

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TARIM MAKİNELERİ TASARIMI VE İMALATINDA KATMANLI İMALAT
TEKNOLOJİLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE ADAPTASYONU
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA: PLASTİK MALZEME ESASLI BAZI
BAĞLANTI ELEMANLARINDA HIZLI PROTOTİPLEME ÖRNEĞİ**

Gökhan KUNT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIM MAKİNELERİ VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TARIM MAKİNELERİ TASARIMI VE İMALATINDA KATMANLI İMALAT
TEKNOLOJİLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE ADAPTASYONU
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA: PLASTİK MALZEME ESASLI BAZI
BAĞLANTI ELEMANLARINDA HIZLI PROTOTİPLEME ÖRNEĞİ**

Gökhan KUNT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIM MAKİNELERİ VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TARIM MAKİNELERİ TASARIMI VE İMALATINDA KATMANLI İMALAT
TEKNOLOJİLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE ADAPTASYONU
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA: PLASTİK MALZEME ESASLI BAZI
BAĞLANTI ELEMANLARINDA HIZLI PROTOTİPLEME ÖRNEĞİ**

Gökhan KUNT

TARIM MAKİNELERİ VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından FYL-2018-3411
nolu proje ile desteklenmiştir.**

HAZİRAN 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARIM MAKİNELERİ TASARIMI VE İMALATINDA KATMANLI İMALAT
TEKNOLOJİLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE ADAPTASYONU
ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA: PLASTİK MALZEME ESASLI BAZI
BAĞLANTI ELEMANLARINDA HIZLI PROTOTİPLEME ÖRNEĞİ**

Gökhan KUNT

TARIM MAKİNELERİ VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

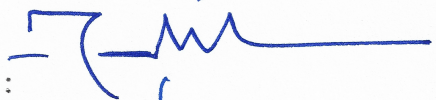
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 25/06/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hüseyin Kürşat ÇELİK (Danışman)

Prof. Dr. İbrahim AKINCI

Prof. Dr. Mehmet UÇAR

: 
: 
: 

ÖZET

TARIM MAKİNELERİ TASARIMI VE İMALATINDA KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ VE ADAPTASYONU ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA: PLASTİK MALZEME ESASLI BAZI BAĞLANTI ELEMANLARINDA HIZLI PROTOTİPLEME ÖRNEĞİ

Gökhan KUNT

Yüksek Lisans Tezi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin Kürşat ÇELİK

Haziran 2019; 178 sayfa

Son yıllarda, bilgisayar destekli mühendislik ve katmanlı imalat teknolojileri birçok farklı makine tasarım ve imalat alanlarında aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tip ileri düzey tasarım ve imalat teknolojileri ile ilgili araştırma alanları uluslararası ölçekte öncelikli araştırma alanları arasında yer almaktadır. Ancak bu tip teknolojiler ile ilgili bilimsel nitelikli araştırmaların ve imalata yönelik pratik uygulamaların sayısının özellikle ülkemizde tarım makineleri tasarımı ve imalatı alanında yok denecek kadar sınırlı sayıda kaldığı görülmektedir.

Bu bağlamda, gerçekleştirilen bu tez çalışmasında; günümüzde aktif bir şekilde kullanımda olan katmanlı imalat teknolojileri hakkında ulusal ve uluslararası düzeyde güncel bilgilerin genel bilimsel ve teknolojik prensipler temelinde derlenmesi, var olan bilimsel çalışmaları kapsayan geniş bir literatür/kaynak taramasının sunulması ve bu teknolojinin tarım makineleri tasarımı ve imalatında kullanılabilirliğinin ve adaptasyonunun olabilirliğinin araştırılması konuları üzerine odaklanılmıştır.

Bununla birlikte, tarım alet ve makine tasarımlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılabilecek ileri düzey bilgisayar destekli tasarım, mühendislik, tersine mühendislik, yapısal optimizasyon ve katmanlı imalat/hızlı prototipleme uygulamalarını referans alan bir tasarım inceleme/değerlendirme uygulama algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, bitkisel üretimde kullanılan ve çalışmanın kapsamına uygun plastik malzeme bazlı bir sera bitki askısı tasarımı üzerinde uygulamaya konulmuştur. Uygulama örneğinde ele alınan örnek tasarımın yapısal optimizasyonu neticesinde başlangıç tasarımına kıyasla %34.49'luk bir kütle kazanımı elde edilmiş ve yeni tasarıma ait hızlı prototip uygulaması adım adım gerçekleştirilerek nihai tasarım çıktıları hazırlanmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması amacına uygun şekilde konu ile ilgili sektör çalışanlarına ve araştırmacılara yön gösterici ve faydalı bir kaynak olarak yapılandırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Tarım Makineleri Tasarımı ve İmalatı, Tersine Mühendislik, Bilgisayar Destekli Tasarım ve Mühendislik, Katmanlı İmalat, Hızlı Prototipleme, Hızlı İmalat, 3B Yazıcılar

JÜRİ: Doç. Dr. Hüseyin Kürşat ÇELİK

Prof. Dr. İbrahim AKINCI

Prof. Dr. Mehmet UÇAR



ABSTRACT

A RESEARCH ON THE USABILITY AND ADAPTATION OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES IN DESIGN AND MANUFACTURING OF AGRICULTURAL MACHINERY: RAPID PROTOTYPING CASE STUDY FOR PLASTIC BASED FASTENERS

Gökhan KUNT

**MSc Thesis in Department of Agricultural Machinery and Technology
Engineering**

Supervisor: Assoc Prof. Dr Hüseyin Kürşat ÇELİK

June 2019; 178 pages

In recent years, computer aided engineering and additive manufacturing systems have been actively used in many different machine design and manufacturing fields. Research areas related to this type of advanced design and manufacturing technologies are among the priority research areas at international level. However, it is seen that the number of scientific researches and practical applications related to such technologies remain in a limited number, especially in the field of agricultural machinery design and manufacture in Turkey.

In this context, within the scope of this thesis; the aim of this study is to present a wide range of literature search on the existing national and international level of information technology about the additive manufacturing technologies that are currently in use, to present a broad literature/literature review covering existing scientific studies and to investigate the availability and adaptability of this technology in the design and manufacture of agricultural machinery.

In addition, a design review/evaluation implementation algorithm has been developed that uses advanced computer aided design, engineering, reverse engineering, optimization and additive manufacturing/rapid prototyping applications that can be used in the development and improvement of agricultural tool and machine designs. This algorithm has been implemented on a greenhouse plant hanger design based on plastic material used in green house production and suitable for the scope of the study. As a result of the structural optimization of the sample design discussed in the case study, a mass gain of 34.49% was obtained compared to the initial design and the rapid prototyping of the new design was realized step by step and final design outputs were prepared.

This study has been structured as a guid and useful source for the sector engineers and researchers.

KEYWORDS: Design and Manufacturing of Agricultural Machinery, Reverse Engineering, Computer Aided Design and Engineering, Additive Manufacturing, Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, 3D Printers

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr Hüseyin Kürşat ÇELİK

Prof. Dr İbrahim AKINCI

Prof. Dr Mehmet UÇAR



ÖNSÖZ

Büyük bir hızla gelişen teknoloji, endüstride ve günlük hayatta yeni sistemlerin ve uygulamaların gelişmesine, bununla birlikte zaman, maliyet, iş gücü gibi birçok etkenin minimuma indirilmesine olanak sağlamaktadır. Yaşanan bu gelişmeler insanoğlunun hayatını her geçen gün kolaylaştırmaktadır. Bu gelişmelerden bir tanesi de bu tez çalışmasının temel konusu olan katmanlı imalat teknolojileridir. Yapılan bu tez çalışmasında çeşitli kaynaklardan faydalanılarak bilimsel çalışma yöntemleri çerçevesinde, geleceğin imalat teknolojisi olarak öngörülen katmanlı imalat teknolojileri ve teknikleri hakkında güncel bilgiler derlenmiş ve tarım makineleri tasarım ve imalat sektöründe kullanılabilirliğine dair uygulamalı bir çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında tez konusunun seçiminden araştırmanın yürütülerek tamamlanmasına kadar geçen sürede her türlü desteğini gördüğüm ve kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin Kürşat ÇELİK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca bu süreçte sabrı ve desteğiyle hep yanımda olan Serap KOÇAK'a, tez yazım işlemleri ve deneyler esnasında benden hiçbir desteğini esirgemeyen arkadaşlarım Zir. Yük. Müh. Emre ÖZDEMİR, Zir. Müh. Emrah ARICAN, Zir. Müh. Gökhan ERAVCI ve İnş. Müh. Furkan DAĞLI'ya sonsuz minnetlerimi sunarım.

Son olarak beni bu günlere kadar getiren, bütün yaşamım ve eğitim öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her daim yanımda olan babam Şerafettin KUNT, annem Hülya KUNT, ablalarım Hatun TURAN ve Handan TÜMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasının ilgili alan ve bu alanda yer alan araştırmacılara faydalı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Katmanlı İmalat.....	2
1.2. Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Tarihsel Gelişimi	3
1.3. Katmanlı İmalat Teknolojileri Kullanım Alanları.....	5
1.4. Katmanlı İmalat Teknolojileri İşlem Basamakları	6
1.4.1. Üç boyutlu (3D) dijital CAD modelin oluşturulması.....	7
1.4.2. 3D CAD modelinin STL formatına dönüştürülmesi	7
1.4.3. STL dosyasının katmanlara bölünmesi ve üretim parametrelerin tanımlanması.....	8
1.4.4. Ürünün katmanlar halinde inşa edilmesi	13
1.4.5. Temizleme ve son işlemler.....	13
1.5. Katmanlı İmalat Yöntemleri.....	14
1.5.1. Fotopolimerizasyon (Vat photopolymerization)	15
1.5.2. Malzeme ekstrüzyonu (Material extrusion)	16
1.5.3. Malzeme püskürtme (Material jetting).....	17
1.5.4. Bağlayıcı püskürtme (Binder jetting).....	18
1.5.5. Toz yatağı birleştirme (Powder bed fusion).....	18
1.5.6. Doğrudan enerji ile yığma (Direct energy deposition).....	19
1.5.7. Tabaka laminasyonu (Sheet lamination)	20
1.5.8. 4 boyutlu yazdırma (4D printing).....	21
1.6. Katmanlı İmalat Yöntemlerinde Kullanılan Hammaddeler	22
1.7. Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Sınırlamaları	23
1.8. Katmanlı İmalat Teknolojileri Üretim Hataları ve Çözüm Yolları	24
1.9. Tersine Mühendislik.....	28
1.10. Tasarım	29

1.11. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD: Computer Aided Design)	31
1.12. Yapısal Optimizasyon	32
1.12.1. Boyut optimizasyonu	33
1.12.2. Şekil optimizasyonu	34
1.12.3. Topoloji optimizasyonu	34
1.13. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM: Finite Elements Method)	35
2. KAYNAK TARAMASI	39
2.1. Katmanlı İmalat Teknolojileri Konusunda Yapılan Uluslararası Bilimsel Yayınlar İçin Güncel Durum İncelenmesi	43
2.1.1. Literatür inceleme modeli	43
2.1.2. Verilerin toplanması ve araştırma sınırlılıkları	44
2.1.3. Veri inceleme çıktıları	44
3. MATERYAL VE METOT	103
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	105
4.1. Uygulama Algoritması ve Adımları	105
4.2. Örnek Uygulama: Bitkisel Üretimde Kullanılan Sera Bitki Askısının Boyut Optimizasyonu ve Hızlı Prototipleme Örneği	110
4.2.1. Sera bitki askısı (SBA)	110
4.2.2. Mukavemete dayalı tasarım incelemesi	114
4.2.2.1. Çekme deneyi	114
4.2.2.2. Sertlik ölçümü	123
4.2.2.3. Kütle ölçümü	124
4.2.2.4. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi	124
4.2.2.5. Tersine mühendislik - CAD süreci	127
4.2.2.6. SBA sonlu elemanlar analizi süreci	128
4.2.3. SBA yapısal optimizasyon kurgusu	140
4.2.3.1. SBA sonlu elemanlar tabanlı boyut optimizasyonu süreci	140
4.2.4. SBA katmanlı imalat/hızlı prototipleme kurgusu	150
4.2.4.1. En uygun katmanlı imalat/hızlı prototipleme yönteminin belirlenmesi	150
4.2.4.2. SBA katmanlı imalat/hızlı prototipleme süreci	150
4.3. Uygulama Algoritması Toplam Süreç Değerlendirmesi	156

4.4. Nihai Tasarım İçin İmalat Resmi Çıktısı.....	157
5. SONUÇLAR	159
6. KAYNAKLAR.....	161
ÖZGEÇMİŞ	

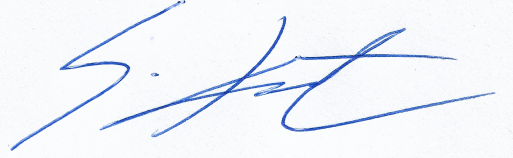


AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tarım Makineleri Tasarımı ve İmalatında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanılabilirliği ve Adaptasyonu Üzerine Bir Araştırma: Plastik Malzeme Esaslı Bazı Bağlantı Elemanlarında Hızlı Prototipleme Örneği” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

25/06/2019

Gökhan KUNT



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- E : Elastisite Modülü
 F : Kuvvet
 g : Yer Çekimi İvmesi
 ν : Poisson Oranı

Kısaltmalar

- 3DP : 3D Printer (3B Yazıcı)
ABS : Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DED : Directed Energy Deposition (Doğrudan Enerji Biriktirme)
DLP : Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
DMLS : Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)
DOE : Design of Experiment (Deney Tasarımı)
EBM : Electron Beam Melting (Elektron Işını ile Ergitme)
FDM : Fused Deposition Modelling (Eriyik Yığılma Modelleme)
FEA : Finite Elements Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FEM : Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
HPDC : High-Pressure Die Casting (Yüksek Basıncılı Döküm)
KHK : Kanun Hükmünde Kararnameler
LENS : Laser Engineered Net Shaping (Lazer ile Net Şekillendirme)
LOM : Laminated Object Manufacturing (Lamine Nesne Üretimi)
MIT : Massachusetts Institute of Technology (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü)
PBF : Powder Bed Fusion (Toz Yatağı Füzyonu)
PLA : Polilaktik Asit
RAM : Robotic Additive Manufacturing (Robotik Katmanlı İmalat)
SBA : Sera Bitki Askısı
SLA : Stereolithography (Stereolitografi)
SLM : Selective Laser Melting (Seçici Lazerle Ergitme)
SLS : Selective Laser Sintering (Seçici Lazerle Sinterleme)
STL : Stereolithography (Stereolitografi)
UV : Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Katmanlı imalat teknolojileri ana uygulamaları	3
Şekil 1.2. Mısır piramitlerinin katmanlar halinde inşa edilmesi (Temsili görsel)	3
Şekil 1.3. Katmanlı imalat teknolojileri kronolojik gelişim süreci	4
Şekil 1.4. 3D Systems şirketi tarafından üretilen SLA-250 cihazı	5
Şekil 1.5. Katmanlı imalat teknolojilerinin sektörlere göre kullanım oranları (2014).....	6
Şekil 1.6. Katmanlı imalat prosesi işlem basamakları	7
Şekil 1.7. Farklı üçgen eleman sayılarına sahip STL formatındaki modeller.....	8
Şekil 1.8. Örnek Cura yazılımı ve katmanlı imalat için ayar (tanımlama) parametreleri	8
Şekil 1.9. Farklı katman kalınlıkları ile yazdırılan malzemelerin yüzey kalitesi ve yazdırma süreleri	9
Şekil 1.10. Farklı kabuk kalınlıkları	10
Şekil 1.11. Duvar kalınlığı sırası ile doğru ve hatalı verilen örnekler	11
Şekil 1.12. Farklı doldurma yoğunluğuna sahip örnek modeller.....	11
Şekil 1.13. Destek elemanı ve kullanım açısı	12
Şekil 1.14. Yüzey pürüzlülüğü giderme (zımpara-boya) işlemleri.....	13
Şekil 1.15. Katmanlı imalat yöntemleri	14
Şekil 1.16. SLA tekniğinin temsili çalışma prensibi	15
Şekil 1.17. DLP tekniğinin temsili çalışma prensibi	16
Şekil 1.18. FDM yöntemi çalışma prensibi	17
Şekil 1.19. Malzeme püskürtme yöntemi çalışma prensibi	17
Şekil 1.20. Bağlayıcı püskürtme yöntemi çalışma prensibi	18
Şekil 1.21. Toz yatağında birleştirme yöntemi çalışma prensibi	19
Şekil 1.22. Doğrudan enerji ile yığma yöntemi çalışma prensibi	20
Şekil 1.23. Tabaka laminasyonu yöntemi çalışma prensibi	21
Şekil 1.24. 4D printing ile üretilen ürünün kendini şekillendirme süreci.....	22
Şekil 1.25. Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan hammaddeler ve üretilmiş bazı ürünler.....	23
Şekil 1.26. Katmanlar arası boşluk hatası	25
Şekil 1.27. Fazla ekstrüzyon hatası	25

Şekil 1.28. Üst katmanlarda oluşan boşluklar.....	26
Şekil 1.29. Katman kayması hatası	27
Şekil 1.30. Çarpılma hatası	27
Şekil 1.31. Tersine mühendislik uygulama adımları	28
Şekil 1.32. Tasarım kavramı	29
Şekil 1.33. Tasarım süreci.....	30
Şekil 1.34. $f(x)$ fonksiyonu için minimum ve $-f(x)$ fonksiyonu için maksimum noktaları.....	32
Şekil 1.35. a) Boyut optimizasyonu, b) Şekil optimizasyonu, c) Topoloji optimizasyonu	33
Şekil 1.36. Boyut optimizasyonu	34
Şekil 1.37. Şekil Optimizasyonu.....	34
Şekil 1.38. Tasarım sürecinde topoloji optimizasyonu adımları.....	35
Şekil 1.39. Sonlu eleman modellemesinde eleman sayısının etkisi.....	37
Şekil 1.40. FEM uygulama adımları	38
Şekil 2.1. HPDC yönteminin SLS tekniği ile maliyet-üretim adedi bakımından karşılaştırılması	42
Şekil 2.2. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı	46
Şekil 2.3. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı	47
Şekil 2.4. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı	47
Şekil 2.5. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı	48
Şekil 2.6. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı	49
Şekil 2.7. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı	50
Şekil 2.8. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı	51

Şekil 2.9. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı	52
Şekil 2.10. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı	52
Şekil 2.11. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı	53
Şekil 2.12. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı	54
Şekil 2.13. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı	55
Şekil 2.14. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı	55
Şekil 2.15. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı	56
Şekil 2.16. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı	57
Şekil 2.17. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı	58
Şekil 2.18. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı	59
Şekil 2.19. “Rapid Prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı	59
Şekil 2.20. “Rapid Tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı	60
Şekil 2.21. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı	61
Şekil 2.22. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı.....	62
Şekil 2.23. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı.....	63
Şekil 2.24. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı.....	63

Şekil 2.25. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı.....	64
Şekil 2.26. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı.....	65
Şekil 2.27. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı.....	66
Şekil 2.28. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı.....	67
Şekil 2.29. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı.....	67
Şekil 2.30. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı	68
Şekil 2.31. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı	69
Şekil 2.32. Türkiye ölçeğinde, belirlenen anahtar kelimeler ile yapılan çalışma sayılarının yıllara göre dağılımı (2014-2018)	70
Şekil 2.33. Türkiye ölçeğinde, yapılan toplam çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı (2014-2018)	71
Şekil 2.34. Katmanlı imalat teknolojileri hakkında rastgele seçilen çalışmaların yıllara göre dağılımı (2015-2019 Mayıs)	100
Şekil 2.35. Katmanlı imalat teknolojileri hakkında rastgele seçilen çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı (2015-2019 Mayıs).....	100
Şekil 2.36. Katmanlı imalat teknolojileri hakkında rastgele seçilen çalışmaların araştırma konusu malzemesine göre dağılımı (2015-2019 Mayıs).....	101
Şekil 4.1. Geliştirilen uygulama algoritması.....	106
Şekil 4.2. Metal ve plastik tip sera bitki askısı	110
Şekil 4.3. Bitki yatırma işlemi	111
Şekil 4.4. SBA ip bağlantı şekilleri ve kabul edilen kuvvet etki noktaları	112
Şekil 4.5. Örnek sera askısı ve kullanımı.....	113
Şekil 4.6. Tez çalışmasında incelenen SBA’lar (SBA-01, SBA-02, SBA-03, SBA-04)	114
Şekil 4.7. Çekme Test Cihazı ve DSLR makine	115

Şekil 4.8. Çekme deneyi öncesi numuneler	116
Şekil 4.9. Çekme deneyi sonrası numuneler	117
Şekil 4.10. SBA çekme deneyinden bir görsel	118
Şekil 4.11. Bitkisel üretim ipleri ve çekme deneyinden bir görsel	118
Şekil 4.12. SBA-01 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği	119
Şekil 4.13. SBA-02 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği	120
Şekil 4.14. SBA-03 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği	120
Şekil 4.15. SBA-04 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği	121
Şekil 4.16. İp (1 mm) çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği	122
Şekil 4.17. İp (2 mm) çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği	122
Şekil 4.18. Shore D Durometer sertlik test cihazı.....	123
Şekil 4.19. Shore D - Rockwell R sertlik dönüşüm diyagramı.....	125
Şekil 4.20. Rockwell R - Akma mukavemeti diyagramı	126
Şekil 4.21. SBA katı model ve geometrik ölçüleri	127
Şekil 4.22. Monster Markut M5 V5.1.1 marka ve modeli iş istasyonu.....	129
Şekil 4.23. SBA sonlu elemanlar analizi için CAD modeli düzenlemeleri	130
Şekil 4.24. SBA sonlu elemanlar analizi sınır koşulları	131
Şekil 4.25. SBA sonlu elemanlar modeli ve özellikleri	133
Şekil 4.26. SBA-01 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları	134
Şekil 4.27. SBA-02 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları	134
Şekil 4.28. SBA-03 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları	135
Şekil 4.29. SBA-04 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları	135
Şekil 4.30. SBA-01 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği.....	136
Şekil 4.31. SBA-02 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği.....	137
Şekil 4.32. SBA-03 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği.....	137

Şekil 4.33. SBA-04 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği.....	138
Şekil 4.34. SBA-01 boyut optimizasyonu sınır koşulları	140
Şekil 4.35. SBA-01 kalınlık tasarım değişkeni (girdi parametresi) seçimi	142
Şekil 4.36. SBA-01 maksimum yer değiştirme (cevap parametresi).....	142
Şekil 4.37. SBA-01 maksimum eşdeğer gerilme (cevap parametresi)	143
Şekil 4.38. SBA-01 toplam reaksiyon kuvveti (cevap parametresi-doğrulama)	143
Şekil 4.39. Oluşturulan tasarım noktaları ve cevap parametrelerinin sonuçları	145
Şekil 4.40. Tasarım eğrisi	146
Şekil 4.41. Aday tasarım değerleri ve tanımlamalar.....	146
Şekil 4.42. Önerilen aday tasarım noktaları.....	147
Şekil 4.43. Optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası (doğrulama) Von Mises eşdeğer gerilme simülasyon çıktıları	148
Şekil 4.44. Optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası (doğrulama) yer değiştirme simülasyon çıktıları	148
Şekil 4.45. Optimizasyon sonucu elde edilen ve STL formatına dönüştürülen CAD model	151
Şekil 4.46. Cura yazılımı STL modelin tabla üzerine konumlandırılması	152
Şekil 4.47. Cura yazılımı tanımlanan üretim parametreleri	152
Şekil 4.48. FDM katmanlı imalat cihazı ve teknik özellikleri	153
Şekil 4.49. SBA-01 elemanının prototip üretim aşaması.....	154
Şekil 4.50. Optimize edilmiş modele ait hızlı prototip örnekleri.....	154
Şekil 4.51. SBA-01 nihai tasarım için imalat resmi.....	158

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Katmanlı imalat teknolojileri üretim hammaddeleri ve hammadde formları.....	22
Çizelge 2.1. Web of Science veri tabanından elde edilen çalışma sayılarının belirlenen anahtar kelimelere göre dağılımı.....	45
Çizelge 2.2. Türkiye ölçeğinde, belirlenen anahtar kelimeler ile 2014-2018 yılları arasında yapılan çalışma sayıları.....	70
Çizelge 2.3. 2015-2019 yılları arasında katmanlı imalat teknolojileri üzerine yapılan bilimsel nitelikli çalışmalar	73
Çizelge 4.1. SBA tasarımları Shore D sertlik ölçüm değerleri	123
Çizelge 4.2. SBA tasarımları kütle, hacim ve yoğunluk değerleri.....	124
Çizelge 4.3. SBA malzeme özellikleri (Bi-lineer elastoplastik malzeme modeli)	126
Çizelge 4.4. SBA tasarımlarının 5 mm, 10 mm ve 15 mm deformasyondaki kuvvet değerlerinin karşılaştırılması	139
Çizelge 4.5. Malzeme özellikleri (Lineer Model).....	141
Çizelge 4.6. Tasarım değişkenleri için kullanılan tasarım sınırlamaları.....	144
Çizelge 4.7. Optimizasyon öncesi, sonrası ve doğrulama değerleri	147

1. GİRİŞ

Geleneksel yöntemlerle kavram (konsept) tasarımı bitmiş ürünler için prototip oluşturmak, yeni tasarımı onaylanmış veya tasarımı güncellenmiş bir ürünü üretmek oldukça maliyetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu kapsamda daha kısa tasarım ve imalat zamanı, karmaşık yapıdaki bir ürünü üretim kolaylığı, daha düşük tasarım ve imalat maliyetleri vb. gibi avantajları nedeniyle, ileri düzey imalat teknolojilerinden biri olan ve birçok alanda geleceğin imalat teknolojilerinden birisi olarak öngörülen katmanlı imalat teknolojileri; genel makine imalatı, medikal, havacılık, otomotiv, savunma sanayi, sanat, mimari, moda tasarımı, gıda vb. gibi birçok alanda aktif olarak kullanılmaya başlanmış, diğer alanlara doğru hızlı bir yayılma ve ilerleme eğilimi göstermektedir. Katmanlı imalat teknolojileri bahsi geçen makine imalat alanlarında öncelikli araştırma faaliyetleri arasında yerini almıştır. Ancak Türkiye ölçeğinde, tarım makineleri tasarımı ve imalatı alanında yapılan bilgisayar destekli tasarım/mühendislik, tersine mühendislik, katmanlı imalat ve üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojileri ve uygulamaları ile ilgili konularda sınırlı sayıda bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanılmıştır.

Özellikle katmanlı imalat teknolojileri konusunun tarım makineleri sektöründe henüz aktif olarak yer almaması, teorik altyapıdaki bilgi (know-how) eksiklikleri, yetişmiş eleman eksikliği, bu konu hakkında alana özgü literatür kaynağının yok denecek kadar az olması gibi kısıtlar, katmanlı imalat teknolojilerinin alana özgü uygulama kabiliyetinin araştırılması üzerine odaklanması gereken bir konu olduğunu göstermektedir. Bu durum, yapılan bu tez çalışmasının öncelikli motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu tez çalışmasında, ilgili imalat alanlarında kullanımda olan katmanlı imalat teknolojileri hakkında ulusal ve uluslararası düzeyde güncel bilgileri derlemek, var olan bilimsel çalışmaları kapsayan geniş bir kaynak taraması sunmak ve bu teknolojinin tarım makineleri tasarımı ve imalatında kullanılabilirliğinin ve adaptasyon olabilirliğinin uygulamalı olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada, tarım alet ve makine tasarımlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılabilecek ileri düzey bilgisayar destekli tasarım, yapısal optimizasyon, hızlı prototipleme tekniklerini referans alan bir tasarım inceleme/değerlendirme uygulama algoritması hazırlanması ve bu algoritmanın örnek olarak seçilmiş uygulanabilir yapısal ve fonksiyonel elemanlar üzerinde örneklendirilmesi ile uygulamaya konulması hedeflenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, katmanlı imalat teknolojilerinin tarım makineleri tasarımı ve imalatı araştırma alanı özelinde kullanılabilirliğinin adım adım değerlendirildiği bir çalışma olarak yapılandırılmıştır.

1.1. Katmanlı İmalat

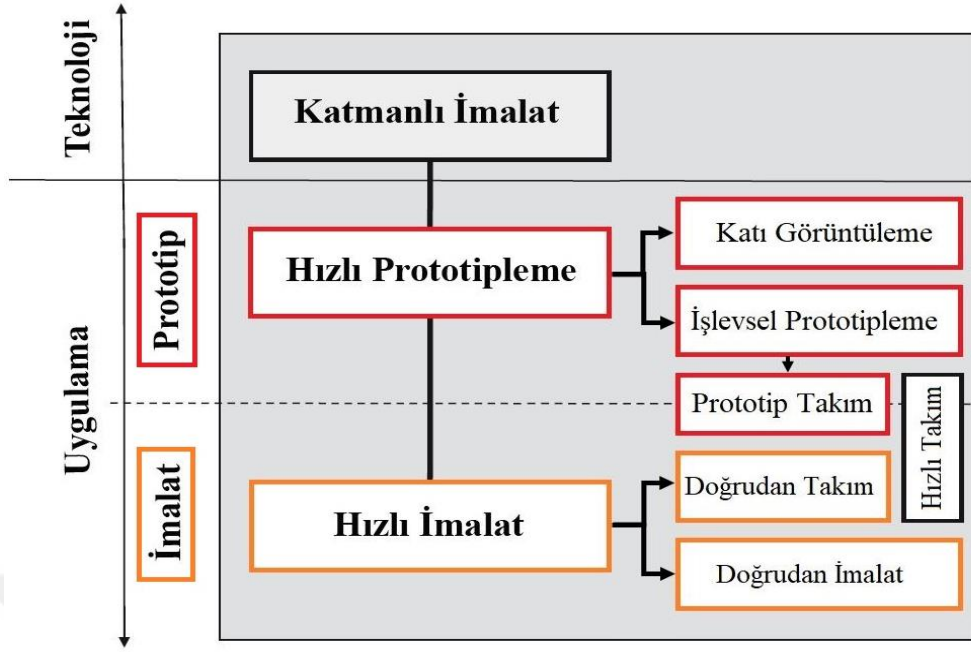
Günümüz imalat sektörü malzeme, mühendislik, yazılım ve lazer teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde üç boyutlu katı model esaslı dijital tasarımların polimer, metal ve seramik gibi malzemelerden katmanlı bir şekilde somut ürünlerin imal edilebildiği bir yöntemle tanışmıştır. Bu yöntem, “katmanlı imalat” olarak literatüre girmiş ve günümüzde birçok farklı alana özgü ürünlerin prototip ve/veya nihai ürün olarak üretilmesine imkân sağlamıştır (Yalçın ve Ergene 2017).

Katmanlı imalat, üç boyutlu bir bilgisayar destekli tasarım (CAD: Computer Aided Design) modelinin, stereolitografi (STL: Stereolithography) adı verilen üçgensel kafes yüzeyli bir modele dönüştürülerek özel yazılımlar ile katmanlara dilimlendikten sonra tabandan başlayarak, ürünün katman katman polimer, metal, seramik gibi belirli hammaddelerden imal edilmesi işlemidir. Torna, frezeleme gibi imalat tekniklerinde uygulanan şekil verilmemiş ana malzemeyi oyarak, keserek vb. şekil verme tekniklerinden farklı olarak, katmanlı imalat yönteminde üretilmek istenen obje, bilgisayar ortamında uygun biçimde modellenmekte, elde edilen model gerekli dilimleme ve düzenleme işlemlerinin ardından katmanlı imalat cihazına gönderilmektedir. Daha sonra cihaz, üretimde kullanılacak ham maddeyi katmanlar halinde işleyerek üretilmek istenen objeyi meydana getirmektedir (Zhang ve Jung 2018; autodesk.com). Katmanlı imalat teknolojileriyle, geleneksel yöntemler ile üretilmesi imkânsız, karmaşık yapıdaki cisimler üretilmektedir (Wong ve Hernandez 2012).

ASTM (American Society for Testing and Materials) uluslararası standartlar organizasyonunun yayınladığı F-2792-12a kodlu katmanlı imalat teknolojileri standart terminolojisinde katmanlı imalat şu şekilde tanımlanmaktadır.

Katmanlı İmalat (AM: Additive Manufacturing); talaş kaldırma prensibinin tam tersi olarak 3D dijital model verilerinden yararlanarak uygun malzemeleri katman katman birleştirerek 3D objelerin yapıldığı işlemler bütünüdür (ASTM F2792-12a)

Katmanlı imalat teknolojileri 1980’li yıllarda prototip üretmek amacıyla hayatımıza girmiş olsa da bilgisayar, malzeme, lazer gibi teknolojilerin gelişmesiyle günümüzde prototipin dışında doğrudan üretim cihazları olarak ta kullanılabilir. Katmanlı imalat teknolojileri Şekil 1.1’ de gösterildiği gibi temelde hızlı prototipleme ve hızlı imalat olarak ikiye ayrılmaktadır. Hızlı prototipleme, imalatı düşünülen bir ürünün birebir ya da farklı bir ölçekte ilk örneğinin, ürünü değerlendirmek ya da tanıtmak amacıyla üretilmesidir. Hızlı imalat ise ihtiyaca yönelik ürünün doğrudan üretilerek son kullanıcı için kullanıma sunulması işlemidir (Gebhardt 2011).

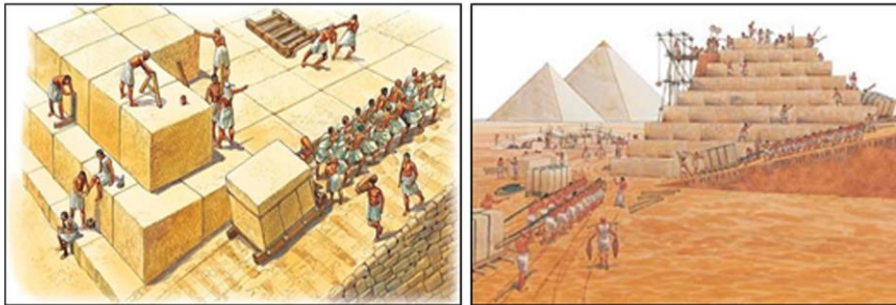


Şekil 1.1. Katmanlı imalat teknolojileri ana uygulamaları

1.2. Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Tarihsel Gelişimi

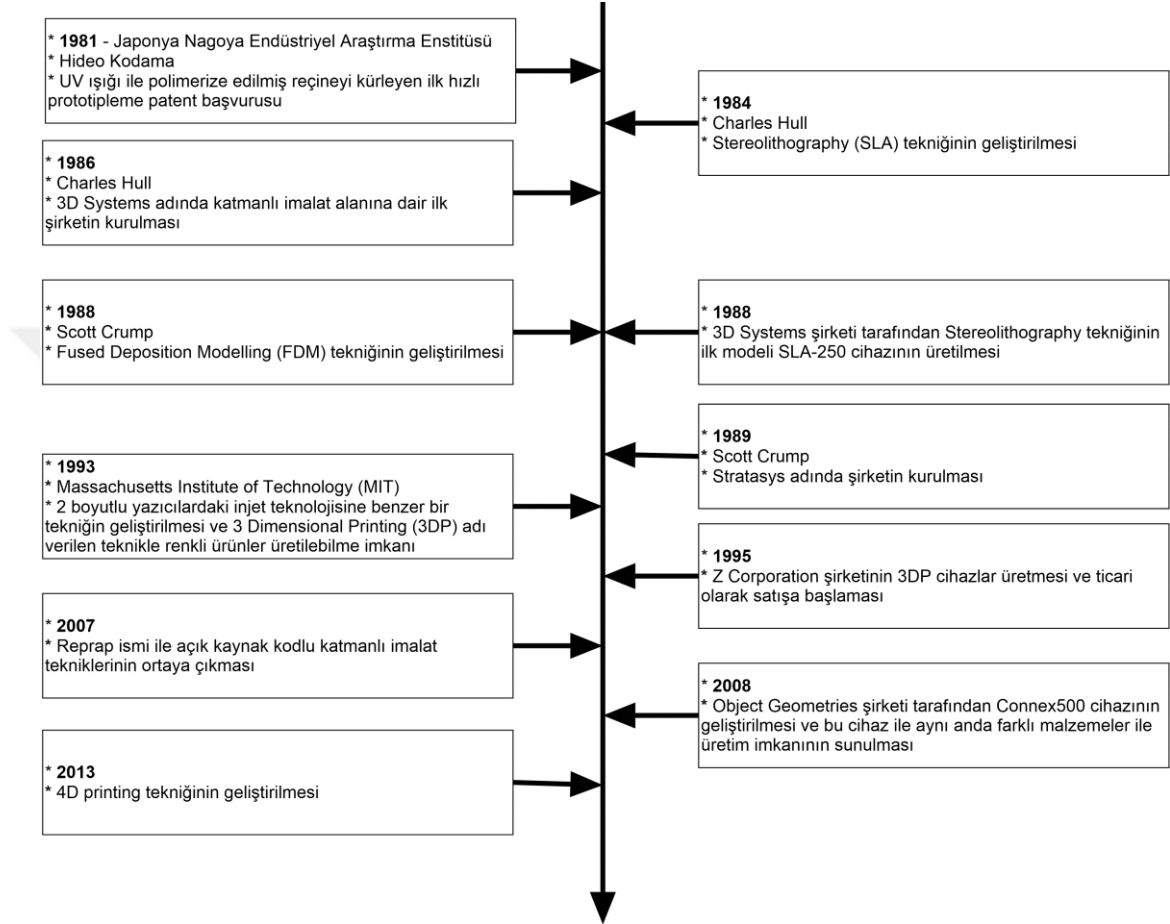
Herhangi bir araştırma konusunun tarihsel gelişimine hâkim olmak, o konunun gelecekte sağlayabileceği faydaların ve potansiyelinin öngörülebilmesi ve anlaşılabilmesi açısından önemlidir.

