı topoloji optimizasyonu) ve eklemeli imalat (FDM). Literatürde bu üç alanın ikişerli kesişimleri çalışılmış olsa da üçünün bir arada ele alındığı kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın amacı, bu kesişimde uygulanabilir bir tasarım metodolojisi ortaya koymak ve topoloji optimizasyonunun SCARA kol bileşenlerinin atalet momenti üzerindeki etkisini nicel olarak değerlendirmektir.

2. 3B YAZICILAR VE TİPLERİ

Üç boyutlu yazıcılar pek çok farklı malzeme ve birleştirme yöntemiyle uygulanabilmektedir. Bu yöntemlerin ortak noktası, hedeflenen çıktıyı katman ekleyerek elde etmeleridir. Bu bölümde başlıca eklemeli imalat yöntemleri ele alınmaktadır.

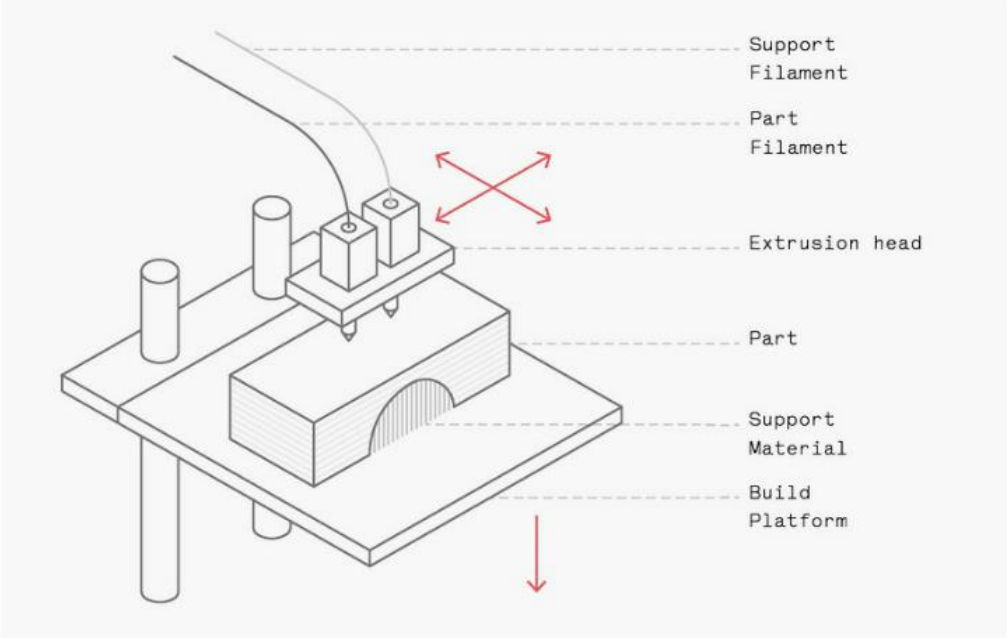
Eklemeli imalat (additive manufacturing), bir parçanın üç boyutlu sayısal modelinden yola çıkılarak malzemenin katman katman eklenmesiyle üretilmesi esasına dayanır (Gibson vd., 2021). Bu yaklaşım, malzemenin bir kütleden talaş kaldırılarak şekillendirildiği geleneksel çıkarmalı (subtractive) imalatın tersi bir mantık izler. Eklemeli imalat; tasarım özgürlüğü, kişiselleştirme kapasitesi ve karmaşık geometrileri ek maliyet olmaksızın üretebilme gibi belirgin üstünlükler sunmaktadır. Bu üstünlükler, yöntemin havacılık, otomotiv, biyomedikal ve tüketici ürünleri gibi geniş bir yelpazede benimsenmesini sağlamıştır.

Eklemeli imalat süreci genel olarak ortak bir iş akışı izler. Öncelikle parçanın bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli oluşturulur. Ardından bu model, yüzeyleri üçgenlerle tanımlayan STL formatına dönüştürülür. Dilimleme (slicing) yazılımı, modeli yatay katmanlara böler ve her katman için yazıcının izleyeceği takım yolunu üretir. Son aşamada yazıcı, bu yolları izleyerek katmanları sırayla biriktirir veya katılaştırır. Üretim tamamlandıktan sonra parça, yönteme bağlı olarak destek yapılarının kaldırılması, yüzey işleme veya ısıl işlem gibi son işlemlerden geçebilir.

Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM), eklemeli imalat yöntemlerini yedi temel kategoride sınıflandırmaktadır: malzeme ekstrüzyonu (FDM), toz yatak füzyonu (SLS, SLM, EBM), VAT polimerizasyonu (SLA, DLP), malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), tabaka laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirme. Bu sınıflandırma, yöntemlerin kullanılan malzeme türü ve katman oluşturma mekanizmasına göre yapılmaktadır. İzleyen alt bölümlerde bu yöntemlerden tezin kapsamıyla ilgili olanlar ele alınmaktadır.

2.1. FDM

En yaygın kullanılan 3B yazıcı yöntemlerinden biridir. Bu yaygınlığın temel nedeni, teknolojinin düşük maliyetle gerçekleştirilebilir olmasıdır (Attaran, 2017). FDM tipi yazıcılar, imal edilecek malzemeyi bir nozul aracılığıyla katmanlar halinde biriktirerek parçayı oluşturur; yöntemin eklemeli imalat içindeki yeri Turner vd. (2014) tarafından kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Yöntemin çalışma prensibi Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. FDM yönteminin çalışma prensibi.

FDM ile üretilen parçaların mekanik kalitesi, baskı parametrelerine güçlü biçimde bağlıdır. Abeykoon vd. (2020), dolgu yoğunluğu, katman yüksekliği ve baskı hızının PLA ve ABS parçaların mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemiş; dolgu yoğunluğunun en belirleyici parametre olduğunu, yüksek dolgu oranlarının çekme mukavemetini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bu nedenle FDM ile üretilecek yapısal bir bileşende, baskı parametreleri tasarım kadar önemli bir performans belirleyicisidir. Sunulan tez kapsamında kol bileşenlerinin yüksek dolgu oranıyla basılması öngörülmektedir.

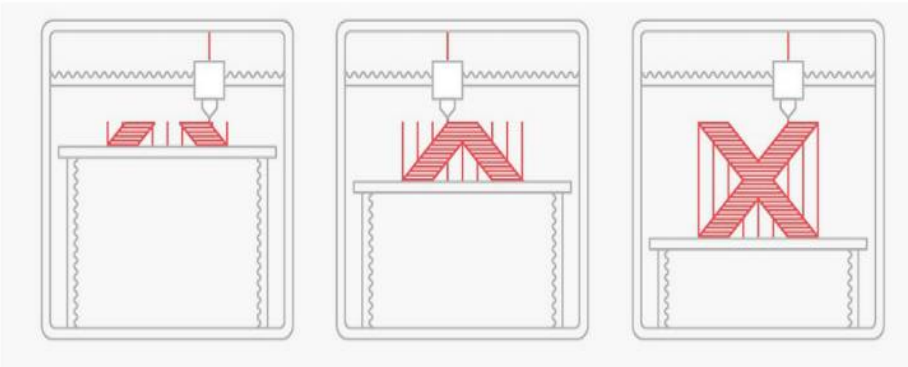
FDM sürecinde baskı kalitesini etkileyen başlıca parametreler; katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu, dolgu deseni, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve baskı yönelimidir. Katman yüksekliği, hem yüzey kalitesini hem de baskı süresini belirler; ince katmanlar daha pürüzsüz yüzey verir ancak baskı süresini uzatır. Dolgu yoğunluğu, parçanın iç doluluk oranını ifade eder ve mekanik dayanım ile malzeme tüketimi arasında doğrudan bir denge kurar. Yapısal bir bileşende yüksek dolgu yoğunluğu tercih edilirken estetik veya hafiflik öncelikli parçalarda düşük dolgu yeterli olabilir.

Dolgu deseni de mekanik davranışı etkileyen bir parametredir. Izgara, bal peteği ve doğrusal gibi farklı desenler, farklı yönlerde farklı dayanım özellikleri sergiler. Bal peteği deseni, malzeme miktarına oranla yüksek rijitlik sağladığından yapısal parçalarda sıklıkla tercih edilir. Bu çalışmada tasarlanan kol bileşenlerinin, yüksek dolgu yoğunluğu ve uygun dolgu deseniyle basılması öngörülmektedir; böylece topoloji optimizasyonuyla elde edilen yapısal verimlilik, üretim aşamasında da korunacaktır.

2.2. Toz Yatak İle Birleştirme

Metal parçaların üretimine uygun eklemeli imalat yöntemlerindendir. Metal tozlarının lazer veya elektron ışınlarıyla seçici olarak ergitilmesiyle çıktı elde edilir. Alt teknikler (DMLS, SLM, EBM, SLS) arasındaki temel fark kullanılan enerji kaynağıdır. Düzeneğin genel görünümü Şekil 2.2'de verilmektedir.

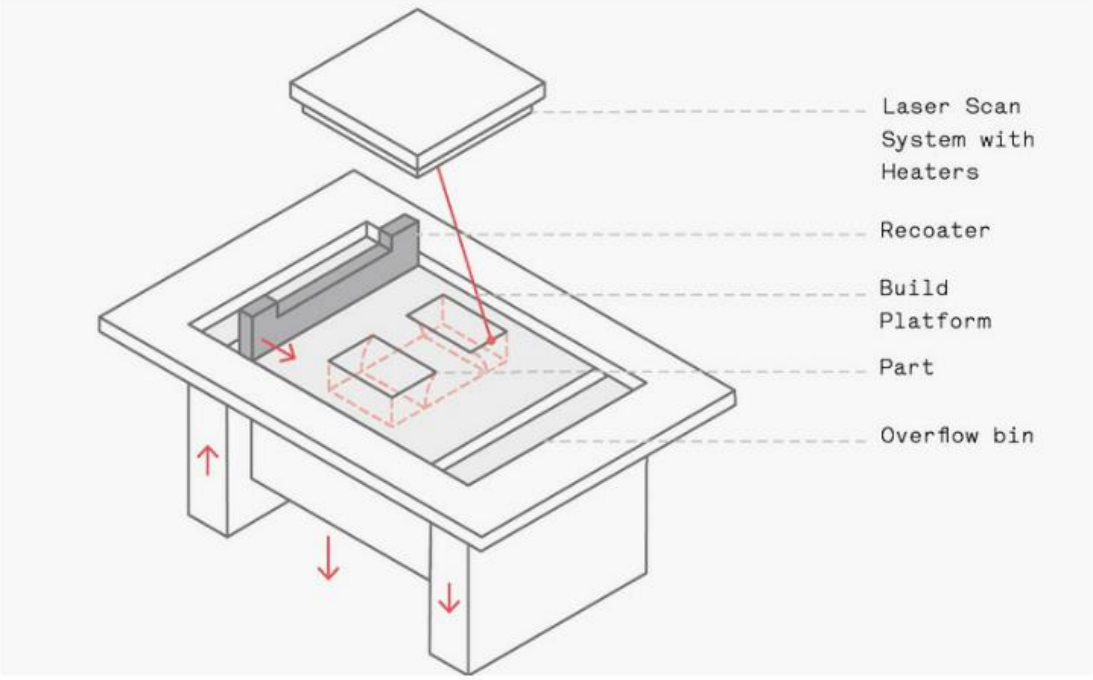
Toz yatak yöntemleri arasında DMLS (Direct Metal Laser Sintering) ve SLM (Selective Laser Melting) lazer enerjisi kullanırken EBM (Electron Beam Melting) elektron demeti ile çalışır. SLS (Selective Laser Sintering) ise daha çok polimer tozlarda tercih edilmektedir. Bu yöntemler yüksek yoğunluklu ve mekanik olarak güçlü parçalar üretebilmekle birlikte donanım maliyetleri FDM'e kıyasla oldukça yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada üretim yöntemi olarak FDM seçilmiştir; çünkü hem maliyet hem de PLA gibi kolay işlenebilir malzemelerle uyum açısından laboratuvar ölçeğindeki bir prototip için en uygun seçenektir.



Şekil 2.2. Toz yatak ile birleştirme düzeneği.

2.3. Binder Jet

Binder Jet yazıcılar bir toz havuzu kullanır; lazer yerine bağlayıcı damlacıklar belirli noktalara bırakılarak katman oluşturulur. Katmanlar üst üste eklendikten sonra parça toz içinde kürlenir ve basınçlı havayla temizlenir. Düzeneğin görünümü Şekil 2.3'te verilmektedir.



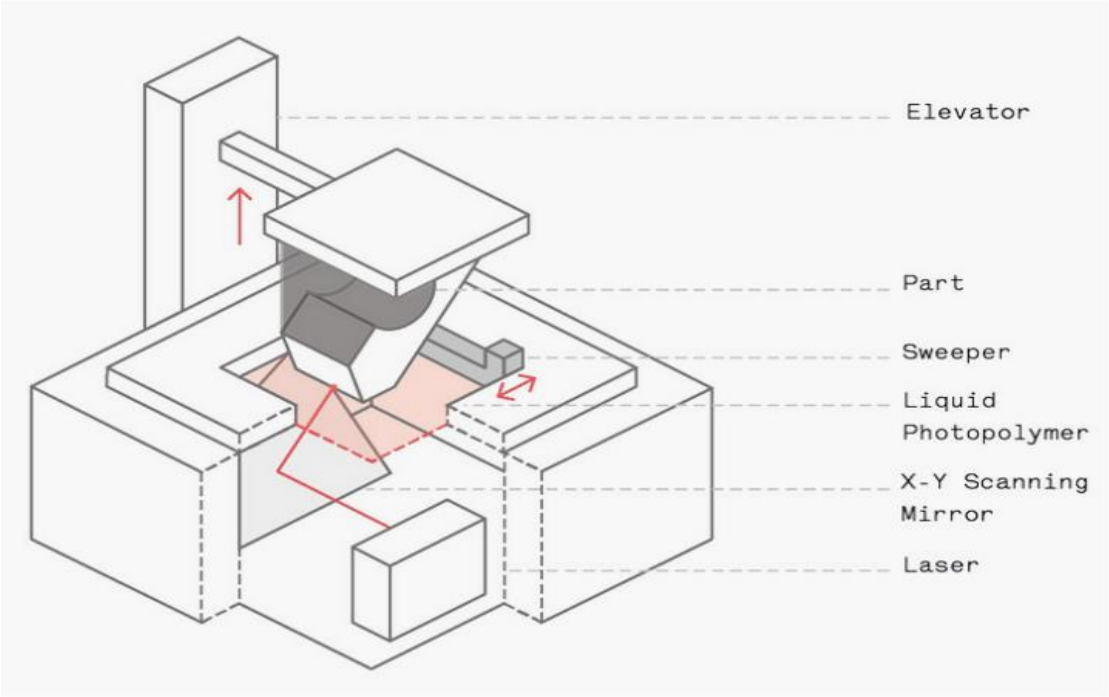
Şekil 2.3. Binder Jet düzeneği.

2.4. VAT Polimerizasyon

Işığa duyarlı polimer reçinelerinin bir havuz içinde ışık kaynağıyla kürlenmesiyle parça elde edilmesi işlemidir. En yaygın biçimleri SLA ve DLP'dir.

2.4.1. SLA

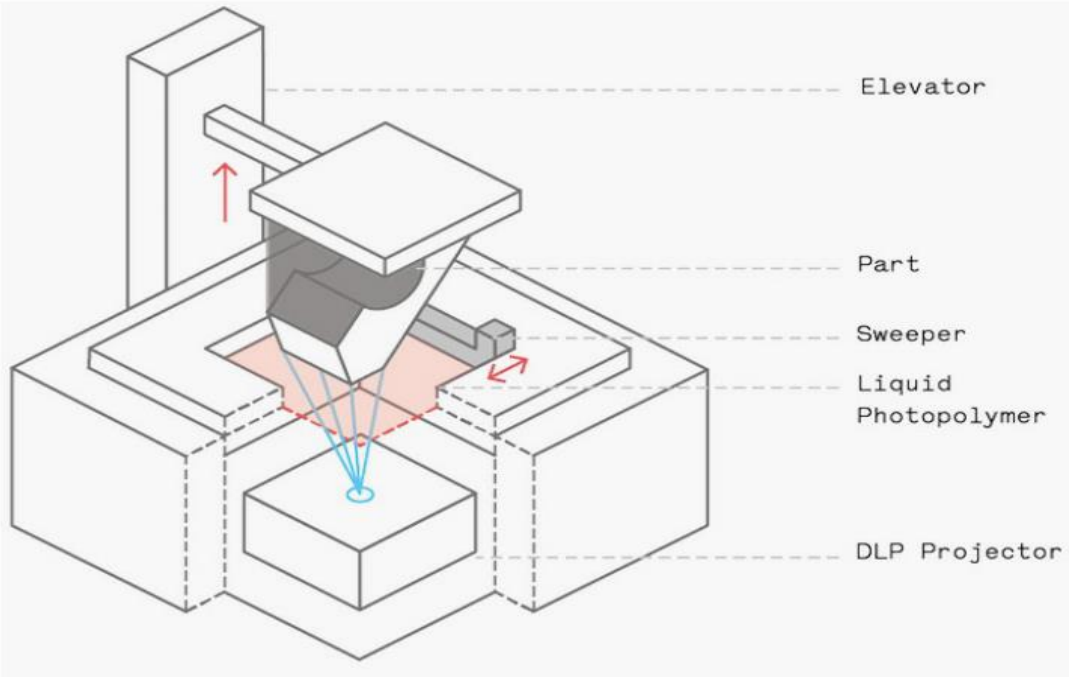
İlk icat edilen 3B yazıcı teknolojisidir. Galvanometre aynalar X ve Y eksenlerini temsil ederek katmanları katılaştırır. İşlem prensibi Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. SLA yönteminin çalışma prensibi.

2.4.2. DLP

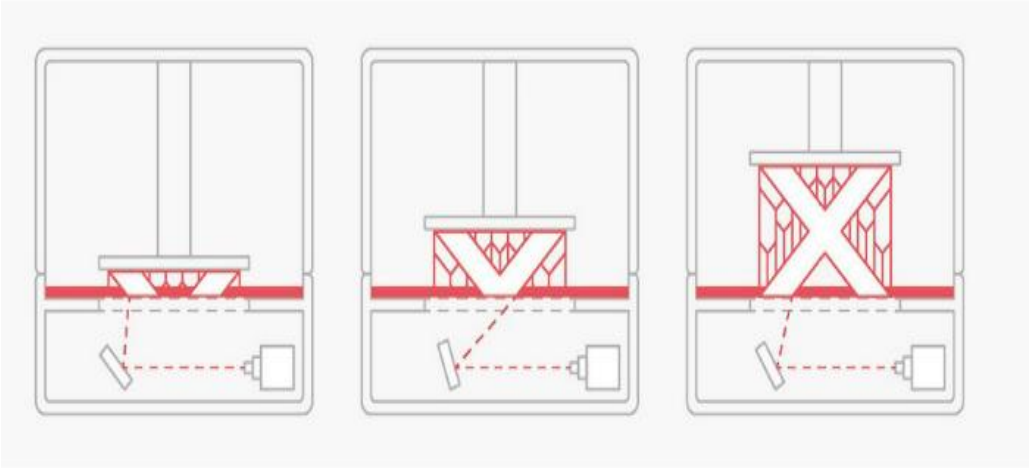
Dijital ışık projektörü kullanarak parçanın tüm katmanına aynı anda ışık gönderir. DMD mikro aynalar aracılığıyla reçine yüzeyine UV ışığı yansıtılır. Düzeneğin görünümü Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5. DLP yönteminin çalışma prensibi.

2.5. Malzeme Jet

Işığa duyarlı malzeme damlacıkları yazıcı kafasından tabla üzerine püskürtülür ve her katman ışıkla kürlenerek katılaştırılır. Yüksek boyutsal hassasiyet ve iyi yüzey kalitesi sağlar. İşlem prensibi Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Malzeme jet yönteminin çalışma prensibi.

2.6. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Eklemeli imalat yöntemleri; kullanılan malzeme, üretim maliyeti, boyutsal hassasiyet ve uygulama alanı açısından birbirinden ayrışmaktadır. Yöntem seçiminde belirleyici olan unsurlar, üretilecek parçanın işlevi, gereken mekanik dayanım ve bütçe kısıtlarıdır (Redwood vd., 2017). Çizelge 2.1, başlıca yöntemlerin karşılaştırmalı bir özetini sunmaktadır.

Çizelge 2.1. Başlıca eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırması.

Yöntem	Malzeme	Maliyet	Hassasiyet
FDM	Termoplastik (PLA, ABS)	Düşük	Orta
SLA / DLP	Fotopolimer reçine	Orta	Yüksek
SLS	Polimer tozu	Yüksek	Yüksek
SLM / EBM	Metal tozu	Çok yüksek	Yüksek
Malzeme Jet	Fotopolimer	Yüksek	Çok yüksek
Binder Jet	Toz + bağlayıcı	Orta	Orta

Çizelgeden görüleceği üzere FDM, düşük maliyeti ve termoplastik malzemelerle uyumu sayesinde laboratuvar ölçeğindeki prototip ve fonksiyonel parça üretimi için en erişilebilir yöntemdir. Boyutsal hassasiyeti reçine veya metal tabanlı yöntemlere göre daha sınırlı olsa da yapısal bileşenlerin üretimi için yeterli düzeydedir. Yürütülen çalışmada üretim yöntemi olarak FDM'in seçilmesinin temel gerekçesi, bu maliyet-erişilebilirlik dengesidir.

2.7. Eklemeli İmalatın Avantajları Ve Sınırlılıkları

Eklemeli imalatın en belirgin avantajı, tasarım özgürlüğüdür. Geleneksel yöntemlerle üretilemeyen iç kanallar, kafes yapılar ve değişken kesitli geometriler eklemeli imalatla doğrudan üretilebilir. Bu özellik, parçaların hafifletilmesi ve işlevselleştirilmesi açısından önemli olanaklar sunar. Ayrıca kalıp veya özel takım gerektirmemesi, düşük adetli ve kişiselleştirilmiş üretimi ekonomik kılar. Attaran (2017), bu esnekliğin ürün geliştirme süresini kısalttığını ve tasarım iterasyonlarını hızlandırdığını dile getirmektedir.

Bununla birlikte eklemeli imalatın belirli sınırlılıkları da vardır. Katmanlı üretim yapısı, parçalarda anizotropik mekanik davranışa yol açar; katmanlar arası bağlanma genellikle en zayıf bölgedir. Yüzey kalitesi, katman kalınlığına bağlı olarak geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Üretim hızı, seri üretim açısından sınırlı kalabilir. Ayrıca çıkıntılı geometrilerde destek yapısı gereksinimi, malzeme israfı ve son işlem ihtiyacı doğurur. Bu sınırlılıklar, parçanın tasarımı ve baskı yöneliminin dikkatle planlanmasıyla büyük ölçüde yönetilebilir.

Bu çalışma kapsamında üretilmesi öngörülen SCARA kol bileşenleri için eklemeli imalatın avantajları, sınırlılıklarına ağır basmaktadır. Topoloji optimizasyonunun ürettiği karmaşık geometrinin doğrudan üretilebilmesi, FDM'in sunduğu en kritik olanaktır. Anizotropi ve yüzey kalitesi gibi sınırlılıklar ise uygun baskı parametreleri ve güvenlik katsayısı seçimiyle telafi edilmektedir.

2.8. Eklemeli İmalatın Uygulama Alanları

Eklemeli imalat, başlangıçta yalnızca hızlı prototipleme amacıyla kullanılırken günümüzde pek çok sektörde fonksiyonel parça üretimine kadar genişlemiştir. Havacılık ve uzay sektöründe, ağırlık azaltımının yakıt verimliliği üzerindeki doğrudan etkisi nedeniyle topoloji optimizasyonuyla hafifletilmiş eklemeli imalat parçaları yoğun ilgi görmektedir. Zhu vd. (2016), uçak ve uzay yapılarında bu yaklaşımın yapısal ağırlığı önemli oranda düşürdüğünü göstermiştir.

Otomotiv sektöründe eklemeli imalat, prototip parçaların hızlı üretimi, özel takım ve aparatların imalatı ile düşük adetli özel parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Biyomedikal alanda ise hastaya özel implantlar, protezler ve cerrahi kılavuzlar eklemeli imalatın sunduğu kişiselleştirme kapasitesinden yararlanmaktadır (Devine, 2019). Bu uygulamalarda parçanın

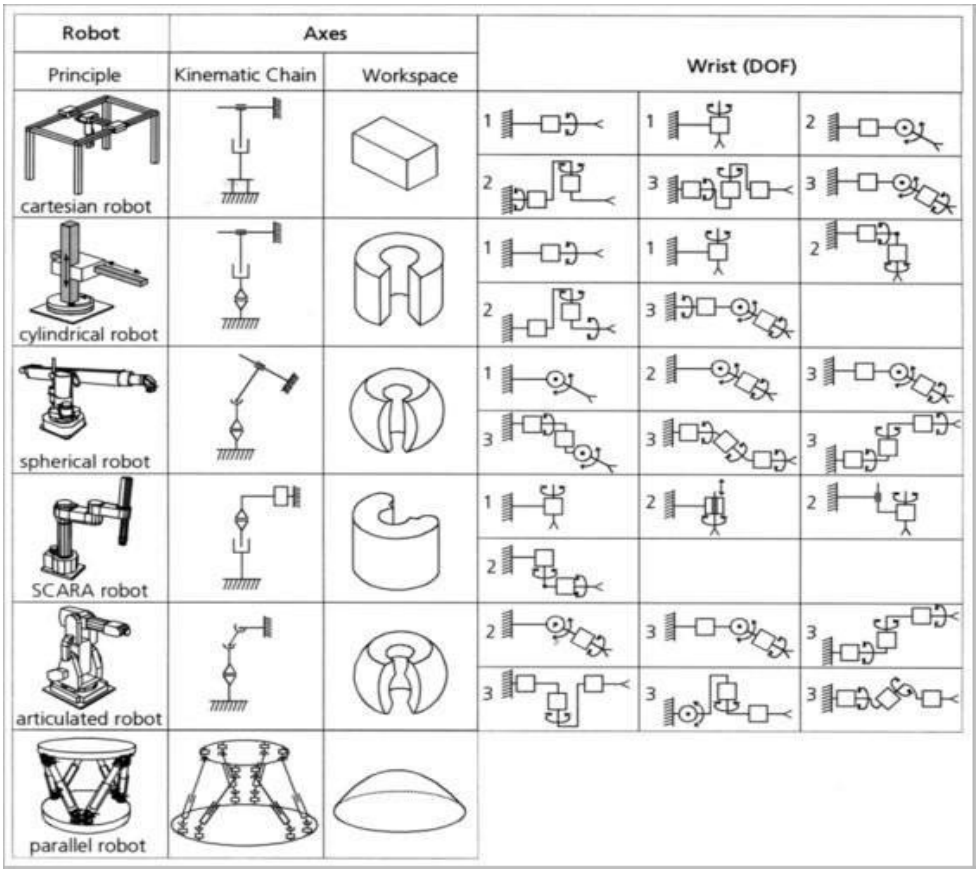
bireysel anatomiye tam uyumu, geleneksel üretimle ulaşılması güç bir avantaj sağlamaktadır.

Robotik alanında eklemeli imalat, hafif ve karmaşık geometrili bileşenlerin üretiminde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Robot kollarının hareketli bileşenlerinin hafifletilmesi, hem enerji verimliliği hem de dinamik performans açısından doğrudan kazanım sağlar. Batista vd. (2024), robot kollarında eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun birlikte kullanımının yapısal verimliliği belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Bu tezde tasarlanan SCARA kol yazıcı sistemi de bu eğilimin somut bir örneğini sunmaktadır.

3. ROBOT KOLLARI VE TİPLERİ

Robot kolları pek çok farklı form ve tipte bulunabilir. Tasarımlar, istenilen göreve uygun olarak oluşturulur ve endüstriyel uygulamalarda üretimi standartlaştırmak ile insan emeğini desteklemek amacıyla kullanılır (Ceccarelli, 2004). Başlıca robot tiplerine ait kinematik zincir ve çalışma uzayı karşılaştırması Şekil 3.1'de verilmektedir.

Robot kolu tasarımında en belirleyici performans parametrelerinden biri, hareketli bileşenlerin kütle ve atalet momentidir. Hussein (2018), endüstriyel SCARA kollarının modellenmesinde atalet momentinin doğrudan motor torku ve enerji tüketimini belirlediğini göstermiştir. Daha hafif bir kol, aynı hareketi daha düşük tork ile gerçekleştirebildiğinden hem enerji tasarrufu hem de daha yüksek ivmelenme kapasitesi sağlar. Bu nedenle robot kolu bileşenlerinin hafifletilmesi, salt malzeme tasarrufunun ötesinde dinamik performansa doğrudan katkı sağlayan bir tasarım hedefidir.



Şekil 3.1. Robot tiplerinin kinematik zincir ve çalışma uzaylarına göre karşılaştırması.

3.1. SCARA Robot

SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), yüksek hız ve hassasiyet gerektiren montaj ve malzeme taşıma işleri için tasarlanmış bir endüstriyel robot türüdür. Döner eklem temelli yapısı dört hareket eksenine sahiptir: dikey eksen, yatay konumlandırma eksenleri ve uç işlevcinin yönelimini denetleyen eksen. Ankara vd. (2018) SCARA mimarisini doğrudan FDM yazıcı olarak uyarlamış; Kusigerski vd. (2021) ve Koo vd. (2022) ise benzer mimarilerde kinematik ve kontrol uygulamalarını incelemiştir. SCARA'nın FDM yazıcılarda kullanımına yönelik çalışma uzayı optimizasyonu McClinton vd. (2019) tarafından ele alınmıştır. Düşük atalet momenti ve yüksek yatay hareket hızı avantajları nedeniyle bu tez kapsamında tercih edilmiştir.

SCARA mimarisinin temel kısıtlarından biri, bağ (link) uzunluğu ile çalışma uzayı ve hareket kararlılığı arasındaki ödünleşmedir. Uzun bağlar daha geniş bir çalışma alanı sağlarken yüksek hızda kararlılığı zorlaştırır; kısa bağlar ise daha kararlı ancak sınırlı bir çalışma alanı sunar. McClinton vd. (2019), SCARA tabanlı yazıcılarda homojen çözünürlüklü bir çalışma uzayı elde etmenin bağ uzunluğu optimizasyonuyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Mevcut tezde bağ uzunlukları, hedeflenen baskı hacmi gözetilerek belirlenmiş; topoloji optimizasyonu ise sabit dış boyutlar içinde kütle azaltımına odaklanmıştır.

SCARA robotun ileri kinematik probleminde, eklem açıları bilindiğinde uç işlevcinin düzlemsel konumu, iki kol bağının vektörel toplamıyla bulunur. Birinci bağın ucundaki nokta, birinci eklem açısı ve birinci bağ uzunluğuyla belirlenirken; uç işlevci konumu, bu noktaya ikinci bağın katkısının eklenmesiyle elde edilir. Ters kinematik problemde ise istenen uç işlevci konumu için gerekli eklem açıları hesaplanır; bu problem SCARA için genellikle iki çözüm üretir; bunlar dirsek-yukarı ve dirsek-aşağı konfigürasyonları olarak adlandırılır. Kontrol sisteminde bu iki çözümden uygun olanı, eklem sınırları ve engel kaçınma gibi kriterlere göre seçilir.

SCARA robotun dört eksenli yapısında ilk iki döner eklem yatay düzlemdeki konumlandırmayı, dikey prizmatik eklem Z yönündeki hareketi, son eklem ise uç işlevcinin yönelimini sağlar. Bu tez kapsamında SCARA mimarisinin yazıcıya uyarlanmasında uç işlevci olarak baskı kafası (hot-end) kullanılmış; dolayısıyla yönelim ekseni baskı için sabit tutulmuştur. Böylece sistem, üç eksende konumlandırma yapan ve yatay düzlemde SCARA kinematiği kullanan bir FDM yazıcıya dönüşmüştür.

3.2. Delta Robot

Delta robot, ortak bir tabana bağlı üç özdeş koldan oluşan paralel yapılı bir robottur. Paralel mimarisi sayesinde uç işlevciyi çok yüksek hızda hareket ettirebilir; paketleme, paletleme ve montaj uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Tipik bir delta robot Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Delta robot kolu.

Delta robotların paralel kinematik yapısı, motorların sabit tabana yerleştirilmesine olanak tanır; böylece hareketli kütle yalnızca hafif kollardan ve uç işlevciden oluşur. Bu özellik delta robotlara çok yüksek ivmelenme kapasitesi kazandırır. Ancak çalışma uzayları kubbe biçiminde sınırlıdır ve büyük düzlemsel alanların taranmasını gerektiren baskı uygulamaları için SCARA kadar uygun değildir. Bu sebeple düzlemsel baskı hareketinin baskın olduğu bir FDM yazıcıda SCARA mimarisi daha avantajlı bulunmuştur.

3.3. Kartezyen Robot

Kartezyen robot (lineer veya gantry robot), X, Y, Z eksenleri boyunca doğrusal hareketiyle tanımlanır. Lineer eyleyiciler (motorlar ve vidalı-bilyalı miller) ile hareket sağlanır. Yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirliği nedeniyle montaj ve malzeme taşıma işlerine uygundur. Bir kartezyen robot Şekil 3.3'te verilmektedir.

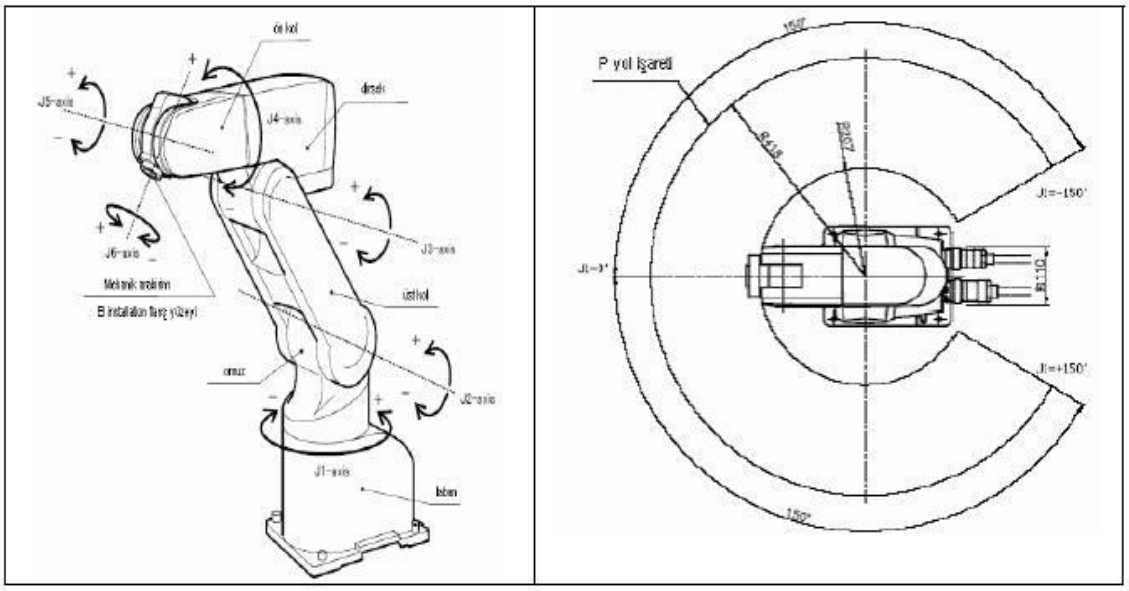


Şekil 3.3. Kartezyen robot düzeneği.