Geçmişe bakıldığında üç boyutlu nesneleri katmanlı biçimde inşa etmek insanlık uygarlığı kadar eskidir denilebilir. Buna en iyi örnek mısır piramitleridir. Mısır piramitlerinin nasıl inşa edildiği henüz net olarak bilinemesi de bazı araştırmacılar tarafından katman katman ekleme prensibiyle oluşturulduğu düşünülmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Mısır piramitlerinin katmanlar halinde inşa edilmesi (Temsili görsel)

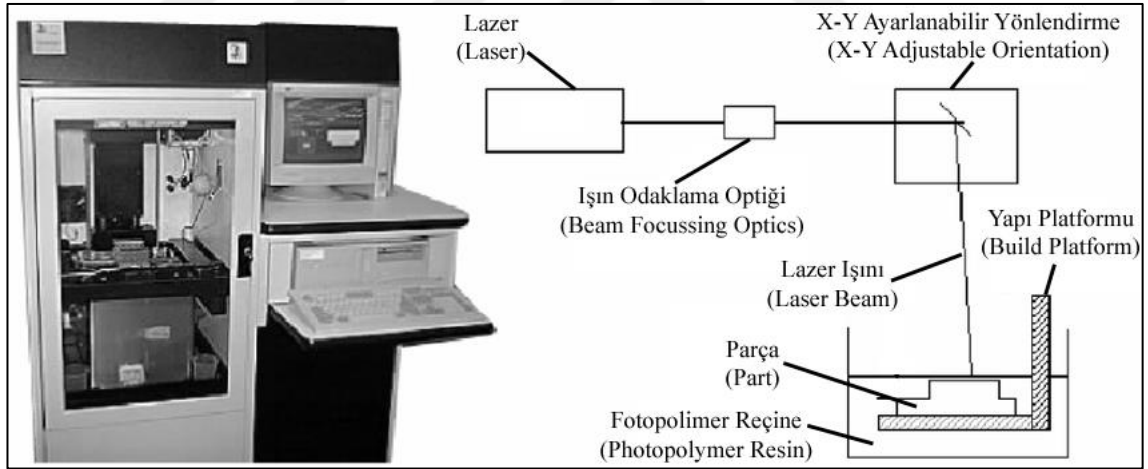
1980’lerin başlarında tohumları serpiyen katmanlı imalat teknolojileri, büyük bir hızla gelişim göstermiş ve günümüzde neredeyse her eve girebilen cihazlar haline gelmiştir. Bu bağlamda katmanlı imalat teknolojilerinin kronolojik gelişim süreci Şekil 1.3’ te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Katmanlı imalat teknolojileri kronolojik gelişim süreci

1981 yılında Japonya’da bulunan Nagoya Endüstriyel Araştırma Enstitüsünde Hideo Kodama tarafından, UV ışığı ile polimerize edilmiş reçineyi kürleyen ilk hızlı prototipleme patent başvurusu yapılmış, takip eden süreçte patent spesifikasyonları zamanında tamamlanamadığı için çalışma yarım kalmıştır (Bogue 2013). Ancak, katmanlı imalatın günümüzde kullanıldığı halinin temelleri 1984 yılında Charles Hull tarafından atılmıştır. Hull, 1984 yılında 3 boyutlu fiziksel parçaları, geometrik bilgiyi kullanarak üretebilen bir sistem geliştirmiş ve bu sisteme Stereolitografi (Stereolithography) adını vermiştir. Hull tarafından geliştirilen Stereolitografi tekniği, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçinenin morötesi (ultraviyole) lazer ışını vasıtasıyla kürleştirilmesi ve her katmanın oluşturulduktan sonra tekrar üzerine reçinenin serilerek somut modelin oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Hull, 1986 yılında Stereolitografi yönteminin patentini almış ve 3D Systems şirketini kurarak ticari

anlamda ilk 3D yazıcıyı geliştirmiştir. 3D Systems şirketi 1988 yılında Şekil 1.4’ te gösterilen Stereolitografi tekniğinin ilk modeli olan SLA-250’yi üretmiştir (Bandyopadhyay ve Bose 2015; Uphoff vd. 2005). 1988 yılında Scott Crump, Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisi ile üretim yapan katmanlı imalat tekniğini geliştirmiş ve 1989 yılında Stratasys şirketini kurmuştur. 1993 yılında Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2 boyutlu yazıcılardaki inkjet teknolojisine çok benzeyen yeni bir katmanlı imalat tekniği geliştirmiştir. Geliştirilen bu tekniğe 3DP (3D printer) adı verilmiş ve 3DP tekniği sayesinde renkli ürünler üretilebilir hale gelmiştir. 1995 yılında Z Corporation şirketi 3DP tekniği ile çalışan cihazlar üreterek ticari olarak satışına başlamıştır. 2007 yılında katmanlı imalat teknolojileri büyük bir atılım göstermiş, Reprap ismi ile açık kaynak kodlu cihazlar çıkmış ve bu sayede daha çok ulaşılabilir ve geliştirilebilir bir teknoloji haline gelmiştir. 2008 yılında Object Geometries şirketi tarafından Connex500 geliştirilmiştir. Bu cihaz sayesinde aynı anda farklı malzemelerle üretim imkânı sunulmuştur (priyoid.com). 2013 yılında geliştirilen 4D printing kavramı, katmanlı imalat alanına yeni bir boyut kazandırmıştır. Bu akıllı malzeme (smart material) teknolojisinin 3D katmanlı imalat teknolojilerine adapte edilmesi olarak adlandırılabilir. Bu teknik ile üretilen objeler belirli uyarıcılarla (su, sıcaklık, ışık vb.) kendini şekillendirebilmektedir. Şu an geliştirilme aşamasında olan 4D printing tekniğinde dördüncü boyut zaman olarak adlandırılmaktadır (Momeni vd. 2017).

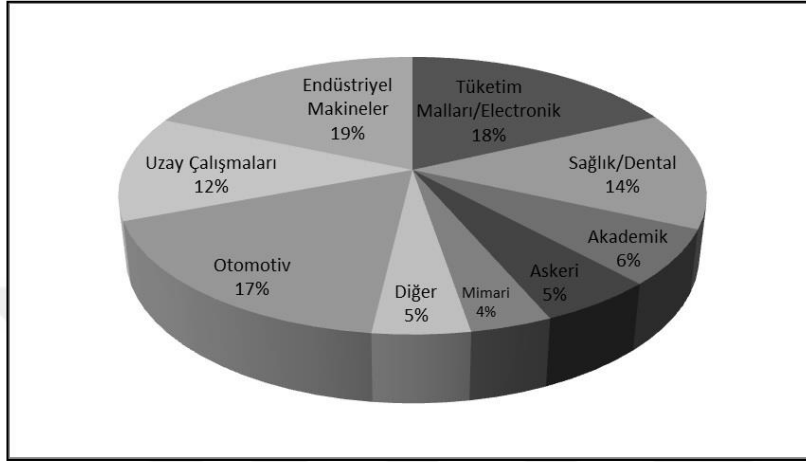


Şekil 1.4. 3D Systems şirketi tarafından üretilen SLA-250 cihazı

1.3. Katmanlı İmalat Teknolojileri Kullanım Alanları

Katmanlı imalat teknolojileri günümüzde her türlü imalat ve prototip uygulamalarında, medikal-dental implant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan parça üretimi ve hızlı döküm kalıbı imalatında, metal parça veya üretilcek olan bir ürünün ilk örneğini teşkil edecek şekilde prototip üretiminde, mimari yapı uygulamalarında, uzay-otomotiv sanayinde, takı sektörü gibi detay gerektiren ürünlerin doğrudan veya prototipinin üretiminde ve eğitim amaçlı her türlü somut modelin imalatı

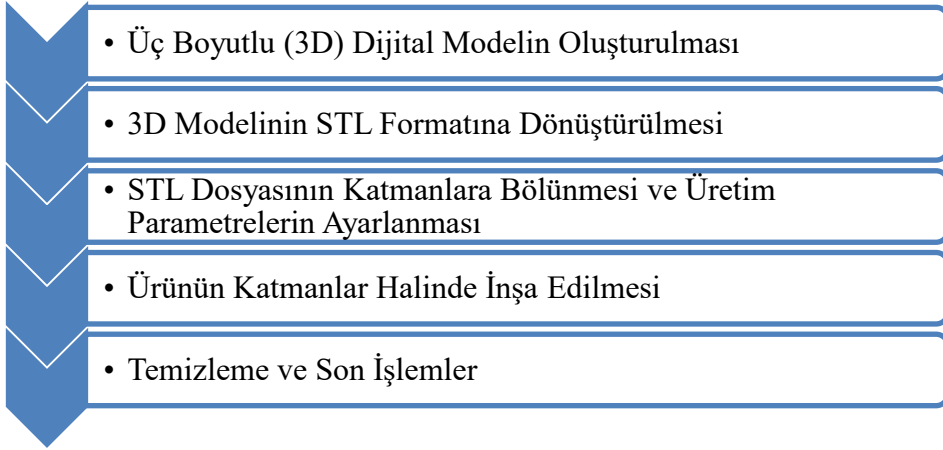
gibi daha birçok alanda kullanılmaktadır (Çelik vd. 2013). Terry Wohlers tarafından 2014 yılında yayımlanan “3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry” (Endüstrinin 3D yazdırma ve katmanlı imalat durumu) isimli raporda yer alan katmanlı imalat teknolojisinin sektörlere göre kullanım oranları Şekil 1.5’te verilmiştir (Nadasbaş 2018, Wohlers 2014).



Şekil 1.5. Katmanlı imalat teknolojilerinin sektörlere göre kullanım oranları (2014)

1.4. Katmanlı İmalat Teknolojileri İşlem Basamakları

Katmanlı imalat teknolojileri, temel terminoloji standartlarında tanımlandığı haline kıyasla çok daha fazla detay içermektedir. Farklı katmanlı imalat teknolojilerinde farklı ilkeler doğrultusunda parça inşa edilmekte ve çalışılması hedeflenen işlem seçildikten sonra, işlem ile ilgili kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak birçok farklı katmanlı imalat tekniği bulunmasına karşın, büyük çoğunluğunda işlem basamakları ve imalat öncesi tanımlanan parametreler oldukça benzerlik göstermektedir. Buna göre genel katmanlı imalat işlem basamakları Şekil 1.6’da verilmiştir (Poyraz ve Kuşhan 2017; Yalçın ve Ergene 2017). Yapılan bu çalışmada üretim için hedef proses FDM tekniği olduğundan dolayı konu, FDM tekniğinin işlem basamakları üzerinden örneklendirilerek detaylandırılmış ve incelenmiştir.



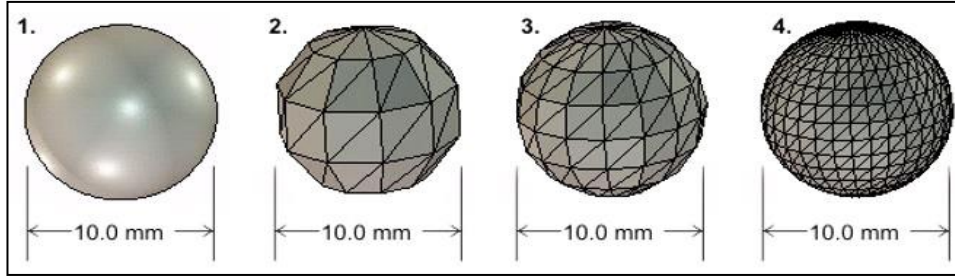
Şekil 1.6. Katmanlı imalat prosesi işlem basamakları

1.4.1. Üç boyutlu (3D) dijital CAD modelin oluşturulması

Bilgisayar destekli tasarım, bir ürünün ortaya çıkarılmasına yardımcı olmak için bilgisayar sistemlerinin kullanılması ve dijital bir görsel ile ürünün değerlendirilmesi işlemidir (Olgun ve Yılmaz 2014). Katmanlı imalat için ilk adım, imalatı düşünülen ürünün bilgisayar ortamında 3D bilgisayar destekli tasarım (CAD: Computer Aided Design) modelinin oluşturulması aşamasıdır. CAD modelinin oluşturulması için kullanılan birçok ticari CAD yazılımı mevcuttur. Bu yazılımlardan bazıları SolidWorks, Autocad, 3D Max, Alibre, UniGraphics ve Catia olarak sıralanabilir.

1.4.2. 3D CAD modelinin STL formatına dönüştürülmesi

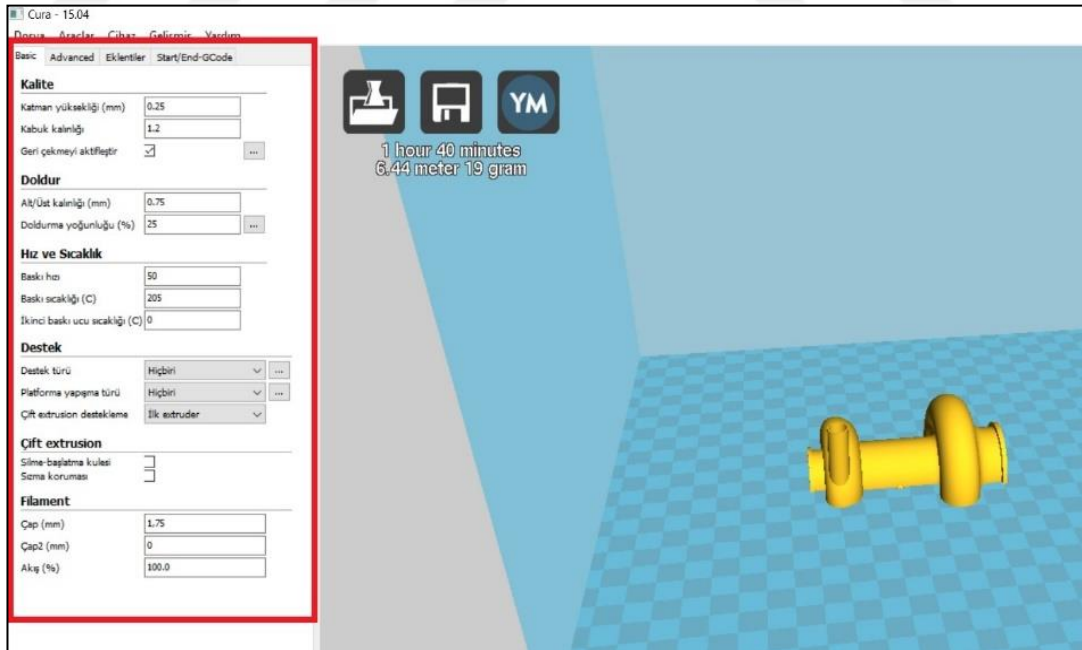
Oluşturulan CAD model Stereolithography (STL) uzantılı bir formata dönüştürülerek sistem yazılımına aktarılır. STL formatı, modeli daha basite indirgemek amacı ile yüzey geometrisinin genellikle üçgen elemanlarla oluşturulan ağ örgüsü ile ifade edilmesidir. Daha geniş bir tabirle, 3D modelin yüzeylerinin matematiksel bir dizi içerisinde çok sayıda üçgene bölünmesiyle oluşturulan bu üçgenlerin kendi normali ve üç adet noktasıyla 3D modeli temsil ettiği bu formata STL adı verilmektedir (Demir vd. 2018). STL formatına dönüştürülecek olan bir modelde, geometriyi temsil eden üçgen elemanların sayısı artırıldıkça modeldeki detay seviyesi ve modeli temsil etme yeteneği de Şekil 1.7’de verilen örnekte gösterildiği gibi artmaktadır. Bunun yanında üçgen sayısını çok fazla artırmanın avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Modeldeki üçgen sayısı ne kadar artırılsa elde edilen STL uzantılı dosyanın boyutu o kadar yüksek olmaktadır. Bu durum, işlem gören modelin işlenmesinde zaman kayıplarına neden olacağı gibi kimi zaman da yüksek boyutlu bir model ile sonraki aşamaların uygulanması imkânsız hale gelebilmektedir. Cihazların dilimleyici (slicer) adı verilen yazılımları belli bir boyutun üzerindeki STL uzantılı dosyaları kabul etmemekte veya yüksek boyutlu modelleri işlemekte zorlanmaktadır. Bu nedenle istenilen model yüzeyi ve üçgen sayısı arasında bir denge kurmak oldukça önemli olmaktadır.



Şekil 1.7. Farklı üçgen eleman sayılarına sahip STL formatındaki modeller

1.4.3. STL dosyasının katmanlara bölünmesi ve üretim parametrelerin tanımlanması

STL uzantılı model dosyasının oluşturulmasının ardından bu dosya slicer adı verilen dilimleyici sistem yazılımlarına aktarılmaktadır. Bu yazılımlarda üretilecek olan ürüne dair birçok ayar (tanımlama) parametresi mevcuttur. Dosyanın yazılım içine aktarılmasının ardından ilk olarak model, cihazın tablasına konumlandırılır ve Şekil 1.8’deki örnek dilimleyici yazılımda gösterilen parametreler tanımlanır. Bu parametrelerden birçoğu, modelin geometrik yapısına, kullanılan hammaddenin cinsine, ürünün istenilen mukavemet özelliklerine ve yüzey kalitesine göre değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 1.8. Örnek Cura yazılımı ve katmanlı imalat için ayar (tanımlama) parametreleri

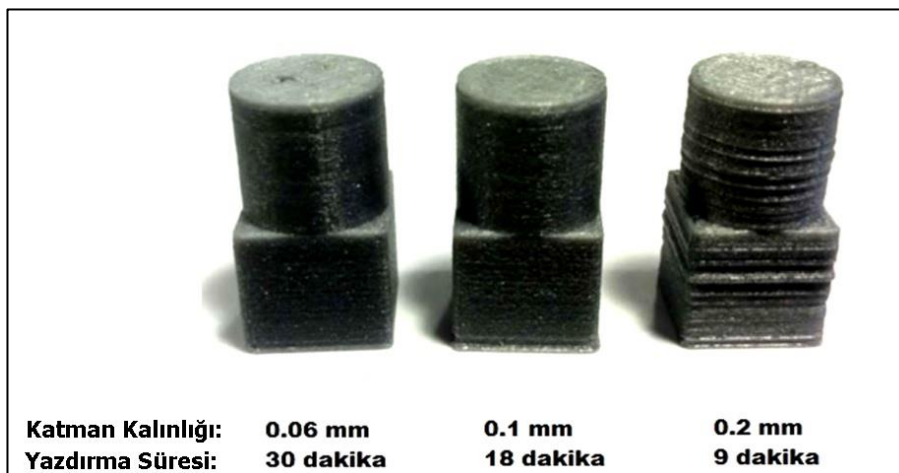
Bahsi geçen örnek yazılım Cura, Ultimaker desteğiyle David Braam tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu bir dilimleme yazılımıdır (rigid3d.com). Şekil 1.8’ de gösterilen bu yazılım, FDM tekniğiyle üretim yapan cihazlarda kullanılmaktadır. Ancak parametrelerden birçoğu, tüm katmanlı imalat yöntemleri için aynı prensibe göre ayarlanmakta ve aynı teknik terimler kullanılmaktadır. Bu yüzden parametrelerin tanımları Cura yazılımı üzerinden belirtilmiş ve aşağıda sırası ile verilmiştir.

Katman Yüksekliği: Üretilmek istenen somut ürünün yüzey kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Her bir katman (dilim), ürünün ilgili kesit alanını temsil etmektedir. Dolayısıyla bir dilim kalınlığı iki kesit arası mesafe kadardır. Katman yüksekliği genel olarak 0.06 – 0.30 mm arasında tanımlanabilmektedir (Ultimaker-Cura). Modeldeki katman kalınlığını ifade eden eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\text{Katman Kalınlığı [mm]} = \frac{\text{Modelin Z Yüksekliği [mm]}}{\text{Katman Sayısı [-]}}$$

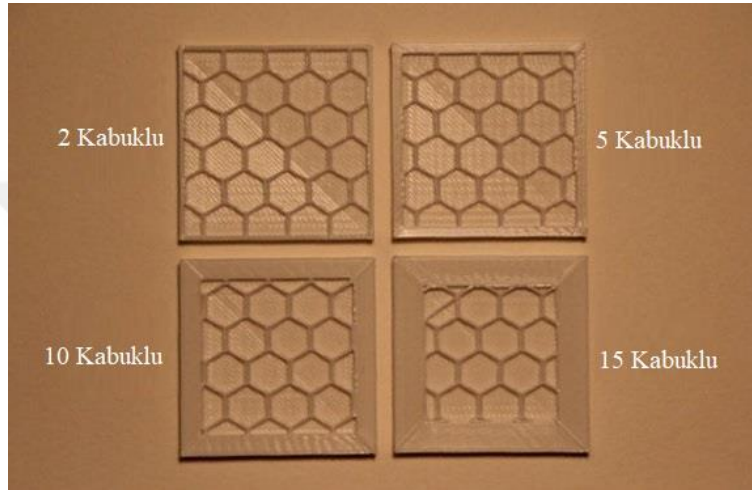


Üründeki katman kalınlığı küçüldükçe ürün hassasiyeti ve yüzey kalitesi artmakta, ancak dezavantaj olarak ürünün oluşturulma süresinde büyük bir artış olmaktadır. Farklı katman kalınlıklarında sahip malzemelerin yüzey kalitesi ve yazdırma süreleri ile ilgili örnekler Şekil 1.9’ da gösterilmiştir (artiboyut.com).



Şekil 1.9. Farklı katman kalınlıkları ile yazdırılan malzemelerin yüzey kalitesi ve yazdırma süreleri

Kabuk (Shell) Kalınlığı: Kabuk, ürünün dış kısmını oluşturan katmanlardır. Bu katmanların yatay düzlemdeki toplam boyutuna kabuk kalınlığı adı verilmektedir. Kabuk kalınlığı ürünün mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Kabuk kalınlığı arttıkça ürün mukavemeti de artmaktadır. Ancak; kabuk kalınlığının artması, harcanan hammadde miktarında artış ve modelin baskı süresinde uzama anlamına gelmektedir. Bu yüzden üretilecek ürünün istenilen mukavim özelliklerine göre kabuk kalınlığı belirlenmelidir. Farklı kabuk kalınlıkları ile yapılan temsili örnek Şekil 1.10’ da gösterilmiştir (tridi.co).



Şekil 1.10. Farklı kabuk kalınlıkları

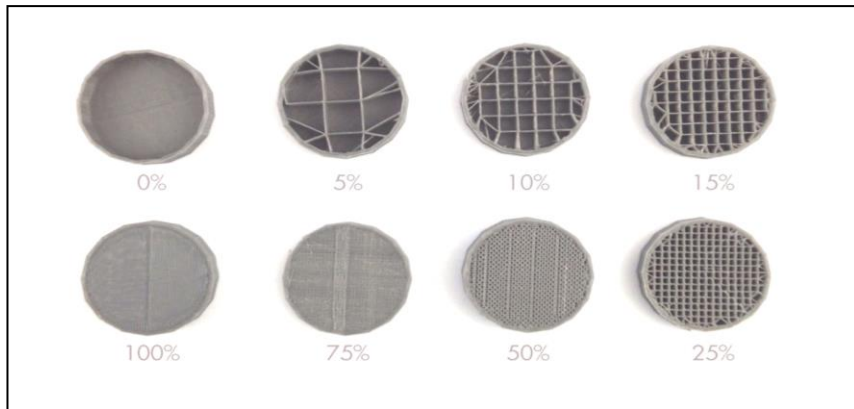
Kabuk kalınlığı FDM tekniği ile üretim yapan cihazlarda bulunan nozul çapıyla doğrudan ilişkilidir. Kabuk parametresi değiştirilirken, cihazda bulunan nozul çapının katları olan bir değer girilmelidir. Katları olmayan bir değer girildiğinde ürünün duvar kalınlıkları arasında boşluklar oluşabilmektedir. Örneğin, 0.4 mm çapındaki bir nozule sahip cihaz için kabuk parametresi, nozul çapının katları olan 0.8 mm, 1.2 mm gibi katların girilmesi uygun olmaktadır. Şekil 1.11’ de verilen görselde soldaki örneğin duvar kalınlığı ideal olarak verilmiş, sağdaki örneğin ise hatalı olmaktadır (tridi.co). Aralarındaki fark, hatalı olan örnekte duvar kalınlığı parametresinin nozul çapının katları şeklinde girilmemesidir.



Şekil 1.11. Duvar kalınlığı sırası ile doğru ve hatalı verilen örnekler

Alt-Üst Kalınlığı: Bu parametre taban ve tavandaki katmanların kalınlığını belirlemektedir. İçerisi %100 dolu olmayan ürünlerde en alt ve en üst katmanların kaç katman kalınlığı boyunca tamamen dolu olacağının belirlendiği değerdir. Örneğin 0.25 mm katman kalınlığında üretilecek olan bir ürün için alt-üst kalınlığı 0.75 mm girildiğinde cihaz en alt ve en üst kısımlardaki 3 katmanı tamamen dolu olarak inşa etmektedir.

Doldurma Yoğunluğu: Bu parametre üretilecek olan ürünün iç kısmının yüzde olarak doluluk oranını belirlemektedir ve ürün mukavemetini en fazla etkileyen etkenlerden bir diğeridir. İç hacmi tamamen doldurulacak olan bir ürün için bu değer %100 girilirken içi tamamen bir ürün için ise %0 girilmektedir. Mukavemet gerektirmeyen bazı ürünlerde bu değer sıfıra yakın girilerek kullanılan hammaddeden ve zamandan büyük oranda tasarruf yapılabilmektedir. Farklı doluluk oranlarında üretilen örnek modeller Şekil 1.12’ de gösterilmiştir (tridi.co).

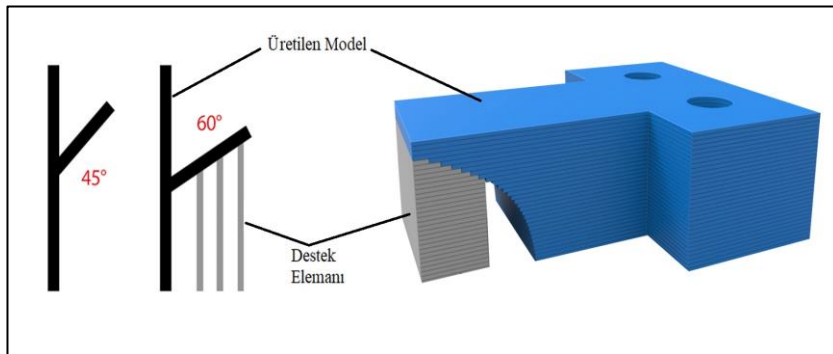


Şekil 1.12. Farklı doldurma yoğunluğuna sahip örnek modeller

Baskı Hızı: Bu parametre ürünün üretim hızıdır. Baskı hızı standart bir değer olmamakta, kullanılan cihaza göre farklılıklar gösterebilmektedir. Ancak iyi kalitedeki bir üretim için baskı hızının düşük kullanılması önerilmektedir (3dportal.io). Baskı hızı ve ürün kalitesi arasındaki ilişki, ürünün geometrik yapısı, cihazın kapasitesi, kullanılan hammaddenin cinsi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu yüzden optimum değer ürün bazında kullanıcı denetimindedir.

Baskı Sıcaklığı: FDM tip cihazlarda kullanılan hammaddeye göre belirlenen sıcaklık değeridir. Bu değer kullanılan filament ve kullanıcı tecrübesine bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin PLA filament için 190-220 °C aralığındaki sıcaklıklar yeterli iken ABS filament için 230-260 °C aralığındaki sıcaklıklar uygundur (Ultimaker-Cura).

Destek Elemanı: Üretilen objenin geometrisine bağlı olarak bazı kısımlarında yerçekiminden dolayı sarkmalar meydana gelebilmektedir. Bu sarkmaları engelleyebilmek için destek elemanı adı verilen yapılar kullanılmaktadır. Destek elemanları baskı sonunda ana objeden temizlenir ve istenilen ürün elde edilir. Örnek yazılım olan Cura’ da baskı levhasına yapışık ve her yere olmak üzere iki adet destek seçeneği mevcuttur. Bunlardan herhangi birisi seçildiğinde yazılım otomatik olarak objenin sarkma yapabilecek kısımlarına destek uygulamaktadır. Baskı levhasına yapışık seçeneği, sadece baskı levhasına temas eden kısımlara destek uygularken, her yere seçeneği ise objedeki tüm destek ihtiyacı gerektiren kısımlara destek elemanı uygulamaktadır. Yaklaşık olarak 45° açının üstündeki çıkıntılarda Şekil 1.13’ te gösterildiği gibi destek elemanına ihtiyacı duyulmaktadır. Destek elemanı kullanmadan üretilmesi imkânsız olan bazı modeller, destekler sayesinde üretilebilir bir hale gelmektedir. Ancak destek elemanının bazı dezavantajları da mevcuttur. Üretim sonunda destek elemanı, ana objeden temizlenip atılmaktadır. Bu durum fazla hammadde kullanımına sebebiyet vermektedir. Ayrıca istenilen ürüne ek olarak destek elemanının da üretilmesi zaman açısından kayıplara neden olmaktadır.



Şekil 1.13. Destek elemanı ve kullanım açısı

1.4.4. Ürünün katmanlar halinde inşa edilmesi

Ürünün cihaz tablasına konumlandırılması ve üretim parametrelerinin ayarlanmasının ardından sonraki aşama katmanlar halinde inşa işlemidir. Cihaz, yazılımda ayarlanan sıcaklığa ulaştığında ürünün tabladaki ayarlanan konumuna göre üretim işlemi başlamakta ve katmanların üst üste eklenmesi prensibiyle inşa işlemini tamamlamaktadır. İnşa işleminin tamamlanma süresi, üretilen ürünün geometrik boyutları, katman yüksekliği, destek elemanı kullanımı, doldurma yoğunluğu, kabuk kalınlığı, alt-üst kalınlığı ve baskı hızı gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

1.4.5. Temizleme ve son işlemler

İnşa sürecinin bitmesinin ardından ürün üzerinde bazı temizleme ve son işlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir. İlk olarak ürün, üretim tablasından alınarak varsa destek elemanlarının temizlenmesi gerekmektedir.

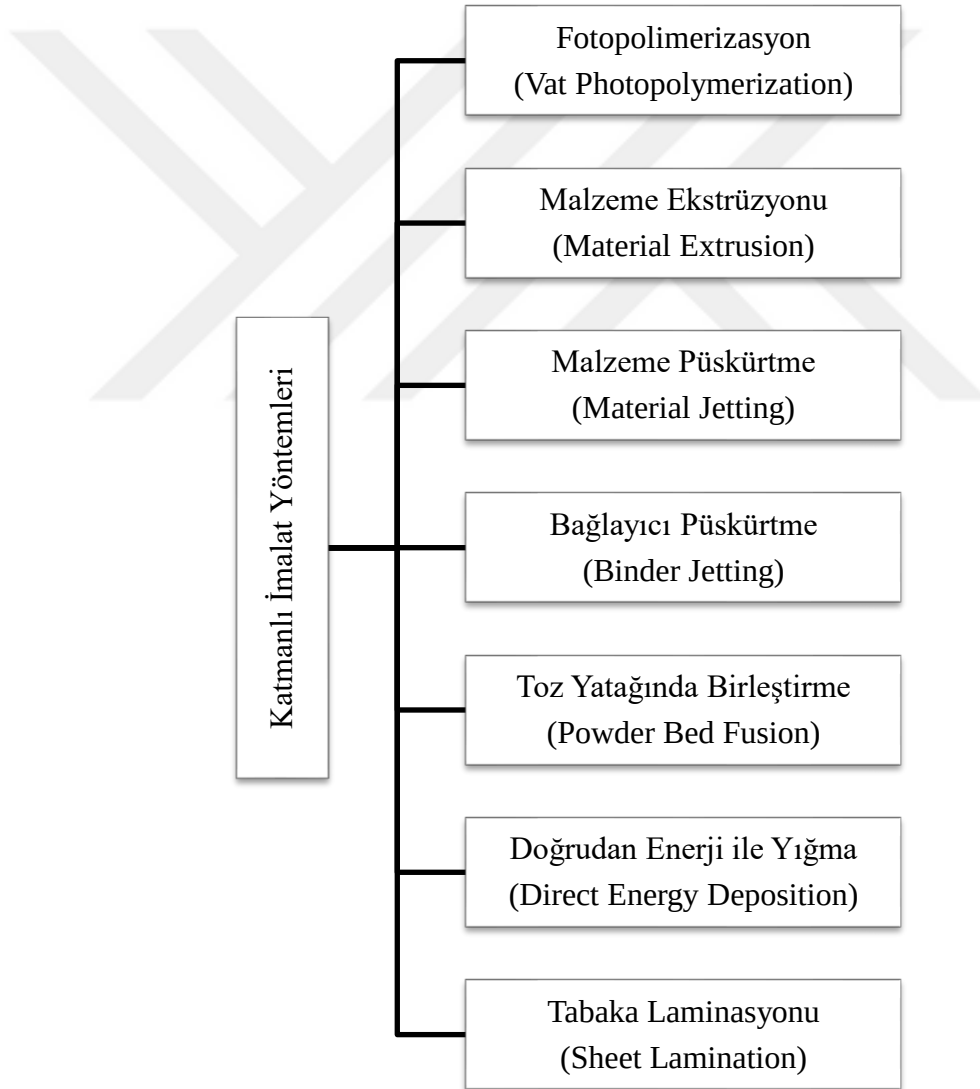
Yüzey pürüzlülüğü katmanlı imalat teknolojilerinin önemli problemlerinden biridir. Objenin katmanlar halinde üretilmesi nedeniyle obje yüzeyinde pürüzler meydana gelebilmektedir. Pürüzlülük, bazı katmanlı imalat tekniklerinde aşırı belirgin bir halde olurken bazılarında daha düzgün yüzeyler elde edilebilmektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü katman yüksekliği ile doğrudan bağlantılıdır. Katman yüksekliği azaldıkça pürüzlülükte azalacaktır. Yüzey pürüzlülüğünün istenilmediği durumlarda zımparalama, taşlama, boyama, kaplama, aseton banyosu gibi üretim sonrası işlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi için zımparalama ve boyama uygulaması yapılan temsili bir örnek görsel Şekil 1.14’ te gösterilmiştir. Ayrıca destek elemanının temas ettiği yüzeylerde bozulmalar meydana gelebileceği için mümkün olduğu kadar destek elemanı kullanımından kaçınılmalıdır.



Şekil 1.14. Yüzey pürüzlülüğü giderme (zımpara-boya) işlemleri

1.5. Katmanlı İmalat Yöntemleri

Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan birçok farklı yöntem olmasına karşın ortak özellikleri, hammaddenin katmanlar halinde üst üste eklenerek dijital modelin somut bir üç boyutlu fiziksel nesneye dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Fakat katmanların oluşturulma tekniği ve üretim hammaddesi olarak kullanılan malzemenin özellikleri farklılıklar gösterebilmektedir. Her yöntemin diğer yöntemlere kıyasla farklı avantajları ve dezavantajları mevcuttur. ISO/ASTM 52900: 2015 standartlarına göre katmanlı imalat yöntemleri toplamda 7 grupta kategorize edilmiş ve standartlaştırılmıştır (ISO/ASTM 52900: 2015). Bu kategorilerin standartlaştırılmış isimleri bazı ticari firmalar veya kullanıcılar tarafından farklı isim ya da kısaltmalarla anılsa da standartlarla belirlendiği biçimi ile Şekil 1.15’ te gösterilmiştir.