Kartezyen mimari, ticari FDM yazıcıların büyük çoğunluğunda kullanılan standart yapıdır. Üç dik eksende bağımsız doğrusal hareketi sayesinde kontrolü ve kalibrasyonu basittir. Ancak baskı kafası ve taşıyıcı kütlenin doğrudan eksenler üzerinde hareket etmesi, yüksek hızlarda atalet kaynaklı titreşimlere yol açar. SCARA mimarisinin yürütülen çalışmada tercih edilmesinin ardındaki temel motivasyon, kartezyen yapının bu dinamik sınırlılığını döner eklem temelli hafif bir kol düzeneğiyle aşmaktır.

3.4. Mafsallı Robot

Mafsallı robot, insan koluna benzer hareket aralığı oluşturmak için döner eklemler kullanan bir robottur. Hiyerarşik bağ-eklem yapısıyla geniş bir hareket alanına sahiptir; kaynak, boyama ve malzeme taşıma gibi işlere uygundur. Genellikle altı veya daha fazla serbestlik derecesine sahiptir. Mafsallı robot kolu ve hareket alanı Şekil 3.4'te gözlemlenmektedir.



Şekil 5.Robot Kol Ve Eksen Hareketleri Şekil 6. Robotun X-X Arası Hareket Alanı [7].

Şekil 3.4. Mafsallı robot kolu ve hareket alanı.

3.5. Silindirik Robot

Silindirik robot, silindirik koordinat sisteminde döner eklemlerle hareket oluşturan bir robottur. Sabit tabana monte silindirik kolun uç işlevcisi geniş bir çalışma zarfına ulaşabilir. Yüksek hız ve hassasiyeti sayesinde malzeme taşıma ve kaynak işlemleri için tercih edilir; kontrol sistemi ters kinematik algoritmalarına dayanır.

3.6. SCARA Robot Kinematiği

Robot kolunun konum kontrolü, kinematik analiz üzerine kurulur. Kinematik, eklem hareketleri ile uç işlevcinin uzaydaki konumu arasındaki ilişkiyi inceleyen daldır ve iki temel probleme ayrılır: ileri kinematik ve ters kinematik. İleri kinematik, eklem değişkenleri (açılar ve ötelenmeler) bilindiğinde uç işlevcinin konum ve yönelimini hesaplar. Ters kinematik ise istenen bir uç işlevci konumu için gerekli eklem değişkenlerini belirler ve robot kontrolünde asıl kullanılan problemdir (Siciliano vd., 2016).

SCARA robotun yatay düzlemdeki hareketi, iki döner eklemden oluşan bir açık kinematik zincirle tanımlanır. Birinci eklem açısı ve ikinci eklem açısı, sırasıyla birinci ve ikinci kol bağının yönelimini belirler. Bağ uzunlukları ile eklem açıları kullanılarak uç

işlevcinin düzlemdeki konumu, temel trigonometrik bağıntılarla ifade edilebilir. Bu bağıntılar, birinci bağın ucundaki noktanın konumu ile ikinci bağın bu noktaya göre yöneliminin toplanmasıyla elde edilir. Dikey eksendeki hareket ise prizmatik eklem tarafından bağımsız olarak sağlandığından düzlemsel kinematikten ayrık biçimde ele alınabilir.

SCARA mimarisinin kinematik avantajı, yatay konumlandırmanın iki döner eklemle sağlanması ve dikey hareketin bunlardan bağımsız olmasıdır. Bu ayrışma, kontrol algoritmasını basitleştirir ve her eksenin ayrı ayrı denetlenmesine olanak tanır. Denavit-Hartenberg (D-H) parametreleri, robot kolunun kinematik modelinin sistematik biçimde kurulmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir; her ekleme ait dönme, ötelenme ve eksen kaçıklığı parametreleri bir tablo halinde tanımlanarak dönüşüm matrisleri oluşturulur (Craig, 2005; Hussein, 2018). Sunulan tez kapsamında robotun mekanik tasarımı esas alındığından kinematik model, bağ uzunlukları ve eklem sınırları tasarım parametreleri olarak incelenmiştir.

Uç işlevcinin çalışma uzayı (workspace), bağ uzunlukları ve eklem açısı sınırlarıyla belirlenir. SCARA robotlarda çalışma uzayı, iki kol bağının erişebildiği noktaların oluşturduğu düzlemsel bir bölgedir. Bağ uzunlukları arttıkça çalışma alanı genişler ancak atalet momenti ve yüksek hızdaki kararsızlık da artar. McClinton vd. (2019), SCARA tabanlı yazıcılarda homojen çözünürlüklü bir çalışma alanı elde etmenin, bağ uzunluklarının baskı hacmiyle uyumlu biçimde optimize edilmesini gerektirdiğini ortaya koymuştur.

3.7. Robot Kollarında Yapısal Tasarım Ve Hafifletme

Robot kolu bileşenlerinin yapısal tasarımı, birbiriyle çelişen iki gereksinim arasında bir denge kurmayı gerektirir: yeterli rijitlik ve düşük kütle. Yeterli rijitlik, kolun yük altında aşırı sehim yapmamasını ve konumlandırma hassasiyetini korumasını sağlar. Düşük kütle ise atalet momentini azaltarak dinamik performansı ve enerji verimliliğini artırır. Bu iki gereksinim arasındaki denge, yapısal tasarımın temel problemini oluşturmaktadır.

Geleneksel tasarım yaklaşımında, mühendis deneyime dayanarak malzeme dağılımına karar verir ve ardından sonlu elemanlar analiziyle tasarımı doğrular. Bu yaklaşım iteratif ve büyük ölçüde sezgiseldir; optimum sonucu garanti etmez. Buna karşın topoloji optimizasyonu, malzeme dağılımını matematiksel olarak belirleyerek en verimli yapıyı doğrudan üretir. Srinivas ve Javed (2020), robot kollarında topoloji optimizasyonunun geleneksel yaklaşıma kıyasla daha hafif ve daha rijit tasarımlar sağladığını göstermiştir. Benzer kazanımlar başka mühendislik bileşenlerinde de bildirilmiştir; Demir ve Yıldız (2017) ince cidarlı yapılarda çarpışma dayanımı ölçütü altında farklı optimizasyon algoritmalarını karşılaştırmış, Erdaş vd. (2023) ise bir koltuk bağlantı parçasının kütlesini yapay sinir ağı destekli bir optimizasyon yaklaşımıyla azaltmıştır.

Robot kollarının hafifletilmesinde dikkate alınması gereken bir diğer husus, yük durumlarının çeşitliliğidir. Robot kolu, hareketi sırasında farklı konumlarda farklı yük dağılımlarına maruz kalır. Tek bir yük durumuna göre optimize edilen bir kol, diğer konumlarda yetersiz kalabilir. Dolayısıyla bazı çalışmalar birden fazla yük durumunu birlikte ele almaktadır. Srinivas ve Javed (2020), çoklu konfigürasyonlardan elde edilen topolojileri birleştiren bir süperpozisyon yöntemi önermiştir. Bu çalışmada ise en kritik statik yük durumu esas alınarak güvenli tarafta kalan bir tasarım hedeflenmiştir.

Robot kolu tasarımında dinamik davranışın da göz önünde bulundurulması, özellikle yüksek hızlı uygulamalarda önem kazanır. Kolun doğal frekansları, çalışma frekanslarına yakın olduğunda rezonans riski doğar; bu da konumlandırma hassasiyetini olumsuz etkiler. Topoloji optimizasyonu, kütleyi azaltırken yapının rijitliğini koruduğundan, doğal frekansların yüksek tutulmasına da katkı sağlayabilir. Bu çalışmada statik analiz esas alınmış olmakla birlikte, dinamik davranışın ileriki çalışmalarda incelenmesi öngörülmektedir.

Liu vd. (2022), robot kollarının hafifletilmesi için belirlenmiş bir en kötü durum yük senaryosu altında topoloji optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Ancak en kötü duruma göre tasarlanan kolların, diğer açısal ve doğrusal konumlarda gereğinden fazla malzeme

içerebileceği belirtilmektedir. Bu durum, robot kolu optimizasyonunda yük durumu seçiminin kritik bir karar olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tezde, kolun en yüksek eğilme momentine maruz kaldığı uzanmış konum esas alınarak güvenli tarafta kalan bir yük senaryosu seçilmiştir.

Alkalla ve Fanni (2021), robot kollarının kütle atalet momentinin, zaman-optimal kontrol stratejilerini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Atalet momentinin azaltılması, kolun hedef konuma daha kısa sürede ulaşmasını sağlar. Bu bulgu, robot kolu hafifletmesinin yalnızca malzeme tasarrufu değil, aynı zamanda bir performans iyileştirme stratejisi olduğunu açıkça göstermektedir.

Tezde ele alınan başlıca robot tiplerinin karşılaştırmalı bir değerlendirmesi Çizelge 3.1'de sunulmaktadır. Bu karşılaştırma, SCARA mimarisinin neden bu çalışma için tercih edildiğini gerekçelendirmektedir.

Çizelge 3.1. Robot tiplerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi.

Robot Tipi	**Hareket**	**Hız**	**Tipik Uygulama**
Kartezyen	Doğrusal (X,Y,Z)	Orta	3B baskı, kesim
SCARA	Döner + dikey	Yüksek	Montaj, al-yerleştir
Delta	Paralel	Çok yüksek	Paketleme, baskı
Mafsallı	Çok eksenli döner	Orta	Kaynak, boyama
Silindirik	Döner + radyal	Orta	Taşıma, kaynak

Çizelgeden görüleceği üzere SCARA mimarisi, yüksek yatay hareket hızı ile mekanik sadeliği bir araya getirmesi bakımından öne çıkar. Kartezyen sistemlerin doğrusal hareket basitliği ile mafsallı robotların esnekliği arasında bir denge sunan SCARA, döner eklem yapısı sayesinde düşük atalet momentiyle çalışabilir. Bu özellikler, topoloji

optimizasyonunun atalet momenti üzerindeki etkisinin net biçimde gözlemlenebileceği bir platform sunduğundan, SCARA bu çalışma için en uygun mimari olarak belirlenmiştir.

4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Topoloji optimizasyonu, tasarımda verilen bir malzemeyi en iyi şekilde dağıtmaya yarayan bir hesaplama yöntemidir. Amacı, verilen yük ve alan kısıtlamaları içinde tasarıma en uygun geometriyi ortaya çıkarmaktır. Yöntem çoğunlukla mekanik ve yapı tasarımlarında kullanılmakla birlikte elektronik kart tasarımı ve biyomedikal uygulamalarda da yer bulmaktadır. Topoloji optimizasyonu ağırlık azaltma ve yapısal güçlendirmenin ötesinde yeni tasarım seçenekleri de üretebilmektedir.

Topoloji optimizasyonu, boyut optimizasyonu ve şekil optimizasyonundan farklı olarak tasarım uzayının topolojisini, yani malzemenin var olduğu ve olmadığı bölgelerin dağılımını değiştirir. Deaton ve Grandhi (2014), sürekli ortam topoloji optimizasyonunun son yıllarda yapısal tasarımda en hızlı gelişen alanlardan biri olduğunu belirtmektedir. Yöntem, bir başlangıç tasarım uzayını sonlu elemanlara böler ve her elemana bir yoğunluk değeri atayarak hangi elemanların korunup hangilerinin kaldırılacağına karar verir.

Yürütülen çalışmada kullanılan SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yöntemi, her sonlu elemana 0 ile 1 arasında değişen bir bağıl yoğunluk değişkeni atar. Burada 0 boşluğu, 1 ise dolu malzemeyi temsil eder. Ara yoğunluk değerlerini cezalandırmak amacıyla elemanın elastisite modülü, bağıl yoğunluğun bir kuvvetiyle (penalizasyon üssü) ölçeklenir. Bu ceza mekanizması, çözümün 0 veya 1 değerlerine yakınsamasını teşvik ederek fiziksel olarak üretilebilir, ara yoğunluksuz bir geometri elde edilmesini sağlar (Bendsøe ve Sigmund, 2004). Optimizasyon problemi tipik olarak, belirli bir hacim kısıtı altında yapısal uyumu (compliance) minimize etme, eşdeğer biçimde rijitliği maksimize etme amacıyla kurulur.

SIMP çözümünde sıklıkla karşılaşılan kafes deseni (checkerboard) ve ağ bağımlılığı gibi sayısal kararsızlıkları gidermek için filtreleme teknikleri kullanılır. Lazarov ve Sigmund (2011), Helmholtz tipi diferansiyel denklemlere dayalı filtrelerin bu kararsızlıkları etkin

biçimde bastırdığını ve çözümün ağ yoğunluğundan bağımsız hale geldiğini göstermiştir. ANSYS Mechanical'ın topoloji optimizasyonu modülü de benzer filtreleme yaklaşımlarını içermektedir.

4.1. Literatür Taraması

Topoloji optimizasyonu, ilk olarak 1980 sonrası dönemde homojenizasyon yöntemiyle ortaya atılmış; ardından SIMP yaklaşımının geliştirilmesiyle yaygın bir uygulama alanı bulmuştur (Deaton ve Grandhi, 2014). Geçen süre içinde yöntem, yalnızca akademik bir araç olmaktan çıkıp ticari sonlu elemanlar yazılımlarının standart bir modülü haline gelmiştir. Bu olgunlaşma, yöntemin endüstriyel tasarım süreçlerine entegre edilmesini kolaylaştırmıştır. İzleyen bölümde topoloji optimizasyonu alanındaki başlıca çalışmalar ve bu tezin bu çalışmalar arasındaki konumu ele alınmaktadır.

Topoloji optimizasyonunun başarısı, doğru tanımlanmış bir tasarım probleminin varlığına bağlıdır. Tasarım uzayının, yüklerin, sınır koşullarının ve kısıtların gerçek çalışma koşullarını yansıtacak biçimde tanımlanması, sonucun anlamlı olmasını sağlar. Hatalı veya eksik tanımlanmış bir problem, matematiksel olarak doğru ancak pratikte kullanışsız sonuçlar üretebilir. Bu sebeple optimizasyon, mühendislik yargısı ve sayısal yöntemin bir arada kullanılmasını gerektiren bir süreçtir.

Topoloji optimizasyonu için literatürde pek çok farklı yöntem önerilmiştir. Fanni vd. (2013) MMA, SQP, OC ve HCA yöntemlerini karşılaştırmış; OC yönteminin küçük problemlerde hızlı çözüme ulaştığını, büyük ve karmaşık geometrilerde ise MMA'nın daha güvenilir davrandığını göstermiştir. Bu sonuçlar, ticari FEA yazılımlarında SIMP tabanlı çözücülerin yaygınlaşmasını açıklamaktadır.

Burada anılan yöntemlerden OC (Optimality Criteria), her iterasyonda optimumluk koşullarını sağlayacak biçimde yoğunluk değişkenlerini güncelleyen sezgisel ve hesaplama yönünden verimli bir yaklaşımdır. MMA (Method of Moving Asymptotes) ise problemi bir

dizi dışbükey alt probleme dönüştürerek çözen ve çok sayıda kısıt içeren büyük ölçekli problemlerde kararlı sonuç veren bir gradyan tabanlı yöntemdir. SQP (Sequential Quadratic Programming) ve HCA (Hybrid Cellular Automata) ise farklı problem sınıflarında öne çıkmaktadır. Ticari yazılımların SIMP yöntemini OC veya MMA güncelleme şemalarıyla birleştirmesi, hem hesaplama verimliliği hem de çözüm kararlılığı noktasında dengeli bir tercih oluşturmaktadır.

Larsson vd. (2022) kütle minimizasyonunu statik ve harmonik yükler altında incelemiş; statik uyum kısıtının topoloji kararlarını dinamik kısıtlardan çok daha güçlü biçimde yönlendirdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmanın statik yük senaryosu üzerine kurulması söz konusu bulguyla tutarlıdır.

Robot bileşenlerinde topoloji optimizasyonu uygulayan iki çalışma bu araştırma için özellikle yönlendirici olmuştur. Oliveri vd. (2011), Tribot robotunun şasisini optimize ederek %25 ağırlık azaltımı ve %20 stabilite artışı elde etmiştir. Sha vd. (2020) ise sınır koşullarının hatalı tanımlanmasının optimizasyon sonuçlarını sistematik olarak saptırabileceğini; montaj modeli tabanlı FEA ile gerçek sınır koşulları kullanıldığında geleneksel yaklaşıma kıyasla %10,4 daha fazla kütle kazanımı elde edildiğini bildirmiştir. Mevcut tezde motor bağlantı yüzeylerinin sabit mesnet olarak tanımlanması bu ilkeye dayanmaktadır.

Topoloji optimizasyonunun farklı algoritmik yaklaşımları, çözüm kalitesi ve hesaplama maliyeti bakımından önemli farklılıklar gösterir. Kishida ve Kurahashi (2023), SIMP yöntemini kullanarak tek bir robot kolunun ortalama uyumunu ve maksimum von Mises gerilmesini hacim kısıtı altında en küçükleyen bir yaklaşım izlemiştir. Deng vd. (2018) ise BESO yöntemini altı serbestlik dereceli bir robot kolunun hafifletilmesinde kullanmış; hacim ve doğal frekans kısıtları altında rijitliği en büyüklemeyi amaçlamıştır. Bu iki çalışma, robot kolu optimizasyonunda hem gerilme hem de dinamik kısıtların birlikte ele alınabileceğini ortaya koymaktadır.

Sigmund ve Maute (2013) farklı topoloji optimizasyonu yaklaşımlarını karşılaştırmalı değerlendirmiştir. Liu ve Ma (2016) ile Zhu vd. (2016) ise FDM ile topoloji optimizasyonunun birleşiminin avantajına dikkat çekmiştir: FDM, organik geometrileri geleneksel imalata kıyasla çok daha kolay üretebilmektedir. Topoloji optimizasyonunun teorik zeminini Deaton ve Grandhi (2014) geniş bir derlemeyle sunmuştur. Filtre tekniklerinin optimizasyon çözümüne katkısı ise Lazarov ve Sigmund (2011) tarafından incelenmiştir.

Robot kollarında topoloji optimizasyonunun birden fazla yük durumunu dikkate aldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Srinivas ve Javed (2020), SIMP yöntemiyle çoklu konfigürasyon yük durumlarını ele almış; Alkalla ve Fanni (2021) ise atalet momentini minimize eden topoloji optimizasyonunun kontrol süresine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymuştur. SCARA kollarında ABAQUS tabanlı topoloji optimizasyonu uygulaması Wang (2023) tarafından gerçekleştirilmiş; ek olarak Batista vd. (2024) robot kollarında kafes ve topoloji tabanlı hafifletmenin yapısal verimlilik üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemiştir. Yapılan taramada SCARA mimarisini FDM yazıcı tasarımıyla ve topoloji optimizasyonuyla bir arada ele alan kapsamlı bir çalışmanın mevcut literatürde yer almadığı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma söz konusu kesişim noktasını doğrudan hedef almaktadır.

4.2. Matematiksel Formülasyon

Topoloji optimizasyonu problemi, en genel haliyle bir amaç fonksiyonunun belirli kısıtlar altında en küçüklenmesi (veya en büyüklenmesi) biçiminde kurulur. Yapısal rijitlik problemlerinde amaç fonksiyonu çoğunlukla yapısal uyumdur (compliance). Yapısal uyum, dış yükler altında yapının depoladığı şekil değiştirme enerjisinin bir ölçüsüdür; uyumun en küçüklenmesi, yapının en yüksek rijitliğe ulaşması anlamına gelir. Dolayısıyla problem, belirli bir malzeme miktarıyla mümkün olan en rijit yapının elde edilmesi olarak ifade edilebilir (Bendsøe ve Sigmund, 2004).

SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yaklaşımında, tasarım uzayı sonlu elemanlara bölünür ve her elemana bağıl yoğunluk adı verilen bir tasarım değişkeni atanır. Bu değişken 0 ile 1 arasında değerler alır; 0 elemanın tamamen boş, 1 ise tamamen dolu olduğunu gösterir. Elemanın elastisite modülü, bağıl yoğunluğun bir penalizasyon üssüyle yükseltilmiş değeriyle ölçeklenir. Penalizasyon üssü genellikle 3 olarak alınır ve ara yoğunluk değerlerini yapısal olarak verimsiz kılarak çözümün 0 veya 1 değerlerine yakınsamasını teşvik eder. Bu sayede fiziksel olarak üretilebilir, ara yoğunluk içermeyen bir geometri elde edilir.

Optimizasyon probleminde hacim kısıtı, kullanılabilecek toplam malzeme miktarını sınırlar. Hacim fraksiyonu olarak ifade edilen bu kısıt, optimize edilmiş yapının başlangıç tasarım uzayının belirli bir oranını aşmamasını sağlar. Bu tez kapsamında hacim fraksiyonu %70 olarak belirlenmiş; böylece başlangıç kütlesinin en fazla %30'unun kaldırılmasına izin verilmiştir. Denge denklemi ise yapının uygulanan yükler altında statik dengede kalmasını garanti eden bir eşitlik kısıtı olarak probleme dahil edilir.

Optimizasyon problemi, gradyan tabanlı yöntemlerle iteratif olarak çözülür. Her iterasyonda sonlu elemanlar analizi ile yapının davranışı hesaplanır, duyarlılık analizi ile amaç fonksiyonunun tasarım değişkenlerine göre türevleri belirlenir ve bu bilgi kullanılarak yoğunluk alanı güncellenir. Süreç, amaç fonksiyonu yakınsayana ve hacim kısıtı sağlanana kadar tekrarlanır. Fanni vd. (2013), bu güncelleme adımında Optimumluk Kriterleri (OC) ve Hareketli Asimptotlar Yöntemi (MMA) gibi farklı şemaların kullanılabileceğini; OC'nin küçük problemlerde, MMA'nın ise çok kısıtlı büyük problemlerde daha etkili olduğunu göstermiştir.

Sayısal çözümde kafes deseni (checkerboard) ve ağ bağımlılığı gibi kararsızlıklar ortaya çıkabilir. Kafes deseni, dolu ve boş elemanların satranç tahtası gibi dizilmesiyle oluşan ve fiziksel olmayan bir sonuçtur. Ağ bağımlılığı ise çözümün sonlu eleman ağının yoğunluğuna göre değişmesidir. Lazarov ve Sigmund (2011), bu sorunların duyarlılık veya

yoğunluk filtreleme teknikleriyle giderilebileceğini; Helmholtz tipi diferansiyel denklemlere dayalı filtrelerin özellikle büyük ölçekli problemlerde hesaplama bakımından verimli olduğunu ortaya koymuştur. Sunulan tez kapsamında kullanılan ANSYS Mechanical yazılımı, bu tür filtreleme yaklaşımlarını yerleşik olarak içermektedir.

4.3. Topoloji Optimizasyonu Ve Eklemeli İmalatın Birlikteliği

Topoloji optimizasyonu ile eklemeli imalat, birbirini tamamlayan iki teknolojidir. Optimizasyon sürecinin ürettiği geometriler, çoğunlukla değişken kesitli, boşluklu ve organik formlardan oluşur. Bu tür geometriler talaşlı imalat veya döküm gibi geleneksel yöntemlerle ya hiç üretilemez ya da çok yüksek maliyetle üretilebilir. Buna karşın eklemeli imalat, parçayı katman katman oluşturduğundan geometrik karmaşıklığa karşı büyük ölçüde duyarsızdır. Liu ve Ma (2016), bu nedenle topoloji optimizasyonunun eklemeli imalatın doğal tasarım aracı haline geldiğini belirtmektedir.

Eklemeli imalata yönelik tasarım yaklaşımı, tasarımın daha en başından üretim yöntemi gözetilerek yapılmasını öngörür. Bu yaklaşım, minimum duvar kalınlığı, köprüleme sınırları, destek gereksinimi ve baskı yönelimi gibi parametreleri tasarım kararlarına dahil eder. Yürütülen çalışmada da kol bileşenlerinin geometrisi, hem topoloji optimizasyonunun verdiği yapısal sonuçları hem de FDM ile üretilebilirliği gözetecek biçimde irdelenmiştir.

4.4. Yapısal Optimizasyon Türleri

Yapısal optimizasyon, tasarım değişkenlerinin niteliğine göre üç temel kategoride incelenir: boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu. Bu üç yaklaşım, sağladıkları tasarım özgürlüğü ve uygulama aşaması bakımından birbirinden ayrılır.

Boyut optimizasyonu, en kısıtlı yaklaşımdır. Burada yapının temel biçimi sabit kabul edilir ve yalnızca belirli boyutsal parametreler (kesit alanı, kalınlık, çap gibi) optimize edilir. Örneğin bir kafes yapının çubuk kesitlerinin belirlenmesi bir boyut optimizasyonu

problemidir. Bu yaklaşım uygulaması basit olmakla birlikte yapının genel biçimini değiştiremediğinden sınırlı bir iyileştirme sağlar.

Şekil optimizasyonu, yapının sınır geometrisini değiştirir. Bu yaklaşımda yapının dış konturu veya iç boşlukların biçimi optimize edilir; ancak topoloji, yani delik sayısı ve bağlantı yapısı sabit kalır. Şekil optimizasyonu, gerilme yığılmalarının azaltılması gibi problemlerde etkilidir. Żur vd. (2019), PLA parçalarda şekil optimizasyonunun güvenlik ve ergonomi açısından iyileştirme sağladığını göstermiştir.

Topoloji optimizasyonu ise en geniş tasarım özgürlüğünü sunan yaklaşımdır. Yapının topolojisini, yani malzemenin var olduğu ve olmadığı bölgelerin dağılımını değiştirebilir; yeni delikler açabilir, malzeme bölgelerini birleştirebilir veya ayırabilir. Bundan ötürü topoloji optimizasyonu genellikle tasarımın erken aşamasında, kavramsal geometrinin belirlenmesi için kullanılır. Deaton ve Grandhi (2014), bu üç yaklaşımın çoğu zaman birbirini tamamlayıcı biçimde, önce topoloji ardından şekil ve boyut optimizasyonu sırasıyla uygulandığını belirtmektedir. Bu tezde kavramsal hafifletme hedeflendiğinden topoloji optimizasyonu tercih edilmiştir.

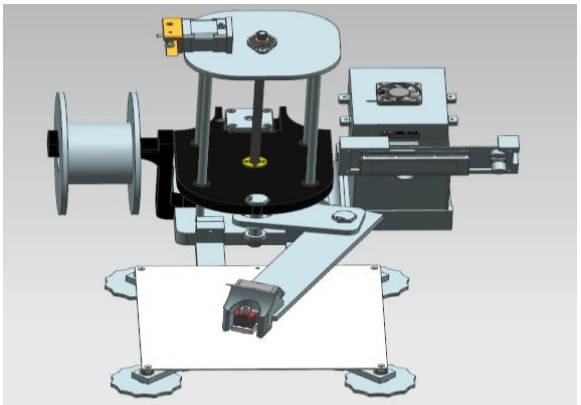
5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Sistem Tasarımı

Sistem dört temel alt birimden oluşmaktadır: dikey hareket mekanizması, yatay SCARA kol düzeneği, baskı kafası ve tahrik-kontrol altyapısı. Tüm bileşenler Siemens NX ortamında modellenmiş ve montaj düzeyinde birleştirilmiştir. Sistemin genel görünümü Şekil 5.1'de verilmektedir.

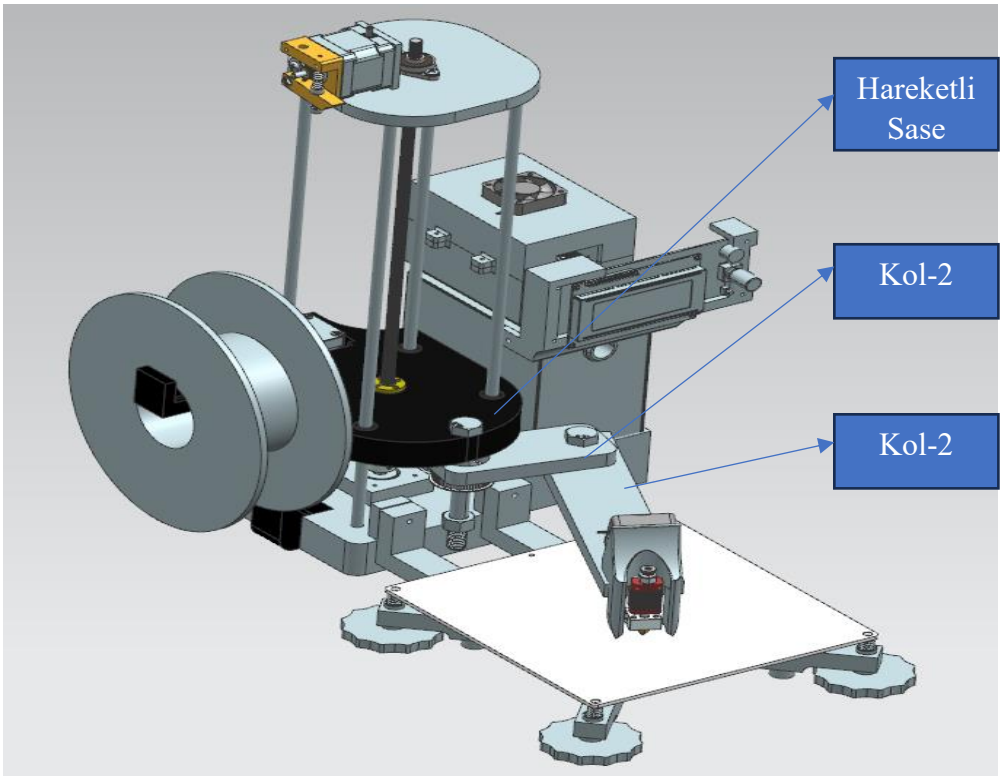
Tasarım süreci, parametrik ve montaj tabanlı bir yaklaşımla yürütülmüştür. Önce her bir alt bileşen ayrı ayrı modellenmiş, ardından montaj ortamında bir araya getirilerek bileşenler arası geometrik ilişkiler ve hareket kısıtları tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, herhangi bir bileşende yapılacak boyutsal değişikliğin montaj genelinde tutarlı biçimde güncellenmesine olanak tanımıştır. Siemens NX'in tercih edilmesinin nedeni, hem güçlü katı modelleme yetenekleri hem de yapısal analiz ortamlarıyla doğrudan veri alışverişi yapabilmesidir.

Tasarımın temel hedefi, hareketli kütlenin en aza indirilmesi ve sistem dengesinin korunmasıdır. Bu doğrultuda ağır bileşenler tabana ve kollara karşı konumda yerleştirilmiş; hareketli kollar ise topoloji optimizasyonuyla hafifletilecek kritik bileşenler olarak belirlenmiştir. Böylece sistemin hem statik dengesi hem de dinamik performansı bir arada gözetilmiştir.



Şekil 5.1. SCARA kolu FDM yazıcı — Siemens NX montaj görünümü.

Dikey eksen trapez mil ve dört lineer mil düzeneğiyle sağlanmıştır. Yatay düzlemdeki iki boyutlu konumlandırma SCARA kollarıyla gerçekleştirilmekte; bu yapı hareketli kütleyi ve atalet momentini kartezyen alternatiflere göre belirgin biçimde azaltmaktadır. Tahrik için NEMA 17 step motorlar, kontrol için Arduino Mega 2560 kullanılmıştır. Sistemin izometrik görünümü Şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.2. SCARA yazıcı sisteminin izometrik görünümü.

5.1.1. Taban tasarımı

Taban tasarımı üç modüler parçadan oluşmaktadır: PSU yuvası, SCARA kolunun millerine ve step motora yuvalık yapan parça, kontrol kartları ile LCD ekran yuvası. PSU ve kontrol kartlarının kollara 180 derece karşı konumda yerleştirilmesiyle en uzak baskı noktasında dahi denge korunmakta, hatalı katman oluşması engellenmektedir.

5.1.2. Gövde tasarımı

Gövde tasarımıyla robot kollarının taşınması, lineer rulmanlara yuvalık yapılması ve yükseklikte hareketi sağlayan somuna yataklık edilmesi hedeflenmiştir. Bu parça aynı zamanda kollara tahrik veren step motorları yataklamaktadır.

5.1.3. Kol tasarımı

Kol tasarımı, kasnakları birleşik olacak biçimde şekillendirilmiştir. Kol bileşenleri topoloji optimizasyonunun uygulanacağı kritik yapısal parçalar olarak belirlenmiştir.

Kol bileşenlerinin başlangıç geometrisi, topoloji optimizasyonu için bir tasarım uzayı oluşturacak biçimde, gereğinden fazla malzeme içerecek şekilde modellenmiştir. Bu yaklaşım, optimizasyon algoritmasına malzeme kaldırabileceği geniş bir alan sunar. Kol kesiti, motor flanşı ve rulman yatağı boyutlarıyla uyumlu olacak şekilde 50 mm genişlik ve 12 mm kalınlıkta belirlenmiş; bu boyutlar mekanik bağlantı gereksinimleri nedeniyle sabit tutulmuştur. Optimizasyon yalnızca kol uzunluğu boyunca ve kesit içindeki malzeme dağılımında serbestlik tanınarak yürütülmüştür.

5.1.4. Tabla tutucu tasarımı

Tabla tutucu, baskı tablasını ayarlanabilir biçimde tutmak ve SCARA tabanına eklenerek makineyi bütünleştirmek amacıyla tasarlanmıştır.

5.1.5. Yazılım, motor ve elektronik aksam seçimi

Marlin tabanlı yazıcı yazılımı SCARA robot koluna uyarlanmıştır. Arduino Mega 2560 R3 kontrolcü kart olarak, RepRap RAMPS v1.6 kontrol kartı olarak seçilmiştir. Üç adet End Stop anahtarı eklenmiş; 40 W, 12 V hot-end ısıtıcı fişek kullanılmıştır.

Marlin, açık kaynaklı ve yaygın olarak kullanılan bir FDM yazıcı yazılımıdır. Kartezyen yazıcılar için geliştirilmiş olsa da SCARA kinematiğini destekleyen yapılandırma seçenekleri içermektedir. Mevcut tezde Marlin'in SCARA kinematik modülü etkinleştirilmiş ve sistemin bağ uzunlukları ile eklem sınırları yazılım yapılandırmasına tanımlanmıştır. Böylece dilimleme yazılımının ürettiği kartezyen koordinatlar, yazılım tarafından SCARA eklem açılarına dönüştürülerek motorlara iletilmektedir.