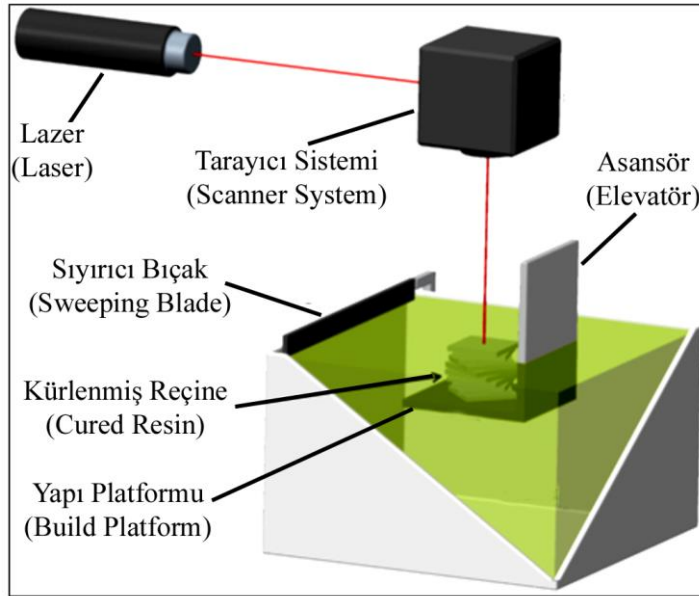


Şekil 1.15. Katmanlı imalat yöntemleri

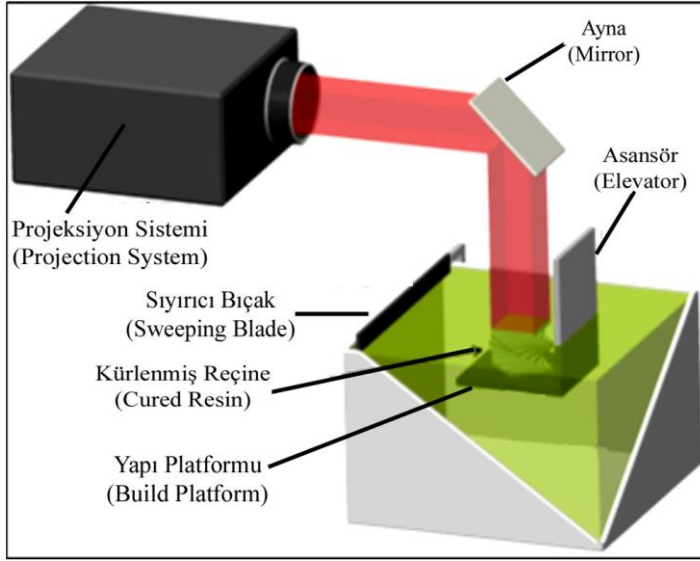
1.5.1. Fotopolimerizasyon (Vat photopolymerization)

Fotopolimerler, ışık enerjisine maruz bırakıldığında kimyasal reaksiyon sonucu mekanik ve kimyasal özellikleri değişen sıvı maddelerdir. Farklı dalga boylarındaki ışınlarla aktive olabilen bu maddeler ışık etkisi altında sıvı halden katı hale geçmektedirler. Bu işleme fotopolimerizasyon adı verilmektedir. (Gebhardt ve Hötter 2016)

Fotopolimerizasyon işlemi uygulanarak üretim yapan iki çeşit katmanlı imalat tekniği bulunmaktadır. Bunlar; Stereolitografi (SLA: Stereolithography) ve Dijital Işık İşleme (DLP: Digital Light Processing)' dir. SLA tekniği, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir ultraviyole lazer ışını vasıtasıyla, üretilecek olan ürünün kesit bölgelerinin taranarak kürleştirilmesi prensibine dayanır. Taranan kısımların sertleşmesinin ardından platform bir katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni bir fotopolimer katman lazer ışığıyla taranır. Bu işlemler üretilen ürünün tamamı bitene kadar tekrarlanır. İnşa işlemi bitince model fotopolimer havuzdan çıkarılır (Alpay 2012). SLA tekniğinin temsili çalışma prensibi Şekil 1.16' da gösterilmiştir. DLP tekniği ise fotopolimerlerle üretim yapan bir katmanlı imalat yöntemi olması nedeniyle SLA' ya benzer bir prensiple çalışmaktadır. Aralarındaki en büyük fark kullanılan ışık kaynağıdır. SLA tekniğinde üretilen parçanın her katmanı ultraviyole lazer ışığı ile noktasal olarak taranırken, DLP tekniğinde dijital bir projektör ile tek seferde gönderilen ışın kaynağı ile katmanlar oluşturulur DLP tekniğinin çalışma prensibi Şekil 1.17' de gösterilmiştir.



Şekil 1.16. SLA tekniğinin temsili çalışma prensibi

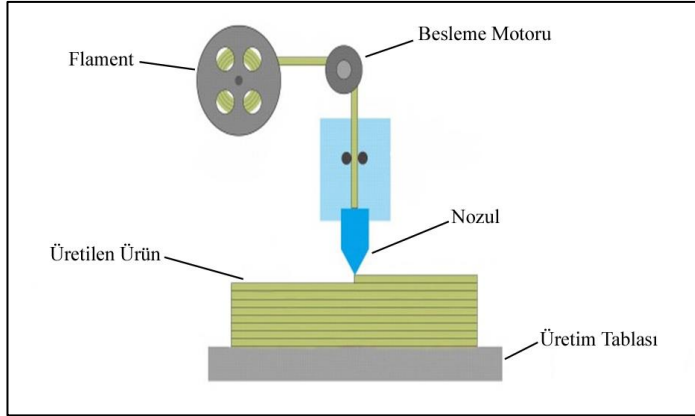


Şekil 1.17. DLP tekniğinin temsili çalışma prensibi

1.5.2. Malzeme ekstrüzyonu (Material extrusion)

Bu yöntemde katı halde bulunan ve filament adı verilen termoplastik malzemenin yüksek sıcaklığa sahip olan bir nozul yardımı ile eritilerek ekstrüzyonu sağlanmakta ve katmanlar halinde ürün oluşturulmaktadır. Bu yöntemle üretim yapan katmanlı imalat tekniğine Eriyik Yığılma Modelleme (FDM: Fused Deposition Modelling) ismi verilmektedir (Gibson vd. 2010)

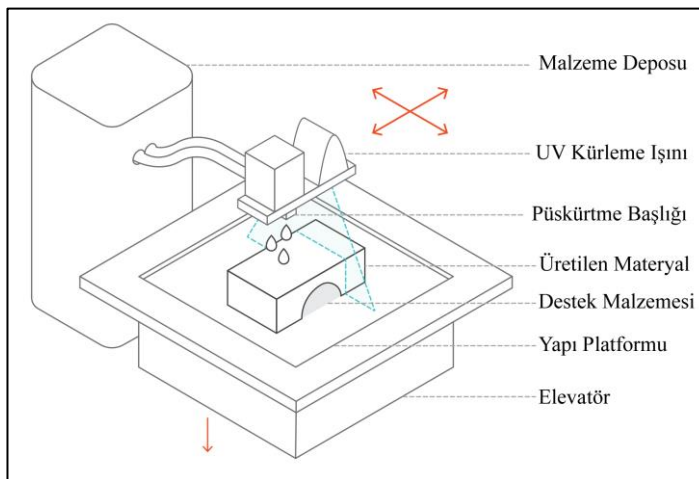
Temelde en çok kullanılan katmanlı imalat teknolojisi FDM tekniği ile çalışan cihazlardır. (Gibson vd. 2010) FDM sürecinin basitliği, güvenilirliği, satın alınabilirliği ve farklı CAD yazılımları ile kolay entegrasyonu sayesinde popülerliği endüstri, akademi ve diğer kullanıcılar tarafından geniş çapta kabul edilmiş ve benimsenmiştir. Bu cihazlar özellikle tasarım çalışmalarında ortaya konan yeni tasarıma ait geometrik yapının somut olarak değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu teknikte bilgisayarda üç boyutlu katı modeli oluşturulan cisim iki boyutlu katmanlar halinde yığılarak üç boyutlu somut ürün elde edilmektedir. Çalışma prensibi, filament adı verilen ve genellikle makaraya sarılmış halde bulunan hammaddenin FDM cihazına yüklenmesi ve ekstrüzyon kafasındaki sıcaklık kontrollü bir yazıcı memesine motor ile beslenmesi şeklindedir. Nozul adı verilen yazıcı memesi, filamentin türüne göre istenilen bir sıcaklıkta ısıtılır ve filament, motor aracılığı ile itilerek nozulun içerisinden geçirilir. İşlem sonunda eritilen termoplastik malzemenin katman katman, belirtilen koordinatlar boyunca üretim tablası üzerine serilmesi ve her katman bitiminde tablanın bir katman kalınlığı kadar aşağı veya ekstrüzyon kafasının bir katman kalınlığı kadar yukarı çıkarılarak aynı işlemleri tekrarlama mantığı ile çalışan FDM yönteminin çalışma prensibi Şekil 1.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. FDM yöntemi çalışma prensibi

1.5.3. Malzeme püskürtme (Material jetting)

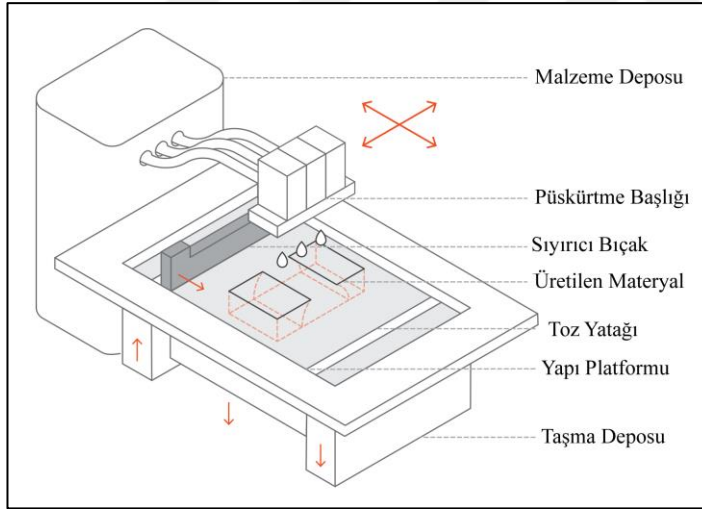
Malzeme püskürtme, standart mürekkep püskürtmeli yazdırma için kullanılan 2D yazıcılara benzer şekilde çalışan bir üretim sistemidir. Sıvı halde bulunan ve ultraviyole ışığı altında katılaştıran fotopolimer sıvının, bir başlıkta bulunan çok sayıdaki delikten püskürtülmesi ve ardından aynı başlıkta bulunan ultraviyole ışık kaynağı altında kürlenmesi ile katman oluşturulmaktadır. Katmanın tamamlanmasının ardından yapı platformu bir katman kalınlığı kadar aşağı inmekte ve aynı işlemin üretim bitinceye kadar tekrarlanması sonucunda ürün elde edilmektedir. Malzeme püskürtme tekniği ile diğer yöntemlere kıyasla çok düzgün yüzey kalitesine ve yüksek boyutsal hassasiyete sahip ürünler üretilebilmektedir. Ayrıca bu teknikte ürün, farklı sertlik derecelerinde ve farklı renklerde isteğe bağlı olarak üretilebilmektedir. Malzeme püskürtme yönteminin temsili çalışma prensibi Şekil 1.19’da gösterilmiştir (3dhubs.com).



Şekil 1.19. Malzeme püskürtme yöntemi çalışma prensibi

1.5.4. Bağlayıcı püskürtme (Binder jetting)

Bağlayıcı püskürtme yönteminde granül formda bulunan hammadde, hareketli başlıkta bulunan çok sayıdaki deliklerden yapıştırıcı bir etken maddenin püskürtülmesi ile bağlanmakta ve ürün oluşturulmaktadır. Kullanılan hammaddeler genel olarak granül halde bulunan metaller ve seramiklerdir. Hammaddenin yapıştırıcı ile bağlanması ve katmanın oluşturulmasının ardından yapı platformu bir katman kalınlığı kadar aşağı hareket etmekte ve granül, sıyırıcı bir bıçak vasıtası ile tekrar serilerek aynı işlemler ürün oluşturuluncaya kadar tekrarlanmaktadır. Ayrıca ürün, üretim aşamasında isteğe bağlı olarak renklendirilebilmektedir. Bu teknikte, üretim esnasında destek (support) elemanına ihtiyaç duyulmaması büyük bir avantajdır. Çünkü toz havuzunda bulunan ve yapıştırıcı etken maddeyle bağlanmamış tozlar ürüne destek işlevi görmektedir. Üretim işleminin sona ermesinin ardından yapıştırıcı maddeyle bağlanmamış tozlar basınçlı hava ile temizlenerek üretilen ürün toz haznesinden çıkarılmaktadır. Bu yöntemle üretilen ürünlerde, kullanılan malzemeye bağlı olarak ürün mukavemetinin artırılması amacı ile üretim sonrası bir son işleme (post proses) ihtiyaç duyulabilmektedir. Örneğin metal granül hammaddeden üretilen bir ürünün üretim işleminin tamamlanmasının ardından sinterlenmesi veya farklı bir şekilde ısıtılarak işlem görmesi ürün mukavemetinin artırılması açısından önemli bir faktördür. Bağlayıcı püskürtme yönteminin çalışma prensibi Şekil 1.20’ de gösterilmiştir (3dhubs.com).

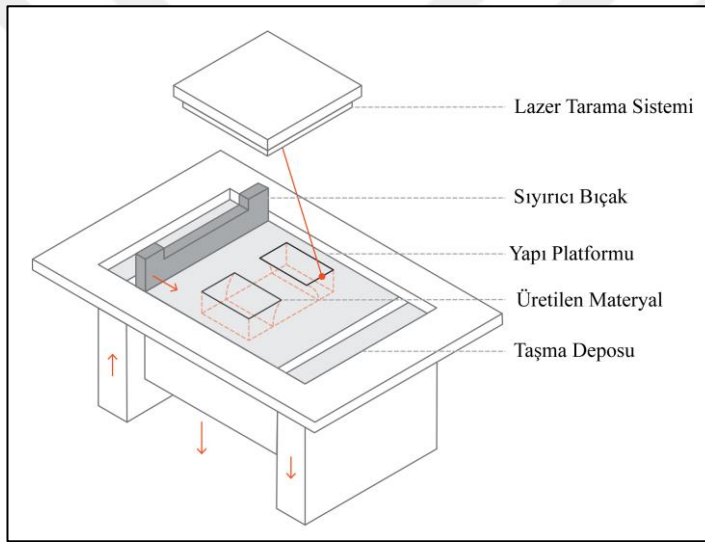


Şekil 1.20. Bağlayıcı püskürtme yöntemi çalışma prensibi

1.5.5. Toz yatağı birleştirme (Powder bed fusion)

Toz yatağı birleştirme, katmanlı imalat için toz bazlı hammadde kullanan diğer bir üretim yöntemidir. Bağlayıcı püskürtme yönteminde tozları birbirine bağlayan yapıştırıcı etken maddesinin kullanımının aksine bu yöntemde toz halindeki hammadde, lazer ya da elektron ışını ile ertirilerek birbirine birleştirilmektedir. Toz yatağında birleştirme teknolojisi ile üretim yapan birçok katmanlı imalat tekniği bulunmaktadır.

Bunlar SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), EBM (Electron Beam Melting) ve DMLS (Direct Metal Laser Sintering) gibi tekniklerdir. Bu teknikler ile genel olarak metal, seramik, termoplastik ve cam gibi malzemelerle üretim yapılabilir. Toz yatağında birleştirme teknolojisi ile üretimin ilk aşaması toz halindeki hammaddenin bir katman kalınlığı kadar düz bir yapı platformuna serilmesidir. Serilen toz hammadde bir lazer veya elektron ışını tarafından kısmen ya da tamamen eritilerek ürünün kesiti taranır. İlk katmanın oluşturulmasının ardından yapı platformu bir katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni bir toz tabakası merdane veya sıyrıcı bir bıçak aracılığıyla tekrar serilir. Bu işlemlerin katman katman tekrarlanması ile ürün oluşturulmaktadır. İşlemlerin sona ermesinin ardından ürün toz havuzundan çıkarılarak kullanılmayan tozlar bir sonraki üretimde kullanılmak üzere üründen temizlenerek depolanır. Toz yatağında birleştirme yönteminin çalışma prensibi Şekil 1.21’ de gösterilmiştir (3dhubs.com).

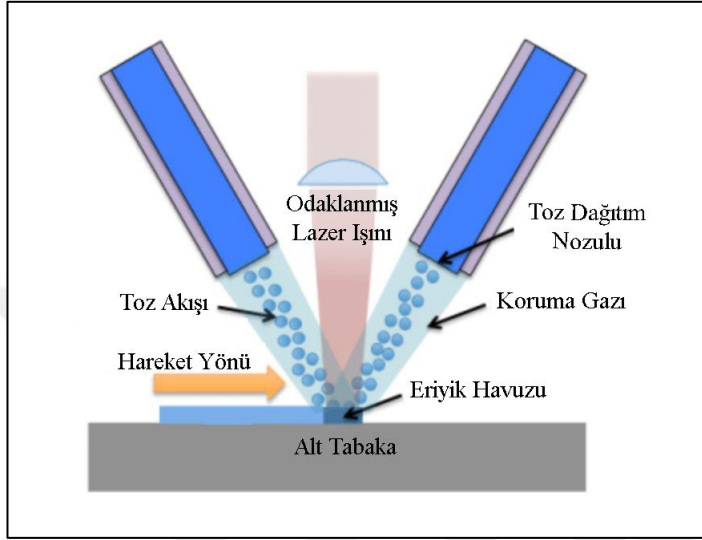


Şekil 1.21. Toz yatağında birleştirme yöntemi çalışma prensibi

1.5.6. Doğrudan enerji ile yığma (Direct energy deposition)

Doğrudan enerji ile yığma yöntemi, özellikle metal ve metal alaşımları ile üretim yapan bir katmanlı imalat teknolojisidir. Polimer, cam veya seramikler ile de üretim yapılabilir ancak bu malzemeler için çok uygun bir teknoloji değildir. Genel olarak, metal veya metal alaşım kullanılarak üretilmiş ürünlerin onarımı ve bu ürünlere uzantı eklemek için kullanılmaktadır. Bu yöntem, malzeme ekstrüzyonu yöntemine çok benzer bir prensiple üretim yapmaktadır ancak kullanılan hammadde ve hareketli olan başlık bakımından farklılık göstermektedir. Bu yöntemde kullanılan başlık ve malzemeyi besleyen meme, çok eksenli bir kol üzerine monte edilmektedir. Bu sebepten dolayı besleme başlığı malzeme ekstrüzyonu yöntemindeki aksine, belirli bir eksenle sınırlı kalmayıp çok yönlü olarak hareket edebilmektedir. Çok eksenli kolun dört veya beş eksenle, besleme başlığı ve memeyi hareket ettirmesine olanak sağladığı için herhangi

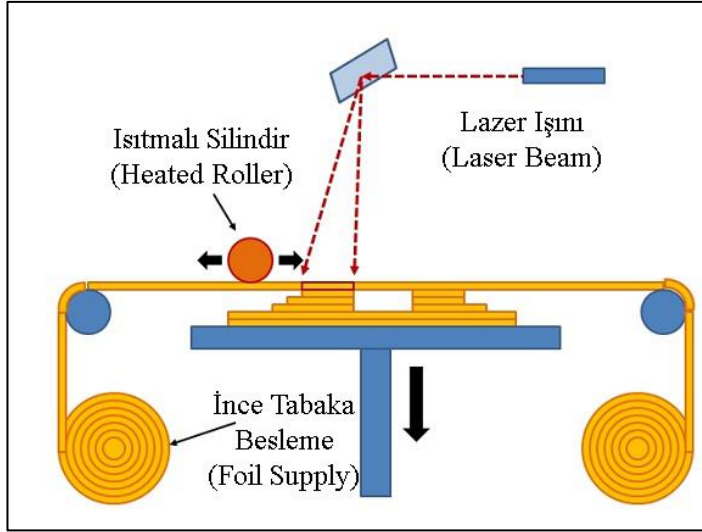
bir yüzeyde üretim yapılabilmekte ve diğer yöntemlerin aksine düz bir yüzeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Doğrudan enerji ile yığma yönteminde hammadde, besleme memesinden toz veya tel halinde sağlanmakta ve eşzamanlı olarak bir lazer veya elektron ışını aracılığıyla eritilerek katmanlar oluşturulmaktadır. Yöntemin çalışma prensibi Şekil 1.22’ de verilmiştir (bintoa.com).



Şekil 1.22. Doğrudan enerji ile yığma yöntemi çalışma prensibi

1.5.7. Tabaka laminasyonu (Sheet lamination)

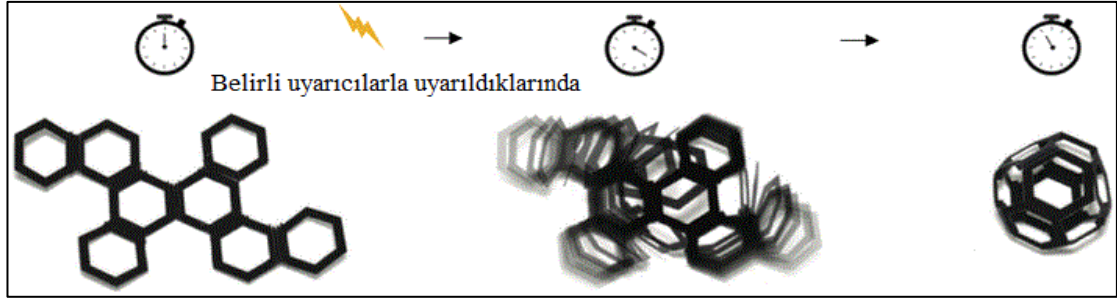
Tabaka laminasyonu, yüzeyi yapışkan kaplı kâğıt, plastik veya metal tabakaların ısı ve basınç kullanılarak birbirine kaynaştırıldığı ve ardından bilgisayar kontrollü bir lazer veya bıçak sayesinde ürünün geometrisine göre kesildiği bir katmanlı imalat yöntemidir. Bu yöntem genel olarak prototip üretimi için kullanılmaktadır. Tabaka halindeki hammaddenin yapı platformuna yuvarlanması, yapışkanın erimesi için ısıtılmış bir silindirin platformdan geçirilmesi ve tabakanın lazer veya bıçakla ürünün geometrisine bağlı olarak kesilmesiyle katmanlar oluşturulmakta ve kesme işleminin ardından yapı platformunun katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek işlemlerin tekrarlanmasıyla ardından ürün elde edilmektedir. Tabaka laminasyonu yönteminin çalışma prensibi Şekil 1.23’ te gösterilmiştir (pinterest.com).



Şekil 1.23. Tabaka laminasyonu yöntemi çalışma prensibi

1.5.8. 4 boyutlu yazdırma (4D printing)

Katmanlı imalat teknolojileri, yapılan tüm standartlaştırma çalışmalarına rağmen özellikle kullanıcılar tarafından birçok farklı tabirle tanımlanmaktadır. Terminolojide “katmanlı imalat teknolojileri” olarak geçen bu üretim yöntemi sektör içerisinde veya birçok kişi tarafından “3 boyutlu yazdırma (3D printing)” olarak adlandırılmaktadır (Khan vd. 2018). Günümüzde malzeme ve teknolojik gelişmeler sayesinde 3 boyutlu yazdırma tekniklerine ek olarak “4D printing” adında yeni bir üretim tekniği geliştirilmiştir. Söz konusu teknik, akıllı malzeme (smart material) teknolojisinin 3D katmanlı imalat teknolojisine adapte edilmesi olarak adlandırılabilir. 2013 yılında temelleri atılan 4D printing tekniği ile üretilmiş bir model, belirli uyarıcılarla (su, sıcaklık, ışık vb.) kendini şekillendirebilmektedir. Bu teknikte kullanılan akıllı malzemeler özellikle çevrelerindeki değişiklikleri sezip ona göre daha önce üzerlerine tanımlanan davranışları sergileme ve değişikliklere canlı bir organizma gibi cevap verebilme kabiliyetleri ile ön plana çıkmaktadır. Şu an geliştirilme aşamasında olan 4D printing tekniğinde 4. Boyut zaman olarak adlandırılmaktadır. 4D printing tekniği ile üretilen bir ürünün kendini şekillendirmesi ile ilgili görsel Şekil 1.24’ te verilmiştir.



Şekil 1.24. 4D printing ile üretilen ürünün kendini şekillendirme süreci

1.6. Katmanlı İmalat Yöntemlerinde Kullanılan Hammaddeler

Katmanlı imalat cihazlarında üretim için kullanılan hammaddeler genel olarak üç farklı formda bulunmaktadır. Bunlar katı, sıvı ve toz şeklindedir. Malzeme seçimi, üretilecek olan ürünün istenilen özelliklere uygun olmasını sağlamak için oldukça önemli bir faktördür (Şahin ve Turan 2018). Katmanlı imalat teknolojileri için kullanılan hammaddeler ve bu hammaddelerle üretilmiş olan bazı ürünler Şekil 1.25’ te gösterilmiştir. Ayrıca aşağıda verilen tabloda, ASTM standartlarına göre 7 ana kategoriye ayrılmış olan katmanlı imalat teknolojilerinde üretim malzemesi olarak kullanılan hammaddeler ve bu hammaddelerin malzeme formu verilmiştir (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Katmanlı imalat teknolojileri üretim hammaddeleri ve hammadde formları

Katmanlı İmalat Tekniği	Üretim Malzemesi (Hammadde)	Üretim Malzemesi Formu
Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization)	Polimer (Fotopolimer)	Sıvı Reçine
Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)	Polimer	Katı (Filament)
Malzeme Püskürtme (Material Jetting)	Polimer (Fotopolimer)	Sıvı Reçine
Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)	Metal, Seramik, Polimer	Toz
Toz Yatağında Birleştirme (Powder Bed Fusion)	Metal, Polimer	Toz
Doğrudan Enerji ile Yığılma (Direct Energy Deposition)	Metal	Toz veya Tel
Tabaka Laminasyonu (Sheet Lamination)	Metal, Polimer, Kâğıt	Katı (Tabaka)



Şekil 1.25. Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan hammaddeler ve üretilmiş bazı ürünler

1.7. Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Sınırlamaları

Katmanlı imalat teknolojilerinin kullanım alanının geniş olması, zaman-maliyet açısından fayda sağlaması, karmaşık yapıdaki ürünlerin üretilebilirliği gibi sayısız avantajlarının yanı sıra geliştirilmesi gereken bazı sınırlamaları da mevcuttur. Bu sınırlamalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Üretim süresi: Katmanlı imalat teknolojileri, geleneksel seri üretim yöntemleri ile sadece üretim süreleri dikkate alınarak kıyaslandığında daha yavaştır. Ancak geleneksel üretim yöntemlerinde ihtiyaç duyulan takım, kalıp tasarımı gibi aşamalara katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen ürünlerde gerek olmadığı için toplamda daha hızlı bir üretim yapılmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğü: Katmanlı imalat teknolojileri, katman katman inşa etme prensibi ile üretim yaptığı için ürün yüzeyinde katmanların sebep olduğu pürüzler meydana gelmektedir. Bu pürüzler bazı kimyasal sıvılarla veya zımparalama, macunlama, astarlama gibi yöntemlerle giderilebilir ancak üretim sonrası ek bir iş yükü gerektirmektedir.

Ürün boyutu: Günümüzde kullanılan katmanlı imalat cihazları, kendi boyutlarının sınırlı olmasından dolayı çok büyük hacim kaplayan parçaları üretememektedir. Örnek olarak FDM tipi bir cihazın üretim boyutu ortalama

30x30x50 mm civarındadır. Cihazlardaki boyutsal kısıtlamalar, söz konusu üretim tekniği için büyük dezavantajlardan birisidir. Ancak bu durum yeni nesil katmanlı imalat cihazları ile aşılmaya çalışılmaktadır.

Malzeme Sınırlılığı: Son dönemlerdeki gelişmeler sayesinde katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzeme seçenekleri oldukça artmış olsa da geleneksel yöntemlere kıyasla oldukça sınırlıdır.

Kötüye kullanım olasılığı: Hızla gelişen teknoloji ile yaygınlaşan katmanlı imalat teknolojileri günümüzde her bireyin sahip olabileceği bir duruma gelmiştir. Bu toplumsal gelişme ve en yeni teknolojilerin kullanımı açısından güzel bir şey olsa da kötüye kullanım açısından birçok problem doğurmaktadır. Örneğin katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak kolaylıkla silah üretilebilmektedir. Ayrıca üretilen silahlar detektörlerle tespit edilemediği için toplumsal huzuru bozabilecek riskler taşımaktadır. Ancak bu ve bunun gibi sorunların önüne geçebilmek için çalışmalar devam etmektedir.

1.8. Katmanlı İmalat Teknolojileri Üretim Hataları ve Çözüm Yolları

Katmanlı imalat teknolojileri ile üretim esnasında bazı istenmeyen durumlar ve objelerde üretim hataları meydana gelebilmektedir. Bu hatalar, üretim yapan cihaz, malzeme, ürün geometrisi veya üretim parametrelerinin doğru ayarlanmaması gibi etkenlerden kaynaklanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında örneklendirilen üretim yöntemi FDM tekniği olduğundan dolayı, kaynaklanan bazı hatalar ve muhtemel sebepleri FDM tekniğine göre incelenmiştir.

Filamentin tablaya yapışmaması: Üretim esnasında objenin ilk katmanının üretim tablasına güçlü bir şekilde bağlanması çok önemlidir. Objenin geri kalan kısmı, yapının temeli görevi gören ilk katman üzerine inşa edilmektedir. Eğer ilk katman tablaya güçlü bir şekilde bağlanmazsa üretimin ilerleyen aşamalarında problem yaratmakta ve istenilen şekilde bir üretim sağlanamamaktadır. Bu hataya yol açabilecek etkenler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Cihaz nozulunun (memesinin) tabla ile olan mesafesinin iyi kalibre edilmemiş olması
- Tabla yüzeyinin yapışmaya elverişsiz olması
- İlk katman oluşturulurken üretim hızının çok fazla olması
- Üretim esnasında nozuldan eritilerek beslenen hammaddenin ani soğuma sebebiyle büzülmesi

Katmanlar arasında boşlukların oluşması: Üretim esnasında Şekil 1.26’ da gösterildiği gibi katmanların arasında boşluklar oluşabilmektedir (simplify3d.com). Bu hataya yol açabilecek etkenler aşağıda verilmiştir.

- Dilimleme yazılımlarında cihazın ne kadar hammaddeyi ekstrüzyon yapması gerektiğini belirlemek için kullanılan ayarlardaki filament çapının yüksek girilmesi
- Filamentin nozul kısmına beslenmesi amacıyla kullanılan motordaki itici dişlinin aşınması veya başka bir sebepten kaynaklanan yetersiz besleme



Şekil 1.26. Katmanlar arası boşluk hatası

Katmanlar arası fazla ekstrüzyon: Üretilen objenin yüzey kalitesini ve boyutlarını etkileyen bir sorundur. Katman aralarından fazla malzemelerin çıkması ve yüzey kalitesini bozması ile gözlemlenebilmektedir. Bu sorunla ilgili örnek görsel Şekil 1.27’ de, sorunun muhtemel sebepleri ise aşağıda verilmiştir (elektromanyetix.com)

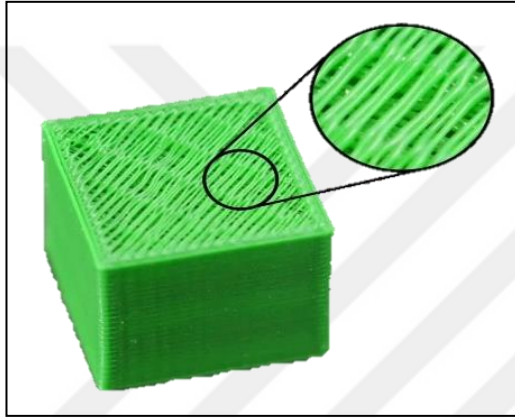
- Dilimleyici yazılımlarda, girilen filament çapı değerinin düşük girilmesi
- Başka bir yazılımsal sorun nedeni ile besleme motorunun filamenti olması gerekenden daha hızlı beslemesi



Şekil 1.27. Fazla ekstrüzyon hatası

Üretilen objenin üst katmanlarında oluşan boşluklar: Katmanlı imalat teknolojilerinde üretim yapılırken ürünün iç kısmı, malzeme ve zaman tasarrufu sağlamak için isteğe bağlı olarak istenilen doluluk oranında imal edilebilmektedir. Ancak bu durum bazen en üst katmanlarda boşlukların meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Söz konusu üretim hatası ile ilgili görsel Şekil 1.28’ de, hata ile ilgili muhtemel sebepler ise aşağıda verilmiştir (simplify3d.com).

- Doluluk oranının çok düşük olması
- Alt-Üst kalınlığının yetersiz olması
- Yetersiz ekstrüzyon



Şekil 1.28. Üst katmanlarda oluşan boşluklar

Katman kayması: Birçok katmanlı imalat cihazı, yazdırma esnasında meydana gelen olumsuzlukları ve hataları geri bildirim alamazlar. Bu yüzden üretim esnasında herhangi bir sorun oluşsa dahi cihaz bunu fark edemez ve işleme devam eder. Katman kayması problemi, yazdırma esnasında katmanların üst üste eklenmemesi ve katmanlarda sapmalar yaşanmasıdır. Cihaza geri bildirim olmadığı için üretim bu şekilde devam etmekte ve istenilen ürüne ulaşılamamaktadır. Söz konusu sorun Şekil 1.29’ da gösterilmiş ve bu problemin olası sebepleri aşağıda sıralanmıştır (simplify3d.com).

- Üretim hızının çok yüksek olması
- Mekanik veya yazılımsal problemler
- Üretim esnasında cihaza fiziksel müdahale sebebiyle başlık kısmında oluşan kaymalar



Şekil 1.29. Katman kayması hatası

Ürün geometrisinde oluşan çarpılma: Bu hata özellikle ABS (Akrilonitril bütadien stiren) plastik ile üretim yaparken meydana gelmektedir. Büyük boyutlarda bir geometriye sahip bazı objelerde üretim esnasında istenmeyen çarpılmalar ve büzülmeler görülebilmektedir. Bu hatanın muhtemel sebepleri aşağıda, söz konusu hataya ait örnek bir görsel ise Şekil 1.30’ da verilmiştir (elektromanyetix.com).

- ABS plastik ile üretim yaparken ısıtmalı tabla kullanılmaması
- Ortam sıcaklığının çok düşük olması veya cihaz üzerindeki fandan kaynaklı ani soğumalar
- ABS plastik ile üretim yapılırken ani soğumalardan etkilenmemesi için cihazda kabin kullanılmaması

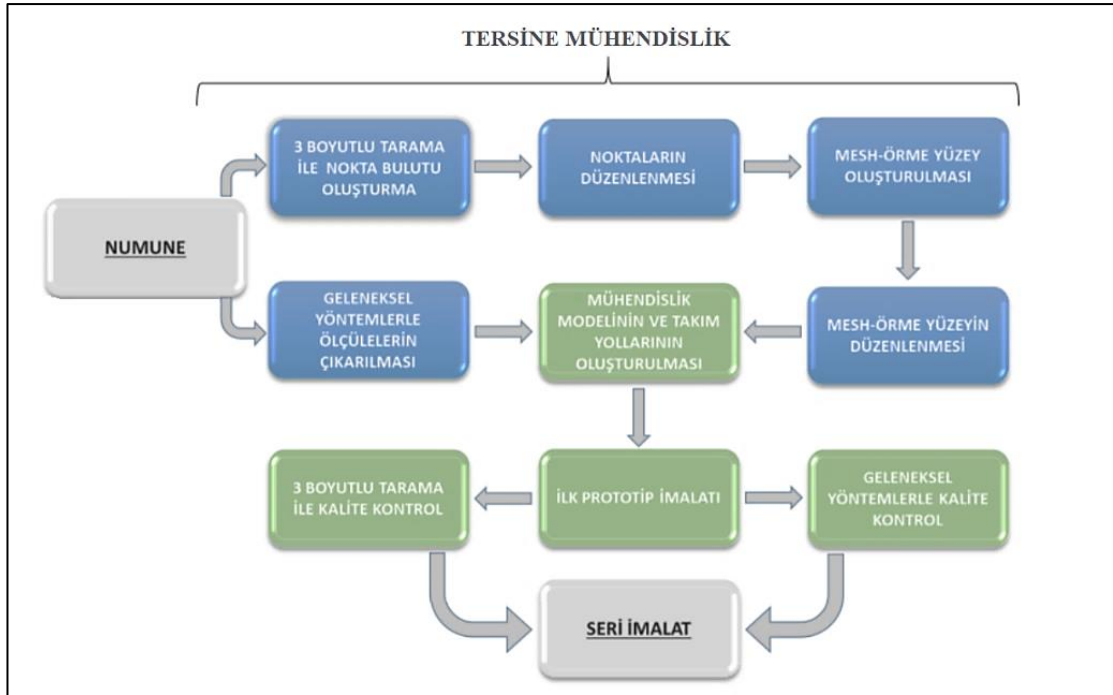


Şekil 1.30. Çarpılma hatası

1.9. Tersine Mühendislik

Son yıllarda bilgisayar destekli tasarım ve imalat teknolojilerinde yaşanan büyük gelişmeler, tersine mühendislik (Reverse Engineering) adı verilen bir kavramı ortaya çıkarmıştır. Tersine mühendislik kavramı, var olan bir nesnenin kopyasını veya fonksiyonel olarak yeniden tasarımını yapmak için ya da nesnenin tasarım bilgilerinin bulunmadığı durumlarda, nesneyi yeniden üretebilmek veya geliştirebilmek amacıyla, ürünün sayısal tasarım bilgilerinin elde edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Çelik 2013, Eilam 2005). Bu teknikte tasarım bilgileri bulunmayan somut ürünlerin sayısal tasarım bilgileri, kumpas, mikrometre vb. gibi klasik el ölçüm aletleriyle yapılabildiği gibi bu aletlerin yetersiz kaldığı durumlarda 3D tarama teknikleri ile de yeniden sayısallaştırılabilmektedir (Yıldız 2017).