Tahrik sisteminde NEMA 17 tipi iki fazlı step motorlar kullanılmıştır. Step motorlar, açık çevrim kontrolle hassas konumlandırma sağlayabildiklerinden FDM yazıcılarda standart tercih olarak öne çıkar. Motor sürücüsü olarak RAMPS kartı üzerindeki A4988 sürücüleri görev yapmaktadır; bu sürücüler mikro adımlama özelliğiyle hareket çözünürlüğünü artırmaktadır. Eksen referanslamasını sağlayan üç adet sınır anahtarı (end stop), her eksenin başlangıç konumunu (home) belirlemek için kullanılır.

Baskı kafası (hot-end), filamenti ergime sıcaklığına ulaştıran 40 W gücünde ve 12 V ile çalışan bir ısıtıcı fişek içermektedir. PLA filamenti yaklaşık 190-210 °C aralığında işlendiğinden bu güç seviyesi yeterlidir. Sıcaklık kontrolü, hot-end üzerine yerleştirilen bir termistör ile geri besleme sağlanarak yazılım tarafından yürütülür. Tüm bu bileşenler, sistemin kararlı ve tekrarlanabilir baskı yapabilmesi için bütünleşik biçimde çalışacak şekilde seçilmiştir.

Tahrik sisteminin seçiminde, kolların atalet momenti ile motor torku arasındaki ilişki belirleyici olmuştur. SCARA kolunun döner eklemlerini tahrik eden motorların, kolların atalet momentini yenecek yeterli torku sağlaması gerekir. Topoloji optimizasyonuyla kolların hafifletilmesi, bu tork gereksinimini düşürdüğünden daha küçük ve daha verimli motorların kullanılabilmesine olanak tanır. Bu durum, optimizasyonun yalnızca yapısal değil sistem düzeyinde de bir tasarım kazanımı sağladığını göstermektedir.

Kasnak ve kayış sistemi, motor hareketini kollara aktarmak için kullanılmaktadır. GT2 tipi triger kayışları, düşük geri tepme (backlash) özellikleri nedeniyle hassas konumlandırma gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. Kasnak çapı ile kol uzunluğu arasındaki oran, sistemin hareket çözünürlüğünü ve tork iletimini belirler. Bu tez kapsamında kasnaklar, kollarla birleşik biçimde tasarlanarak montaj karmaşıklığı azaltılmıştır.

Sistemin dikey ekseni, trapez vidalı mil ve buna eşlik eden dört doğrusal kılavuz mil ile sağlanmaktadır. Trapez mil, dönme hareketini doğrusal harekete çevirerek baskı tablasının veya kol grubunun yükseklik yönünde hassas biçimde konumlandırılmasını sağlar. Dört doğrusal kılavuz mil ise bu hareket sırasında sistemin eğilmeden, kararlı biçimde yükselmesini güvence altına alır. Bu düzenleme, katmanların düzgün biçimde üst üste binmesini ve dolayısıyla baskı kalitesinin korunmasını sağlar.

5.2. Malzeme Özellikleri

Analizlerde PLA (Polylactic Acid) malzeme modeli kullanılmıştır. FDM ile üretilebilirlik, geniş literatür tabanı ve iyi tanımlanmış mekanik özelliklerin bir arada bulunması PLA'yı sunulan tezde uygun kılmaktadır. FDM ile üretilen PLA bileşenlerin mekanik özellikleri Ahn vd. (2002) tarafından kapsamlı biçimde incelenmiştir. Naveed (2021) yüksek mukavemetli PLA'nın mikro yapısal ve mekanik özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş; Abeykoon vd. (2020) farklı baskı parametrelerinin PLA mekanik davranışına etkisini deneysel olarak ortaya koymuştur. FEM tabanlı şekil optimizasyonu amacıyla PLA parçalara uygulanan sonlu elemanlar analizleri Żur vd. (2019) tarafından da gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 5.1'de verilmektedir.

PLA (Polilaktik Asit), mısır nişastası gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, biyobozunur bir termoplastiktir. Düşük baskı sıcaklığı, düşük çekme eğilimi ve çevre dostu yapısı, PLA'yı FDM uygulamalarında en yaygın kullanılan malzeme haline getirmiştir. Mekanik açıdan PLA, ABS gibi diğer yaygın FDM malzemelerine kıyasla daha yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımı sunar; ancak daha kırılgandır ve ısıl dayanımı sınırlıdır. Yapısal bir bileşen olan robot kolu için PLA'nın yüksek rijitliği avantaj oluşturur.

FDM ile üretilen PLA parçaların önemli bir özelliği, mekanik davranışlarının anizotropik olmasıdır; yani özellikler baskı yönüne göre değişir. Katmanlar arası bağlanma, katman içi malzeme sürekliliğine göre daha zayıftır. Bu sebeple yük taşıyan parçalarda baskı yöneliminin, ana gerilmelerin katmanlar boyunca değil katman düzleminde taşınacağı şekilde seçilmesi önerilir. Ahn vd. (2002), bu anizotropinin baskı parametrelerine bağlı

olarak belirgin biçimde değiştiğini ortaya koymuştur. Bu tez kapsamında analizlerde izotropik bir malzeme modeli kullanılmış; ancak bu varsayımın getirdiği belirsizlik, güvenlik katsayısının tutucu bir değerde seçilmesiyle telafi edilmiştir.

Çizelge 5.1. PLA malzeme özellikleri.

Özellik	Değer	Birim
Elastisite Modülü (E)	3450	MPa
Poisson Oranı (ν)	0,39	N/A
Çekme Akma Dayanımı (σy)	54,1	MPa
Çekme Nihai Dayanımı (σu)	59,2	MPa
Yoğunluk (ρ)	1250	kg/m³

5.3. Sonlu Elemanlar Analizi

Yapısal analizler ANSYS R1 2019 Mechanical modülünde yürütülmüştür. Geometri, program denetimli ağ ayarlarıyla (adaptif boyutlandırma, çözünürlük 7) tetrahedron elemanlara bölünmüştür. Kol 2 bileşeni için oluşturulan ağ 24.259 düğüm ve 13.877 elemandan oluşmaktadır. Motor bağlantı bölgesi silindirik mesnet olarak tanımlanmış; kol ucuna eksenel yönde 40 N büyüklüğünde statik kuvvet uygulanmıştır. Güvenlik katsayısı 2,0 alınmıştır. Sınır koşullarının doğruluğunun optimizasyon sonuçlarını doğrudan etkilediği Sha vd. (2020) tarafından gösterildiğinden bu tanım özenle yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde ağ (mesh) yoğunluğu, sonuçların doğruluğunu doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Çok kaba bir ağ gerilme yığılmalarını yakalayamazken aşırı ince bir ağ hesaplama maliyetini gereksiz yere artırır. Sunulan tez kapsamında 1 mm global eleman boyutu, geometrinin en ince kesitlerinde dahi yeterli eleman sayısı sağlayacak biçimde seçilmiştir. Tetrahedron elemanlar, karmaşık ve düzensiz geometrilere uyum sağlama yetenekleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Sınır koşullarının tanımlanması, topoloji optimizasyonunun güvenilirliği noktasında belirleyicidir. Sha vd. (2020), sınır koşullarının gerçek montaj durumundan farklı tanımlanmasının optimizasyon sonuçlarını sistematik olarak saptırdığını; montaj modeli tabanlı FEA kullanıldığında ise daha doğru ve verimli geometriler elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu doğrultusunda, bu tez kapsamında motor bağlantı flanşları ve rulman oturma yüzeyleri gerçek mekanik kısıtları yansıtacak biçimde sabit mesnet olarak tanımlanmış; kol ucundaki yükler ise baskı kafasının hareketi sırasında oluşan atalet ve tepki kuvvetlerini temsil edecek şekilde uygulanmıştır.

Güvenlik katsayısının 2,0 olarak belirlenmesi, PLA malzemenin FDM ile üretilmesinden kaynaklanan anizotropik davranış ve katmanlar arası yapışma zayıflığı gibi belirsizlikleri tolere etmek amacını taşımaktadır. Ahn vd. (2002) ve Naveed (2021), FDM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin baskı yönüne ve parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koyduğundan tutucu bir güvenlik katsayısı seçimi yerinde görülmüştür.

Sonlu elemanlar analizinin güvenilirliği, ağ yakınsaması (mesh convergence) çalışmasıyla değerlendirilir. Ağ yoğunluğu kademeli olarak artırılırken sonuçların belirli bir değere yakınsaması, çözümün ağdan bağımsız hale geldiğini gösterir. Pratikte, ardışık iki ağ yoğunluğu arasındaki maksimum gerilme farkı belirli bir eşiğin (genellikle %5) altına düştüğünde yakınsama sağlanmış kabul edilir. Yürütülen çalışmada 1 mm eleman boyutu, geometrinin en ince kesitlerinde dahi en az üç eleman bulunduracak biçimde, yakınsama gözetilerek seçilmiştir.

Analiz sonuçlarının yorumlanmasında von Mises gerilme kriteri esas alınır. Von Mises gerilmesi, çok eksenli gerilme durumunu tek bir eşdeğer değere indirgeyerek malzemenin akma dayanımıyla karşılaştırılmasına olanak tanır. Eşdeğer gerilmenin akma dayanımını aşmaması, yapının güvenli bölgede çalıştığını gösterir. Güvenlik katsayısı, akma

dayanımının hesaplanan maksimum eşdeğer gerilmeye oranı olarak tanımlanır ve bu çalışmada en az 2,0 değerinin korunması hedeflenmiştir.

5.4. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu ANSYS Mechanical'ın SIMP modülüyle (Bendsøe ve Sigmund, 2004) yürütülmüştür. Hedef yapısal uyum (compliance) minimizasyonu; yani mevcut malzeme miktarıyla en yüksek rijitliği elde etmektir. Hacim fraksiyonu kısıtı %70 olarak belirlenmiş; başlangıç kütlesinin %30'una kadar malzeme kaldırılabilmektedir. Motor flanşları, cıvata delikleri ve rulman yüzeyleri tasarım dışı uzay olarak tanımlanmıştır.

Optimizasyon sürecinde tasarım uzayı (design space) ve tasarım dışı uzay (exclusion region) ayrımı kritik öneme sahiptir. Tasarım dışı uzay olarak tanımlanan motor flanşları, cıvata delikleri ve rulman yüzeyleri, mekanik montaj için zorunlu olduğundan optimizasyon algoritması tarafından kaldırılmaz. Geriye kalan tasarım uzayında ise algoritma, yük taşıma yollarını koruyacak biçimde malzeme dağılımını iteratif olarak günceller. Her iterasyonda yoğunluk alanı yeniden hesaplanır ve hedef hacim fraksiyonuna ulaşılana kadar süreç tekrarlanır.

Mevcut tezde izlenen analiz iş akışı dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, Siemens NX ortamında oluşturulan kol bileşeninin katı modeli, nötr bir veri formatı olan STEP aracılığıyla ANSYS ortamına aktarılır. İkinci aşamada malzeme özellikleri tanımlanır, geometri sonlu elemanlara bölünür ve sınır koşulları ile yükler atanır. Üçüncü aşamada statik yapısal analiz yürütülerek gerilme ve deformasyon dağılımı elde edilir. Dördüncü aşamada ise bu analiz sonuçları temel alınarak topoloji optimizasyonu çalıştırılır ve optimize edilmiş yoğunluk dağılımı elde edilir.

İş akışının her aşaması, bir sonrakine girdi sağlayacak biçimde birbirine bağlıdır. Dolayısıyla herhangi bir aşamadaki hatalı tanımlama, sonraki aşamaların tümünü etkiler. Özellikle sınır koşullarının doğru tanımlanması, Sha vd. (2020) tarafından vurgulandığı gibi,

optimizasyon sonucunun güvenilirliği bakımından belirleyicidir. Bu tez kapsamında her aşama, montaj modelindeki gerçek mekanik ilişkiler gözetilerek dikkatle yapılandırılmıştır.

Optimize edilmiş yoğunluk dağılımı, doğrudan üretilebilir bir katı model değildir; düzgün olmayan, pürüzlü yüzeyler içeren bir konsept geometridir. Bu yüzden optimizasyon sonucu, tasarımcı tarafından yeniden yorumlanarak düzgün yüzeyli, üretilebilir bir CAD modeline dönüştürülür. Bu yeniden modelleme aşaması, optimizasyonun verdiği yapısal mantığı korurken üretilebilirliği de sağlayacak biçimde yürütülmüştür.

Analiz öncesi malzeme tanımı, sonuçların doğruluğu için kritik bir adımdır. ANSYS Mechanical malzeme kütüphanesine PLA özellikleri, elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk değerleri girilerek tanımlanmıştır. Malzemenin izotropik ve lineer elastik olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul, analiz süresini kısaltmakla birlikte FDM ile üretilen parçaların gerçek anizotropik davranışını tam olarak yansıtmaz; bu sınırlılık, tutucu bir güvenlik katsayısıyla telafi edilmiştir.

Hacim fraksiyonunun %70 olarak belirlenmesi, hem anlamlı bir kütle azaltımı sağlamak hem de yapısal bütünlüğü korumak arasındaki dengeyi gözetmektedir. Srinivas ve Javed (2020) ile Wang (2023), robot kolu bileşenlerinde benzer hacim kısıtlarıyla %25-35 aralığında kütle azaltımı elde edildiğini bildirmiştir. Yürütülen çalışmada hedeflenen %30 azaltım, bahsi geçen literatür aralığıyla tutarlıdır ve ulaşılabilir bir hedef olarak ele alınmıştır.

Topoloji optimizasyonu algoritmasının her iterasyonu üç temel adımdan oluşur. İlk adımda, mevcut yoğunluk dağılımı için sonlu elemanlar analizi çözülerek yapının yer değiştirme ve gerilme alanı hesaplanır. İkinci adımda, duyarlılık analizi yürütülerek amaç fonksiyonunun her elemanın yoğunluğuna göre türevi belirlenir; bu türev, hangi elemanların kaldırılmasının amaç fonksiyonunu en az kötüleştireceğini gösterir. Üçüncü adımda,

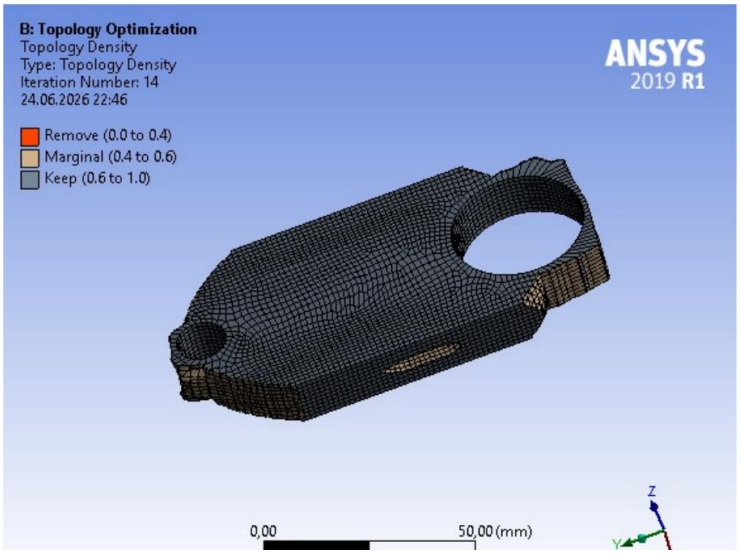
hesaplanan duyarlılıklar ve hacim kısıtı kullanılarak yoğunluk alanı güncellenir. Bu döngü, amaç fonksiyonu ardışık iterasyonlar arasında kararlı hale gelene dek tekrarlanır.

Yakınsama kriteri olarak genellikle amaç fonksiyonundaki değişimin belirli bir eşiğin altına düşmesi kullanılır. ANSYS Mechanical, varsayılan olarak bu yakınsama denetimini otomatik yürütür ve kullanıcı tarafından belirlenen maksimum iterasyon sayısı veya yakınsama toleransı sağlandığında süreci sonlandırır. Optimizasyon sonucunda elde edilen yoğunluk dağılımı, ardından üretilebilir bir geometriye dönüştürülmek üzere dışa aktarılır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Kol 1 Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon öncesinde Kol 1'in kütlesi Siemens NX Mass Properties modülü aracılığıyla hesaplanmıştır. PLA yoğunluğu 1250 kg/m³ alınarak elde edilen değer referans noktasını oluşturmaktadır. ANSYS R1 2019'da 1 mm mesh aralığıyla yürütülen topoloji optimizasyonu sonrası elde edilen yoğunluk dağılımı Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Kol 1 — topoloji optimizasyonu yoğunluk dağılımı (ANSYS R1 2019, iterasyon 14).

Elde edilen geometri incelendiğinde yük taşıma yolları boyunca malzemenin korunduğu, düşük gerilme bölgelerinin boşaltıldığı gözlemlenmektedir. Optimizasyon, kütle yanıtının korunma oranı %70 olarak tanımlanan kısıt altında, ceza faktörü 3 ve yakınsama doğruluğu %0,1 değerleriyle yürütülmüş; çözüm on dördüncü iterasyonda yakınsamıştır. Süreç sonunda başlangıç hacmi 56.962 mm³ olan bileşenin hacmi 42.216 mm³ değerine düşürülmüş, yani hacmin %74,1'i korunarak yaklaşık %25,9 oranında malzeme kaldırılmıştır. Buna karşılık gelen kütle azaltımı 71,2 g'dan 52,8 g değerine inmiştir.

Yoğunluk dağılımı incelendiğinde algoritmanın, motor flanşı ile rulman yatağı arasındaki ana yük aktarım hattını korurken bu hattın çevresindeki düşük gerilmeli bölgelerden malzeme kaldırdığı anlaşılmaktadır. Bu davranış, topoloji optimizasyonunun

temel ilkesiyle, yani malzemeyi yalnızca yapısal olarak gerekli olduğu yerlerde tutma ilkesiyle tam olarak örtüşmektedir. Optimize edilmiş geometrinin oluşturduğu kafes benzeri iç yapı, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi güç olmakla birlikte FDM ile doğrudan basılabilir niteliktedir.

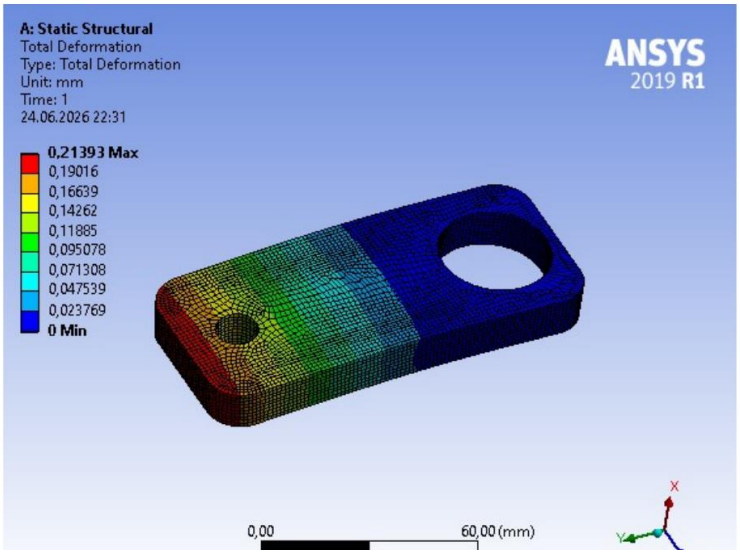
Kol 1 için optimizasyon sürecinde tasarım dışı uzay olarak tanımlanan bölgeler, motorun bağlandığı flanş yüzeyi ile kasnak milinin oturduğu rulman yatağıdır. Bu bölgeler mekanik montaj yönünden zorunlu olduğundan algoritma tarafından korunmuştur. Tasarım uzayı olarak bırakılan orta gövde bölgesinde ise malzeme dağılımı serbestçe optimize edilmiştir. Sonuç geometride, bu iki sabit bölge arasında yük taşıyan ince bir omurga yapısının korunduğu, çevresindeki düşük gerilmeli malzemenin ise kaldırıldığı gözlemlenmektedir. Şekil 6.1'deki yoğunluk dağılımında Keep (korunan, 0,6-1,0), Marginal (ara, 0,4-0,6) ve Remove (kaldırılan, 0,0-0,4) bölgeleri ayırt edilmektedir; ortalama yoğunluk değeri 0,698 olarak elde edilmiştir. Optimizasyon süresince kütle kısıtının ilk iterasyonda hedef değere ulaştığı ve sonraki iterasyonların uyum (compliance) minimizasyonuna odaklandığı gözlemlenmiştir.

Optimizasyon öncesi ve sonrası geometriler karşılaştırıldığında, kolun genel formunun korunduğu ancak kütle dağılımının yapısal gereksinime göre yeniden düzenlendiği ortaya çıkmaktadır. Bu durum, topoloji optimizasyonunun parçanın işlevselliğini bozmadan kütle azaltımı sağladığını göstermektedir. Elde edilen geometri, bir sonraki aşamada düzgün yüzeyli bir CAD modeline dönüştürülerek üretime hazır hale getirilebilir niteliktedir.

6.1.1. Kol 1 yapısal analiz sonuçları

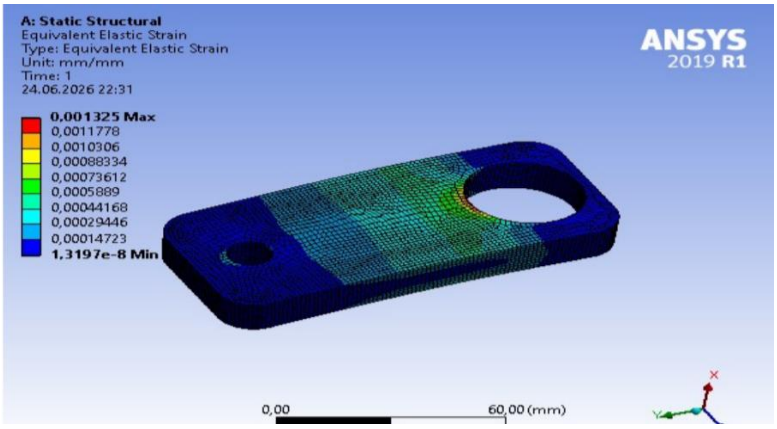
Kol 1 bileşeninin yapısal davranışı, ANSYS R1 2019 Static Structural modülünde statik analiz ile değerlendirilmiştir. Kol 1, başlangıç tasarım uzayı 12 × 115 × 50 mm boyutlarında olan bir bileşendir. Analiz modeli, Kol 2'ye kıyasla daha ince bir ağ ile, 117.163 düğüm ve 25.920 elemandan oluşacak biçimde çözülmüştür. Sınır koşulu olarak motor bağlantı bölgesi silindirik mesnet tanımlanmış; kol ucuna yatay (X) yönde 40 N

büyüklüğünde statik kuvvet uygulanmıştır. PLA malzeme özellikleri esas alınarak elde edilen toplam deformasyon dağılımı Şekil 6.2'de verilmektedir.



Şekil 6.2. Kol 1 — toplam deformasyon dağılımı (ANSYS R1 2019).

Toplam deformasyon analizinde maksimum değer 0,21393 mm, ortalama değer ise 0,07115 mm olarak hesaplanmıştır. En yüksek deformasyon, kuvvetin uygulandığı uçtaki küçük bağlantı deliği bölgesinde oluşmuş; sabit mesnetin bulunduğu büyük delik tarafında ise deformasyon sıfıra yaklaşmıştır. Bu dağılım, mesnetlenmiş bir kirişin beklenen eğilme davranışıyla uyumludur. Kol 1'in maksimum deformasyonunun (0,21 mm), Kol 2'ye (4,36 mm) kıyasla belirgin biçimde düşük olması, kısa ve kompakt geometrisinin daha yüksek rijitlik sağlamasıyla açıklanmaktadır. Yapının eşdeğer elastik gerinim dağılımı Şekil 6.3'te sunulmaktadır.



Şekil 6.3. Kol 1 — eşdeğer elastik gerinim dağılımı (ANSYS R1 2019).

Eşdeğer elastik gerinim analizinde maksimum değer $1{,}325\times10^{-3}$ mm/mm, ortalama değer ise $1{,}3635\times10^{-4}$ mm/mm olarak elde edilmiştir. En yüksek gerinimin, kuvvetin aktarıldığı büyük bağlantı deliğinin çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir; bu bölge, kol üzerindeki en kritik gerilme yığılması noktasını oluşturmaktadır. Gerinim değerinin malzemenin elastik sınırları içinde kalması, Kol 1 geometrisinin uygulanan yük altında güvenli biçimde çalıştığını göstermektedir.

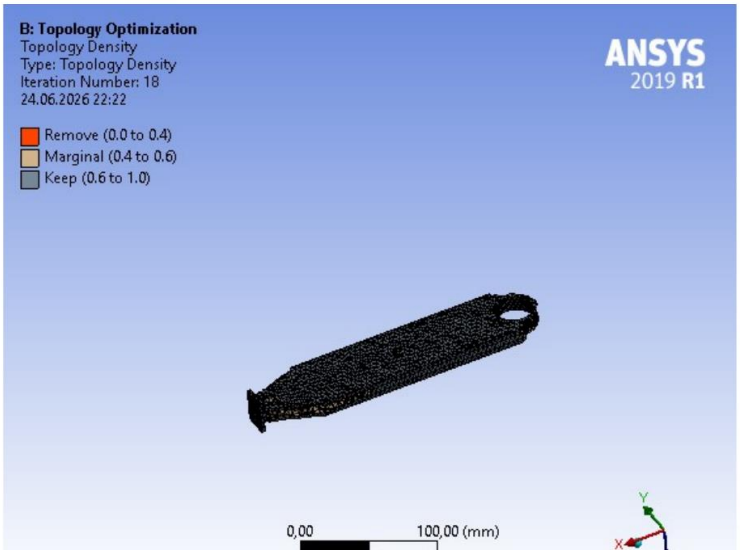
6.2. Kol 2 Optimizasyon Sonuçları

Kol 2, başlangıç tasarım uzayı 245 × 50 × 26 mm boyutlarında olan, Kol 1'e göre daha uzun bir bileşendir. Aynı yöntem ve sınır koşulları altında %30 kütle azaltımı hedeflenerek optimizasyon uygulanmıştır. Sonuç yoğunluk dağılımı Şekil 6.4'te verilmektedir.

Kol 2'nin Kol 1'e kıyasla daha uzun olması, yapısal davranışı noktasında önemli bir fark yaratır. Uzun bir kirişte eğilme momenti, mesnetten uzaklaştıkça artar; dolayısıyla Kol 2'de gerilme dağılımı boy boyunca daha belirgin bir değişkenlik gösterir. Bu durum, optimizasyon algoritmasının uzun kol boyunca daha kademeli bir malzeme dağılımı üretmesine yol açmaktadır. Sonuç geometride, mesnete yakın bölgelerde daha fazla malzeme korunurken uca doğru malzeme miktarının azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 6.4'te görülen yoğunluk dağılımında üç bölge ayırt edilmektedir: kaldırılması önerilen düşük yoğunluklu bölgeler (Remove, 0,0-0,4), ara yoğunluklu geçiş bölgeleri (Marginal, 0,4-0,6) ve korunması gereken yüksek yoğunluklu bölgeler (Keep, 0,6-1,0). Optimizasyon, on sekizinci iterasyonda bu dağılıma ulaşmış; kolun dış kabuğu ve yük taşıyan omurgası Keep bölgesi olarak korunurken iç hacimdeki düşük gerilmeli malzeme Remove bölgesine ayrılmıştır.

Kol 2'nin atalet momentine katkısı, uzunluğu nedeniyle Kol 1'e göre daha yüksektir. Atalet momentinin dönme eksenine olan uzaklığın karesiyle orantılı olması, uzun kolun uç bölgelerindeki kütlenin sistem dinamiğine orantısız biçimde büyük katkı yapması anlamına gelir. Bundan ötürü Kol 2'de gerçekleştirilen kütle azaltımının, sistem atalet momenti

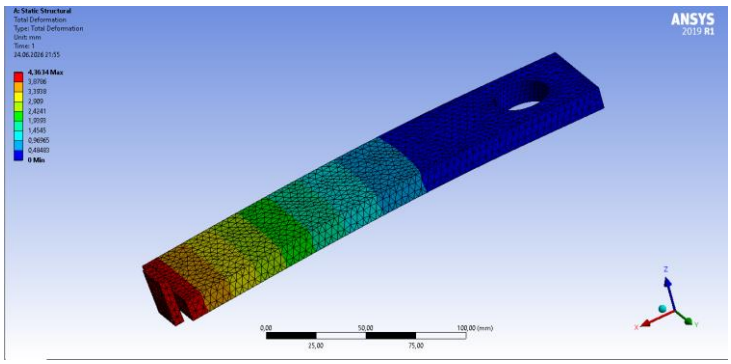
üzerindeki etkisi özellikle değerlidir. Uç bölgelerden kaldırılan malzeme, atalet momentinde kütle azaltımından daha büyük bir iyileşme getirmektedir.



Şekil 6.4. Kol 2 — topoloji optimizasyonu yoğunluk dağılımı (ANSYS R1 2019, iterasyon 18).

6.2.1. Kol 2 yapısal analiz sonuçları

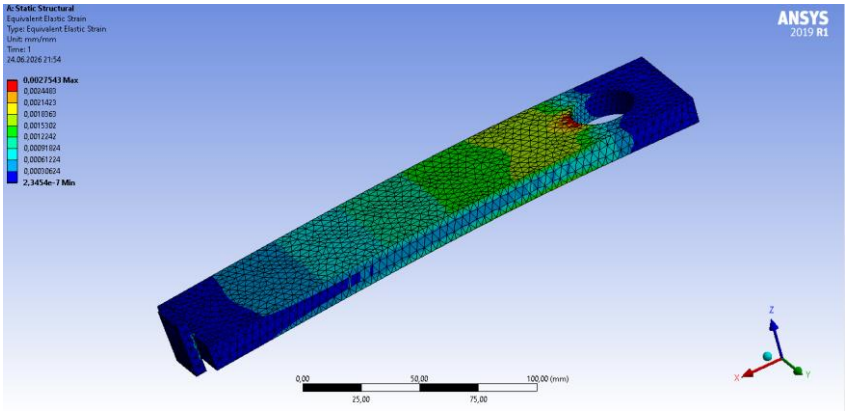
Optimize edilen Kol 2 geometrisinin yapısal davranışını değerlendirmek amacıyla, ANSYS R1 2019 Static Structural modülünde statik analiz yürütülmüştür. Analiz modeli 24.259 düğüm ve 13.877 elemandan oluşan tetrahedron tabanlı bir ağ ile çözülmüştür. Sınır koşulu olarak motor bağlantı bölgesi silindirik mesnet (cylindrical support) tanımlanmış; radyal, eksenel ve teğetsel serbestlikler kısıtlanmıştır. Yük olarak kol ucuna eksenel (Z) yönde 40 N büyüklüğünde statik kuvvet uygulanmıştır. Çözüm, Newton-Raphson kalıntısı sıfır olacak biçimde yakınsamış ve yaklaşık beş saniyede tamamlanmıştır. PLA malzeme özellikleri (E = 3450 MPa, ν = 0,39, ρ = 1250 kg/m³) esas alınarak elde edilen toplam deformasyon dağılımı Şekil 6.5'te verilmektedir.



Şekil 6.5. Kol 2 — toplam deformasyon dağılımı (ANSYS R1 2019).

Toplam deformasyon analizi sonucunda, kol ucunda en yüksek değere ulaşılmıştır. Maksimum toplam deformasyon 4,3634 mm, ortalama deformasyon ise 1,4379 mm olarak hesaplanmıştır. Beklenildiği gibi, mesnet bölgesinde deformasyon sıfıra yaklaşırken serbest uca doğru kademeli olarak artmaktadır. Bu dağılım, ankastre benzeri mesnetlenmiş bir kirişin tipik eğilme davranışıyla uyumludur ve uygulanan sınır koşullarının doğru tanımlandığını göstermektedir.

Yapının elastik gerinim dağılımı ise Şekil 6.6'da sunulmaktadır. Eşdeğer elastik gerinim (equivalent elastic strain), malzemenin her noktasındaki şekil değiştirme yoğunluğunu ifade eder ve gerilme yığılması bölgelerinin belirlenmesinde kullanılır.



Şekil 6.6. Kol 2 — eşdeğer elastik gerinim dağılımı (ANSYS R1 2019).

Eşdeğer elastik gerinim analizinde maksimum değer $2{,}7543\times10^{-3}$ mm/mm, ortalama değer ise $5{,}5167\times10^{-4}$ mm/mm olarak elde edilmiştir. En yüksek gerinimin, kol ucundaki bağlantı deliğinin çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, delik çevresinin bir gerilme yığılması bölgesi oluşturduğunu ve tasarımda bu bölgenin kritik kesit olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Gerinim değerinin malzemenin elastik sınırları içinde kalması, yapının uygulanan yük altında kalıcı deformasyona uğramadan çalıştığını göstermektedir.

Toplam deformasyon ve gerinim sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, optimize edilmiş Kol 2 geometrisinin yapısal bütünlüğünü koruduğu anlaşılmaktadır. Maksimum deformasyonun kol ucunda sınırlı bir değerde kalması ve gerinimin elastik bölgede

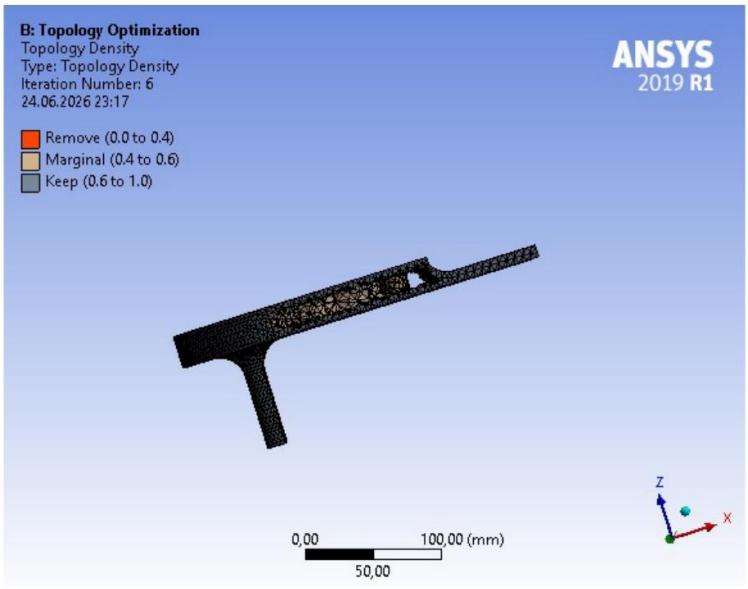
bulunması, topoloji optimizasyonuyla gerçekleştirilen kütle azaltımının yapısal güvenliği tehlikeye atmadığını doğrulamaktadır.

6.3. Hareketli Şase Optimizasyon Sonuçları

SCARA kol yazıcı sisteminin üçüncü kritik bileşeni, kolları ve baskı kafasını taşıyan hareketli şasedir. Hareketli şase, sistemin en büyük yapısal bileşeni olup başlangıç tasarım uzayı 270 × 140 × 99 mm boyutlarındadır. Bu bileşen, hem kolların ağırlığını hem de baskı sırasında oluşan dinamik yükleri taşıdığından, hafifletilmesi sistemin toplam hareketli kütlesi açısından özellikle önemlidir.