Somut ürün, sayısallaştırma işlemlerinin ardından elde edilen tasarım bilgileri kullanılarak analiz edilebilmekte, geliştirilebilmekte, boyutsal doğruluğu kontrol edilebilmekte, yeniden üretilebilmekte veya ürün verimliliğini artırmak amacı ile çalışmalar yapılabilmektedir. Yeniden üretim için yapılan bir tersine mühendislik işleminin uygulama adımları Şekil 1.31’de verilmiştir. Verilen uygulama adımlarında tersine mühendislik, somut modelin veya teknik resmi bulunmayan bir numunenin sayısal verilerinin toplanması ile başlayıp, mühendislik modelinin oluşturulması ile biten süreçtir (Yıldız 2017).



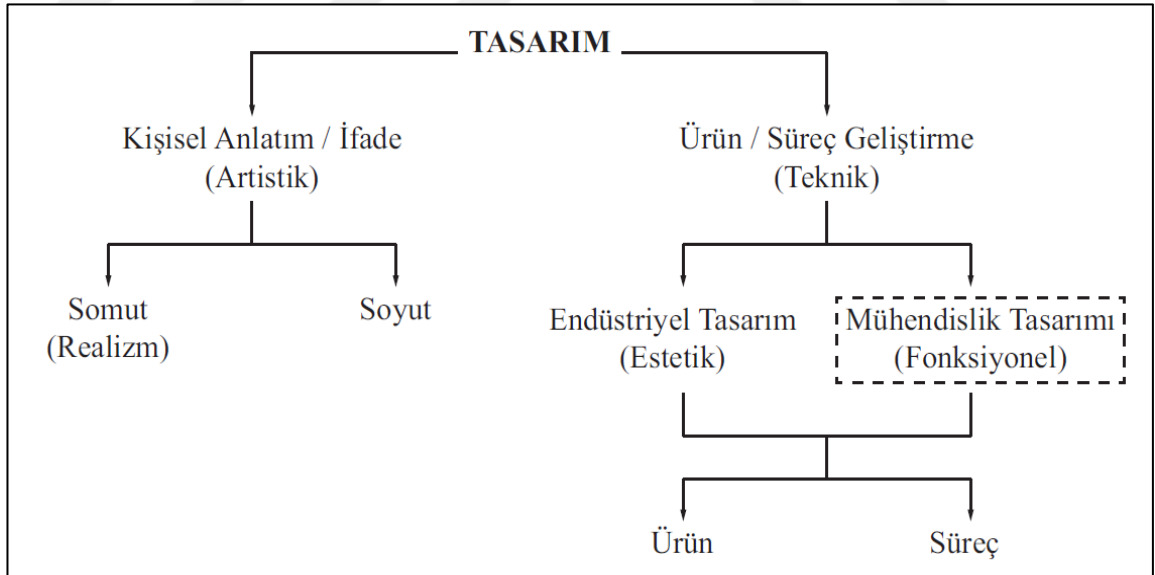
Şekil 1.31. Tersine mühendislik uygulama adımları

1.10. Tasarım

Tasarım, kelime anlamı olarak birçok disiplini kapsayan ve tek bir tanımlama ile tarif edilemeyen oldukça geniş bir alandır. Bu yüzden literatürde evrensel olarak kabul görmüş bir tanımını bulmak neredeyse imkansızdır. En yalın haliyle işaret etmek, tanımlamak, göstermek, sınırlarını belirlemek, biçimlendirmek vb. gibi kavramlarla tarif edilmektedir (Childs 2004).

Tasarım kelimesi, özel bir işlevi belirten bir sıfatla birlikte anlam kazanacağı için başında bir sıfat olmadan tanımlamak oldukça zordur. Makine tasarımı, grafik tasarım, endüstriyel tasarım, ürün tasarımı vb. örnek olarak verilebilir (Özgür 2015).

Tasarım kavramı, artistik (sanatsal) tasarım ve teknik tasarım olmak üzere iki ana çatıda incelenmektedir. Artistik tasarım, heykel, resim, peyzaj, dekorasyon vb. gibi sanatsal içerikleri kapsarken, teknik tasarım ise bir ürün veya sürecin oluşturulması/geliştirilmesi olarak ifade edilmektedir. Teknik tasarım kendi içerisinde endüstriyel tasarım ve mühendislik tasarımı olmak üzere iki farklı alt gruba ayrılmaktadır. Endüstriyel tasarımda ürün veya süreç, estetik ve/veya ergonomi açısından değerlendirilirken mühendislik tasarımında ise ürün veya sürecin geliştirilmesi fonksiyonel, teknolojik ve yenilikçi bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Buna göre tasarım kavramı ve alt grupları Şekil 1.32’ de verilmiştir (Çelik 2013).



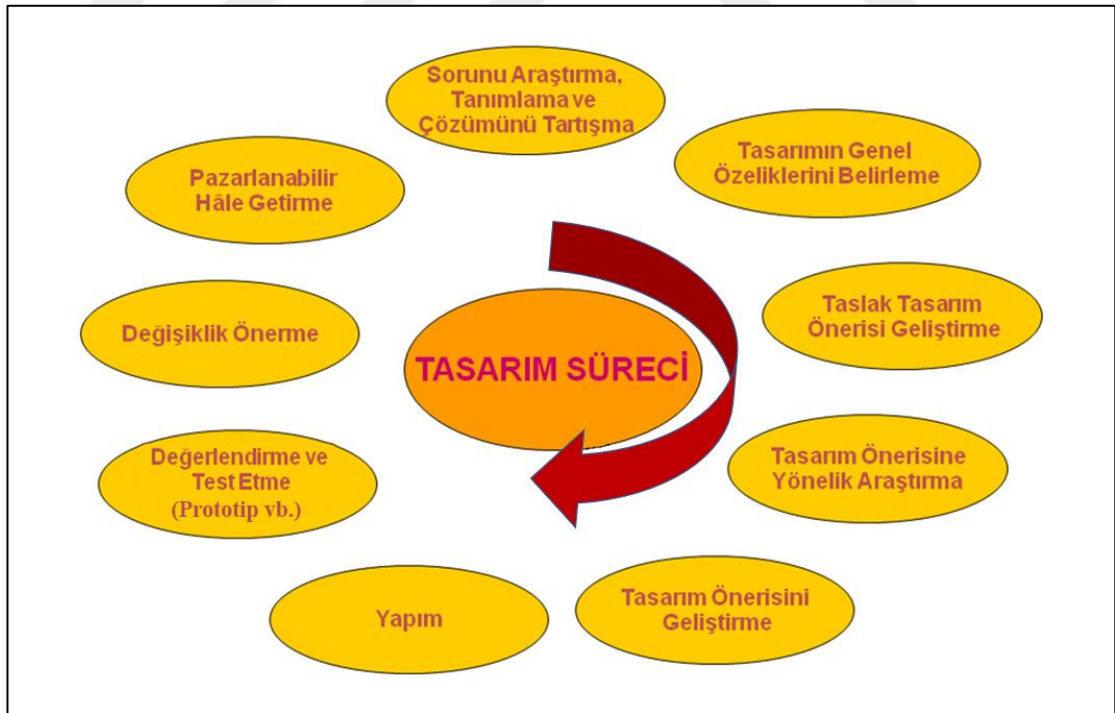
Şekil 1.32. Tasarım kavramı

Buna göre tasarım kavramının özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Özgür 2015).

- Yaratıcılık gerektiren bir süreçtir
- Çok disiplinli bir süreçtir
- Dönüşlü bir süreçtir
- Sürekli gelişim durumunda olan bir süreçtir
- İnsan ihtiyaçlarına hizmet eden bir süreçtir

Benzer şekilde 554 sayılı KHK (Kanun Hükmünde Kararnameler) tasarım kavramını “bir ürünün tümü veya bir parçası veya üzerindeki süslemenin, çizgi, şekil, biçim, renk, doku, malzeme veya esneklik gibi insan duyuları ile algılanan çeşitli unsur veya özelliklerinin oluşturulduğu bütünü” şeklinde ifade etmiştir (Tekil 1997).

Tasarım süreci, genellikle bir sorun ya da ihtiyacın ortaya çıkmasıyla başlayan ve sorun veya ihtiyaca yönelik problemin giderilmesine yönelik çalışmaların yapılmasıyla ürünün ortaya konulması ve pazara hazır hale getirilmesiyle biten bir süreçtir. Buna göre genel olarak tasarım süreci Şekil 1.33’ te belirtildiği gibi tarif edilebilir (Yavuzcan 2016).



Şekil 1.33. Tasarım süreci

1.11. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD: Computer Aided Design)

Bilgisayar destekli tasarım, imalatının yapılması düşünülen bir ürünün ortaya çıkarılmasında yardımcı olmak için bilgisayar sistemlerinin kullanılmasıdır. Daha basit bir tabirle imalatı düşünülen ürünün ilk olarak bilgisayar ortamında oluşturulmasıdır (Olgun ve Yılmaz 2014).

Bilgisayarlar, günümüzde tüm sektörlerde aktif olarak kullanılan ve günümüzün vazgeçilmez bir parçası haline almış teknolojik ürünlerdir. Ticari boyutta ilk olarak Dr. Patrick J. Hanratty, 1957 yılında bilgisayar destekli işleme programını geliştirmiştir. Dr. Patrick J. Hanratty o yıllarda Pronto adı verilen ilk ticari nümerik-kontrol programlama sistemine katkıda bulunmuştur. Ardından 1960'lı yıllarda bilgisayar destekli tasarım kavramının ilk aşaması olan Sketchpad projesi, Ivan Sutherland tarafından Massachusetts Institute of Technology (MIT)'de hayata geçirilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte Amerikan ordusunun da desteklediği projeler sayesinde bilgisayar destekli tasarım kavramı hızlı bir gelişim göstermiştir (Türkel 2008).

1960'lardan itibaren tasarım sürecinin vazgeçilmez bir parçası olan bilgisayarlar, tüm tasarım ofislerinde yerini almaya başlamıştır. Sonraki yıllarda, bilgisayar programcılığı dillerinin, bilgi tabanlı sistemlerin, yapay zekânın ve birbiriyle ilişki kurabilen veri tabanı sistemlerinin gelişimiyle bilgisayar destekli tasarım kavramı yeni teknolojik avantajlara sahip olmuştur. Bu yazılım avantajlarına ilişkili olarak, bilgisayar donanımlarının maliyetinde düşüş, güçlerinde ise artış olmuştur (Bijl 1989).

Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak teknik resim, mühendislik analizleri, görselleştirme, simülasyonlar ve animasyonlar gibi uygulamalarda kullanılmak amacı ile oluşturulan yazılımlarda, son yıllarda oldukça büyük gelişmeler yaşanmıştır. Buna rağmen bilgisayar destekli tasarım teknolojisi göreceli bir şekilde çok yeni bir teknoloji olarak görülmekte ve gelişmeye açık konumda değerlendirilmektedir. Bilgisayar teknolojilerinin entegre edildiği tasarım ve üretim uygulamaları, klasik yöntemlere kıyasla aşağıda verilen bazı önemli yararları sağlamaktadır (Çelik 2013).

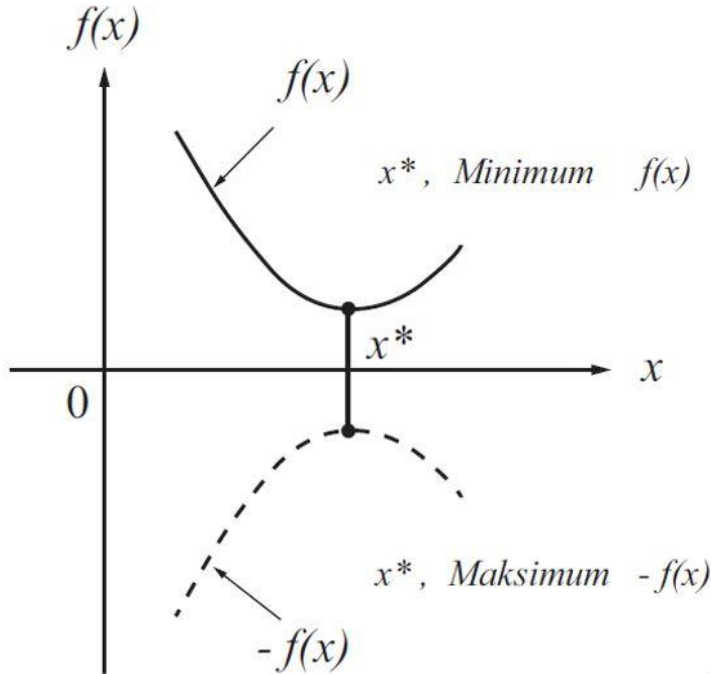
- Bilgisayar teknolojilerinin entegre edildiği tasarım uygulamalarındaki maliyetlerde %15-30 oranında azalma
- Klasik yöntemlere kıyasla ürün bazında toplam tasarım ve imalat süresinde %30-60 oranında azalma
- Toplam süreç baz alındığında verimlilikte %40-70 oranında artış
- Ürün kalitesindeki artış sebebiyle hurdaya çıkma oranında %20-50 azalma
- Bilgisayar teknolojilerine entegre edilmiş sayısal yöntemlerin ilgili mühendislik hesaplamalarındaki hızında 3-30 kat artış
- Ürünlerin görsel boyutta değerlendirilmesi ve karşılaştırılması gibi işlemlerde yüksek verim

1.12. Yapısal Optimizasyon

Bilgisayar ve mühendislik teknolojilerinde yaşanan büyük gelişmeler sayesinde, bilgisayar ortamında hasar tahminlerinin yapılabilmesi ve buna bağlı olarak maliyetlerin minimuma indirilmesi sağlanmış durumdadır. Son yıllarda optimizasyon kavramının da bilgisayar ve mühendislik teknolojilerine dahil olmasıyla birlikte tasarım süreçlerinde büyük avantajlar gözlenmektedir.

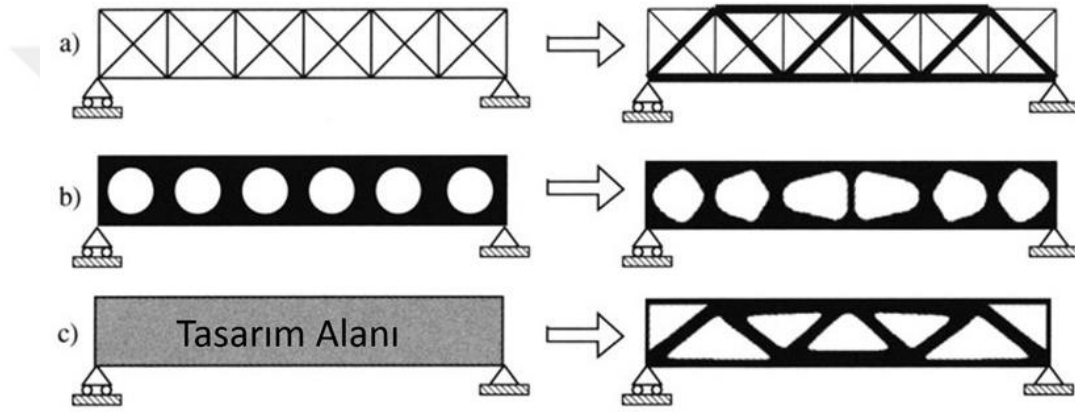
Optimizasyon, herhangi bir sistemdeki işgücü, zaman, hammadde, kapasite, ekipman vb. gibi kaynakların en verimli şekilde kullanılarak maliyetin en aza indirilmesi, kârın, kapasite kullanımının ve verimliliğin en yüksek tutulması gibi belirli amaçlara ulaşmayı sağlayan bir kavram olarak tanımlanmaktadır (Türkay 2006).

Optimizasyon matematiksel olarak bir fonksiyonun maksimum veya minimum değerini veren durumların bulunması şeklinde ifade edilebilir. Örnek olarak Şekil 1.34’ te verilen görselde, x^* olarak tanımlanan nokta $f(x)$ fonksiyonunun minimum olduğu nokta ve $-f(x)$ fonksiyonunun maksimum olduğu noktadır. x^* noktası $f(x)$ fonksiyonunu minimize ederken aynı zamanda $-f(x)$ fonksiyonunu maksimize etmesinden dolayı maksimum değeri bulmakla minimum değeri bulmak aslında eşdeğer olmaktadır (Özbakış 2008).



Şekil 1.34. $f(x)$ fonksiyonu için minimum ve $-f(x)$ fonksiyonu için maksimum noktaları

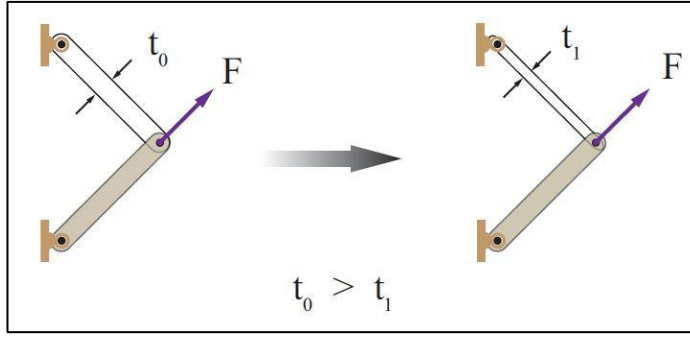
Yapısal optimizasyon ise herhangi bir tasarımın boyut, şekil veya topoloji olmak üzere üç farklı parametresinin en ideal hale getirilmeye çalışılması olarak ifade edilebilir. Boyut ve şekil optimizasyonunda tasarıma ait belirlenmiş olan ölçülerin veya şeklin değiştirilmesiyle optimizasyon işlemi yapılmaktadır. Topoloji optimizasyonunda ise belirlenen tasarım alanı sınırları içerisinde şekil veya ölçülere bağlı kalmadan optimizasyon işlemi yapılmaktadır. Şekil 1.35’ te verilen görselde, a) boyut, b) şekil ve c) topoloji optimizasyonlarına örnekler sunulmuştur. Sunulan örneklerde a ve b görseli için boyut ve şekillerin önceden belirlenmiş olduğu görünmektedir. C görselinde ise boyut ve şekle bağlı kalmadan, belirlenmiş tasarım alanı üzerinden optimizasyon yapılmıştır (Bendsoe ve Sigmund 2003).



Şekil 1.35. a) Boyut optimizasyonu, b) Şekil optimizasyonu, c) Topoloji optimizasyonu

1.12.1. Boyut optimizasyonu

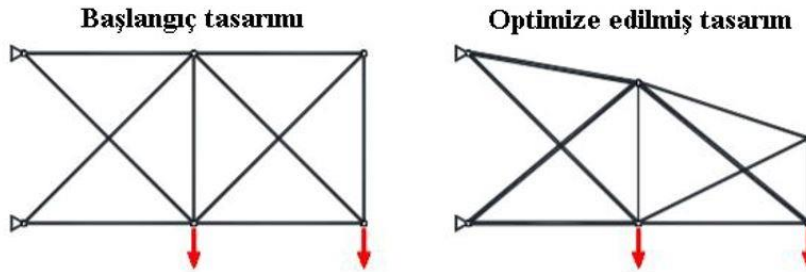
Elemanların kesit alanlarında tasarım değişkeni olarak kullanılan optimizasyon yöntemidir. Elemanların kesit alanları ve kalınlıklarındaki tasarım değişkeni olarak kabul edilen optimizasyon problemlerine boyut optimizasyonu denir. Bu optimizasyon yönteminde genel olarak amaç malzeme kalınlığını ve dolayısıyla malzemenin ağırlığını optimum düzeyde tutmaktır. Sistemin geometrisi rastgele eleman kesit alanı seçilerek oluşturulur. Ardından sınırlara bağlı kalmak koşuluyla bir metodoloji kullanılarak kesit alanlarının değerleri değiştirilir. Boyut optimizasyonunda eleman sayısı ve eleman koordinatları değişmez (Sevim 2013, Çelik 2013). Boyut optimizasyonu ile ilgili örnek bir görsel Şekil 1.36’ da verilmiştir.



Şekil 1.36. Boyut optimizasyonu

1.12.2. Şekil optimizasyonu

Belirli yapısal ve mali sınırlamalara bağlı kalmak koşuluyla en uygun şeklin elde edilmesinin amaçlandığı optimizasyon çalışmalarına şekil optimizasyonu adı verilmektedir. Burada amaç, istenilen özelliklere sahip optimum şeklin elde edilmesidir. Şekil optimizasyonu çalışmaları ile ilgili bir görsel Şekil 1.37’ de gösterilmiştir. Bu tür optimizasyonda aşağıdaki örnek görselde verildiği gibi tasarım değişkeni olarak düğüm noktaları koordinatları ve eleman kesit alanları kullanılır (Sevim 2013).



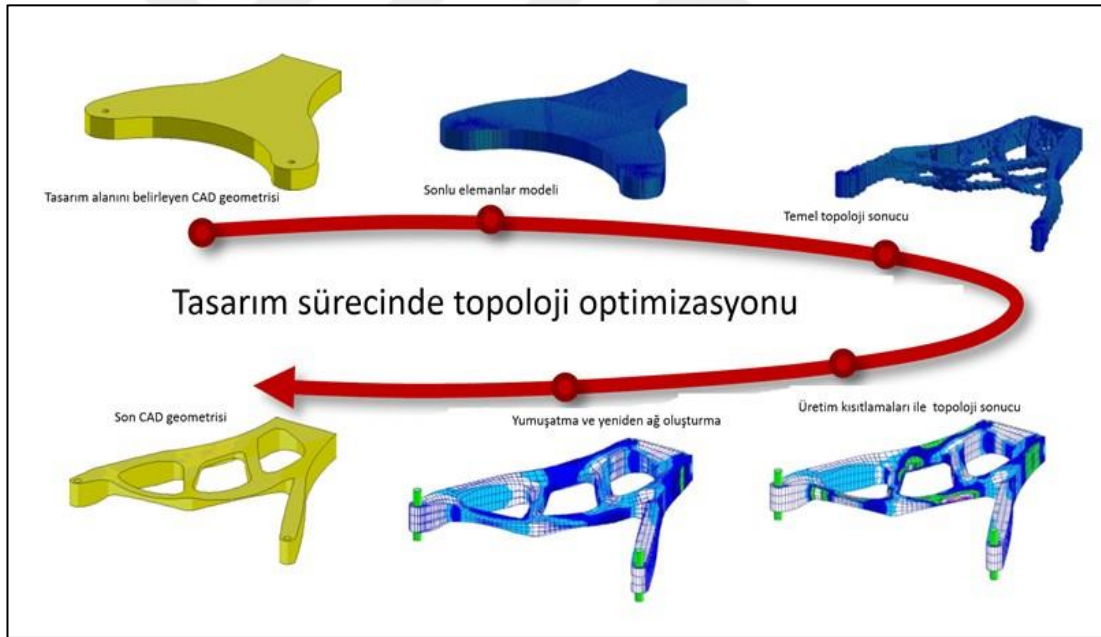
Şekil 1.37. Şekil Optimizasyonu

1.12.3. Topoloji optimizasyonu

Herhangi bir tasarıma topoloji optimizasyonu uygulanmasındaki amaç, ağırlığı azaltırken mukavemeti veya doğal frekansı en yüksek olan geometriyi elde etmektir. Son yıllarda bilgisayarların işlem gücündeki artış sayesinde, başta havacılık, otomotiv ve makine sanayi olmak üzere birçok farklı alanda daha hafif ve mukavemeti daha yüksek ürünlerin üretilebilirliği, topoloji optimizasyonu yönteminin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Ayrıca söz konusu yöntem, dinamik yükler altında çalışan parçalara da uygulanabilmekte ve yorulma dayanımının artırılması sağlanmaktadır (Bendsoe ve Sigmund 2003, Yıldız vd. 2003).

Topoloji optimizasyonunun tasarım sürecindeki uygulama adımları maddeler halinde aşağıda verilmiştir. Ayrıca söz konusu adımları özetleyen görsel Şekil 1.38’ de sunulmuştur (Linari 2012).

- İlk adım olarak bilgisayar ortamında tasarım alanı sınırlarını içeren yüzeysel bir CAD model hazırlanır.
- Hazırlanan CAD modeli için sonlu elemanlar modeli oluşturulur.
- Üretim kısıtlamaları göz önüne alınmadan temel bir topoloji sonucu elde edilerek modelin doğruluğu kontrol edilir.
- Ardından üretim kısıtlamaları göz önünde bulundurularak yeni bir topoloji sonucu elde edilir.
- Topoloji sonucu genellikle STL adı verilen ve yüzeylerin üçgenlerle tanımlandığı bir dosya formatında elde edilir. Bu sebeple modelde bir yumuşatma ve yeniden ağ oluşturma işlemi gerçekleştirilir.
- Son olarak elde edilen modelin istenilen dayanım ve limit değerleri sonlu elemanlar analizi ile doğrulanarak değişiklikler CAD modeline yansıtılır.



Şekil 1.38. Tasarım sürecinde topoloji optimizasyonu adımları

1.13. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM: Finite Elements Method)

Sonlu elemanlar yöntemi, 1950’li yıllarda geliştirilmiş ve çeşitli alanlardaki mühendislik problemlerine yaklaşık çözümler bulmak için kullanılan sayısal bir analiz tekniğidir (Fetvacı 2001). Hızlı bir şekilde gelişen teknoloji ile bilgisayarların güçlenmesi, bu yöntemin yaygınlaşmasını sağlamış ve günümüzde birçok farklı

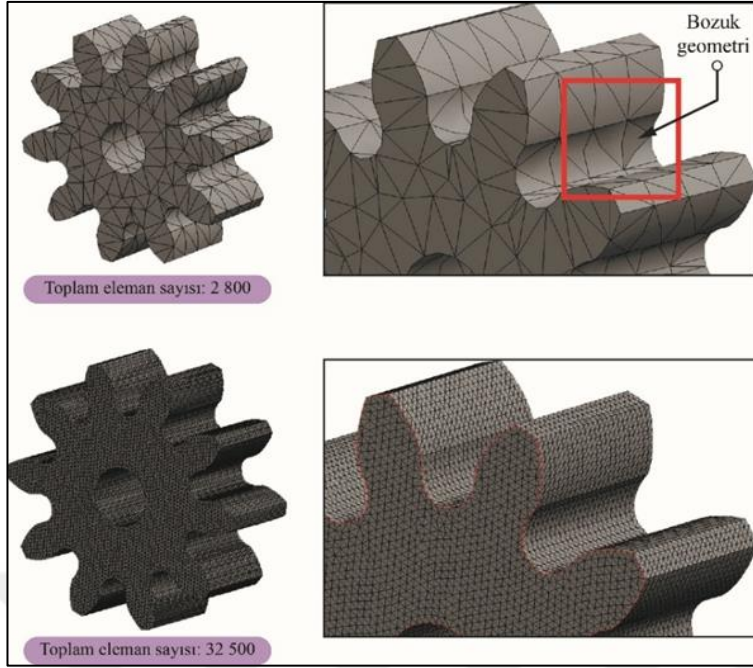
disiplinde aktif bir şekilde kullanılır bir duruma gelmiştir. Ayrıca, bu yönde birçok sonlu eleman yöntemi ile çözüm veren bilgisayar yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlara ANSYS, SOLIDWORKS SIMULATION, NASTRAN, ABAQUS, yazılımları örnek olarak verilebilir.

Sonlu elemanlar yönteminin başlıca avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Bircan 2005).

- Sonlu elemanlar yöntemi geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlar. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve değişik sonlu elemanlar kullanılabilir. Gerektiğinde bazı alt bölgelere daha hassas çözümler yapılabilir.
- Sonlu elemanlar yöntemi değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir.
- Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel olarak genelleştirilebilir ve pek çok problemi çözebilmek için aynı model kullanılabilir.
- Yöntemin hem fiziksel anlamı hem de matematiksel temeli mevcuttur.

Söz konusu analiz yönteminde, analizi yapılacak ürün, daha önce davranışı belirlenmiş “n” tane sonlu elemana ayrılmaktadır. Elemanlar birbirlerine uçlarından düğüm noktaları (nod) ile bağlanmaktadır. Elemanlar, yapının şekline ve çözüm yolunda yapılacak yaklaşıma göre tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu yapıda oluşturulabilir. Çözüm, temel gerilme-birim yer değiştirme ifadelerini komşu elemanlardan, düğüm noktaları üzerinden aktarılan kuvvetler sistemi kullanarak her bir elemandaki çökmelerin hesaplanmasıyla elde edilir.

Sonlu elemanlar yönteminde eleman sayısı ve tipi seçimi oldukça önemlidir. Bu seçim, yapılacak analiz türüne, analizi yapılacak ürünün geometrik özelliklerine, çözücü platformun kapasitesine vb. bağlı olarak optimum düzeyde yapılmalıdır. Teorik olarak eleman boyutu küçüldükçe, ürün geometrisi daha iyi tarif edilmekte ve çözüm sonucunun doğruluğu artmaktadır. Ancak eleman boyutunu gereğinden fazla artırmak büyük zaman kayıplarına neden olabilmekte hatta kimi zaman çözümü imkânsız hale getirmektedir. Bu gibi durumlarda kritik bölgelerde eleman sayısını artırmak (küçük boyutlu eleman oluşturmak), daha az kritik bölgelerde ise eleman sayısını azaltmak (büyük boyutlu eleman oluşturmak) geçerli bir yöntemdir. Şekil 1.39’ da örnek bir sonlu eleman modellemesi ile eleman sayısının, çözüm doğrulamasına etkisi verilmiştir (Çelik 2013).



Şekil 1.39. Sonlu eleman modellemesinde eleman sayısının etkisi

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan, birbirinden farklı birçok yazılım olmasına rağmen bu yöntemin temel uygulama adımları hepsinde aynıdır. Bu adımlar, işlem öncesi (pre processing), çözüm (solution) ve işlem sonrası (post processing) aşamalarıdır (Çelik 2013).

İşlem öncesi (Pre processing)

Bu adım, problemin geometrik (çizgi, alan, hacim vb.) modelinde veya yapısında, sonlu elemanlar yöntemi ağ örgüsünün kurularak, analize hazır hale getirilmesi için yapılan işlemlerin bütünüdür. Bu aşamada takip edilen işlem adımları aşağıda verilmiştir (Çelik 2013).

Modelleme: Bu aşama, parçanın çizim, alan, hacim gibi geometrik yapısının oluşturulması aşamasıdır. Bu geometrik yapı analiz programının içerisinde oluşturulabileceği gibi, bilgisayar destekli katı model programları tarafından oluşturulup uygun formatlarda analiz programı içerisine de alınabilir.

Malzeme özelliklerinin tanımlanması: Bu aşama, malzemeye ait bazı teknik verilerin programa tanıtılması aşamasıdır. Bu veriler, belirli bir yük altında analizi yapılan yapının davranışı, malzemenin elastisite modülü, poisson oranı ve ısı genleşme katsayısı vb. gibi verilerdir.

Yüklerin ve sınır koşullarının belirlenmesi: Bu aşama, genel olarak problemin tanımına uygun şekilde, yapıya gelen yüklerin ve sınır şartlarının (serbestlik derecelerinin) belirlenmesi aşamasıdır. Bu değerler, deneysel ölçümler veya malzeme standartlarına göre belirlenir.

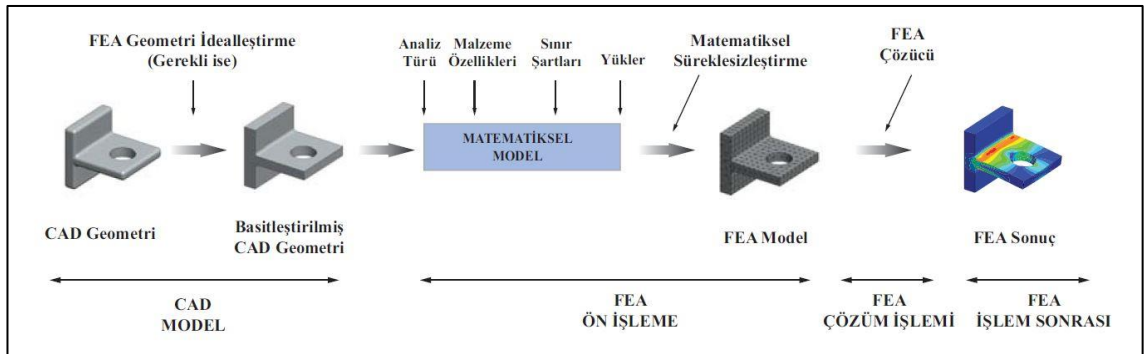
Sonlu eleman modelinin (Mesh) oluşturulması: Bu aşama, geometrik yapının, önceden davranışı belirlenmiş belirli sayıda elemana bölünmesi (Meshing) aşamasıdır. Seçilecek elemanın boyutları, paket program tarafından otomatik olarak seçilir veya tasarımcı tarafından belirlenir.

Çözüm (Solution)

Çözüm adımı, yük değerleri ve sınır koşulları belirli olan bir modelin, sonlu sayıda oluşturulan elemanları arası kurulan denklemlerin çözülmesi ve sonuçların ortaya çıkarılması işlemlerini kapsamaktadır.

İşlem Sonrası (Post processing)

Bu adım, analiz sonuçlarının elde edilmesinden sonra, sonuçlarının görselleştirilmesi ve değerlendirilmesi aşamasıdır. Sonlu elemanlar yöntemi yazılımlarında sonuçlar liste halinde alınabildiği gibi, çeşitli şekillerde ekranda görüntülenebilmekte veya animasyonlar yapılabilmektedir. FEM uygulama adımlarının şematik gösterimi Şekil 1.40' ta verilmiştir (Çelik 2013).



Şekil 1.40. FEM uygulama adımları

2. KAYNAK TARAMASI

Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili yapılan çalışmalar, söz konusu imalat yönteminin yeni bir teknoloji olmasına ve bazı sınırlamalarının bulunmasına karşın, nihai ürün üretimi ve prototip hazırlama sürecinde maliyet ve zaman tasarrufu bakımından oldukça verimli bir teknoloji olduğunu, karmaşık yapıdaki ürünlerin dahi geleneksel yöntemlere kıyasla daha kolay üretilebildiğini ve birçok alanda aktif bir şekilde kullanılarak önümüzdeki süreçte vazgeçilemez bir teknoloji haline geleceğini desteklemektedir (Gökçearslan 2017; Melchels vd. 2012; Durgun ve Başaran 2010; Levy vd. 2003; Alpay 2012; Delikanlı vd. 2005; Ermurat 2002; Guo ve Leu 2013).

Yapılan bu tez çalışması konusu ile ilgili bazı literatür örnekleri, katmanlı imalat teknolojilerinin geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla avantajlarının sunulduğu bazı çalışmalar ve hızlı prototipleme tekniklerinin kullanımına ve üretim sürecindeki önemine yönelik bazı çalışma örnekleri aşağıda verilmiştir.

Kontovourkis vd. (2019) yaptıkları çalışmada, inşaat alanı özelinde katmanlı imalat teknolojilerinin son yıllarda artış gösteren bir şekilde kullanıldığını belirtmiş ve söz konusu imalat tekniğinin üretim zamanı ve üretimde kullanılan malzemenin en aza indirilmesi, yapısal verimlilik ve geometrik sınırlamalara bağlı kalmadan üretim yapılabilirliği gibi avantajlarını belirtmişlerdir. Ardından yapılan çalışmada, inşaat alanına özgü yapılar için topoloji optimizasyonunun önemini vurgulamış ve yapılan bir optimizasyon örneği, kil bazlı malzeme ile üretim yapan ve Robotik Katmanlı İmalat (RAM: Robotic Additive Manufacturing) adı verilen bir teknik ile üretilerek uygulamaya konulmuştur. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar eleştirisel bir şekilde tartışılmış ve inşaat sektörüne özgü uygulamalar için katmanlı imalat teknolojilerinin etkin bir şekilde kullanılmasının birçok farklı avantaj sunduğu sonucu çıkarılmıştır.

Saadlaoui vd. (2017), yaptıkları optimizasyon çalışmalarına katmanlı imalat teknolojilerini entegre ederek bir çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada belirli bir kuvvete maruz kalan metal bir küp ele alınmıştır. Ele alınan metal küpün, üç farklı topoloji optimizasyonu yazılımıyla, gerekli tasarım sınırlamaları göz önünde bulundurularak farklı geometrik şekillere ait yeni tasarımları elde edilmiş ve bilgisayar ortamında analizleri yapılmıştır. Ardından yapılan analizlerin doğrulanması amacıyla elde edilen optimizasyon modelleri, SLM tekniği ile metal üretim yapan bir katmanlı imalat cihazı ile üretilmiş ve fiziksel testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek simülasyon doğrulamaları yapılmış ve üç farklı yeni tasarım üzerinden en uygun optimizasyon modeli sunulmuştur. Çalışmada optimize edilen ürünün klasik imalat yöntemleri ile elde edilemeyeceği, ancak katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak karmaşık yapıdaki ürünlerin dahi daha kolay bir şekilde üretilebileceği vurgulanarak örneklendirilmiştir.

Kazakis vd. (2017), inşaat endüstrisi için optimizasyon çalışmalarının önemini vurgulamış ve söz konusu alana özgü yapılacak topoloji optimizasyon çalışmalarını, kullanılan kiriş elemanlarıyla örneklendirmişlerdir. Örneklendirmede topoloji optimizasyonuna ait hesaplama yöntemlerini sunmuşlardır. Ardından elde edilen optimizasyon tasarımlarına ait kiriş elemanlarının mekanik testleri ve görsel değerlendirilmelerine yönelik olarak katmanlı imalat teknolojileri ile hiçbir kalıba ihtiyaç duymadan ve kısa bir sürede üretilebileceğini vurgulamışlardır. Yapılan çalışma kapsamında kiriş elemanlarına ait yeni tasarımlar FDM tekniği ile üretim yapan bir cihaz aracılığı ile PLA hammaddeden üretilmiş ve elde edilen somut ürün ile topoloji optimizasyonu tasarımı görsel olarak değerlendirilmiştir.

Demir ve Toktaş (2016), insan vücudundaki anatomik yapıların modellenmesi ve katmanlı imalat teknolojileri ile üretilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada insan vücudunda yer alan kemiklerin 3 boyutlu tasarımı ve modelinin üretilmesi hedeflenmiştir. 3 boyutlu kemik modeli, bilgisayarlı tomografi görüntüleri kullanılarak medikal görüntü işleme programıyla elde edilmiş ve üretimi yapılmıştır. Çalışmada, katmanlı imalat teknolojilerinin zaman tasarrufu sağlamasının yanı sıra eğitim ve deneysel çalışmalar için insan vücudundaki yapıların ucuz ve yüksek kalitede modellerinin üretilebildiği, bu yöntemle maliyetin çok daha uygun olduğu ve bu teknolojinin kişiye özel ihtiyaçlara da cevap vermesi sebebiyle klasik imalat teknolojilerine alternatif olarak ön plana çıktığı belirtilmiştir.

Kara vd. (2016), 3 boyutlu yazıcı ile kişiye özgü implant tasarımı isimli çalışmalarında, günümüzde üretilmekte olan implantların çeşitli çap ve uzunluklarda standart olarak üretildiğini, ancak her insanın çene yapısının anatomik farklılıklar göstermesinden dolayı implantın birebir uyum göstermediğini ve bu durumun uygulanan tedaviyi verimsiz kıldığını belirtmişlerdir. Çalışmada, bu sorunu ortadan kaldırmak adına 3 boyutlu baskı teknolojileri kullanılarak kişiye özgü implantların üretilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın ilk adımında 3 boyutlu tarayıcı ile hastanın çene ve diş yapısı taranmakta, CAD modeli oluşturulmaktadır. İmplant tasarımının dizayn edilmesinin ardından, implantın üzerine yük uygulan cisimlerin yapısal bütünlüğü bozabilecek zayıf noktaların belirlenmesi ve vida çevresinde gerçekleşen maksimum gerilme ve deformasyonların nerede oluşacağını tahmin edilebilmesi için sonlu elemanlar yöntemiyle dijital ortamda analiz yapılmaktadır. Analiz sonuçlarının başarıya ulaşması durumunda tasarlanan implant, uygun malzeme ile işlem yapabilen katmanlı imalat yöntemi ile üretilerek kişiye özgü implant yapılabileceği açıklanmıştır.

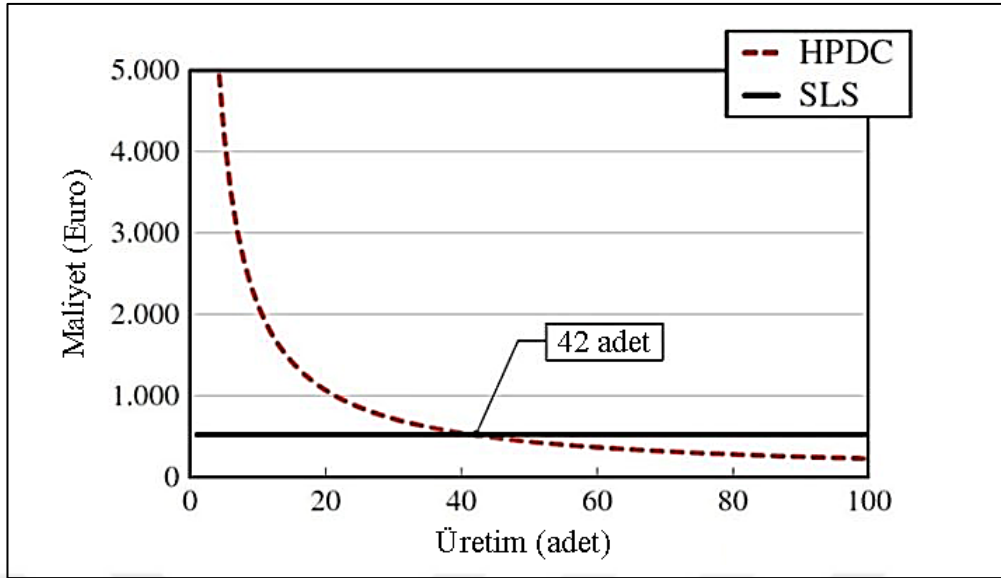
Balcıoğlu (2014), 3 boyutlu yazıcı ve sinemada kullanımı isimli yüksek lisans tezinde, teknolojiye yaşanan gelişmeler sayesinde 3 boyutlu yazıcıların birçok alanda olduğu gibi sinema sektöründe de aktif bir şekilde kullanılmaya başlandığını belirtmiş ve sinema filmlerinde çevre tasarımı, karakter tasarımı ve araç tasarımı olmak üzere üç şekilde kullanıldığını açıklamıştır. Yaptığı çalışmada bir sinema filmi karakterinin fikir aşamasından bitiş aşamasına kadar geçen süreyi incelemiş ve karakterin tüm bilgisayar destekli tasarım aşamalarının 37 saat, 3 boyutlu çıktı aşamasının ise 26 saatte tamamlandığını belirtmiştir. Geleneksel yöntemler kullanılarak bu tasarımın

oluşturulmasının yaklaşık 15-20 gün süreceği ve 3 boyutlu yazıcıların özellikle zaman ve maliyet bakımından çok önemli bir yere sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Çelik vd. (2013), ileri düzey bilgisayar destekli tasarım/bilgisayar destekli mühendislik, tersine mühendislik ve katmanlı imalat teknolojilerini kullanarak bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada sera bitki klipsinin geliştirilmesi ve alternatif tasarım düzeltmeleri hedeflenmiştir. İlk olarak mevcut tasarım üzerinde gerekli mühendislik araçları ve yöntemleri kullanılarak tasarımdaki eksiklikler belirlenmiştir. Elde edilen veriler göz önünde bulundurularak beş farklı tasarım modeli geliştirilmiştir. Bu modellerden bir tanesi ele alınmış ve tasarımı değerlendirebilmek için sonlu elemanlar yöntemine tabii tutularak maksimum gerilme ve deformasyon gibi sonuçlar elde edilmiştir. Son aşama olarak tasarlanan yeni model, katmanlı imalat teknolojisi kullanılarak üretilmiş, görsel ve fiziksel incelemeler yapılmıştır.

Atzeni ve Salmi (2012) yaptıkları çalışmada, Piaggio P180 Avant II model uçağın iniş takımı parçasını geleneksel ve katmanlı imalat yöntemleriyle üretmiş ve iki farklı üretim metodunu maliyet-etkinlik bakımından kıyaslamışlardır. Çalışmada uçak iniş takımları parçası geleneksel yöntem olarak, yüksek basınçlı kalıp döküm (HPDC: High-Pressure Die Casting) tekniği ile üretilmiş, katmanlı imalat yöntemi olarak ise seçici lazer sinterleme (SLS: Selective Laser Sintering) ile üretim yapılmıştır. İki üretim şeklinde de yaklaşık aynı mukavemet değeri elde edilmiştir. Ayrıca katmanlı imalat teknolojileri ile yapılan üretimde daha az malzeme kullanılmış, daha az enerji tüketilmiş ve üretim maliyeti-üretim miktarı grafiği oluşturulduğunda yaklaşık 42. üretim adedine kadar maddi olarak çok büyük bir kazanç sağlandığı Şekil 2.1' de gösterildiği gibi sunulmuştur. Teorik olarak katmanlı imalat teknolojileri ile yapılan üretimlerde kalıp ihtiyacı ve üretim adet artışından kaynaklı avantajlar bulunmadığı için birim maliyet, üretim adedinden bağımsızdır. Bu yüzden seri üretimlerde maliyet bir süre sonra düşmeye başlamaktadır. Ancak, havacılık gibi az sayıda pahalı ve imalatı zor ürünler üretilen bir sektörde 40 kadar üretimin makul olduğu ve bu bakımdan katmanlı imalat teknolojilerinin büyük avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Brackett vd. (2011), katmanlı imalat için topoloji optimizasyonu adlı çalışmalarında, topoloji optimizasyonu için temel kısıtlamaları ve avantajları özetlemişlerdir. Ayrıca optimize edilen ürünlerin, geleneksel imalat yöntemlerine nispeten katmanlı imalat yöntemleri ile üretilebilirliğinin çok daha yüksek olduğunu ve katmanlı imalat teknolojilerinin bu konuda daha avantajlı olduğunu vurgulamışlardır. Söz konusu çalışmada, optimizasyon işleminin ardından, üretim kolaylığı açısından tasarım parametrelerinin düzenlenmesi ve üretim esnasında katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan üretim parametrelerinin (STL oluşturulurken kullanılan mesh yapısı, destek elemanı kullanımı vb. gibi) optimal değerleri hakkında bilgiler verilmiş ve bu parametreler tartışılarak sunulmuştur.



Şekil 2.1. HPDC yönteminin SLS tekniği ile maliyet-üretim adedi bakımından karşılaştırılması

Çelik vd. (2011), seralarda kullanılan bitki klipsleri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında ilk adım olarak tersine mühendislik yaklaşımı ile 3 boyutlu lazer tarayıcı kullanarak klipsi sayısallaştırmış ve parametrik tasarım yazılımlarıyla son düzenlemeleri yaparak bilgisayar ortamına taşımışlardır. Ardından 3 boyutlu yazıcıda üretilecek olan klipslerin mekanik test verilerini elde etmek ve sonlu elemanlar analizi (FEA) gerçekleştirebilmek için test numuneleri üretmişler ve numuneleri testlere tabii tutmuşlardır. Klipslerin deformasyon davranışlarını görmek ve tasarımı değerlendirebilmek için sonlu elemanlar analizi uygulamış ve simülasyon çıktılarını sunmuşlardır. Son aşama olarak görsel ve fiziksel incelemeler için katmanlı imalat teknolojisini kullanarak klipsleri üretmişlerdir. Yapılan bu çalışmada tarımsal makine tasarım, analiz ve imalat konularında en yeni ve yüksek teknolojinin kullanımına yönelik daha fazla araştırmaya katkıda bulunulacağı belirtilmiştir.

Çelik vd. (2010) yaptıkları çalışmada, tarımsal damla sulama sistemlerindeki damla emitörünün 3D CAD katı modelini oluşturulmuş ve akış davranışı, labirent kanallarda akış simülasyon tekniği kullanılarak simule edilmiştir. Özgün tasarımın labirent kanal geometrisi modifiye edilerek yeniden şekillendirilmiş ve damla editörü katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Ardından elde edilen yeni labirent geometrisi simule edilerek özgün tasarımla kıyaslanmış ve sonuçları sunulmuştur.

2.1. Katmanlı İmalat Teknolojileri Konusunda Yapılan Uluslararası Bilimsel Yayınlar İçin Güncel Durum İncelenmesi

Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili yapılan çalışmaların sayısındaki artış, bu teknolojinin mevcut ve ilerleyen süreçlerdeki potansiyelinin oldukça fazla olduğunu desteklemektedir. Bu bağlamda söz konusu teknolojinin güncel durumunun ortaya konmasının ve yapılan çalışmaların genel eğilimlerinin belirlenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında, katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılmış olan çalışmaların belirlenmesi amacıyla aşağıdaki araştırma sorularına cevap aranmaya çalışılmıştır.

Tarama Sorusu-1: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların bilim kategorilerine göre dağılımı nasıldır?

Tarama Sorusu-2: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı nasıldır?

Tarama Sorusu-3: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı nasıldır?

Tarama Sorusu-4: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı nasıldır?

Tarama Sorusu-5: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı nasıldır?

Tarama Sorusu-6: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı nasıldır?

Tarama Sorusu-7: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların Türkiye'deki durumu nedir?

2.1.1. Literatür inceleme modeli

Katmanlı imalat teknolojilerinin güncel durumunun belirlenmesi amacı ile içerik analizi yöntemi kullanılmıştır. İçerik analizi, belli bir konu üzerine yapılan çalışmaların kodlanarak nicelleştirilmesi/sayısallaştırılması olarak tanımlanabilir. Başka bir tanımlamaya göre içerik analizi, “sözel olmayan dokümanı nicel verilere dönüştürmektir. İçerik analizi; metodolojik araç ve teknikler bütünü, kontrollü yorum yapma, nesnel, sistematik ve nicel yollardan betimleme, önceden belirlenmiş ölçütlere göre inceleme, anlam çıkarma, açık talimatlara göre nicelleştirme işlemi, niteli nicele dönüştüren bir işlem, kavramların ölçülmesi ve belirli bir anlam çıkarılması için kategorilere ayırma” olarak tanımlanmaktadır (Aslan ve Tavşancıl 2001). Bu bağlamda yapılan bu tez çalışması kapsamında, katmanlı imalat teknolojilerinin mevcut durumunu ve konu ile ilgili yapılan çalışmaların genel eğilimlerini belirlemek amacı ile içerik analizi en uygun yöntem olarak değerlendirilmiştir.

2.1.2. Verilerin toplanması ve araştırma sınırlılıkları

Veriler Web of Science veritabanından elde edilmiştir. Web of Science, tüm bilim dünyası tarafından kabul gören ve özellikle fen bilimleri alanındaki araştırmalarda oldukça hassas sonuçlar veren, güvenilir, bilimsel bir veri tabanıdır (Bakkalbasi vd. 2006). Bu yüzden araştırmalar için Web of Science veritabanı seçilmiştir. Yapılan bu çalışmada, veri tabanında araştırma yapmak amacıyla çalışma konusu ile alakalı beş farklı anahtar kelime belirlenmiştir. Bu anahtar kelimeler “katmanlı imalat (additive manufacturing), hızlı imalat (rapid manufacturing), hızlı prototipleme (rapid prototyping), hızlı takım (rapid tooling), 3B yazıcılar (3D printers)” şeklindedir. Aramalar İngilizce dilinde yapılmıştır. Belirlenen anahtar kelimeler kullanılarak yapılan taramalarda aşağıda maddeler halinde belirtilen sınırlılıklar uygulanmıştır.

- Araştırma Web of Science veri tabanı ile sınırlandırılmıştır.
- Araştırma 2014-2018 yılları arasındaki son 5 yıl içinde basılan çalışmalarla sınırlandırılmıştır.
- Araştırmada belirlenen anahtar kelimeler, sadece yapılmış çalışmaların başlıklarında aranacak şekilde sınırlandırılmıştır.
- Araştırmaya genişletilmiş bilim atıf indeksi (SCI-Expanded), konferans bildirileri atıf indeksi (CPCI-S) ve gelişen kaynaklar atıf indeksi (ESCI) türünden çalışmalar dahil edilmiştir.
- Araştırmaya belirtilen veri tabanındaki makale (article), bildiri (proceedings paper) ve literatür taraması-derleme (review) türünden çalışmalar dahil edilmiştir.

2.1.3. Veri inceleme çıktıları

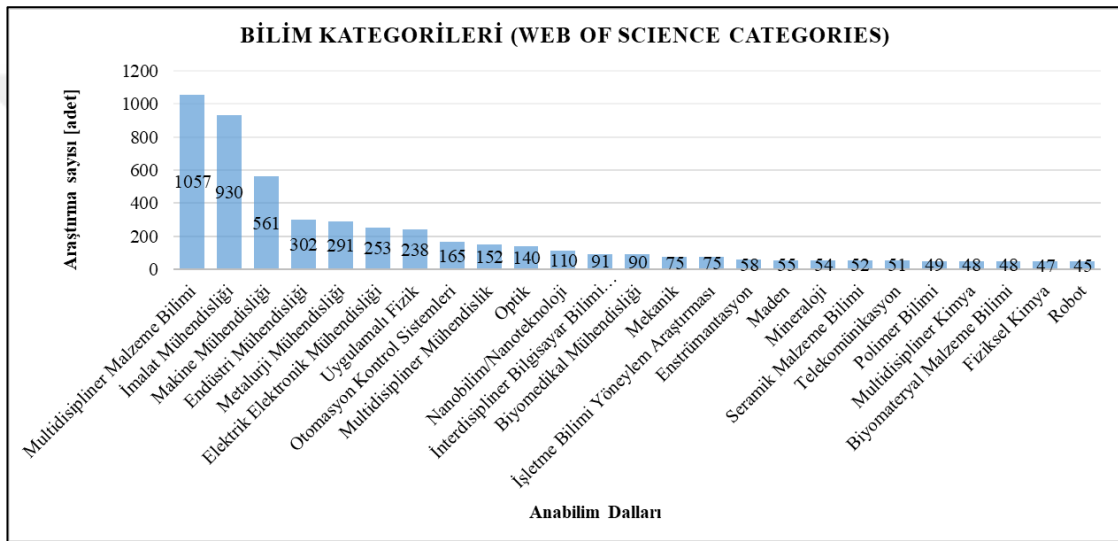
Katmanlı imalat teknolojilerinin güncel durumu ve yapılan çalışmaların genel eğilimlerinin belirlenmesinin amaçlandığı bu bölüm kapsamında, Web of Science veri tabanında, belirtilen kısıtlamalar ve anahtar kelimeler göz önünde bulundurularak 2014-2018 yılları arasında (son 5 yıl) yapılan taramada toplamda 3938 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların belirtilen anahtar kelimelere göre dağılımı Çizelge 2.1’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen bulgular, çalışmanın başında belirtilen araştırma sorularına göre grafikler halinde sunulmuş ve bu sorulara cevap aranmıştır. Ancak bir çalışma birden fazla alanda değerlendirilebildiğinden dolayı grafiklerdeki verilen toplam çalışma sayısı, belirtilen toplam sayıdan farklılık gösterebilmektedir.

Çizelge 2.1. Web of Science veri tabanından elde edilen çalışma sayılarının belirlenen anahtar kelimelere göre dağılımı

Anahtar Kelimeler	Çalışma Sayıları [adet]
Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing)	3114
Hızlı İmalat (Rapid Manufacturing)	44
Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping)	650
Hızlı Takım/Kalıp Üretimi (Rapid Tooling)	36
3B Yazıcılar (3D Printers)	94
Toplam	3938

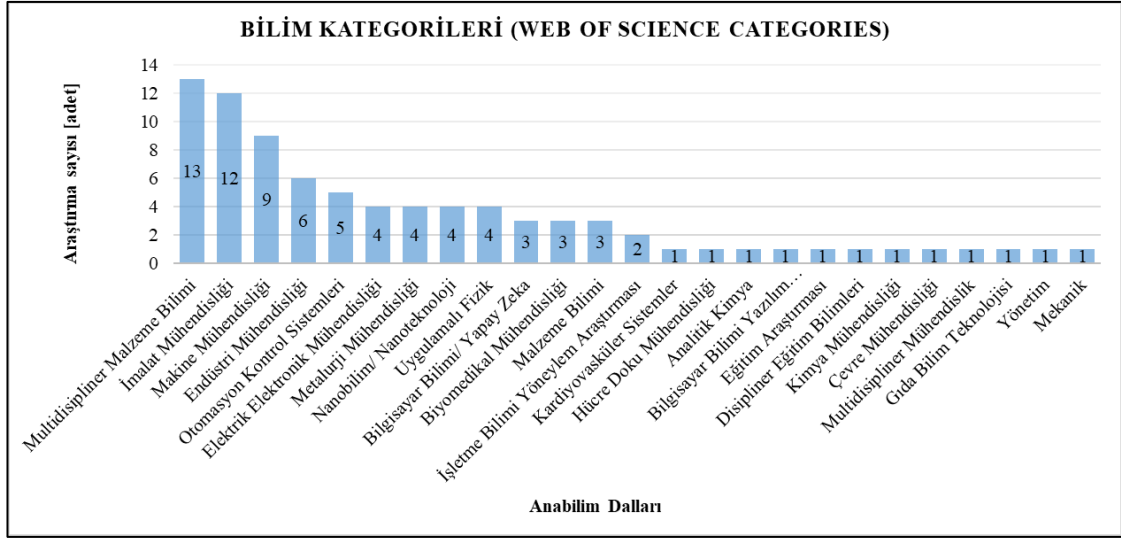
Tarama Sorusu-1: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların bilim kategorilerine göre dağılımı

“Additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 3114 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan anabilim dallarına göre dağılımı Şekil 2.2’de verilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere multidisipliner malzeme bilimi 1057 adet, imalat mühendisliği 930 adet ve makine mühendisliği 561 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



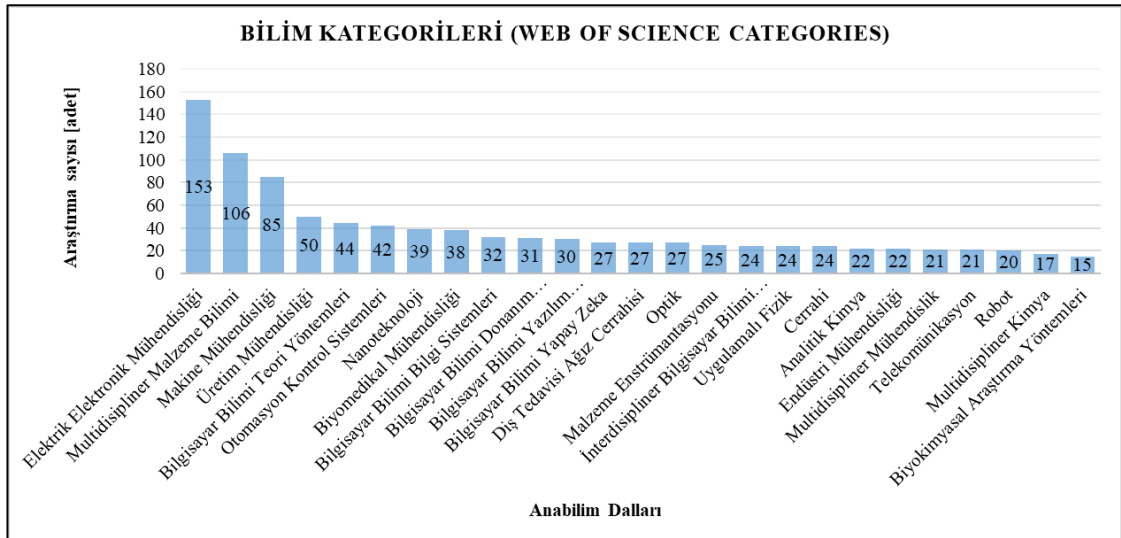
Şekil 2.2. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı

“Rapid manufacturing” (hızlı imalat) anahtar kelimesi kullanılarak yapılan 44 adet çalışmanın anabilim dallarına göre dağılımı Şekil 2.3’te verilmiştir. Bu bağlamda multidisipliner malzeme bilimi 13 adet, imalat mühendisliği 12 adet ve makine mühendisliği 9 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



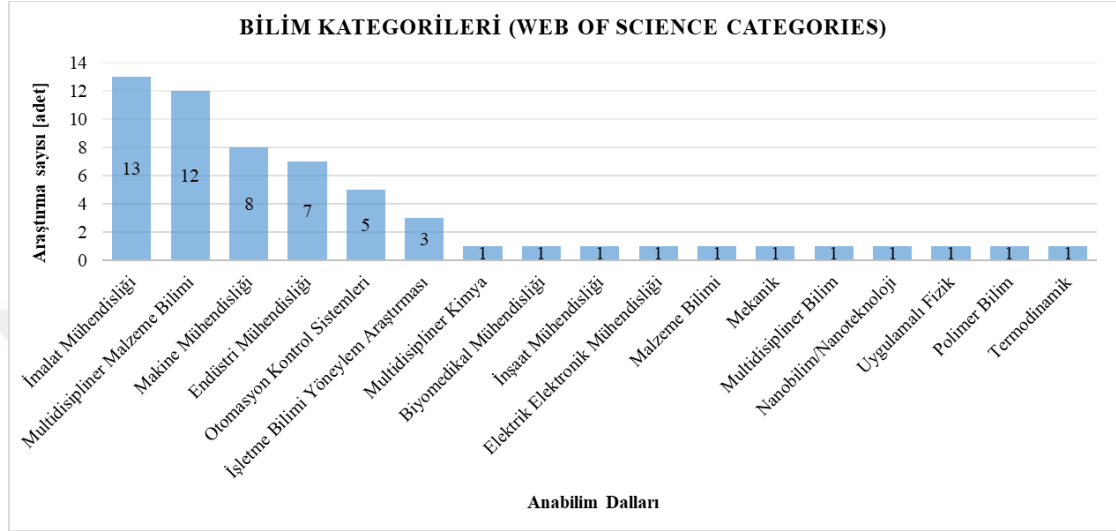
Şekil 2.3. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı

“Rapid Prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi kullanılarak yapılan 650 adet çalışmanın anabilim dallarına göre dağılımı Şekil 2.4’ te verilmiştir. Verilen grafikte gösterildiği üzere, elektrik elektronik mühendisliği 153 adet, multidisipliner malzeme bilimi 106 adet ve makine mühendisliği 85 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



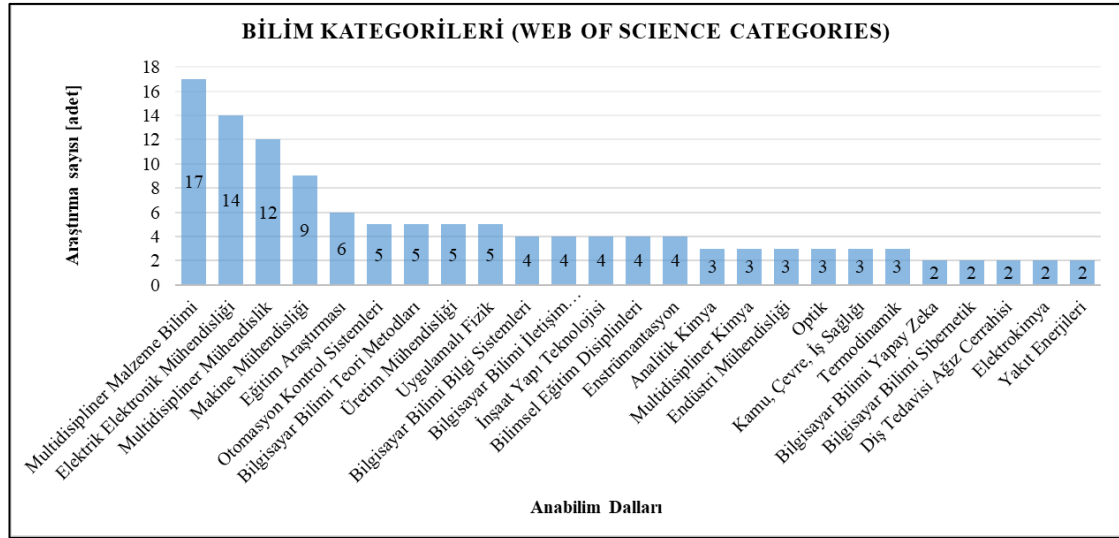
Şekil 2.4. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı

“Rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimesi kullanılarak yapılan 36 adet çalışmanın anabilim dallarına göre dağılımı Şekil 2.5’ te verilmiştir. Verilen grafikte gösterildiği üzere, üretim mühendisliği 13 adet, multidisipliner malzeme bilimi 12 adet ve makine mühendisliği 8 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



Şekil 2.5. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı

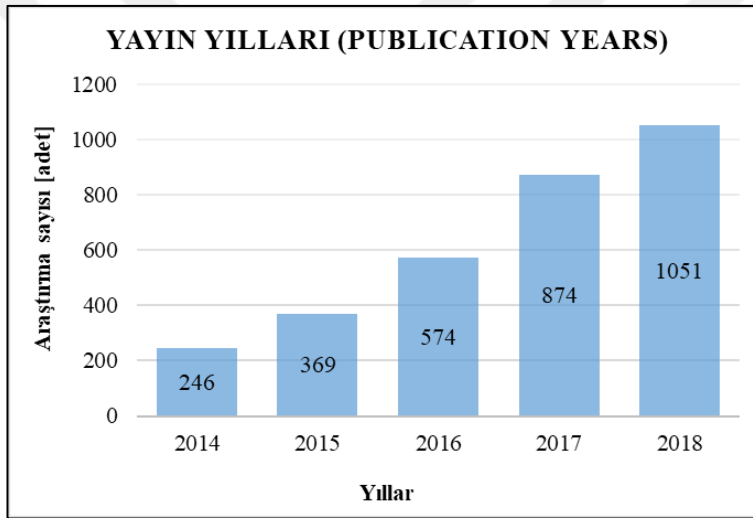
“3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi kullanılarak yapılan 94 adet çalışmanın anabilim dallarına göre dağılımı Şekil 2.6’ da verilmiştir. Verilen grafikte gösterildiği üzere, multidisipliner malzeme bilimi 17 adet, elektrik elektronik mühendisliği 14 adet ve multidisipliner mühendislik 12 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



Şekil 2.6. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı

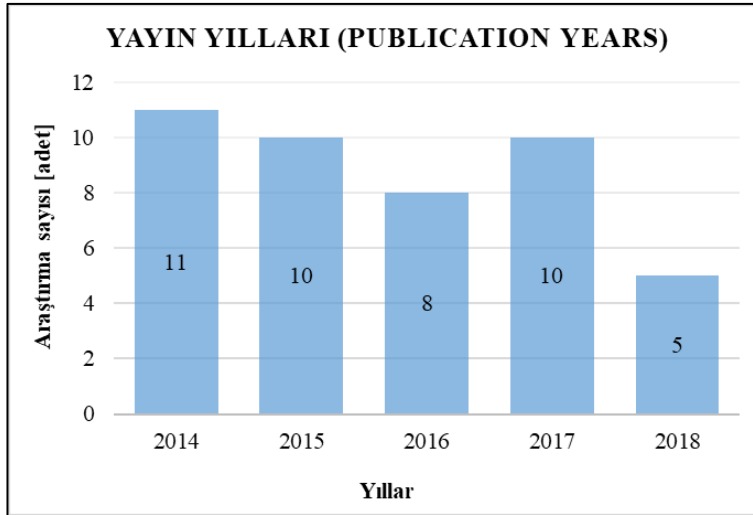
Tarama Sorusu-2: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

“Additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, 2014-2018 yılları arasında toplamda 3114 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, 5 yıllık sürece göre dağılımı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara, 2018 yılında 1051 adet, 2017 yılında 874 adet, 2016 yılında 574 adet, 2015 yılında 369 adet ve 2014 yılında 246 adet çalışmaya rastlanılmıştır. Grafikten anlaşılabacağı üzere “additive manufacturing” anahtar kelimesi kullanılarak yapılan çalışmalarda yıllar bazında giderek artan bir eğilim gözlemlenmiştir.



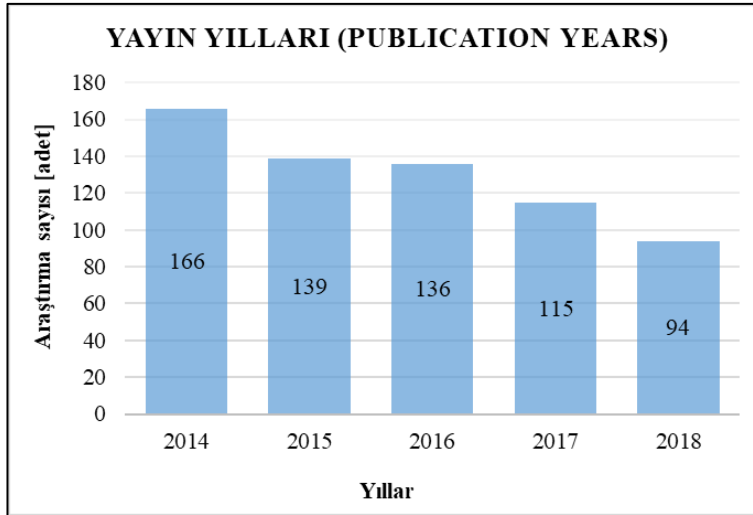
Şekil 2.7. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

“Rapid manufacturing” (hızlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, 2014-2018 yılları arasında toplamda 44 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, 5 yıllık sürece göre dağılımı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre, 2018 yılında 5 adet, 2017 yılında 10 adet, 2016 yılında 8 adet, 2015 yılında 10 adet ve 2014 yılında 11 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



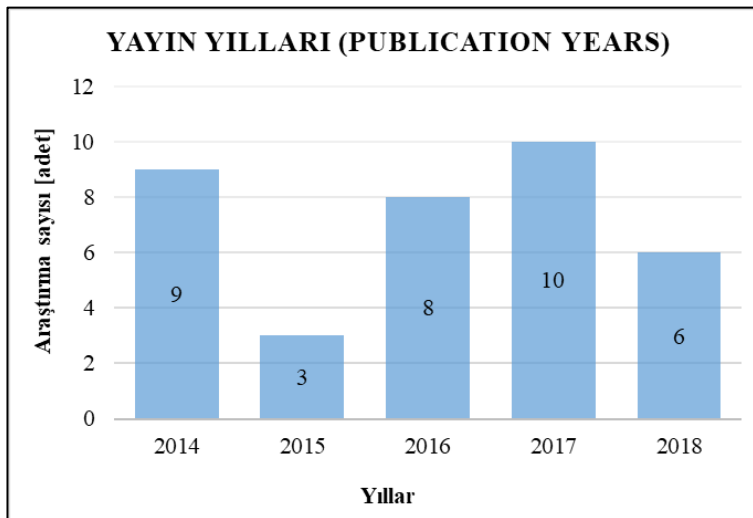
Şekil 2.8. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

“Rapid prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, 2014-2018 yılları arasında toplamda 650 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, 5 yıllık sürece göre dağılımı Şekil 2.9’ da gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 2018 yılında 94 adet, 2017 yılında 115 adet, 2016 yılında 136 adet, 2015 yılında 139 adet ve 2014 yılında 166 adet çalışmaya rastlanılmıştır. Rapid prototyping ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, additive manufacturing anahtar kelimesi ile ilgili yapılan çalışmaların tam aksine, giderek azalan bir eğilim gözlemlenmiştir.