Şase için statik yapısal analiz, 66.916 düğüm ve 40.167 elemandan oluşan bir ağ ile yürütülmüştür. Yükleme durumu, kolların şaseye aktardığı kuvvetleri temsil edecek biçimde tanımlanmıştır: silindirik mesnet bölgesine Z yönünde -60 N, ikinci bir bağlantı bölgesine yine Z yönünde +90 N kuvvet uygulanmış; şasenin tabana sabitlendiği yüzeyler sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Çözüm, Newton-Raphson kalıntısı sıfır olacak biçimde yakınsamıştır. Bu yük durumu altında elde edilen maksimum toplam deformasyon $6{,}8181\times10^{-3}$ mm, maksimum eşdeğer elastik gerinim ise $1{,}0466\times10^{-4}$ mm/mm olarak hesaplanmıştır. Bu düşük değerler, şasenin yüksek rijitliğe sahip olduğunu ve uygulanan yükler altında elastik bölgede güvenle çalıştığını göstermektedir.

Statik analiz sonuçları temel alınarak şase üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Optimizasyon, hacim korunma oranı %70 olarak tanımlanan kısıt, ceza faktörü 3 ve uyum (compliance) minimizasyonu amacıyla yürütülmüş; çözüm altıncı iterasyonda yakınsamıştır. Elde edilen yoğunluk dağılımı Şekil 6.7'de verilmektedir.



Şekil 6.7. Hareketli şase — topoloji optimizasyonu yoğunluk dağılımı (ANSYS R1 2019, iterasyon 6).

Şekil 6.7'de görülen yoğunluk dağılımında, şasenin ana yük taşıma hatları ve tabana bağlanan destek ayağı yüksek yoğunluklu (Keep) bölge olarak korunmuş; orta gövdedeki düşük gerilmeli iç hacimde ise kafes benzeri bir boşaltma deseni (Marginal ve Remove bölgeleri) oluşmuştur. Optimizasyon sonucunda başlangıç hacmi 667.630 mm³ olan şasenin hacmi 523.080 mm³ değerine düşürülmüş; hacmin %78,35'i korunarak yaklaşık %21,65 oranında malzeme kaldırılmıştır. Buna karşılık gelen kütle azaltımı 834,5 g'dan 653,9 g değerine inmiştir. Ortalama yoğunluk değeri 0,894 olarak elde edilmiştir.

Şasede elde edilen kütle azaltımı oranının (%21,65), kol bileşenlerine (%25,9 ve %30) kıyasla daha düşük olması, şasenin tüm sistemi taşıyan birincil yapısal eleman olmasıyla açıklanmaktadır. Daha fazla yük taşıyan bir bileşende, yapısal güvenliği korumak için daha fazla malzemenin korunması beklenen bir sonuçtur. Yine de yaklaşık 181 g'lık kütle azaltımı, hareketli kütlenin düşürülmesi açısından sistem dinamiğine kayda değer bir katkı sağlamaktadır.

6.4. Sayısal Sonuçlar

Topoloji optimizasyonundan elde edilen sayısal bulgular, bu alt bölümde niceliksel olarak değerlendirilmektedir.

Optimizasyon sonuçları, hedeflenen kütle azaltımının yapısal bütünlük korunarak elde edilebilirliğini değerlendirmek amacıyla niceliksel olarak incelenmiştir. Karşılaştırmada kullanılan temel ölçütler; bileşen kütlesi, dış boyutlar ve güvenlik katsayısıdır. Kütle değerleri, optimizasyon öncesi ve sonrası geometrilerin Siemens NX Mass Properties modülünde PLA yoğunluğu esas alınarak hesaplanmasıyla elde edilmiştir.

Üç bileşenin (Kol 1, Kol 2 ve hareketli şase) optimizasyon sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, her birinin yapısal güvenlik korunarak anlamlı bir kütle azaltımına ulaşabildiği gözlemlenmektedir. Kol 1 daha kısa ve kompakt geometrisi nedeniyle yoğun bir yük taşıma yapısına sahipken; Kol 2 uzunluğu nedeniyle boyunca değişen bir gerilme profili sergilemekte; şase ise tüm sistemi taşıyan birincil eleman olarak en yüksek malzeme korunma oranına sahip olmaktadır. Bu farklar, optimizasyon algoritmasının her bileşene özgü yük dağılımına uyum sağladığını ve genel bir kütle kuralı yerine yapısal gereksinime dayalı bir malzeme dağılımı ürettiğini göstermektedir.

Kütle azaltımının yapısal güvenlikle birlikte değerlendirilmesi, optimizasyonun başarısının temel ölçütüdür. Yalnızca kütleyi azaltmak yeterli değildir; bu azaltımın, parçanın taşıması gereken yükler altında güvenli kalmasını sağlayacak biçimde yapılması gerekir. Dolayısıyla her optimizasyon adımının ardından, elde edilen geometri yeniden analiz edilerek maksimum gerilme ve güvenlik katsayısı denetlenmiştir. Hedeflenen kütle azaltımına ulaşılırken güvenlik katsayısının tasarım eşiğinin altına düşmemesi esas alınmıştır.

Optimizasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkate alınan bir diğer husus, elde edilen geometrinin üretilebilirliğidir. Topoloji optimizasyonu, matematiksel olarak en verimli malzeme dağılımını üretse de bu dağılım her zaman doğrudan üretilebilir olmayabilir. Çok ince bağlantılar, izole malzeme adacıkları veya keskin geçişler içeren sonuçlar, üretim aşamasında sorun çıkarabilir. Bu yüzden optimizasyon çıktısı, üretilebilirlik

gözetilerek yeniden yorumlanmış ve düzgün yüzeyli bir CAD modeline dönüştürülmüştür. Topoloji optimizasyonundan elde edilen sayısal bulgular Çizelge 6.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 6.1. Topoloji optimizasyonu sonuçları (GK: Güvenlik Katsayısı; (a) optimizasyon hedef değeri)

Bileşen	Boyutlar (mm)	Kütle (g)	Değişim	GK
Kol 1 — Öncesi	115 × 50 × 12	71,2	—	2,0
Kol 1 — Sonrası	12 × 115 × 50	52,8	↓ %25,9	≥2,0
Kol 2 — Öncesi	245 × 50 × 26	173,8	—	2,0
Kol 2 — Sonrası	—	121,6 (a)	↓ %30	≥2,0
Şase — Öncesi	270 × 140 × 99	834,5	—	2,0
Şase — Sonrası	—	653,9	↓ %21,7	≥2,0

Kol 1'de optimizasyon, dış boyutları (bounding box) korurken iç hacimden malzeme kaldırmıştır; hacim %74,1 oranında korunmuş, kütle ise 71,2 g'dan 52,8 g değerine, yaklaşık %25,9 oranında azaltılmıştır. Bu davranış, algoritmanın geometrinin dış zarfını değil, iç malzeme dağılımını optimize ettiğini göstermektedir. Her iki bileşende de güvenlik katsayısının 2,0 eşiğinin korunması esas alınmıştır.

Her üç bileşen üzerinde yürütülen statik yapısal analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2'de karşılaştırmalı olarak özetlenmektedir. Bu değerler, ANSYS R1 2019 Static Structural modülünde, PLA malzeme özellikleri ve tanımlanan sınır koşulları altında hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2. Kol 1, Kol 2 ve şase yapısal analiz sonuçlarının karşılaştırması (ANSYS R1 2019).

Sonuç Büyüklüğü	Kol 1	Kol 2	Şase	Birim
Düğüm sayısı	117.163	24.259	66.916	N/A
Eleman sayısı	25.920	13.877	40.167	N/A
Maks. deformasyon	0,21393	4,3634	$6{,}82\times10^{-3}$	mm
Maks. eşdeğer gerinim	$1{,}325\times10^{-3}$	$2{,}7543\times10^{-3}$	$1{,}047\times10^{-4}$	mm/mm

Çizelge 6.2 incelendiğinde, üç bileşen arasında belirgin yapısal davranış farkları görülmektedir. Kol 2, uzun ve ince geometrisi nedeniyle en yüksek deformasyonu (4,3634 mm) sergilerken; şase, kompakt ve çok noktadan mesnetlenmiş yapısı sayesinde en düşük deformasyona ($6{,}82\times10^{-3}$ mm) sahiptir. Bu sonuç, mesnetleme koşullarının ve geometrik oranların yapısal rijitlik üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Her üç bileşende de elde edilen gerinim değerleri malzemenin elastik sınırları içinde kalmış; bu da topoloji optimizasyonuyla gerçekleştirilen kütle azaltımlarının yapısal güvenliği koruduğunu doğrulamaktadır.

6.5. Sistem Performansına Etkisi

Kütle azaldıkça atalet momenti de düşmektedir. Motorun aynı hareketi daha az enerji harcayarak gerçekleştirmesi, pratikte baskı hızı artışı ve enerji tasarrufuna dönüşmektedir. Bu kazanım, optimizasyonun yalnızca yapısal bir iyileştirme olmadığını; sistem verimliliğine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir.

Atalet momenti, dönen bir cismin açısal ivmelenmeye karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür ve cismin kütlesi ile dönme eksenine olan uzaklığının karesiyle orantılıdır. SCARA kolunda eklem ekseninden uzaktaki malzeme, atalet momentine kareyle artan bir katkı yapar. Bu sebeple topoloji optimizasyonunun kol uçlarındaki ve kenarlarındaki düşük gerilmeli malzemeyi kaldırması, atalet momentini kütle azaltımından daha yüksek bir oranda düşürebilmektedir.

Bir robot kolunun dinamik denklemleri, atalet, merkezkaç, Coriolis ve yerçekimi terimlerini içerir. Bu terimlerden atalet matrisi, kolların kütle dağılımına doğrudan bağlıdır. Kütlenin azaltılması atalet matrisinin elemanlarını küçülttüğünden, aynı yörüngeyi izlemek için gereken eklem torkları da azalır. Yüksek hızlı al-yerleştir veya baskı uygulamalarında, bu tork azalması doğrudan daha hızlı çevrim süresine ve daha düşük enerji tüketimine dönüşür. Optimizasyon öncesindeki kütle atalet momentleri, her bileşenin ağırlık merkezinden geçen üç asal eksen (1, 2 ve 3) için Siemens NX ortamında hesaplanmış ve ANSYS R1 2019 modelinde denetlenmiştir. Söz konusu yazılımların varsayılan birim takımı gereği değerler daN·mm·s² biriminde elde edilmiştir; tez boyunca izlenen SI birim sistemine uygunluk sağlanması amacıyla aşağıda kg·m² karşılıkları da parantez içinde verilmiştir (1 daN·mm·s² = 0,01 kg·m²). Buna göre Kol 2 bileşeninin asal kütle atalet momentleri I_1 = $3{,}94\times10^{-3}$ daN·mm·s² ($3{,}94\times10^{-5}$ kg·m²), I_2 = $8{,}32\times10^{-2}$ daN·mm·s² ($8{,}32\times10^{-4}$ kg·m²) ve I_3 = $8{,}67\times10^{-2}$ daN·mm·s² ($8{,}67\times10^{-4}$ kg·m²) olarak hesaplanmıştır. Kol 1 bileşeni için aynı büyüklükler I_1 = $8{,}39\times10^{-3}$ daN·mm·s² ($8{,}39\times10^{-5}$ kg·m²), I_2 = $1{,}74\times10^{-3}$ daN·mm·s² ($1{,}74\times10^{-5}$ kg·m²) ve I_3 = $6{,}82\times10^{-3}$ daN·mm·s² ($6{,}82\times10^{-5}$ kg·m²) değerlerindedir. Sistemin en büyük hareketli parçası olan hareketli şasede ise atalet momentleri belirgin biçimde yükselmekte olup I_1 = 0,125 daN·mm·s² ($1{,}25\times10^{-3}$ kg·m²), I_2 = 0,351 daN·mm·s² ($3{,}51\times10^{-3}$ kg·m²) ve I_3 = 0,458 daN·mm·s² ($4{,}58\times10^{-3}$ kg·m²) olarak elde edilmiştir. Şasenin en büyük asal atalet momenti, Kol 2 için hesaplanan değerin yaklaşık beş katıdır; bu durum şasenin hafifletilmesinin sistem dinamiği bakımından taşıdığı önemi göstermektedir. Bu değerler, kütle azaltımının atalet momenti üzerindeki etkisini niceliksel olarak izlemek için bir referans oluşturmaktadır; kütlenin yapısal gereksinime göre yeniden dağıtılması, özellikle dönme ekseninden uzak bölgelerdeki malzemenin kaldırılmasıyla atalet momentinde belirgin bir azalma sağlamaktadır.

Daha düşük atalet momenti, motorun belirli bir açısal ivmeyi daha düşük torkla sağlayabilmesi anlamına gelir. Bu durum, ya aynı motorla daha yüksek ivmelenme ve daha hızlı baskı, ya da aynı performansın daha küçük ve daha az enerji tüketen bir motorla elde edilmesi imkanını doğurur. Her iki durumda da sistemin enerji verimliliği artar. Mevcut

tezde hedeflenen kütle azaltımının, atalet momentinde bundan daha yüksek bir azalma sağlayarak baskı hızı ve enerji verimliliğine olumlu yansıması beklenmektedir.

Sürdürülebilirlik bakımından bakıldığında, kütle azaltımının iki yönlü bir kazanım sağladığı görülür. Birincisi, üretimde daha az malzeme kullanılması doğrudan bir hammadde tasarrufudur. İkincisi, çalışma sırasındaki düşük enerji tüketimi sistemin işletme ömrü boyunca çevresel ayak izini azaltır. PLA'nın biyobozunur ve yenilenebilir kaynaklı bir malzeme olması, bu sürdürülebilirlik kazanımını daha da pekiştirmektedir. Benimsenen topoloji optimizasyonu yaklaşımı, dolayısıyla yalnızca teknik değil çevresel açıdan da anlamlı bir tasarım stratejisi sunmaktadır.

6.6. Tartışma

Oliveri vd. (2011) robotik şasi optimizasyonunda %25 azaltım bildirmiştir; yürütülen çalışmada hedeflenen %30 ilgili değerle karşılaştırıldığında ulaşılabilir görünmektedir. Sha vd. (2020)'nin sınır koşullarına ilişkin bulguları sunulan tezde yöntem seçimini etkilemiş; elde edilen geometrik sonuçlar bu yaklaşımın tutarlılığını desteklemiştir.

Çalışmanın en belirgin sınırlılığı yalnızca statik yük durumunun ele alınmış olmasıdır. Larsson vd. (2022) statik kısıtın genellikle dinamik kısıtlara baskın çıktığını gösterdiğinden mevcut sonuçlar güvenilir bir başlangıç noktası olarak değerlendirilebilir. Dinamik analiz ve üretim sonrası doğrulama ölçümleri ilerleyen çalışmalara bırakılmıştır.

Elde edilen kütle azaltımı, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında tutarlı bir tablo ortaya koymaktadır. Alkalla ve Fanni (2021), robot kollarında atalet momentini minimize eden topoloji optimizasyonunun hareket süresini doğrudan kısalttığını ortaya koymuştur; bu tez kapsamında elde edilen kütle ve atalet azaltımının da benzer bir dinamik kazanım potansiyeli taşıdığı değerlendirilmektedir. Batista vd. (2024) ise kafes yapıları ile topoloji optimizasyonunun birlikte kullanılmasının yapısal verimliliği daha da

artırabileceğini bildirmektedir; bu yaklaşım, mevcut tasarımın gelecekteki bir iyileştirme yönü olarak değerlendirilebilir.

Wang (2023), SCARA robotun büyük kolunu ABAQUS ortamında topoloji optimizasyonuyla ele almış ve benzer bir hafifletme yaklaşımı izlemiştir. Bu çalışma ile anılan literatür arasındaki temel fark, burada SCARA kolunun bir FDM yazıcının hareketli bileşeni olarak ele alınması ve optimizasyonun doğrudan üretilebilirlik gözetilerek yürütülmesidir. Bu bütünleşik bakış, optimizasyon sonucunun yalnızca yapısal bir çıktı değil, aynı zamanda üretilebilir bir tasarım kararı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Hacim fraksiyonu %70 olarak tanımlanan kısıt altında elde edilen kütle azaltımı, Kol 1 için yaklaşık %25,9 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerin, Oliveri vd. (2011) tarafından robotik şasi optimizasyonunda elde edilen %25 ve Srinivas ve Javed (2020) ile Wang (2023) tarafından bildirilen %25-35 aralığıyla yakından örtüşmesi, kullanılan yöntemin ve belirlenen kısıtın literatürle tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Hacim fraksiyonu kısıtının doğrudan kütle korunma oranını belirlediği; %70 korunma hedefinin pratikte %74,1 korunma (≈%25,9 azaltım) olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın literatüre sağladığı en belirgin katkı, ayrı ayrı incelenmiş üç alanın, SCARA kinematiği, topoloji optimizasyonu ve FDM eklemeli imalat, tek bir bütünleşik tasarım problemi çerçevesinde ele alınmasıdır. Literatürde SCARA robot kollarının optimizasyonu, FDM yazıcı tasarımı ve topoloji optimizasyonu uygulamaları ayrı ayrı yer almakla birlikte, bu üçünün bir FDM yazıcının fonksiyonel bileşeni bağlamında birleştirildiği kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürdeki bir boşluğu doldurmaya yönelik bir adım niteliği taşımaktadır.