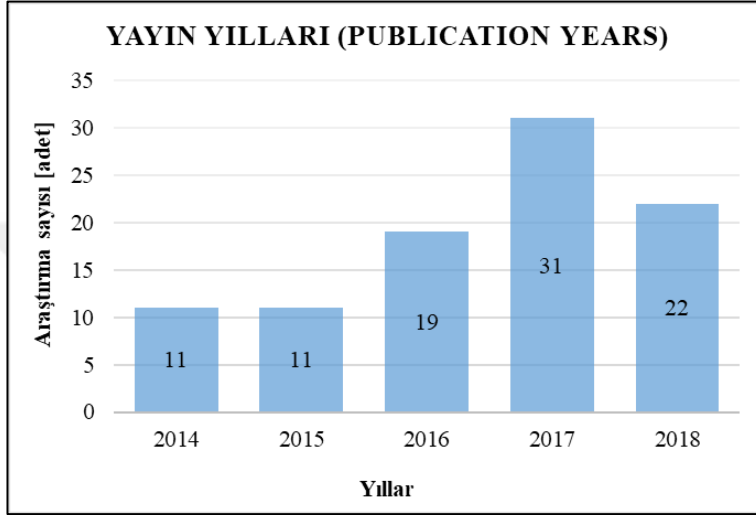
Şekil 2.9. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

“Rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, 2014-2018 yılları arasında toplamda 36 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, 5 yıllık sürece göre dağılımı Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 2018 yılında 6 adet, 2017 yılında 10 adet, 2016 yılında 8 adet, 2015 yılında 3 adet ve 2014 yılında 9 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



Şekil 2.10. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

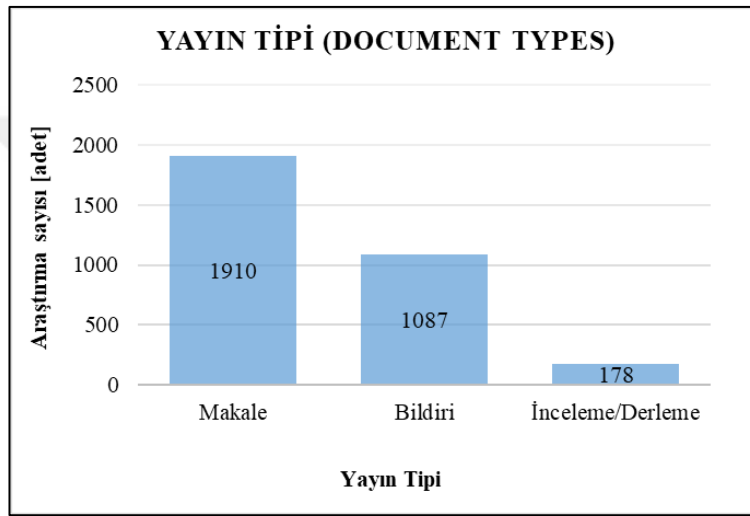
“3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, 2014-2018 yılları arasında toplamda 94 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, 5 yıllık sürece göre dağılımı Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 2018 yılında 22 adet, 2017 yılında 31 adet, 2016 yılında 19 adet, 2015 ve 2014 yıllarında ise 11 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



Şekil 2.11. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

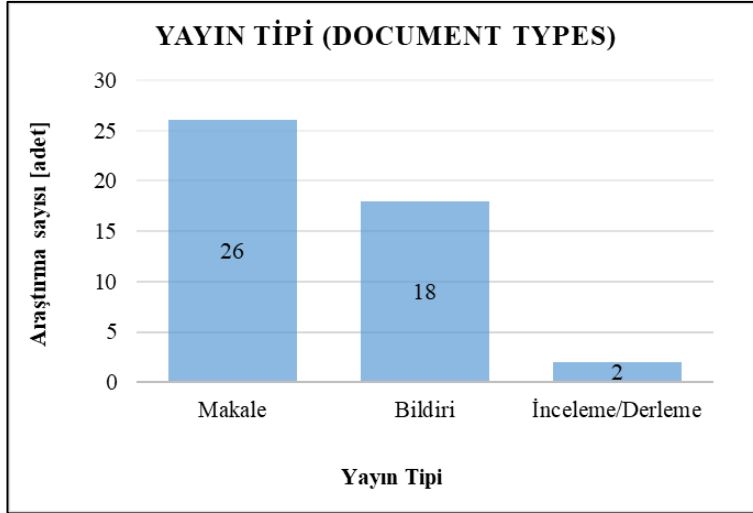
Tarama Sorusu-3: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı

“Additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 3114 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, yayın tipine göre dağılımları Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Elde edilen bulgularda, makale türünden 1914 adet, bildiri türünden 1087 adet ve inceleme/derleme türünden 178 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



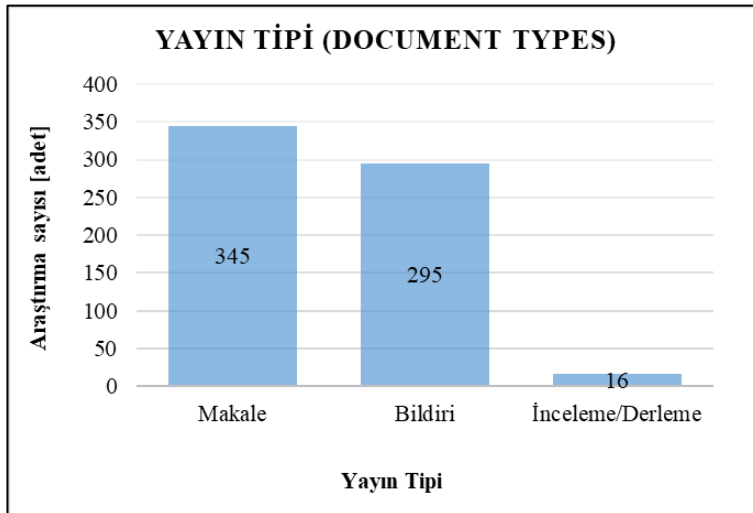
Şekil 2.12. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı

“Rapid manufacturing” (hızlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 44 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, yayın tipine göre dağılımları Şekil 2.13’te gösterilmiştir. Elde edilen bulgularda, makale türünden 26 adet, bildiri türünden 18 adet ve inceleme/derleme türünden 2 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



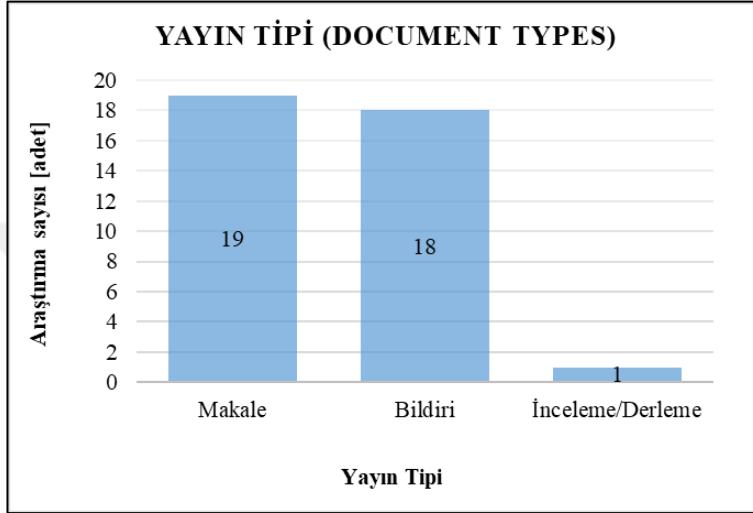
Şekil 2.13. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı

“Rapid prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 650 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, yayın tipine göre dağılımları Şekil 2.14’ te gösterilmiştir. Elde edilen bulgularda, makale türünden 345 adet, bildiri türünden 295 adet ve inceleme/derleme türünden 16 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



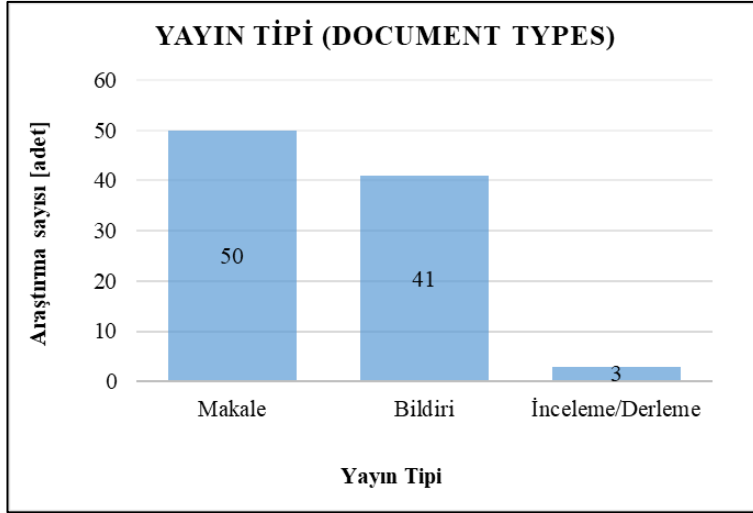
Şekil 2.14. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı

“Rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 36 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, yayın tipine göre dağılımları Şekil 2.15’ te gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara, makale türünden 19 adet, bildiri türünden 18 adet ve inceleme/derleme türünden 1 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



Şekil 2.15. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı

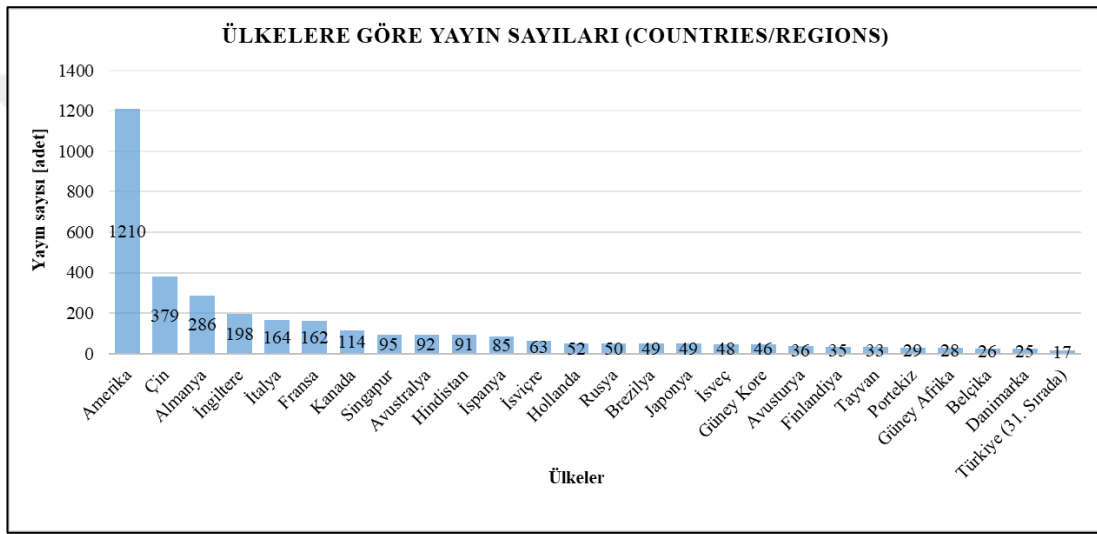
“3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 94 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, yayın tipine göre dağılımları Şekil 2.16’ da gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara, makale türünden 50 adet, bildiri türünden 41 adet ve inceleme/derleme türünden 3 adet çalışmaya rastlanılmıştır.



Şekil 2.16. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayın tiplerine göre dağılımı

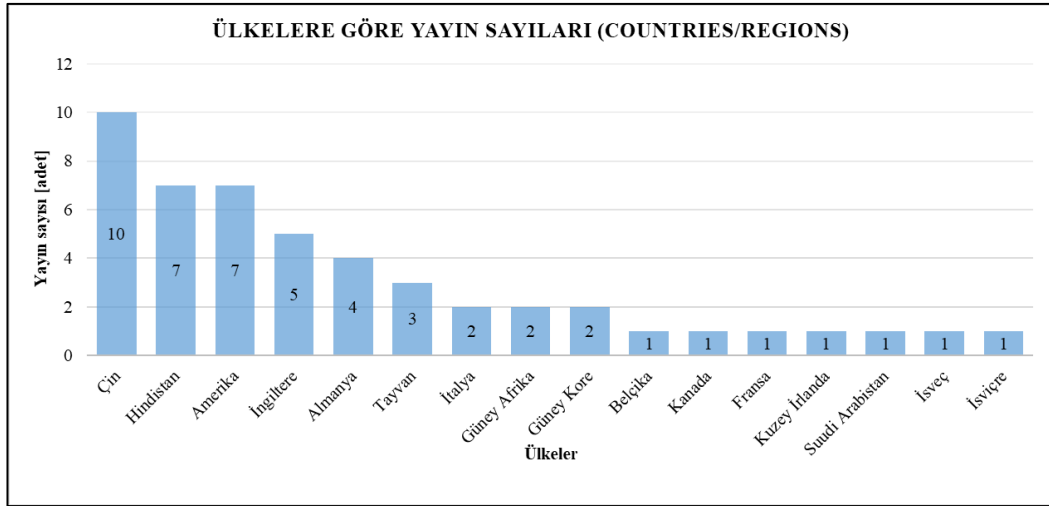
Tarama Sorusu-4: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı

“Additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 3114 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan ülkeler bazında dağılımı Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Amerika 1210 adet, Çin 379 adet ve Almanya 286 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır. Elde edilen verilere göre Türkiye, 17 adet çalışma ile 31. sırada bulunmaktadır.



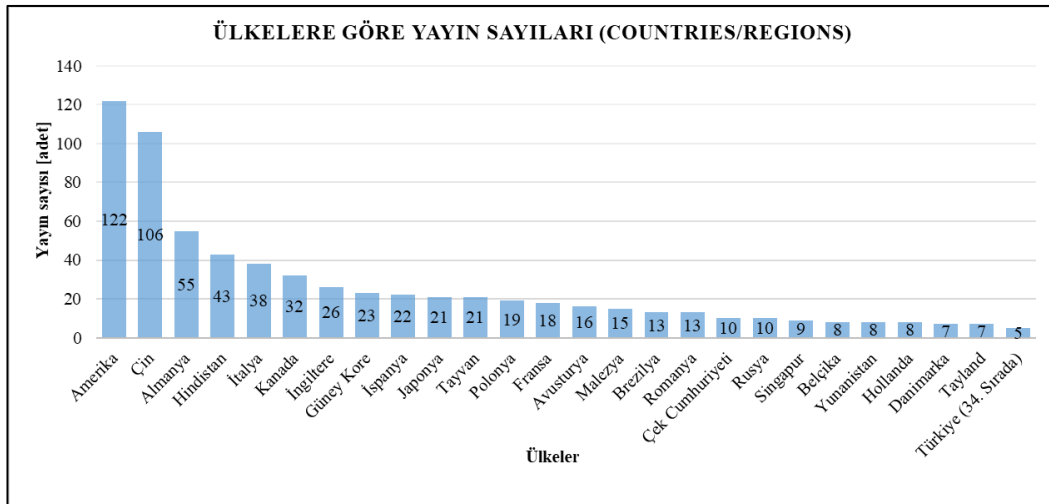
Şekil 2.17. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı

“Rapid manufacturing” (hızlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 44 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ülkeler bazında dağılımı Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Çin 10 adet, Hindistan ve Amerika ise 7 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



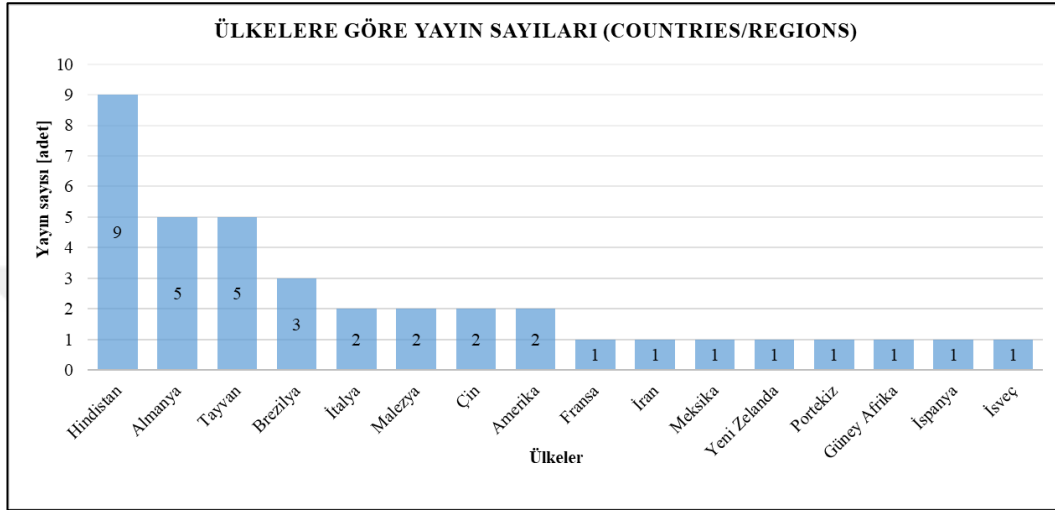
Şekil 2.18. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı

“Rapid prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 650 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan ülkeler bazında dağılımı Şekil 2.19’da gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Amerika 122 adet, Çin 106 adet ve Almanya 55 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır. Ayrıca Türkiye, 5 adet çalışma ile 34. Sırada bulunmaktadır.



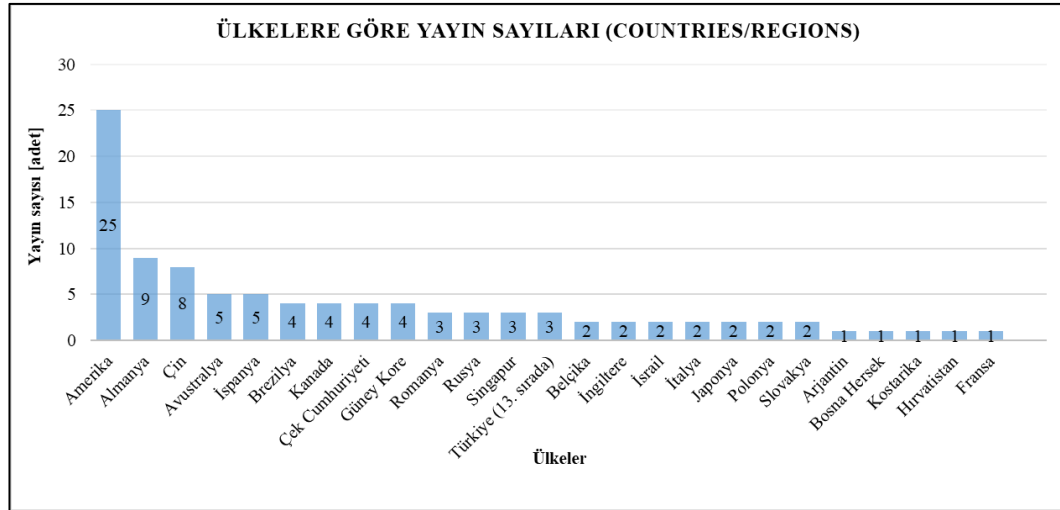
Şekil 2.19. “Rapid Prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı

“Rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 36 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların ülkeler bazında dağılımı Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Hindistan 9 adet, Almanya ve Tayvan 5 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



Şekil 2.20. “Rapid Tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı

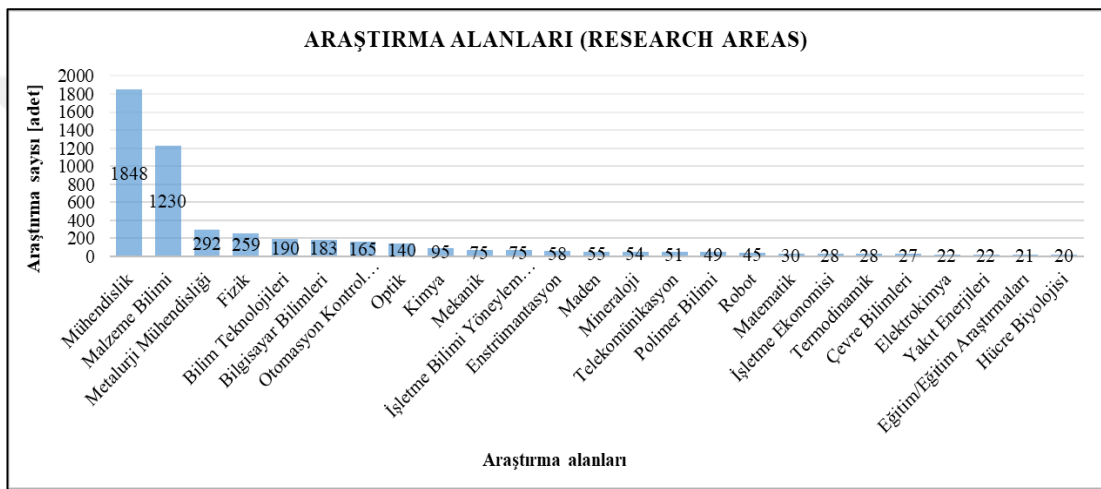
“3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 94 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan ülkeler bazında dağılımı Şekil 2.21’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Amerika 25 adet, Almanya 9 adet ve Çin 8 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır. Ayrıca Türkiye, 3 adet çalışma ile 13. Sırada bulunmaktadır.



Şekil 2.21. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınlandığı ülkelere göre dağılımı

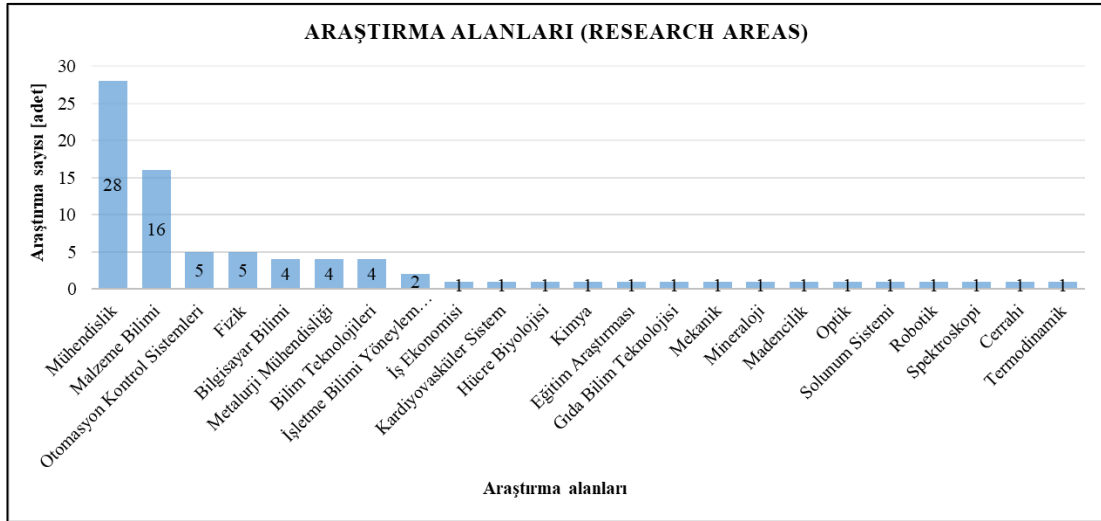
Tarama Sorusu-5: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı

“Additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 3114 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan araştırma alanlarına göre dağılımları Şekil 2.22’ de gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara, mühendislik 1848 adet, malzeme bilimi 1230 adet ve metalürji mühendisliği 292 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



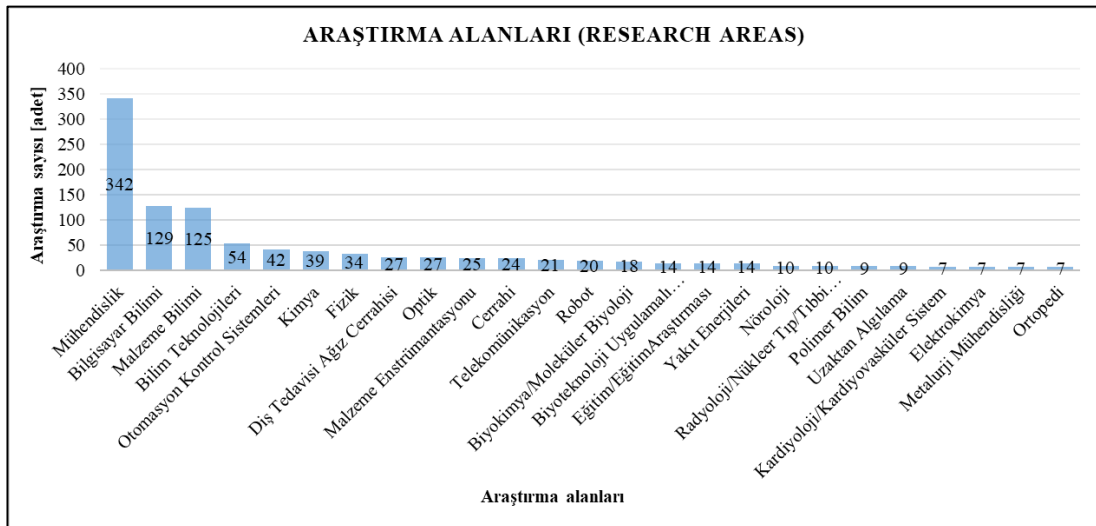
Şekil 2.22. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı

“Rapid manufacturing” (hızlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 44 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, araştırma alanlarına göre dağılımları Şekil 2.23’ te gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara, mühendislik 28 adet, malzeme bilimi 16 adet ve otomasyon kontrol sistemleri 5 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



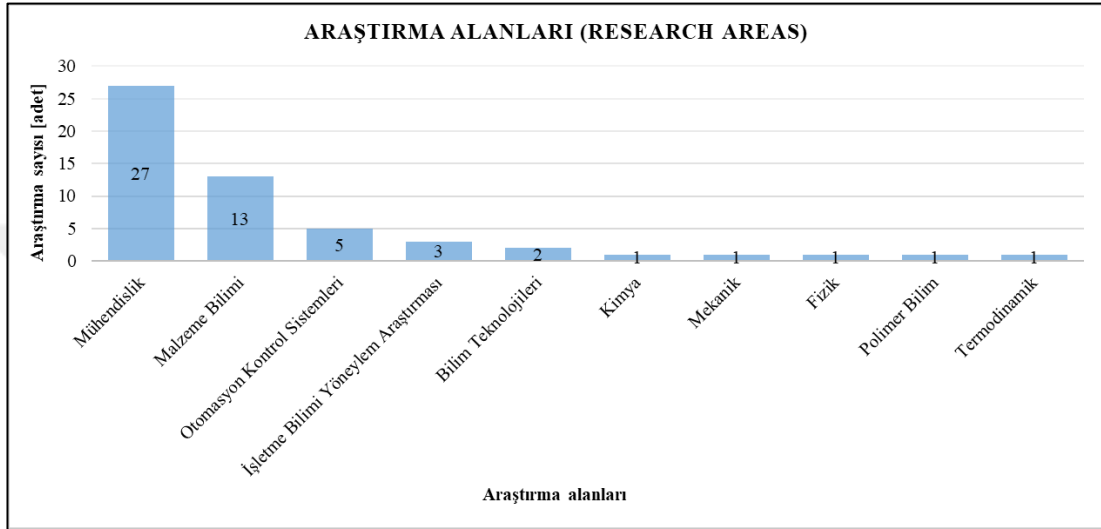
Şekil 2.23. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı

“Rapid prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 650 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan araştırma alanlarına göre dağılımları Şekil 2.24’te gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara, mühendislik 342 adet, bilgisayar bilimi 129 adet ve malzeme bilimi 125 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



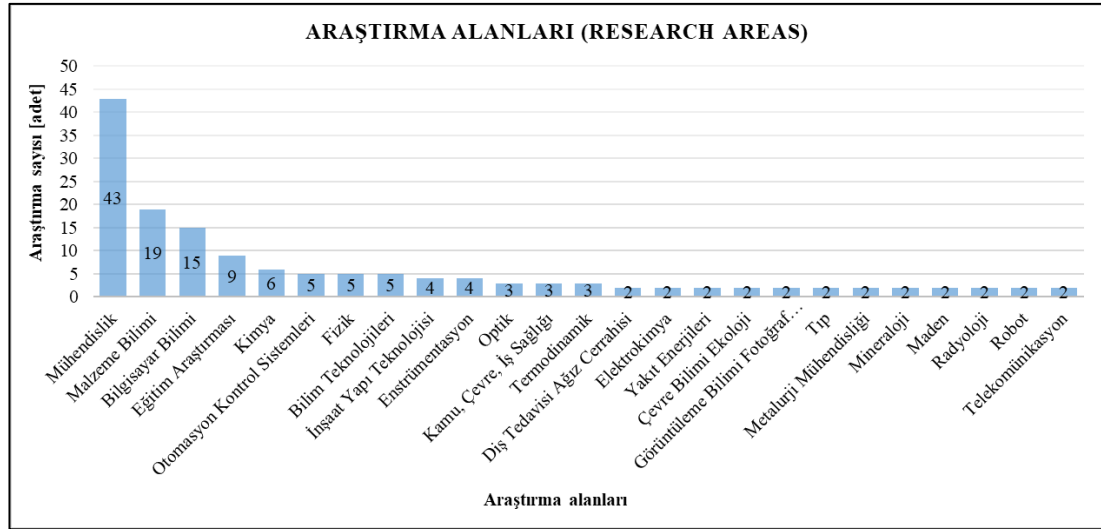
Şekil 2.24. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı

“Rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 36 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, araştırma alanlarına göre dağılımları Şekil 2.25’ te gösterilmiştir. Elde edilen bulgularda, mühendislik 27 adet, malzeme bilimi 13 adet ve otomasyon kontrol sistemleri 5 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



Şekil 2.25. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı

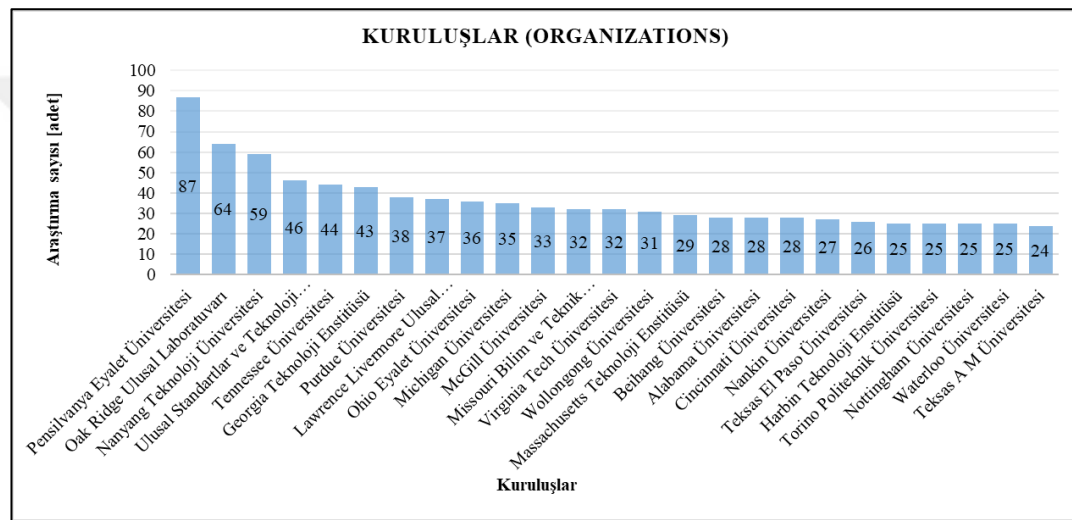
“3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, toplamda 94 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan araştırma alanlarına göre dağılımları Şekil 2.26’ da gösterilmiştir. Elde edilen bulgularda, mühendislik 43 adet, malzeme bilimi 19 adet ve bilgisayar bilimi 15 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



Şekil 2.26. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı

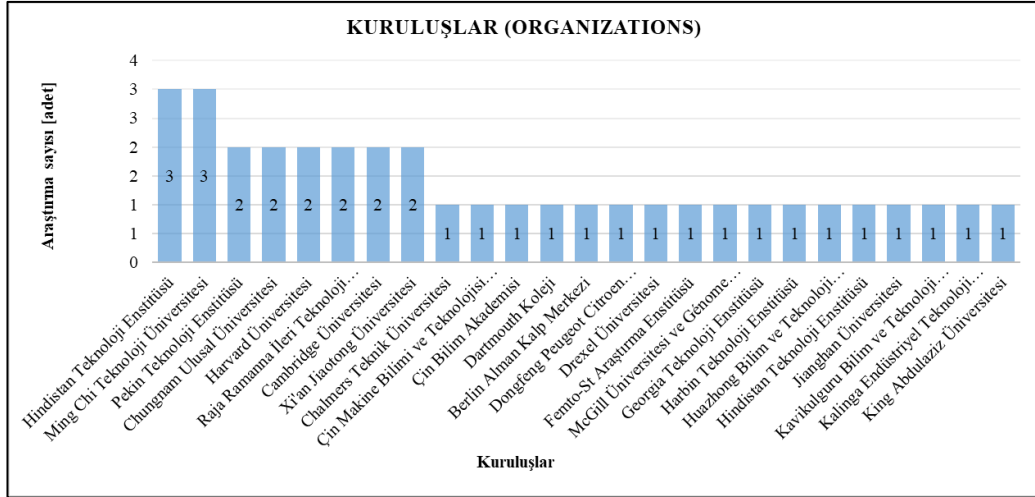
Tarama Sorusu-6: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı

“Additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 3114 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Pensilvanya Eyalet Üniversitesi 87 adet, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı 64 adet ve Nanyang Teknoloji Üniversitesi 59 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



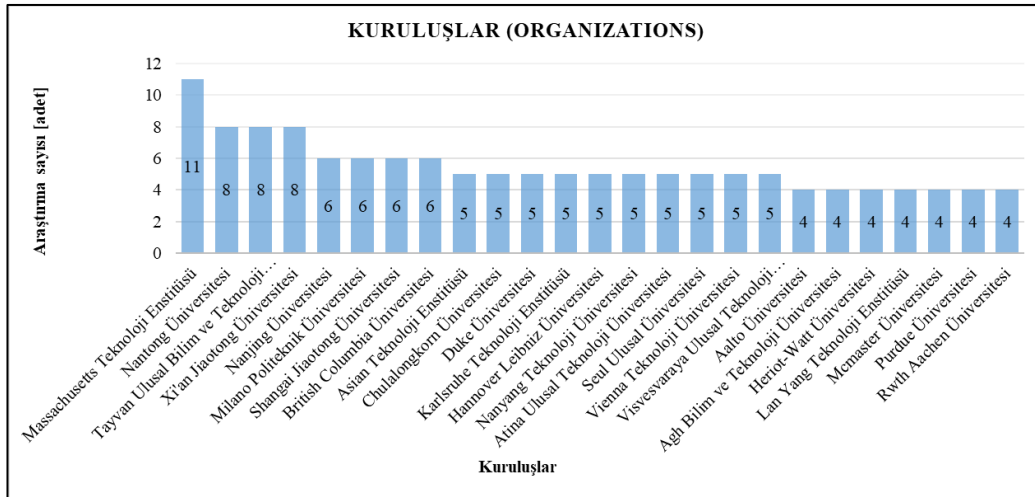
Şekil 2.27. “Additive manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı

“Rapid manufacturing” (hızlı imalat) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 44 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı Şekil 2.28’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Hindistan Teknoloji Enstitüsü ve Ming Chi Teknoloji Üniversitesi 3 adet ve Pekin Teknoloji Enstitüsü 2 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



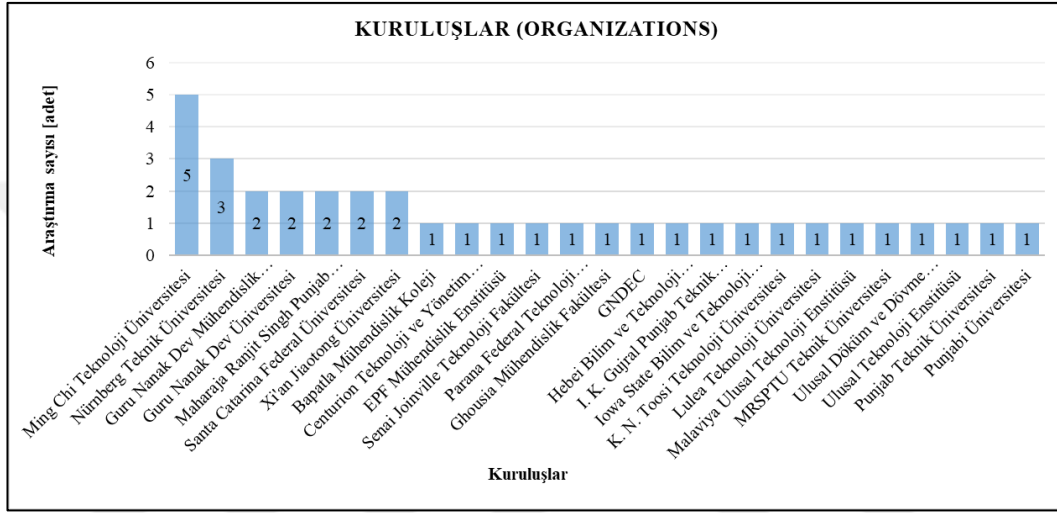
Şekil 2.28. “Rapid manufacturing” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı

“Rapid prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 650 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı Şekil 2.29’da gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Massachusetts Teknoloji Enstitüsü 11 adet, Nantong Üniversitesi ve Tayvan Ulusal Bilim ve Teknoloji Üniversitesi 8 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



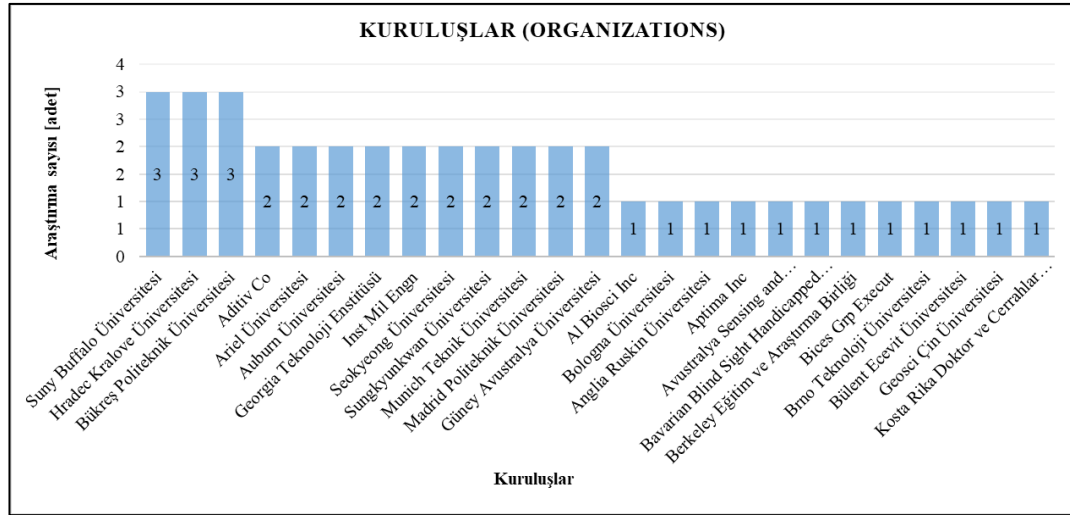
Şekil 2.29. “Rapid prototyping” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı

“Rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 36 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı Şekil 2.30’da gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Ming Chi Teknoloji Üniversitesi 5 adet, Nürnberg Teknik Üniversitesi 3 adet ve Gru Nadak Dev Mühendislik Fakültesi 2 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır.



Şekil 2.30. “Rapid tooling” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı

“3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi ile belirtilen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada toplamda 94 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu kapsamda söz konusu anahtar kelime kullanılarak yapılan çalışmaların, ilk 25 sırada bulunan yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı Şekil 2.31’de gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere Suny Buffalo Üniversitesi, Hradec Kralove Üniversitesi ve Bükreş Politeknik Üniversitesi üçer adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır. Ayrıca Türkiye’de Zonguldak ilinde bulunan Bülent Ecevit Üniversitesi, 1 adet çalışma ile 24. sıradadır.



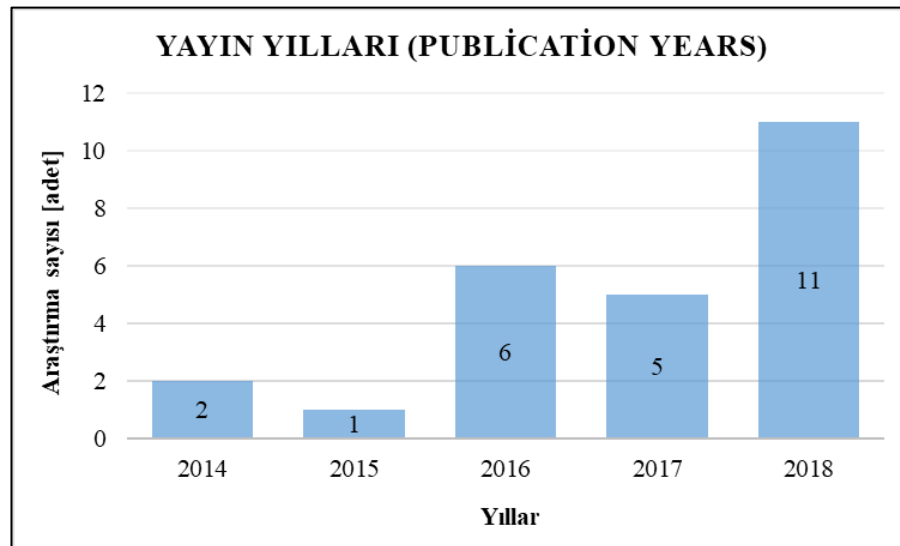
Şekil 2.31. “3D printers” anahtar kelimesi ile yapılan çalışmaların yayınların yapıldığı kuruluşlara göre dağılımı

Tarama Sorusu-7: Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik yapılan çalışmaların Türkiye’deki durumu

Çalışma kapsamında, belirlenen anahtar kelimeler ve uygulanan kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılan taramada, 2014-2018 yılları arasında Türkiye’de toplam 25 adet bilimsel nitelikli çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların anahtar kelimelere göre sayısı Çizelge 2.2’ de, 5 yıllık sürece göre dağılımı grafiği ise Şekil 2.32’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Türkiye ölçeğinde, belirlenen anahtar kelimeler ile 2014-2018 yılları arasında yapılan çalışma sayıları

Anahtar Kelimeler	Çalışma Sayıları [adet]
Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing)	17
Hızlı İmalat (Rapid Manufacturing)	0
Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping)	5
Hızlı Takım/Kalıp Üretimi (Rapid Tooling)	0
3B Yazıcılar (3D Printers)	3
Toplam	25

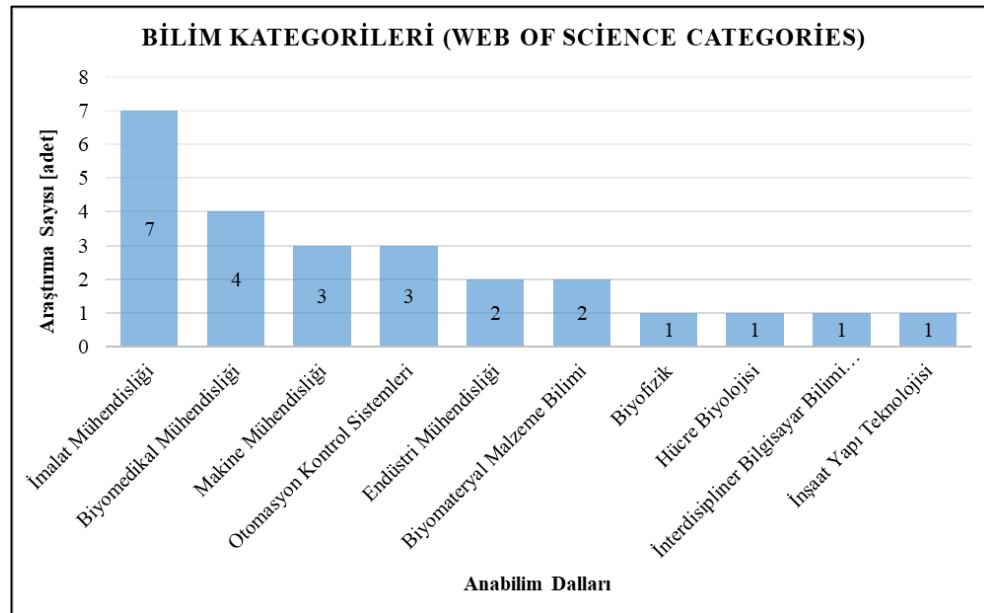


Şekil 2.32. Türkiye ölçeğinde, belirlenen anahtar kelimeler ile yapılan çalışma sayılarının yıllara göre dağılımı (2014-2018)

Elde edilen bulgulara göre 2014-2018 yılları arasında Türkiye’de “additive manufacturing” (katmanlı imalat) anahtar kelimesi ile yapılan taramada 17 adet, “rapid prototyping” (hızlı prototipleme) anahtar kelimesi ile yapılan taramada 5 adet ve “3D printers” (3B yazıcılar) anahtar kelimesi ile yapılan taramada 3 adet çalışmaya rastlanmıştır. Buna ek olarak “rapid manufacturing” (hızlı imalat) ve “rapid tooling” (hızlı takım) anahtar kelimeleri ile yapılan hiçbir çalışmaya rastlanılamamıştır.

Katmanlı imalat teknolojilerinin ülkemizdeki durumu incelendiğinde, özellikle 2018 yılında yapılan çalışmaların, diğer yıllara kıyasla artış gösterdiği görülmektedir. Ancak bu alanda çok sayıda çalışmaların yapıldığı Amerika, Çin, Almanya gibi ülkelere göre ülkemizde yeterli sayıda çalışma yapılmadığı gözlemlenmiştir. Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili yapılan 3938 adet çalışmadan 25 tanesi ülkemizde yapılmıştır. Bu da yaklaşık %0.63’lük bir orana karşılık gelmekte ve katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili araştırmaların sayısının artması gerekliliği görülmektedir.

Ayrıca katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili Türkiye ölçeğinde yapılan çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı Şekil 2.33’te verilmiştir. Grafikte gösterildiği gibi imalat mühendisliği 7 adet, biyomedikal mühendisliği 4 adet ve makine mühendisliği 3 adet çalışma ile ilk üç sırada yer almaktadır. Elde edilen bulgular incelendiğinde, tez çalışmasının yapıldığı tarım makineleri özeli ile alakalı hiçbir çalışmaya rastlanılamamış ve elde edilen sonuçlar bu konu üzerine odaklanılmasının gerektiğini açık bir şekilde ifade etmektedir.



Şekil 2.33. Türkiye ölçeğinde, yapılan toplam çalışmaların anabilim dallarına göre dağılımı (2014-2018)

Google Akademik Veri Tabanı Taraması

Web of Science veritabanı kullanılarak yapılan çalışmaya ek olarak katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili, çeşitli bilim alanlarında geniş sayıda veri tabanlarını tarayabilme başarısı nedeniyle Google Akademik veri tabanından 2015-2019 yılları arasında yapılan taramalardan seçilen 150 adet bilimsel nitelikteki çalışma ile ilgili bazı detaylar Çizelge 2.3’ te sunulmuştur. Sunulan çizelgede çalışma ile ilgili yayın yılı, araştırmacılar, araştırma alanı, araştırma konusundaki katmanlı imalat yöntemi, araştırma konusunda kullanılan malzeme ve özet bir şekilde araştırma içeriği yer almaktadır. Yapılan bu çalışmanın amacı, ön bilgilendirme amacıyla rastgele seçilmiş olan uluslararası bilimsel çalışmalar hakkında fikir yürütülmesine yardımcı olmak ve sonraki süreçte konu ile ilgili araştırmacılara en güncel özet kaynak bilgilerinin verilerek yapılacak olan araştırmalar için kolaylık sağlamaktır.



Çizelge 2.3. 2015-2019 yılları arasında katmanlı imalat teknolojileri üzerine yapılan bilimsel nitelikli çalışmalar

Yıl	Araştırmacılar	Araştırma Alanı	Araştırma Konusu Katmanlı İmalat Yöntemi	Araştırma Konusu Malzemesi	Araştırma İçeriği
2019	Alabort vd.	Tıp	* Selective laser melting (SLM)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Katmanlı imalat teknolojileri ile metalik malzemeden gözenekli yapıda kemik üretimi ve üretilen kemiğin mekanik test sonuçlarının sunulması
2019	Najmon vd.	Havacılık	* Powder bed fusion (PBF) * Directed energy deposition (DED) * Vat photopolymerization * Material Jetting * Material extrusion	Metal - Plastik	* Havacılık endüstrisi için katmanlı imalat teknolojileri uygulamalarının incelenmesi Katmanlı imalat teknolojilerinin havacılık endüstrisine faydaları ve üretim yöntemlerinin incelenmesi
2019	Narra vd.	Tıp	* Electron beam melting (EBM) * Powder bed fusion (PBF)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Katmanlı imalat teknolojileri genel inceleme * Katmanlı imalat teknolojileri ile eklem artroplasti üretimi ve tedavisi hakkında güncel literatür derlemesi ve konu ile ilgili mevcut zorlukların incelenmesi
2019	Roschili vd.	Genel	* BAAM (Büyük ölçekli katmanlı imalat teknolojisi)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* Büyük ölçekli ürünler üretmek için kullanılan katmanlı imalat sisteminin (BAAM) üretim parametreleri ve detaylarının sunulması
2019	Mihalko	Tıp	* Selective laser melting (SLM) * Selective laser sintering (SLS) * Direct metal laser sintering (DMLS) * Electron beam melting (EBM)	Metal	* Artroplasti implantların katmanlı imalat teknolojileri ile üretimi hakkında inceleme * Mevcut teknolojilerin gelecekteki durumu hakkında öngörülerin sunulması

Çizelge 2.3'ün devamı

2019	Li vd.	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelerin ve malzeme yönünden en güncel gelişmelerin incelenmesi
2019	Manmadhachary vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat teknolojilerinin tıp alanındaki cerrahi planlama, implantlar, hastaya özgü tasarım gibi avantajlarının sunulması
2019	Garner vd.	Tıp	* Selective laser melting (SLM)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Biyomedikal alanında kullanılan gözenekli yapıdaki implantın SLM tekniği ile üretilmesi, incelenmesi ve uygunluğunun sunulması
2019	Kumar vd.	Genel	* Wire arc additive manufacturing (WAAM)	Metal	* WAAM tekniği ile yapılan üretimin ve güncel gelişmelerin incelenmesi
2019	Berdine vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Ortopedik cerrahide katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımının ekonomik yönden incelenmesi
2019	Avinash vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat teknolojilerine ait en güncel gelişmelerin sunulması ve Hindistan'da katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı üzerine bilgilerin verilmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2019	Kumar ve Kumaraguru	Genel	* Powder bed fusion (PBF) * Directed energy deposition (DED)	Metal	* Metal üretim yapan katmanlı imalat teknolojileri ile üretim sırasında, üründe yaşanan problemlerin ve çözüm yollarının sunulması
2019	Walker vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM) * Photopolymerization	Plastik	* Katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak yumuşak-esnek malzeme üretimi hakkında gelişmelerin incelenmesi * Yumuşak-esnek malzeme kullanılarak robotik bir ürünün üretilmesi ve söz konusu çalışmanın gelecekteki durumunun öngörülmesi
2019	Yang vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile damar iskelelerinin yapısal özelliklerine göre üretilen stentlerin incelenmesi ve gelecekteki beklentilerin sunulması
2019	Korinko vd.	Genel	* Powder bed fusion (PBF)	Metal	* PBF tekniği kullanılarak bir boru (deney tüpü) üretilmesi ve üretilen ürüne tahribatlı ve tahribatsız muayeneler yapılarak uygunluğunun belirtilmesi
2018	Subramanyam vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Geleneksel imalat yöntemlerinin katmanlı imalat teknolojileri ile üretim hızı, maliyet, üretilebilirlik gibi etkenlerinin kıyaslanması, incelenmesi ve sunulması

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Rubenchik vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM)	Metal	* SLM tekniği ile üretim yapan bir katmanlı imalat teknolojisinin farklı malzemeler ve makineler arasındaki optimum işlem parametrelerinin sunulması
2018	Liu ve Shin	Malzeme	* Selective laser melting (SLM) * Directed energy deposition (DED) * Electron beam melting (EBM)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan titanyum alaşım malzemesi ile ilgili gelişmelerin incelenmesi * Farklı katmanlı imalat teknikleri ile üretilen titanyum alaşımı ürünlerin mekanik özelliklerinin sunulması * Üretilen titanyum alaşımı ürünlerdeki üretim kusurlarının mekanik performanslara etkilerinin incelenmesi
2018	İnamura vd.	Genel	* G3DP2 glass printer	Cam	* Eritilmiş cam malzeme ile üretim yapan bir katmanlı imalat cihazının tanıtımı, uygulaması ve mekanik özelliklerinin sunulması
2018	Murat vd.	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Titanyum alaşımının katmanlı imalat teknolojilerinde kullanımı ile ilgili literatür incelemesi * Titanyum alaşımı ile üretilen ürünlerin kullanım alanları
2018	Prakash vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Mevcut katmanlı imalat teknolojilerinin ana süreçlerinin, malzemelerinin ve uygulamalarının incelenmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Niaki ve Nonino	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Kullanım alanına yönelik olarak katmanlı imalat yöntemi seçiminin sunulması * Katmanlı imalat teknolojilerinin gelecekteki durumunun ve olası kullanıcılarının öngörülmesi
2018	Miar vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Tıp alanına özgü kemik, kırık, tendon ve ligamentlerin farklı katmanlı teknolojileri ile üretimlerinin incelenmesi
2018	Serin vd.	Genel	* Selective laser sintering (SLS) * Selective laser melting (SLM) * Electron beam melting (EBM)	Metal - Seramik	* Katmanlı imalat teknolojileri hakkında genel inceleme * SLS, SLM ve EBM teknikleri detaylı inceleme
2018	Aslan ve Yıldız	Otomotiv	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Örnek bir ürün için katmanlı imalata uygun topoloji ve yapısal optimizasyon yöntemi uygulanarak ağırlık azaltma uygulaması yapmak. * Elde edilen ürünün sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri ve sonuçları.
2018	Zhang vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* ASTM F42 tarafından sınıflandırılan katmanlı imalat teknolojileri üretim işlemlerinin incelenmesi * Polimer, metalik ve seramik malzemeler için katmanlı imalat tekniklerinin gelişiminin incelenmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Roberts ve Bourell	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin tarihinin ve ortaya çıkış amacının incelenmesi * Geçmişten bugüne icat edilen katmanlı üretim teknolojilerinin tanımları ve incelenmesi
2018	Vovrosh vd.	Genel	* Laser powder bed fusion (L-PBF)	Metal Titanyum alaşımı	* Katmanlı imalat tekniğinin kuantum teknolojilerinde kullanımının incelenmesi * PBF tekniği kullanılarak manyetik ekranlama ve vakum odası üretimi ve üretilen ürünlerin değerlendirilmesi
2018	Limido vd.	Askeri	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Metal 17-4PH (Paslanmaz çelik)	* Katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak 17-4PH metalden üretilen delici savaş başlıklarının incelenmesi ve deneysel yöntemlerle test edilmesi
2018	Kartal vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik PLA (Polilaktik asit)	* FDM tekniği ile üretilen ürünlerdeki dolgu tipi, katman kalınlığı, dolum yoğunluğu gibi etkenlerinin üretim süresi üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi
2018	Gusarov vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM)	Metal CoCrMo (Kobalt alaşımı)	* SLM tekniği ile CoCrMo metal alaşımı ürünlerin üretilmesi ve mekanik özellikleri hakkında inceleme

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Tantari vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak akustik ve titreşimi absorbe edebilen mikro delikli susturucuların geliştirilmesi ve üretilmesi * Geliştirilen susturucuların sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri ve analiz sonuçlarının üretilen susturucuların deneysel sonuçlarıyla kıyaslanması
2018	Bozdemir	Askeri	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* Ergonomik bir silah kabzası tasarımı ve FDM tekniği kullanılarak üretilmesi
2018	Debroy ve Zuback	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Metal	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen metal elemanların mikroyapısı, işlem sonrası ısı işlem, alaşım bileşimi gibi etkenlerin ürünün sertliği üzerindeki rolünün incelenmesi
2018	Öz vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* FDM tekniği kullanılarak üretilen plastik bazı parçalardaki doluluk oranının çekme hasar yüküne olan etkilerinin deneysel olarak incelenmesi
2018	Amara vd.	Genel	* Laser metal deposition (LMD)	Metal	* Lazer tabanlı katmanlı imalat teknolojileri ile metal ürünleri üretmek için gerekli ve faydalı parametreleri öngörmeye yardımcı bilgilerin sunulması * Elde edilen metal ürünlerin simülasyon bazı sonuçlarının sunulması

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Narkevich vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin farmasötikler için kullanımı ve son 10 yılda katmanlı imalat yöntemleri kullanılarak hazırlanan çeşitli ilaç dozaj formlarının incelenmesi
2018	Allaire ve Bogosel	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen ürünlerin üretim esnasında destek yapı ihtiyacının incelenmesi * Destek yapılarının iki farklı fiziksel özellik açısından optimize edilmesi
2018	Ballardini	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojisinin fikri mülkiyet hukuku üzerine değerlendirilmesi
2018	Yang vd.	Tıp	* Fused deposition modelling (FDM) * Selective laser sintering (SLS) * Electron beam melting (EBM)	–	* Gözenekli iç yapılara sahip kemik dokularının katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak üretilebilirliği üzerine inceleme * Söz konusu alanda kullanılan katmanlı imalat tekniklerinin birbiri ile kıyaslanarak avantaj-dezavantajlarının sunulması * Mevcut teknolojinin ilerleyen süreçteki konumunun öngörülmesi
2018	Nespoli vd	Genel	* Selective laser melting (SLM) * Fused deposition modelling (FDM)	Metal - Plastik 316L (Paslanmaz çelik) - ABS	* SLM ve FDM teknikleri kullanılarak prototip bir termoelektrik jeneratörü üretimi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Evlen vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* FDM tip katmanlı üretim cihazı tasarımı * Doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi
2018	Aydın vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* FDM tip katmanlı üretim cihazı için filament üreten, dikey ekstrüzyon sistemi tasarımı ve prototipinin üretimi * Üretilen ekstrüzyon sistemi ile filament üretimi ve üretilen filamentin mekanik test sonuçları
2018	Dvorak vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen ürünlerin üretim zamanı açısından uygulama yapılarak kıyaslanması, sonuçların grafiksel olarak sunulması
2018	Vlasceanu vd.	Tıp	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* FDM tekniği kullanılarak ortopedik cerrahiye özgü bir ürünün üretilmesi * Üretilen ürünün ergonomi, maliyet, üretim süresi, mekanik özellikleri gibi parametrelerinin incelenmesi
2018	Sağbaş vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik	* FDM tekniği ile üretilen ürünlerin boyutsal doğruluğu, yüzey kalitesi gibi etkenlerinin ürünün oluşturulma esnasında incelenmesi üzerine bilgiler verilmesi ve uygulanması
2018	Lele	Askeri	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı üretim teknolojileri hakkında genel bilgilerin sunulması * Katmanlı imalat teknolojilerinin askeri alanlarda kullanılabilirliği üzerine bilgilerin verilmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Guo vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin deneysel çalışmalar sunularak incelenmesi * Söz konusu teknolojinin bazı kullanım alanlarının sunulması * Konu ile ilgili zorlukların, gelecekteki durumunun belirtilmesi
2018	Jasiuk vd.	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Plastik	* Polimerler ile üretim yapan katmanlı imalat tekniklerinin incelenmesi * Katmanlı imalat tekniklerinin avantajları ve kısıtlamalarının sunulması * Katmanlı imalat teknolojilerinin gelecekteki yönelim alanları hakkında öngörülerin sunulması
2018	Anand vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili eğitim için simülasyon araçlarının incelenmesi
2018	Yakout vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM)	Metal TiAl6V4 (Titanyum alaşımı) AlSi10Mg (Alüminyum alaşımı) 316L (Paslanmaz çelik) Inconel 718 (Nikel Alaşımı)	* Metal üretim yapan katmanlı imalat teknolojilerinin incelenmesi * Kullanılan bazı metal alaşımlarının incelenmesi ve mekanik özellikleri hakkında bilgilerin sunulması
2018	Udofia ve Zhou	Genel	* Microextrusion	Plastik	* Mikro ekstrüzyon yöntemi için literatür incelemeleri ve deneysel sonuçların derlenerek başarılı bir üretim için gerekli yol haritasının belirtilmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Khan vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel) * 4D printing	–	* Katmanlı imalat teknolojileri hakkında genel bilgiler * 4D printing ve akıllı malzemeler hakkında yapılan çalışmaların derlenmesi ve konu ile alakalı güncel ve geleceğe yönelik değerlendirmelerin sunulması
2018	Zenou ve Grainger	Malzeme	* Selective laser melting (SLM) * Laser Engineered Net Shaping (LENS) * Direct Metal Deposition (DMD)	Metal	* Metal üretim yapan katmanlı imalat teknolojileri ve metal üretim için kullanılan hammaddelerin mikro yapılarının incelenmesi
2018	Hilleprecth vd.	Otomotiv	* Laser beam melting (LBM)	Metal 316L (Paslanmaz çelik)	* LBM tekniği ile otomobillerin kaputlarında kullanılmak üzere yeni tip menteşe tasarımı, üretimi ve mekanik analizleri * Tasarlanan menteşelerin avantajları
2018	Levi	Genel	* Nano particle jetting (NPJ)	Seramik	* Yeni bir katmanlı imalat tekniği olan NJP hakkında bilgilerin verilmesi ve NJP ile üretilen seramik ürünlerin diğer üretim teknolojileri ile üretilenlere göre avantajları (yüzey pürüzsüzlüğü, boyutsal doğruluk v.b.)
2018	Baumers ve Tuck	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri üretilen üretilen ürünlerin mali açıdan analizleri ve değerlendirilmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Sing	Tıp	* Selective laser melting (SLM) * Powder bed fusion (PBF)	Metal Titanyum alaşımı	* SLM ve PBF teknikleri ile ortopedik implant üretimi hakkında bilgilerin incelenmesi
2018	Santos vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen ürünlerin hata tolerans değerleri, boyutsal doğruluk gibi faktörlerinin kıyaslanması ve kıyaslama yöntemlerinin incelenmesi
2018	Criscenti vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin implant ve protez üretimi ile ilgili bilgiler verilmesi ve tıp alanında en yaygın kullanılan tekniklerin sunulması
2018	Francis ve Jain	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelere nanopartikül takviyesi ve bunun malzeme özelliklerine etkisi hakkında inceleme
2018	Moritz ve Maleksaedi	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Seramik	* Katmanlı imalat teknolojileri ile seramik ürün üretiminin incelenmesi * Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan yöntemler * Seramik ürünlerin diğer malzemelerle kıyaslanması * Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili pazar araştırması ve söz konusu teknolojinin gelecekteki öneminin sunulması

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Jones vd.	Malzeme	* Selective laser melting (SLM)	Metal Ta (Tantal)	* SLM tekniği ile tantal elementinden üretilen numuneler ve mekanik test sonuçlarının sunulması * Üretilen numunelere dinamik testler uygulanması ve test sonuçlarının sunulması
2018	Zadpoor	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Metal	* Metal malzemelerin katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılması ve gelişiminin incelenmesi
2018	Dehghan vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve kullanılan farklı üretim sistemlerin tanıtılması
2018	Haleem vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin kardiyoloji alanındaki gelişmelerinin ve yapılan çalışmaların incelenmesi ve konu ile ilgili öneriler
2018	Jiang vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinde karmaşık geometrilerin üretilebilmesi için kullanılan destek yapıları üzerine inceleme
2018	Horst vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Endüstri 4.0' da katmanlı imalatın incelenmesi ve önemi

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Nohut vd.	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Seramik	* Seramik ürünlerin katmanlı imalat teknolojilerinde kullanımı ve uzay araştırmaları alanında bu teknolojinin kullanımının incelenmesi
2018	Sander vd.	Malzeme	* Selective laser melting (SLM)	Metal	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen metal alaşımlarının korozyon performansının incelenmesi, değerlendirilmesi ve raporların sunulması
2018	Reed vd.	Genel	* Powder bed fusion (PBF)	Metal	* Metal tozu ile üretim yapan PBF katmanlı imalat tekniği hakkında bilgilerin verilmesi ve üretilen ürünlerdeki metal tozunu geri kazanım ve etkin şekilde kullanabilmek için bir sistemin geliştirilmesi
2018	Chergui vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin üretim planlaması ve zaman bakımından incelenmesi ve sezgisel bir uygulama algoritması sunulması
2018	Eyers vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin yeterliliğinin ve söz konusu teknolojiyi ticari bakımdan engelleyebilecek faktörlerin incelenerek sunulması
2018	Hou	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin tarihi ve günümüzdeki durumu hakkında incelemeler ve mevcut katmanlı üretim sistemlerinin sunulması

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Fera vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri hakkında güncel bilgilerin verilmesi * Katmanlı imalat teknolojilerinin bazı sorunlarının ele alınması
2018	Grant vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri hakkında genel inceleme * Bilgisayar destekli tomografi ile alınan görüntülerin katmanlı imalat teknolojileri ile üretilmesi ve söz konusu teknolojinin avantajları
2018	Gupta ve Dhaawan	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerini kapsayan ve 2007-2016 yılları arasında dünyadaki küresel yayın ve bilimsel literatürlerin incelenmesi ve söz konusu teknolojinin dünyadaki büyüme oranları, en çok tercih edilen alanlar, en çok tercih edilen materyaller gibi verilerin sunulması
2018	Brandon vd.	Mekanik	* Selective laser melting (SLM)	Metal	* SLM katmanlı imalat tekniği ile hidrolik radyatör üretimi * Üretilen radyatöre akışkanlar analizi uygulanması ve sonuçlar
2018	Wakimoto vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* Katmanlı imalat hakkında genel bilgiler * FDM tekniği kullanılarak ABS malzemeden robot gövdesi prototipi üretimi
2018	Salvador ve Garcia	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin tıp alanında 2005-2015 yılları arasında yapılan çalışmaların incelenmesi, yaygın olarak kullanılan tekniklerin ve malzemelerin sunulması

Çizelge 2.3'ün devamı

2018	Baino vd.	Tıp	* Selective laser sintering (SLS)	Biyoaktif cam-seramik	* SLS tekniği ile biyoaktif camlar-seramikler kullanılarak vücudun hasar görmüş kısımlarını onarma üzerine detaylı inceleme
2018	Tuan D. vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM) * Powder bed fusion (PBF) * Inkjet printing and contour crafting * Stereolithography (SLA) * Direct energy deposition (DED) * Laminated object manufacturing (LOM)	–	* Katmanlı imalat yöntemleri genel inceleme * Yöntemlerin birbirleri arasındaki avantaj ve dezavantajları * Üretimde karşılaşılan zorluklar * Katmanlı imalat kullanım alanları
2017	Sunpreet vd.	Tıp	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik	* Malzeme (hammadde) - Çeşitlilik
2017	Zhang vd.	Genel	* Powder bed fusion (PBF) * Direct energy deposition (DED) * Binder jetting * Sheet lamination	Metal Titanyum alaşımı	* Metal üreten katmanlı imalat teknolojileri incelemesi * Üretilen ürünlerin mikro yapıları ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması
2017	Nigmatzyanov vd.	Genel	* Ultrasonic additive manufacturing	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin incelenmesi * Ultrasonik katmanlı imalat tekniğinin (UAM) incelenmesi
2017	Sealy vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinde hibrit sistemler hakkında bilgilerin verilmesi
2017	Singh vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik	* Katmanlı imalat teknolojileri hakkında bilgilerin derlenmesi ve kullanılan malzemelerin yeterliliğinin ve malzeme sorunlarının incelenerek tartışılması

Çizelge 2.3'ün devamı

2017	Pedram vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM) * Laminated object manufacturing (LOM) * Stereolithography (SLA) * Selective laser sintering (SLS) * 4D Printing	Plastik Polimer - Elyaf	* Polimer-elyaf kompozitlerin katmanlı imalat teknolojileri ile üretimi ve incelenmesi
2017	Suzic vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat teknolojilerin üretim sektöründeki öneminin incelenmesi * Katmanlı imalat teknolojileri hakkında literatürde ele alınan iş modellerinin derlenmesi ve analiz edilmesi
2017	Krueger	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Havacılık endüstrisi için katmanlı imalat teknolojileri standardizasyonlarının sunulması
2017	Adekanye vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Farklı katmanlı imalat teknikleri detaylı bir şekilde incelenmesi ve söz konusu alanla ilgili çalışmaların sunulması * Gelecek yıllarda katmanlı imalat teknolojilerinin yeri ve öneminin öngörülmesi
2017	Chua vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili ASTM standartlarının incelenmesi ve standartlaştırmanın önemi

Çizelge 2.3'ün devamı

2017	Rivo vd.	Havacılık	* Powder bed fusion (PBF)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin incelenmesi ve söz konusu teknolojinin ay yüzeyinde ürün oluşturma düşüncesinin incelenerek uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi
2017	Javaid vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	*Katmanlı imalat teknolojilerinin tıp sektöründe kullanımının detaylı literatür incelemesi
2017	Bose vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalatın genel incelemesi * Katmanlı imalat teknolojilerinin biyomedikal alanında kullanımının incelenmesi ve söz konusu teknoloji ile yapılan çalışmalarda kullanılan biyomalzemeler
2017	Hyub vd.	Genel	* Stereolithography (SLA) * Selective laser sintering (SLS) * Selective laser melting (SLM) * Laser Engineered Net Shaping (LENS)	–	* Lazer tabanlı katmanlı imalat teknolojileri tanıtımı * Katmanlı imalatla kullanılan lazer türleri ve lazer seçimi
2017	Ribic	Havacılık	* Powder bed fusion (PBF) * Electron beam melting (EBM)	Metal	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen metal ürünlerin havacılık ve uzay alanında kullanımının incelenmesi
2017	Radu vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin tıp alanında kullanımı ile ilgili incelemeler * Düzlemsel olmayan geometrik şekillerin üretilebilirliğinin uygulaması ve sonuçları

Çizelge 2.3'ün devamı

2017	Qian ve Bourell	Malzeme	* Selective laser melting (SLM)	Metal Titanyum alaşımı	* Titanyum alaşımının katmanlı imalat teknolojilerinde kullanımı ile ilgili literatür incelemesi
2017	Lee vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Metal	* Katmanlı imalat teknolojilerinde lazer teknolojisinin kullanılması ve lazer tabanlı sistemlerin incelenmesi
2017	Haigh vd.	Malzeme	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik Polipropilen	* Katmanlı imalat teknolojileri ile polipropilen malzemden üretilen ürünlerin incelenmesi
2017	Nayak	İnşaat	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili inceleme
2017	Paidosh ve shea	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretim için tasarım parametreleri ve tasarım sezgilerinin literatür incelemesi ve derlenerek sunulması
2017	Booth vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri genel inceleme ve üretim öncesi tasarımın uygunluğu gibi bilgilerin verilerek daha kısa sürede ve daha aktif üretim şeklinin sunulması
2017	Eyers vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat, Doğrudan dijital üretim ve üretim sistemleri hakkında detaylı inceleme

Çizelge 2.3'ün devamı

2017	Baumann vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Bulut üretimi veya bulut baskısı hizmetleri gibi birden fazla katmanlı imalat cihazı olması durumunda, katmanlı imalat cihazlarının otomatikleşmiş kullanımı için kullanıcı tarafından sağlanan model dosyalarından uygun kaynakları seçme ve sağlama gereksinimini giderecek fikirler sunmak
2017	Mao vd.	Genel	* Microstereolithography	–	* Katmanlı üretim teknolojileri ile yüksek çözünürlüklü, mikro yapıdaki ürünlerin veya elektronik iletken devre kartlarının üretim ve incelenmesi
2017	Chohan vd.	Tıp	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik ABS (Akrilonitril bütadien stiren)	* Yüzey kalitesi iyileştirme çalışmaları (Buhar yöntemi) * Son işlem sonrası boyutsal doğruluk
2017	Vyas vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak vaskülerize doku yapıları üretilen çalışmaların derlenerek sunulması
2017	Chua vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat ürünleri için metroloji ölçüm yöntemleri ve mekanik testlerin ele alınması
2017	Chua vd.	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Bazı katmanlı imalat sistemlerinin incelenmesi * Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelerin malzeme karakterizasyonunun öneminin incelenmesi ve kullanılan malzemelerin katı, sıvı ve toz şeklinde gruplandırılarak incelenmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2017	Maad vd.	Malzeme	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	Metal	* Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan çelik malzemelerin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve işlem parametreleri gibi bilgilerin verilmesi ve gelecekteki durumunun öngörülmesi
2017	Jardini vd.	Tıp	* Selective laser sintering (SLS) * Direct metal laser sintering (DMLS)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Tıp alanında kullanılan biyomodelin tasarım ve katmanlı imalat teknolojileri ile üretiminin incelenmesi
2017	Bhushan vd.	Genel	* Stereolithography (SLA) * Inkjet printing * Selective laser sintering (SLS) * Fused deposition modelling (FDM) * Laminated object manufacturing (LOM)	–	* Katmanlı imalat yöntemleri genel inceleme * Yöntemlerin birbirleri arasındaki avantaj ve dezavantajları
2016	Sisca vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri genel inceleme * Dünyadaki, katmanlı imalat teknolojileri alanındaki çalışmalarına ayrıntılı bir bakış
2016	Srivastava	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinin incelenmesi ve katmanlı imalat teknikleri hakkında bilgilerin verilmesi
2016	Leach	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen ürünler için metroloji (ölçüm) kavramının öneminin belirtilmesi * Söz konusu teknolojinin daha işlevsel hale gelmesi ve daha başarılı ürünler elde etmek için metroloji açısından önermeler

Çizelge 2.3'ün devamı

2016	Ezeiruaku	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri genel inceleme * Katmanlı imalat teknolojilerinin diğer üretim yöntemleri ile kıyaslanması * Katmanlı imalat teknolojileri kullanım alanlarının incelenmesi
2016	Wu vd.	İnşaat	* Contour crafting (İnşaat için)	Beton	* Contour crafting genel inceleme
2016	Herzog vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM) * Laser Engineered Net Shaping (LENS) * Direct Metal Deposition (DMD)	Metal	* Metal üretim yapan katmanlı imalat teknolojileri incelemesi * Metal üretim için kullanılan hammaddelerin incelenmesi * Mikro yapıları ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması
2016	Popescu ve Laptoiu	Tıp	* Stereolithography (SLA) * Fused deposition modelling (FDM) * Selective laser sintering (SLS)	Plastik	* Katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak hastaya özel ortopedi amaçlı üretimin incelenmesi ve literatürün sunulması
2016	Elahinia vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM) * Direct energy deposition (DED) * Laser Engineered Net Shaping (LENS) * Direct Metal Deposition (DMD)	Metal NiTi (Nikel-Titanyum)	* Katmanlı imalat NiTi üretimi mevcut zorluklar ve çözüm yöntemleri * Katmanlı imalat teknolojileri aracılığıyla NiTi üretimi ile ilgili literatürün kapsamlı bir şekilde incelenmesi * Geleneksel yöntemlerle ve katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen NiTi alaşımının kıyaslanması

Çizelge 2.3'ün devamı

2016	Jose vd.	Tıp	* Inkjet printing (Bio-ink) * Stereolithography (SLA) * Fused deposition modelling (FDM) * Powder bed fusion (PBF) * Selective laser sintering (SLS)	Metal (Tıbbi cihazlar için) Biyo-mürekkep (Canlı hücre)	* Katmanlı imalat teknolojileri ile kişiye özel doku ve tıbbi cihazların üretiminin incelenmesi ve söz konusu teknolojinin son 20 yıldaki gelişmelerin ele alınması
2016	Bhadeshia	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri hakkında genel bir değerlendirme
2016	Lewandowski vd.	Mekanik	* Selective laser melting (SLM) * Electron beam melting (EBM) * Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Metal Ti6Al4V, TiAl	* Katmanlı imalat ile üretilen metal bazlı ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve gözden geçirilmesi
2016	Li vd.	Elektronik	* Digital light projection (DLP) * Stereolithography (SLA)	Plastik	* İki farklı katmanlı imalat tekniğinin (SLA-DLP) birleştirilerek hibrit bir sistemin elde edilmesi * Elde edilen hibrit sistemle elektronik bir devrenin oluşturulması * Oluşturulan ürünün mekanik özelliklerinin sunulması
2016	Stansbury vd.	Genel	* Stereolithography (SLA) * Digital light projection (DLP) * Selective laser sintering (SLS) * Fused deposition modelling (FDM) * Laminated object manufacturing (LOM)	Plastik	* Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelerin, üretim tekniklerinin ve malzeme temelli gelişmelerin incelenmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2016	Thompson vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilmiş ürünlerin x-ışını bilgisayarlı tomografi (XCT) aracılığıyla hacimsel ve boyutsal olarak doğrulanması ve XCT' nin tersine mühendislik aracı olarak kullanımı
2016	Wang vd.	Mekanik	* Selective laser melting (SLM)	Metal Alloy 718 (Nikel Alaşımı)	* SLM tekniğinin genel tanıtımı ve avantajları * Katmanlı imalat teknolojileriyle üretilen Alloy 718 metalinin mekanik özellikleri hakkında inceleme
2016	Williams vd.	Havacılık	* Wire arc additive manufacturing (WAAM)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* WAAM tekniği ile üretilen titanyum alaşımlı ürünlerin incelenmesi ve mekanik özelliklerini iyileştirme, porozitenin giderilmesi gibi önermeler
2016	Everton vd.	Genel	* Powder bed fusion (PBF) * Direct energy deposition (DED)	Metal	* Katmanlı imalat yöntemlerinin üretim kalitesinin değerlendirilmesi için sensörler ve izleme yöntemlerinin incelenmesi * Katmanlı imalatın gelecekteki durumunun tartışılması
2016	Simon vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojilerinde sürdürülebilirliğin incelenmesi * Avantajları ve dezavantajlarının incelenmesi
2016	Wang vd.	Tıp	* Selective laser melting (SLM) * Electron beam melting (EBM)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Ortopedik, gözenekli tasarım ve metal implantların katmanlı imalat teknolojileri ile üretiminin incelenmesi
2016	Zadpoor vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Dokuların, organların ve biyomalzemelerin katmanlı imalat teknolojileri ile üretiminin incelenmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