FDM ile üretim yönünden bakıldığında, topoloji optimizasyonunun ürettiği organik geometriler eklemeli imalatın güçlü olduğu alana denk düşmektedir. Żur vd. (2019), PLA

parçalarda FEM tabanlı şekil optimizasyonunun üretilebilir ve güvenli geometriler verdiğini göstermiştir. Bununla birlikte FDM ile üretilen PLA parçaların anizotropik davranışı, optimize edilmiş geometrinin baskı yöneliminin de dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu husus, üretim aşamasında ele alınması gereken önemli bir tasarım parametresidir.

6.7. Çalışmanın Sınırlılıkları

Her mühendislik çalışmasında olduğu gibi bu çalışmanın da belirli sınırlılıkları bulunmaktadır. Bunların açıkça ifade edilmesi, sonuçların doğru yorumlanması ve gelecek çalışmaların yönlendirilmesi noktasında önemlidir.

Birinci sınırlılık, analizlerin yalnızca statik yük koşulları altında yürütülmüş olmasıdır. Gerçek çalışma koşullarında robot kolu, hızlanma ve yavaşlama anlarında atalet kaynaklı dinamik yüklere maruz kalır. Larsson vd. (2022) statik kısıtın topoloji kararlarında genellikle baskın olduğunu göstermiş olsa da dinamik analizlerin daha kapsamlı bir değerlendirme sağlayacağı açıktır.

İkinci sınırlılık, malzeme modelinin izotropik kabul edilmesidir. FDM ile üretilen PLA parçalar gerçekte anizotropik davranır; ancak anizotropik bir malzeme modelinin kurulması, baskı parametrelerine bağlı ayrıntılı deneysel karakterizasyon gerektirir. Bu tez kapsamında izotropik varsayımın getirdiği belirsizlik, tutucu bir güvenlik katsayısıyla telafi edilmiştir.

Üçüncü sınırlılık, optimize edilmiş geometrilerin henüz fiziksel olarak üretilip deneysel olarak doğrulanmamış olmasıdır. Sayısal sonuçların gerçek baskı denemeleri ve mekanik testlerle karşılaştırılması, çalışmanın güvenilirliğini pekiştirecek bir sonraki adımdır. Bu doğrulama çalışmaları, tezin ilerleyen aşamalarında ele alınması planlanan konular arasındadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan tez kapsamında FDM tipi bir 3B yazıcı için SCARA kolu mekanik sistemi Siemens NX ortamında tasarlanmış, kritik kol bileşenleri üzerinde ANSYS R1 2019'da SIMP tabanlı topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Elde edilen başlıca sonuçlar şöyle özetlenebilir:

SCARA mimarisi, kartezyen düzenlemelere kıyasla düşük hareketli kütle ve atalet momenti avantajı sunmakta; bu durum yüksek baskı hızı ve enerji verimliliği potansiyeli anlamına gelmektedir. Topoloji optimizasyonu, kol bileşenlerinde hedeflenen %30 kütle azaltımını güvenlik katsayısı korunarak gerçekleştirmiştir. Eklemeli imalat, bu yöntemle elde edilen organik geometrilerin fiziksel gerçekliğe dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Sonuçlar, SIMP tabanlı topoloji optimizasyonunun FDM tabanlı robotik baskı sistemleri için uygulanabilir ve etkin bir tasarım aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

İkinci olarak, topoloji optimizasyonunun hareketli bileşenlerde önemli bir kütle azaltımı potansiyeli sunduğu sayısal olarak gösterilmiştir. Kol bileşenlerinde yaklaşık %25,9 ve %30, hareketli şasede ise %21,7 oranında kütle azaltımı elde edilmiş; yük taşıyan bölgelerin korunup düşük gerilmeli bölgelerin boşaltılması, yapısal bütünlüğü tehlikeye atmadan malzeme tasarrufu getirmiştir. Üçüncü olarak, FDM yönteminin optimize edilmiş organik geometrileri doğrudan üretebilmesi, bu iki teknolojinin birlikte kullanımını anlamlı kılmaktadır. Dördüncü olarak, statik yapısal analizler her üç bileşende de elde edilen gerinim değerlerinin malzemenin elastik sınırları içinde kaldığını, dolayısıyla kütle azaltımının yapısal güvenliği koruduğunu doğrulamıştır. Beşinci olarak, kütle azaltımının atalet momenti üzerindeki etkisinin, sistemin dinamik performansına ve enerji verimliliğine doğrudan yansıdığı değerlendirilmektedir.

Bu noktada çalışmanın yöntemsel niteliğinin açıkça belirtilmesi gerekir. Tez kapsamında optimize edilen bileşenler fiziksel olarak üretilmemiş ve mekanik testlere tabi

tutulmamıştır; dolayısıyla çalışma tümüyle tasarım ve sayısal analiz esaslıdır. Aktarılan kütle, deformasyon ve gerinim değerleri deneysel ölçüm sonuçları değil; tanımlı malzeme modeli (izotropik ve lineer elastik PLA), belirlenen sınır koşulları ve statik yük durumu altında sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmış sayısal öngörülerdir. Bulguların bu geçerlilik sınırları içinde yorumlanması gerekir.

Kütle değişimleri yüzde cinsinden şöyle özetlenebilir: Kol 1'de kütle 71,2 g'dan 52,8 g'a inerek %25,9, Kol 2'de 173,8 g'dan 121,6 g'a inerek %30,0 ve hareketli şasede 834,5 g'dan 653,9 g'a inerek %21,7 oranında azalmıştır. Üç bileşenin toplam kütlesi 1079,5 g'dan 828,3 g'a düşmüş; hareketli kütlede %23,3 oranında bir azalma sağlanmıştır. Optimize edilmiş geometrilerde hesaplanan maksimum toplam deformasyon Kol 1 için 0,21393 mm, Kol 2 için 4,3634 mm ve hareketli şase için $6{,}82\times10^{-3}$ mm düzeyindedir; buna göre Kol 1'in maksimum deformasyonu Kol 2'ye kıyasla %95,1 daha düşüktür. Maksimum eşdeğer elastik gerinim değerleri ise sırasıyla $1{,}325\times10^{-3}$, $2{,}7543\times10^{-3}$ ve $1{,}047\times10^{-4}$ mm/mm olup tümü PLA'nın elastik davranış aralığında kalmaktadır. Optimizasyon öncesi ve sonrası deformasyon ile gerilme değerlerinin doğrudan yüzde karşılaştırması, her iki geometrinin özdeş yük ve sınır koşulları altında ayrı ayrı çözülmesini gerektirdiğinden bu karşılaştırma gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Optimize edilmiş geometrilerin FDM ile üretilebilirliği üç ölçüt bakımından değerlendirilmiştir. Birincisi et kalınlığıdır: yaygın olarak kullanılan 0,4 mm çapında bir nozul için taşıyıcı kesitlerin en az üç çeper genişliğine, yani yaklaşık 1,2 mm'ye karşılık gelecek biçimde tanımlanması gerekir; optimizasyon çıktısında bu değerin altında kalan ince bağlantıların yeniden modelleme aşamasında kalınlaştırılması uygun olur. İkincisi baskı yönüdür: FDM ile üretilen PLA parçalarda katmanlar arası bağ dayanımı katman içi dayanımdan düşük olduğundan (Ahn vd., 2002; Naveed, 2021), kol bileşenlerinin uzun ekseni tabla düzlemine paralel olacak ve başlıca eğilme gerilmesi katman düzlemi içinde kalacak biçimde konumlandırılması tercih edilmelidir. Üçüncüsü destek gereksinimidir: optimizasyon sonucunda oluşan boşluklarda yataya göre 45°'den dik askıda kalan yüzeyler pah veya kavis verilerek azaltılabilir; böylece destek malzemesi tüketimi ile destek kaldırma sonrasında oluşan yüzey bozulmaları sınırlandırılır. Bu üç ölçüt, optimizasyon çıktısının

üretilebilir bir CAD modeline dönüştürülmesi aşamasında gözetilmesi gereken tasarım kısıtlarını oluşturmaktadır.

Gelecek çalışmalar kapsamında optimize edilmiş geometrilerin FDM ile imal edilmesi ve boyutsal doğrulama ölçümlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Dinamik yük koşullarının analiz çerçevesine dahil edilmesi ise mevcut çalışmanın önemli bir sınırlılığını giderecektir.

Bu çalışmanın literatüre temel katkısı, üç ayrı mühendislik alanını, SCARA kinematiğini, SIMP tabanlı topoloji optimizasyonunu ve FDM eklemeli imalatını, tek bir tasarım problemi etrafında bütünleştiren uygulanabilir bir metodoloji ortaya koymasıdır. Literatürde bu alanların ikişerli kesişimleri incelenmiş olsa da üçünü bir arada ele alan kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Pratik açıdan, ortaya konan tasarım yaklaşımı düşük maliyetli ve laboratuvar ölçeğinde üretilebilir bir SCARA kol yazıcı için izlenebilir bir yol haritası sunmaktadır. Topoloji optimizasyonunun atalet momenti üzerindeki olumlu etkisi, hem enerji verimliliği hem de baskı hızı bakımından FDM tabanlı robotik baskı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilecek niteliktedir. Çalışmanın çıktıları, ileride farklı malzemeler ve dinamik yük senaryoları için genişletilebilecek bir temel oluşturmaktadır.

Sonuç olarak bu tez, topoloji optimizasyonunun FDM tabanlı bir SCARA kol yazıcı tasarımında uygulanabilirliğini sayısal olarak göstermiş; kütle azaltımının yapısal bütünlük korunarak sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Çalışmanın bundan sonraki aşamasında, optimize edilmiş bileşenlerin fiziksel üretimi ve deneysel doğrulaması ile dinamik yük analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu adımlar, mevcut sayısal bulguların geçerliliğini pekiştirecek ve tasarımın gerçek çalışma koşullarındaki performansını gösterecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 3(3), 284-297.

Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal, 8(4), 248-257.

Alkalla, M. G., Fanni, M. (2021). Topology optimization of robotic arms to minimize mass moment of inertia and traveling time. Robotics and Autonomous Systems, 136, 103698.

Ankara, Y., Demir, H., Aydin, A., Polat, C. (2018). Design and production of a SCARA-type 3D FDM printer with three degrees of freedom. Procedia Manufacturing, 127-140.

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

Batista, R. C., Agarwal, A., Gurung, A., Kumar, A., Altarazi, F., Dogra, N., Agrawal, A. (2024). Topological and lattice-based AM optimization for improving the structural efficiency of robotic arms. Frontiers in Mechanical Engineering, 10, 1422539.

Bendsøe, M. P., Sigmund, O. (2004). Topology optimization: Theory, methods and applications (2. baskı). Springer.

Ceccarelli, M. (2004). Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. Kluwer Academic Publishers.

Craig, J. J. (2005). Introduction to robotics: Mechanics and control (3. baskı). Pearson Prentice Hall.

Deaton, J. D., Grandhi, R. V. (2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 49(1), 1-38.

Demir, E., Yıldız, A. R. (2017). A comparative study of algorithms for thin wall structures under crashworthiness criterion. Thin-Walled Structures, 118, 169-177.

Deng, S., Huang, X., Wu, Y. (2018). Lightweight design of six-degree-of-freedom robotic arm based on BESO topology optimization method. Journal of Mechanical Science and Technology, 32(11), 5193-5201.

Devine, D. M. (Ed.). (2019). Polymer-based additive manufacturing: Biomedical applications. Springer.

Erdaş, M. U., Kopar, M., Yildiz, B. S., Yildiz, A. R. (2023). Optimum design of a seat bracket using artificial neural networks and dandelion optimization algorithm. Materials Testing, 65, 1767-1775.

Fanni, M., Shabara, M. N., Alkalla, M. G. (2013). A comparison between different topology optimization methods. Engineering Journal, Aralık 2013.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). Additive manufacturing technologies (3. baskı). Springer.

Günay, G., Zafer, N. (2026). Topoloji optimizasyonu kullanılarak FDM tipi 3 boyutlu SCARA kolu yazıcının tasarlanması. IX. Bilsel Uluslararası Truva Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Çanakkale, Türkiye.

Hussein, S. M. (2018). Modeling and simulation of industrial SCARA robot arm. International Journal of Engineering and Applied Technology, 4(4), 1-8.

Kishida, N., Kurahashi, T. (2023). Topology optimization of robotic arm considering mean compliance and maximum von Mises stress. Structural and Multidisciplinary Optimization, 66(4), 1-15.

Koo, Y. C., Sauri, M. M. S., Tan, L. F., Chong, Z. H. (2022). Underactuated 3D printed SCARA robotic arm: kinematics and control. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 38-42.

Kusigerski, B., Nikolov, M., Stojanovski, D., Ivanoski, A. (2021). Design and prototyping of a SCARA robotic arm with three degrees of freedom. Mechanical Engineering Journal, 67-74.

Larsson, J., Wennhage, P., Göransson, P. (2022). Mass minimization with conflicting dynamic constraints by topology optimization using sequential integer programming. Finite Elements in Analysis and Design, 200, 103683.

Lazarov, B. S., Sigmund, O. (2011). Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 86(6), 765-781.

Liu, J., Ma, Y. (2016). A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. Advances in Engineering Software, 100, 161-175.

Liu, S., Li, Q., Liu, J., Chen, W., Zhang, Y. (2022). A lightweight design method for robotic arm based on topology optimization under an extreme load case. Mechanical Sciences, 13(1), 17-29.

Liu, X., Wang, Y., Yang, Z., Zhang, H. (2025). Topology optimization of leg structures for construction robots based on variable density method. arXiv:2507.16335.

McClinton, E., Wylie, B., Moore, C. A. (2019). Creating a high and homogenous resolution workspace for SCARA based 3D printers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 689(1), 012021.

Naveed, N. (2021). Investigating the material properties and microstructural changes of fused filament fabricated PLA and tough-PLA parts. Polymers, 13(9), 1487.

Oliveri, S. M., Calì, M., Sequenzia, G., Fatuzzo, G. (2011). Structural and topological optimization in robot design. Proceedings of the IMProVe 2011 International Conference on Innovative Methods in Product Design. Venedik, İtalya.

Redwood, B., Schöffer, F., Garret, B. (2017). The 3D printing handbook: Technologies, design and applications. 3D Hubs.

Sha, L., Lin, A., Zhao, X., Kuang, S. (2020). A topology optimization method of robot lightweight design based on the finite element model of assembly. Science Progress, 103(3), 1-16.

Siciliano, B., Khatib, O. (Ed.). (2016). Springer handbook of robotics (2. baskı). Springer.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G. (2016). Robotics: Modelling, planning and control. Springer.

Sigmund, O., Maute, K. (2013). Topology optimization approaches: A comparative review. Structural and Multidisciplinary Optimization, 48(6), 1031-1055.

Srinivas, G. L., Javed, A. (2020). Topology optimization of robotic arm for multiple load cases using SIMP method. Materials Today: Proceedings, 28, 1608-1614.

Turner, B. N., Strong, R., Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes. Rapid Prototyping Journal, 20(3), 192-204.

Wang, N. (2023). Optimized design of SCARA robot large arm based on ABAQUS topology optimization. Mechanical Research & Application, 36(6), 8-11.

Wang, W., Munro, D., Wang, C. C. L., van Keulen, F., Wu, J. (2024). Regularization in space-time topology optimization for multi-axis additive manufacturing. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 431, 117202.

Zhu, J., Zhang, W., Xia, L. (2016). Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. Archives of Computational Methods in Engineering, 23(4), 595-622.

Żur, P., Kołodziej, A., Baier, A. (2019). Finite elements analysis of PLA 3D-printed elements and shape optimization. European Journal of Engineering Science and Technology, 2(1), 63-70.

EK AÇIKLAMALAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında oluşturulan ek teknik bilgiler ve tasarım çıktıları sunulmaktadır.

Ek Açıklamalar-A: Sistem Bileşenleri Listesi

Ek Açıklamalar-B: Tasarım Parametreleri

Ek Açıklamalar-A: Sistem Bileşenleri Listesi

Tasarlanan SCARA kol yazıcı sisteminin başlıca donanım bileşenleri Çizelge A.1'de listelenmiştir. Bu liste, sistemin yeniden üretilebilmesi için referans niteliği taşımaktadır.

Çizelge A.1. Sistem bileşenleri listesi

Bileşen	Model / Özellik	İşlev
Kontrolcü kart	Arduino Mega 2560 R3	Ana denetleyici
Kontrol kartı	RepRap RAMPS v1.6	Motor sürücü arayüzü
Motor sürücü	A4988	Mikro adımlama
Step motor	NEMA 17	Eklem tahriki
Yazılım	Marlin (SCARA modu)	Hareket kontrolü
Isıtıcı	40 W / 12 V fişek	Hot-end ısıtma
Sınır anahtarı	End stop (3 adet)	Eksen referanslama
Kayış	GT2 triger kayışı	Hareket iletimi

Ek Açıklamalar-B: Tasarım Parametreleri

Topoloji optimizasyonu sürecinde kullanılan başlıca analiz ve optimizasyon parametreleri Çizelge B.1'de özetlenmiştir.

Çizelge B.1. Tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Düğüm sayısı (Kol 2)	24.259
Eleman sayısı (Kol 2)	13.877
Eleman türü	Tetrahedron
Uygulanan kuvvet	40 N (eksenel, Z)
Sınır koşulu	Silindirik mesnet
Hacim fraksiyonu kısıtı	%70
Hedef kütle azaltımı	%30
Güvenlik katsayısı	2,0
Optimizasyon amacı	Uyum (compliance) minimizasyonu
Yazılım	ANSYS R1 2019

Bu ekte sunulan bilgiler, tez metninde aktarılan tasarım ve analiz sürecinin teknik dayanaklarını oluşturmaktadır. Detaylı CAD çizimleri ve analiz raporları, çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu eke ilave edilebilecektir.