2016	Liu vd.	Malzeme	* Electron beam melting (EBM)	Metal Ti24Nb4Zr8Sn (Titanyum Alaşımı)	* EBM tekniği kullanılarak Ti24Nb4Zr8Sn titanyum alaşımı malzeme ile gözenekli yapıda bir ürünün üretilmesi ve elde edilen ürünün farklı titanyum alaşımları ile mekanik değerlerinin kıyaslanması
2016	Bikas vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	—	* Katmanlı imalat yöntemleri genel inceleme * Yöntemlerin birbirleri arasındaki avantaj ve dezavantajları * Katmanlı imalat kullanım alanları
2016	Körner	Genel	* Selective electron beam melting (SEBM)	Metal, seramik	* SEBM tekniğinin incelenmesi * SEBM tekniğinin SLM tekniği ile kıyaslanması ve farklı yönleri
2016	Townsend vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM) * Electron beam melting (EBM)	Metal	* Yüzey kalitesi inceleme
2015	Kelly vd.	Tıp	* Fused deposition modelling (FDM) * Selective laser sintering (SLS) * Material Jetting (MJ)	Plastik	* El bileği atelinin katmanlı imalat teknolojileri ile üretiminin incelenmesi
2015	Shirazi vd.	Tıp	* Selective laser sintering (SLS) * Inkjet printing	Plastik PCL (Polycaprolactone)	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen kemik dokularının insan vücuduna etkilerinin incelenmesi ve üretilen dokuların mekanik ve biyolojik özelliklerinin incelenmesi
2015	Sing vd.	Tıp	* Selective laser melting (SLM) * Electron beam melting (EBM)	Metal Ti6Al4V (Titanyum alaşımı)	* Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen metalik ortopedik implant uygulamalarının güncel durumunun incelenmesi ve üretilen implantların tasarım, yüzey yapısı ve mekanik değerleri gibi bilgilerin verilmesi

Çizelge 2.3'ün devamı

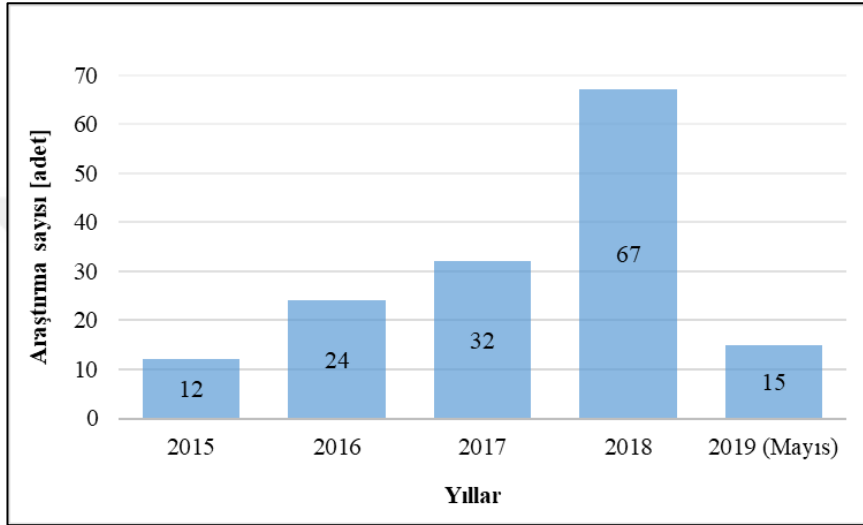
2015	Turner vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik	* FDM tekniği ile üretilen plastik esaslı ürünler için boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili literatür incelemesi
2015	Uriondo vd.	Havacılık	* Selective laser melting (SLM) * Electron beam melting (EBM)	Metal	* Havacılık endüstrisi için katmanlı imalat teknolojilerinin incelenmesi * Havacılık Endüstrisi için üretilen metal parçaların mekanik özelliklerinin yeterliliğinin incelenmesi
2015	Ruiz vd.	Tıp	* Stereolithography (SLA)	Plastik Fotopolimer reçine	* SLA tekniğinin diş hekimliği alanında kullanımı ve hastalardan elde edilen model verileri ile üretilen ürünlerin kullanılarak ameliyat öncesi planlama gibi avantajlarının sunulması
2015	Lachmayer vd.	Otomotiv	* Selective laser melting (SLM)	Metal	* Optik bileşenleri üretmek için SLM teknolojisinin kullanılabilirliğinin araştırılması ve bir örnek optik reflektör üretimi ile desteklenmesi * Uygulama sonuçlarına göre SLM tekniğine alternatif bir teknolojinin kullanılabilirliğinin tartışılması
2015	Xiaohui vd.	Tıp	* Selective laser sintering (SLS)	Plastik A-PC/HA (Alifatik-polikarbonat / Hidroksiapatit)	* A-PC/HA kompozit tozunun SLS tekniği kullanılarak karmaşık ve gözenekli yapıdaki ürünlerin üretilip tıp alanında kullanılabilirliğine dair inceleme

Çizelge 2.3'ün devamı

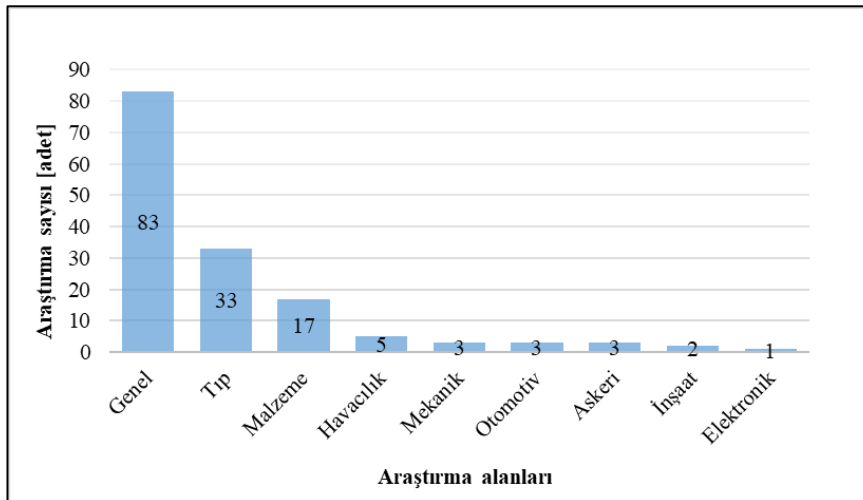
2015	Ho vd.	Tıp	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Biyoimplant yapımı için kullanılan farklı katmanlı imalat teknikleri ve süreçlerinin tanımlanması * Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen farklı tipte biyoimplantların incelenmesi ve sunulması * Katmanlı imalat teknolojilerinin gelecekteki konumunun tartışılması
2015	Wu vd.	Genel	* Fused deposition modelling (FDM)	Plastik Peek (Polieter eter keton)	* FDM tekniği ile peek materyalden farklı katman kalınlığı ve raster açılarında numuneler üretilmesi ve üretilen numunelerin kıyaslanarak mekanik özelliklerinin sunulması
2015	Yang vd.	Genel	* Katmanlı imalat teknolojileri (Genel)	–	* Katmanlı imalat teknolojileri tasarım teorisi ve metodolojisinin incelenmesi
2015	Yap vd.	Genel	* Selective laser melting (SLM)	Metal, seramik	* SLM tekniğinin incelenmesi * SLM tekniği üretim malzemeleri * SLM tekniği uygulamaları ve üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Değerlendirme grafikleri

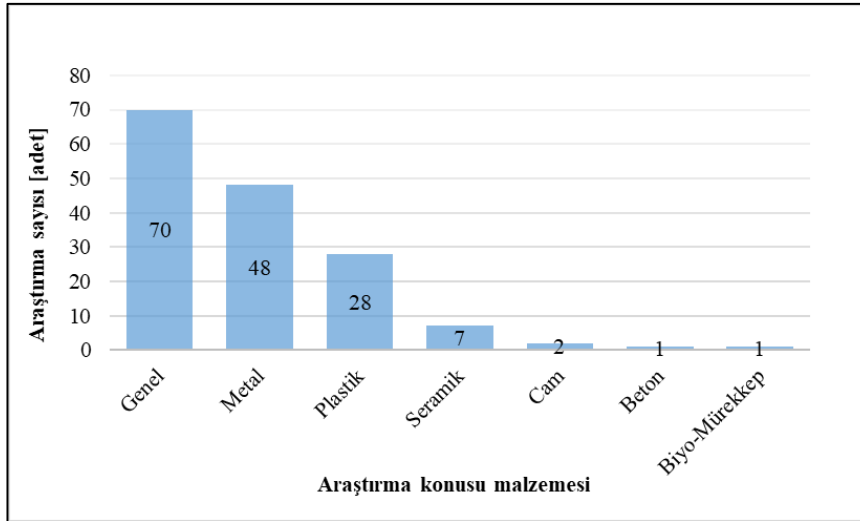
Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili 2015-2019 yılları arasında yapılan taramalardan rastgele seçilen 150 adet bilimsel nitelikli çalışma incelenmiş ve elde edilen veriler değerlendirilerek yayın yıllarına göre çalışma sayıları Şekil 2.34’ te, araştırma alanlarına göre çalışma sayıları Şekil 2.35’ te ve araştırma konusu malzemesine göre çalışma sayıları Şekil 2.36’ da grafikler halinde sunulmuştur.



Şekil 2.34. Katmanlı imalat teknolojileri hakkında rastgele seçilen çalışmaların yıllara göre dağılımı (2015-2019 Mayıs)



Şekil 2.35. Katmanlı imalat teknolojileri hakkında rastgele seçilen çalışmaların araştırma alanlarına göre dağılımı (2015-2019 Mayıs)



Şekil 2.36. Katmanlı imalat teknolojileri hakkında rastgele seçilen çalışmaların araştırma konusu malzemesine göre dağılımı (2015-2019 Mayıs)

Grafikler incelendiğinde, çalışma sayılarında 2018 yılına kadar her yıl bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu literatür çalışması 2019 yılı mayıs ayı içerisinde yapıldığı için henüz 2019 yılında rastlanan çalışma sayısı düşüktür. Fakat ilerleyen süreçlerde yapılacak araştırmalar için 2019 yılındaki çalışma sayısının diğer yıllardan daha yüksek olacağı, elde edilen diğer yılların verileri göz önüne alınarak öngörülmektedir. Araştırma alanları incelendiğinde, herhangi bir alana özgü olmayan ve genel olarak katmanlı imalat teknolojilerinin incelendiği çalışmalar 83 adet, tıp alanına özgü yapılan çalışmalar 33 adet ve malzeme alanına özgü yapılan çalışmalar ise 17 adet olmak üzere ilk üç sırada yer almaktadır. Rastgele seçilen 150 adet çalışmada tarım makineleri tasarımı ve imalatı ile alakalı hiçbir çalışmaya rastlanılamamıştır. Son olarak yapılan çalışmaların araştırma konusu malzemeleri incelenmiş ve herhangi bir malzeme üzerinde durulmadan katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili yapılan genel çalışmalar 70 adet, metal malzemelerle yapılan çalışmalar 48 adet ve plastik malzemelerle yapılan çalışmalar ise 28 adet olmak üzere ilk üç sırada yer almaktadır. Bir çalışmada birden fazla malzeme ele alınabildiği için araştırma konusu malzemesi grafiği toplamında farklılık mevcuttur.



3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında mühendislik tasarım ve imalat alanlarına özgü teorik ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Tez çalışmasının örnek uygulama bölümünde ana materyal olarak plastik malzeme (geri dönüşüm plastik) bazlı bir sera bitki askısı ele alınmıştır. Çalışmada fiziksel boyut ölçümleri, malzeme sertlik ve malzeme çekme deneyleri ve hızlı prototip imalatı için uluslararası standartlara uygun malzeme ölçüm, test ve hızlı prototipleme cihazları, bilgisayar destekli tasarım, mühendislik ve yapısal optimizasyonları için üç boyutlu parametrik katı modelleme ve sonlu elemanlar yöntemi temelli yazılımlar kullanılmıştır. Tez çalışmasında, tahribatlı malzeme muayeneleri ve testleri, mühendislik hesaplama eşitlikleri, sayısal yöntem simülasyonları, ileri düzey bilgisayar destekli tasarım, mühendislik ve yapısal optimizasyon uygulamaları ve hızlı prototipleme imalatı teknik ve yöntemlerinden yararlanılmış ve bu teknik ve yöntemleri içeren tarım makineleri tasarımı ve imalatı alanına özgü bir ürün tasarımı değerlendirme ve geliştirme algoritması geliştirilmiştir.

Özellikle endüstriye yönelik bilgisayar destekli tasarım, mühendislik ve yapısal optimizasyon uygulamalarını ve ürün prototip imalatını içeren ürün/mühendislik tasarımı ile ilgili bilimsel araştırma ve endüstriyel alan uygulamalarında, tasarım kavramının yapı taşlarında bulunan, belirli bir sistematik içerisinde birbirini takip eden, birbirleri ile bağlantılı ve devamlı etkileşim içerisinde olan uygulama aşamaları takip edilmektedir. Bu bağlamda, bu alanda çalışan alan mühendisleri ve araştırmacıların burada sunulan uygulama örneğini anlaşılabilir ve kolay bir şekilde takip edebilmelerine yardımcı olmak amacıyla örnek uygulamada verilen aşamalarda algoritmik bir yaklaşım benimsenmiş ve geliştirilen uygulama algoritmasında yer alan adımlar sistematik bir şekilde adım adım takip edilerek detaylandırılmıştır.

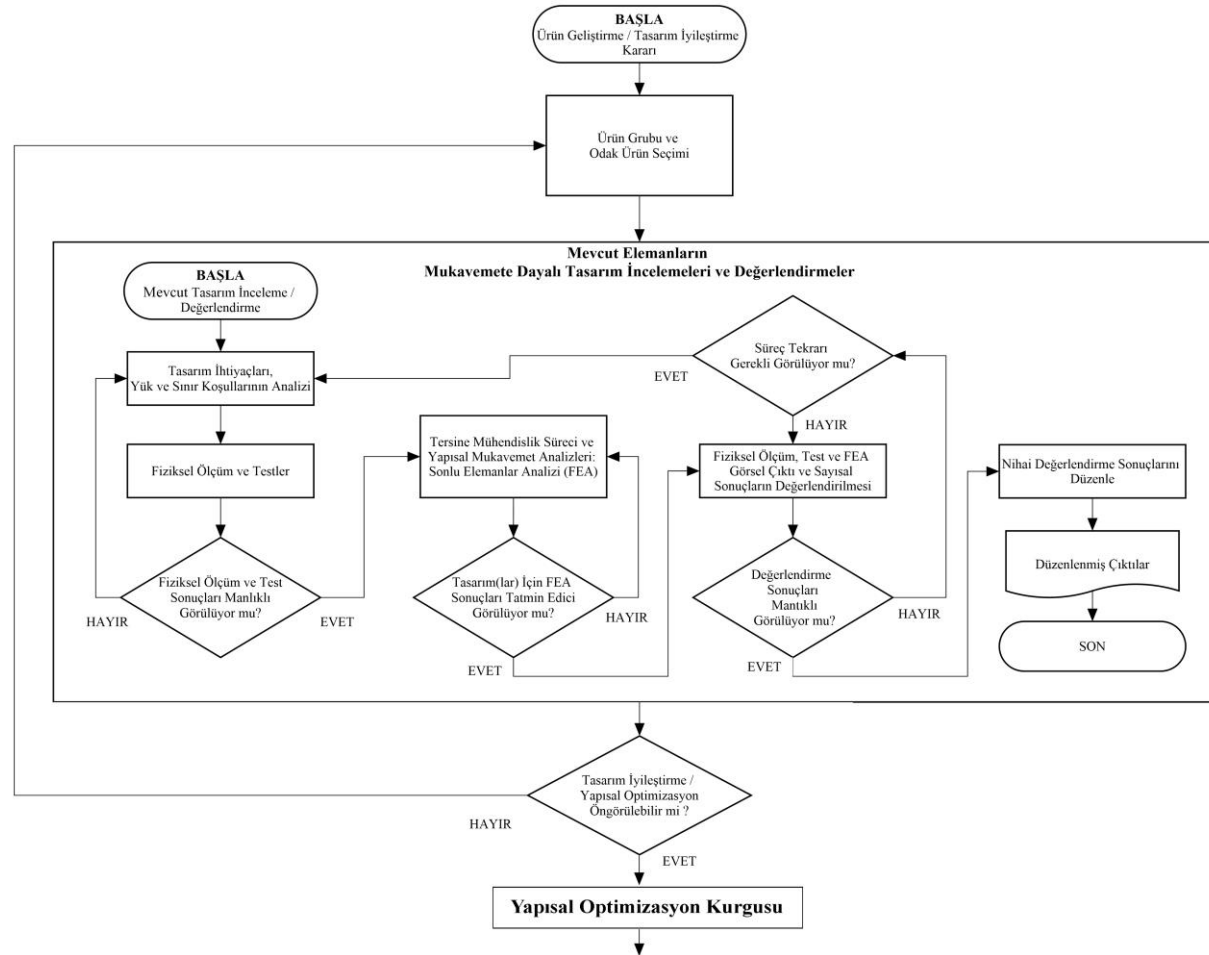


4. BULGULAR VE TARTIŞMA

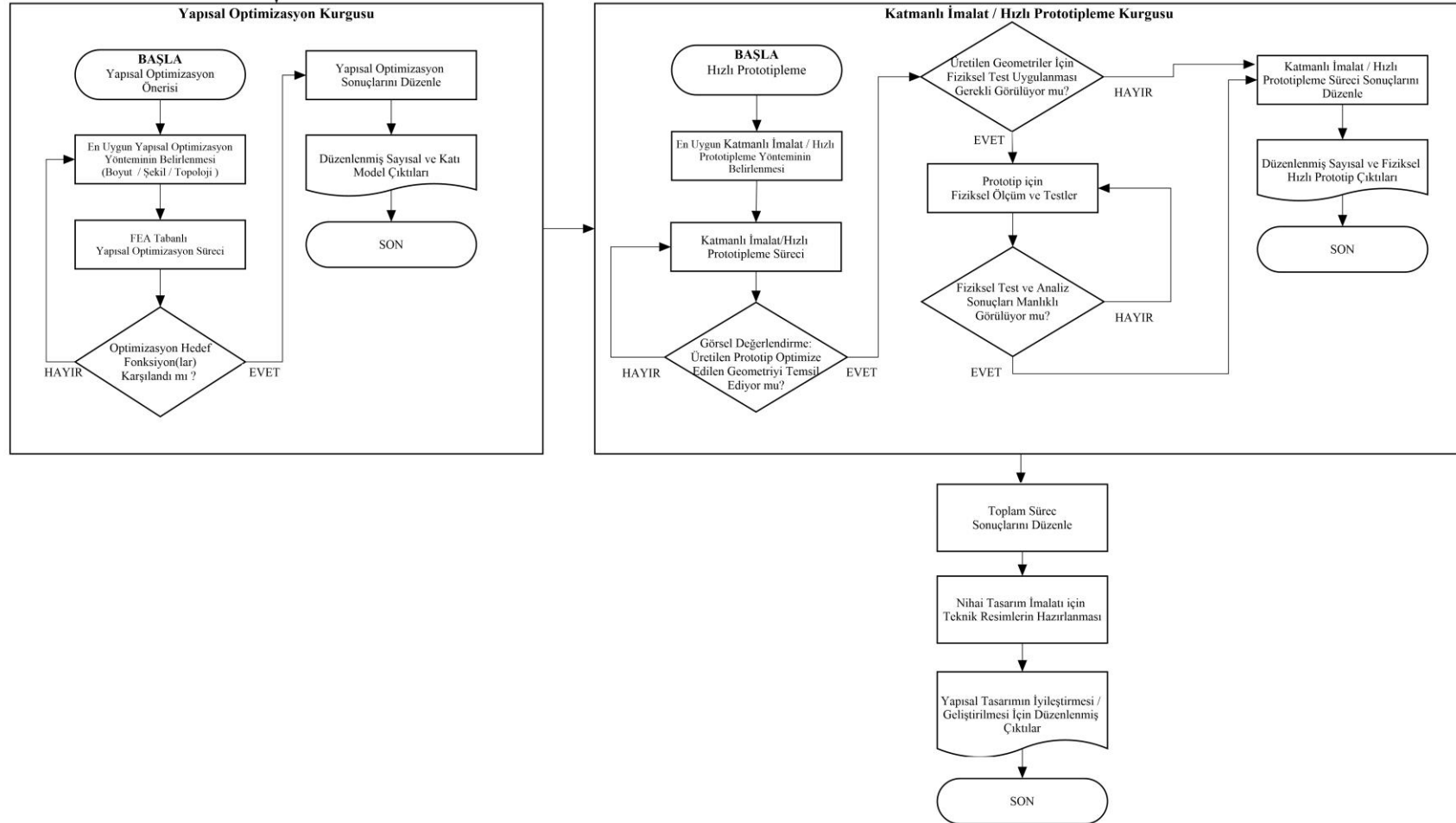
4.1. Uygulama Algoritması ve Adımları

Bu tez çalışmasında tarımsal üretimde kullanılan ürün, alet ve makine tasarımlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılabilecek ileri düzey bilgisayar destekli tasarım, bilgisayar destekli mühendislik, yapısal optimizasyon ve katmanlı imalat (hızlı prototipleme) tekniklerini referans alan bir uygulama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma Şekil 4.1’de sunulmuştur. Tez kapsamında yapılan örnek uygulamada, algoritma adımları sırası ile takip edilmiştir.





Şekil 4.1. Geliştirilen uygulama algoritması



Şekil 4.1. Geliştirilen uygulama algoritması (Devam)

Uygulama Başlama Kararı: Bu çalışma kapsamında, tarımsal üretimde kullanılan ürün, alet ve makine tasarımlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılabilecek uygulama algoritması, bir ihtiyacın karşılanması veya imalat sürecindeki maliyetlerin düşürülmesi amacıyla, ürün geliştirme/tasarım iyileştirme ve katmanlı imalat/hızlı prototipleme kararının alınması ile başlamaktadır. Uygulama algoritmasında takip edilen diğer adımlar aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

Ürün Grubu ve Odak Ürün Seçimi: Bu adım, tarımsal üretimde kullanılan ürün, alet ve makineler içerisinde, ürün geliştirme/tasarım iyileştirme sürecine dahil edilmesi düşünülen ve uygun bulunması halinde ürünün seçilmesi aşamadır.

Belirlenen Mevcut Elemanların Mukavemete Dayalı Tasarım İncelemeleri ve Değerlendirmeler: Bu adım, ürün geliştirme/tasarım iyileştirme sürecine uygun bulunarak seçilen elemanın, yapısal optimizasyon öncesi tasarımının incelenmesi ve değerlendirilmesi aşamasıdır. İlk olarak belirlenen eleman, yük ve sınır koşullarının belirlenmesiyle birlikte deneysel olarak ve/veya analitik yaklaşımlar ile fiziksel ölçüm ve testlere tabii tutulmaktadır. Deneysel olarak bu testler, uygulamaya konulan elemana ve ihtiyaçlara bağlı olarak basma testi, çekme testi, sertlik ölçümleri vb. gibi mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik testleri kapsamaktadır. Bu aşamanın ardından belirlenen eleman, tersine mühendislik yaklaşımı ile, orijinal tasarımına uygun şekilde tasarıma yardımcı yazılımlar veya ilgili modelleme teknikleri kullanılarak CAD modele dönüştürülmekte ve bilgisayar ortamına taşınmaktadır. Elde edilen CAD modeller, yapısal mukavemet analizlerine (sonlu elemanlar analizi) tabii tutulmakta ve elde edilen çıktılar, yapılmış olan fiziksel ölçüm ve testlerle kıyaslanarak simülasyon doğrulaması yapılmaktadır. Doğrulamanın yapıldığı kısım, simülasyon değerlerinin, gerçek çalışma koşulları ile ne derece uyumlu olduğunun belirlenmesini kapsamakta ve optimizasyon süreçlerinin güvenilirliğinin ortaya konması açısından oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Sonuçların mantıklı bulunmasının ardından elde edilen veriler, sonraki aşamalarda kullanılmak üzere düzenlenerek adım sonlandırılmaktadır.

Tasarım İyileştirme/Yapısal Optimizasyon Öngörüsü: Bu adımda ilk aşama, bir önceki adımda uygulanan mevcut elemanların mukavemete dayalı tasarım incelemelerinin göz önünde bulundurularak, yapısal optimizasyonun uygunluğuna dair öngörünün değerlendirilmesidir. Mevcut eleman için yapısal optimizasyon işlemi uygun bulunmazsa, takip edilen döngü sonlandırılarak, farklı bir eleman veya makinenin seçimi amacıyla ürün grubu ve odak ürün seçimi adımına geri dönmelidir. Ancak belirlenmiş eleman için yapısal optimizasyon öngörülür ise bir sonraki aşama olarak yapısal optimizasyon kurgusuna geçiş yapılmaktadır.

Yapısal Optimizasyon Kurgusu: Kurgu için ilk aşama, çalışmaya yönelik en uygun yapısal optimizasyon yönteminin belirlenmesidir. Yapısal optimizasyon yöntemi, boyut, şekil ve topoloji olarak üç farklı gruba ayrılmaktadır. Bu aşamanın ardından FEA tabanlı yapısal optimizasyon süreci başlatılmakta ve seçilen optimizasyon yönteminin kriterleri ve zorunlu tasarım parametreleri göz önünde bulundurularak süreç tamamlanmaktadır. Gerçekleştirilen yapısal optimizasyon işlemi sonucunda ulaşılan hedef fonksiyonlarının, tanımlanan tasarım sınırları dahilinde yeniden kontrol edilerek onaylanması halinde, sonuçlar düzenlenmekte ve söz konusu adım sonlandırılmaktadır.

Katmanlı İmalat/Hızlı Prototipleme Kurgusu: Bu adım, optimizasyon sürecinde elde edilen yeni tasarımın somut olarak değerlendirilmesi açısından katmanlı imalat/hızlı prototipleme tekniklerini referans alan bir üretim aşamasıdır. Hızlı prototipleme işlemi, yeni bir tasarımın veya mevcut tasarım üzerinde yapılan değişikliklerin görsel olarak değerlendirilmesi için oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu adım için ilk aşama, katmanlı imalat/hızlı prototipleme sürecine en uygun yöntemin belirlenmesidir. Yöntemin belirlenmesinin ardından, katmanlı imalat/hızlı prototipleme süreci başlatılmakta ve optimize edilen ürün, katmanlar halinde belirlenen hızlı prototipleme yöntemi ile üretilmektedir. Üretilen prototip ürünün, optimize edilen geometriyi temsil ettiğinin onaylanması durumunda eğer gerekli görülürse ürüne fiziksel ölçüm ve testler uygulanmaktadır. Ancak bu işlemin gerekli görülmediği durumda katmanlı imalat/hızlı prototipleme sonuçları düzenlenerek adım sonlandırılmaktadır.

Toplam Süreç Sonuçlarının Düzenlenmesi: Bu adım, çalışma kapsamında yapılan uygulamaların toplam süreçte elde edilen sonuçlarının düzenlenmesini kapsamaktadır.

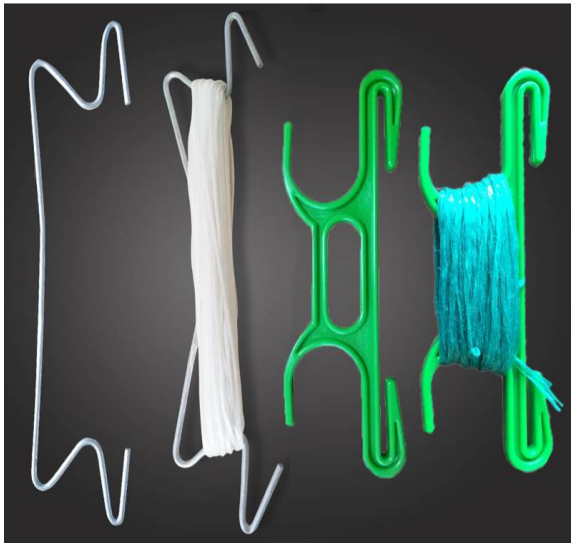
Nihai Tasarım İmalatı için Teknik Resimlerin Hazırlanması: Optimize edilen yeni tasarımın imalatında kullanılmak üzere teknik resimlerinin hazırlanmasıyla birlikte bu adım da sonlandırılarak bir sonraki aşamada düzenlenmiş çıktılar alınmakta ve algoritmanın tüm adımları tamamlanmaktadır.

4.2. Örnek Uygulama: Bitkisel Üretimde Kullanılan Sera Bitki Askısının Boyut Optimizasyonu ve Hızlı Prototipleme Örneği

Tez çalışması kapsamında yapılan örnek uygulama için, tarımsal üretimde kullanılan ürün, alet ve makine tasarımlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılabilecek uygulama algoritmasının adımları takip edilerek örnek bir uygulama sunulmuştur.

4.2.1. Sera bitki askısı (SBA)

Yapılan bu tez çalışmasında örnek uygulama için bitkisel üretimde kullanılan plastik malzeme esaslı, dört farklı tasarıma sahip sera bitki askısı (SBA) seçilmiştir. Sera bitki askısı, genellikle seralarda kullanılan ve domates, salatalık vb. gibi ürünlerin ip ile tavan teline asılmasını sağlayan elemandır. Ticari anlamda, genel olarak metal ve plastik olmak üzere iki farklı türü mevcuttur. Yapılan bu tez çalışmasında, plastik malzeme esaslı sera bitki askısı örneklendirilmiştir. İlgili imalatçılarla gerçekleştirilen görüşmelerde plastik malzeme esaslı tasarımların çoğunlukla geri dönüşüm karışık polimerlerden imal edildiği ve standart bir malzeme özelliği ile imal edilmediği anlaşılmıştır. Seralarda bitkisel üretim yapan üreticiler ile gerçekleştirilen görüşmelerde ise bu tip plastik esaslı tasarımların zaman zaman görevini yerine getiremediği ve istenilen mukavemete sahip olmadığı bilgisi edinilmiştir. Bu mukavemet sorununun özellikle güneş ışığına maruz kalan tasarımlarda daha sık görüldüğü anlaşılmıştır. Güneş ışığına maruz kalan tasarımların mukavemet düşüşleri bu tez çalışması kapsamında ele alınmamış ve ileriki araştırma planları içerisinde ele alınması planlanmıştır. Metal ve plastik tip sera bitki askıları Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Metal ve plastik tip sera bitki askısı

Sırk domates, salatalık gibi ürünler kendiliğinden dikine büyüemeyen bitkilerdir. Bu yüzden fideleme ve dikim işleminden bir süre sonra bitkilerin bir ip aracılığı ile üst kısımda bulunan tele bağlanarak ipe alma adı verilen işlemin yapılması gerekmektedir. İpe alma işleminin gecikmesiyle bitkiler istenmeyen bölgelere yatmakta, kırılmakta ve üretim verimlerinde düşüşler yaşanmaktadır. İpe alma işleminin faydaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

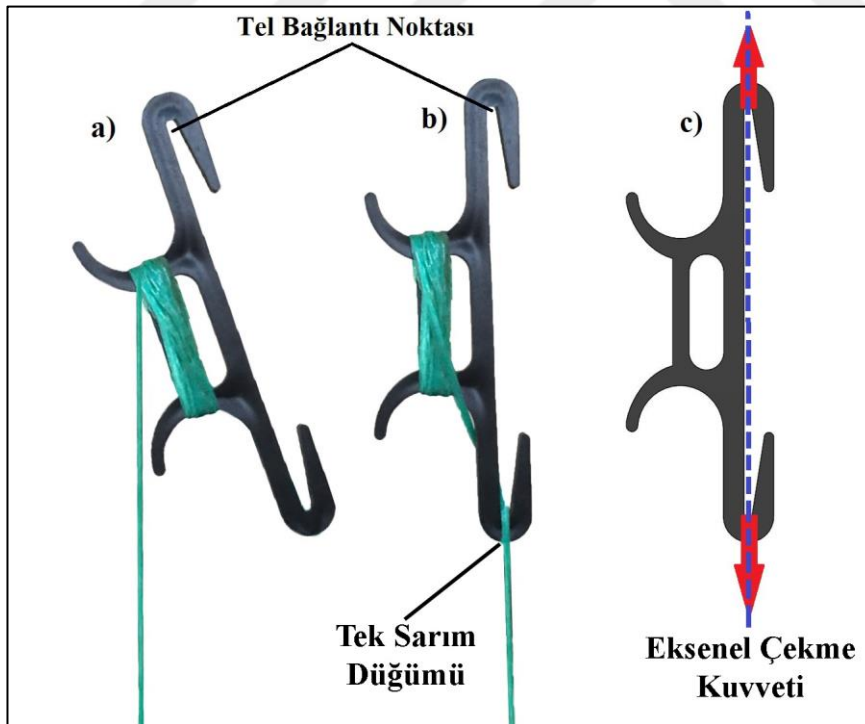
- İpe alma işlemi, bitkinin güneş ışığını daha iyi almasını sağlamaktadır
- İpe alınan bitkilerin bakımları daha kolay yapılmaktadır
- Birim alana dikilen bitki sayısı artmakta, verim yükselmektedir
- İpe alınan bitkilerin meyve kalitesinde bir artış olmaktadır

Ayrıca ipe alma işleminde sera bitki askısı kullanmanın, bitki yatırma, bitkileri üst kısımdan kaydırarak yer değiştirme, daha düzenli ve daha kontrollü bir üretim gibi avantajları bulunmaktadır. Özellikle bitki yatırma adı verilen işlemde sera askısının avantajı çok büyüktür. Domates bitkileri salkımlar şeklinde ürün veren ve bitkinin alt kısmından itibaren olgunlaşmış domatesler toplandıkça, uç kısmın sürekli uzayıp yeni salkımlar oluşturmamasından dolayı, yeni oluşan salkımlara daha kolay erişebilmek ve bitki boyunu kontrol altında tutabilmek için bitkinin yatırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bitki boyu uzadıkça, yatırma işlemi için gerekli olan ip, sera bitki askısının sarım alanında bulunan fazla ipten karşılanmakta ve yatırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bitki yatırma işlemine örnek bir görsel Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Bitki yatırma işlemi

Üretilecek olan bitki, yatırma işlemine ihtiyaç duyuyorsa ilk olarak ip, askıya bağlanarak sarım alanına fazlalık kısmı sarılmaktadır. Sarım işlemi elle yapıldığı gibi sarım makinesi ile de yapılarak askı ve ip hazır hale getirilmektedir. Ardından ipe alınma zamanı gelen bitkinin gövdesine, doğrudan veya bir klips ile ipin diğer ucu bağlanmakta ve askı, seranın üst kısmında bulunan tele takılmaktadır. Askının tele takılmasının ardından bitkiye bağlanan ip Şekil 4.4’ te gösterildiği gibi farkı şekillerdeki konumlandırılabilir. Konu ile ilgili üretim yapılan seralarda incelemeler gerçekleştirilmiş, üreticilerden bilgiler alınmış ve askıdaki ip konumunun genel olarak a ve b görsellerinde gösterildiği şekilde uygulandığı bilgisi edinilmiştir. Ancak a görselindeki uygulamanın yanlış olduğu, ipin bitki bağlantı kısmının a görselindeki gibi bırakıldığında, askı bağlantı ekseninde görseldeki gibi kayma olacağı, hatta askının telden sıyrılarak düşme ihtimali olduğu anlaşılmaktadır. Bu şekilde uygulanmasının nedeninin bitki yatırma işlemi esnasında işçilerin işlemleri hızlı bitirmek adına ipi b görselindeki gibi alt kancadan geçirmemeli olarak gösterilmiştir. Edinilen bilgiler dikkate alınarak, ip sarım ve uygulama işlemleri, ön çalışmalar ve denemeler yapılarak değerlendirilmiş ve tez çalışması kapsamında yapılacak testler ve analizler için kuvvet etki noktalarının c görselinde gösterildiği şekilde kabul edilmesinin çalışma amacına hizmet edebileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.4. SBA ip bağlantı şekilleri ve kabul edilen kuvvet etki noktaları

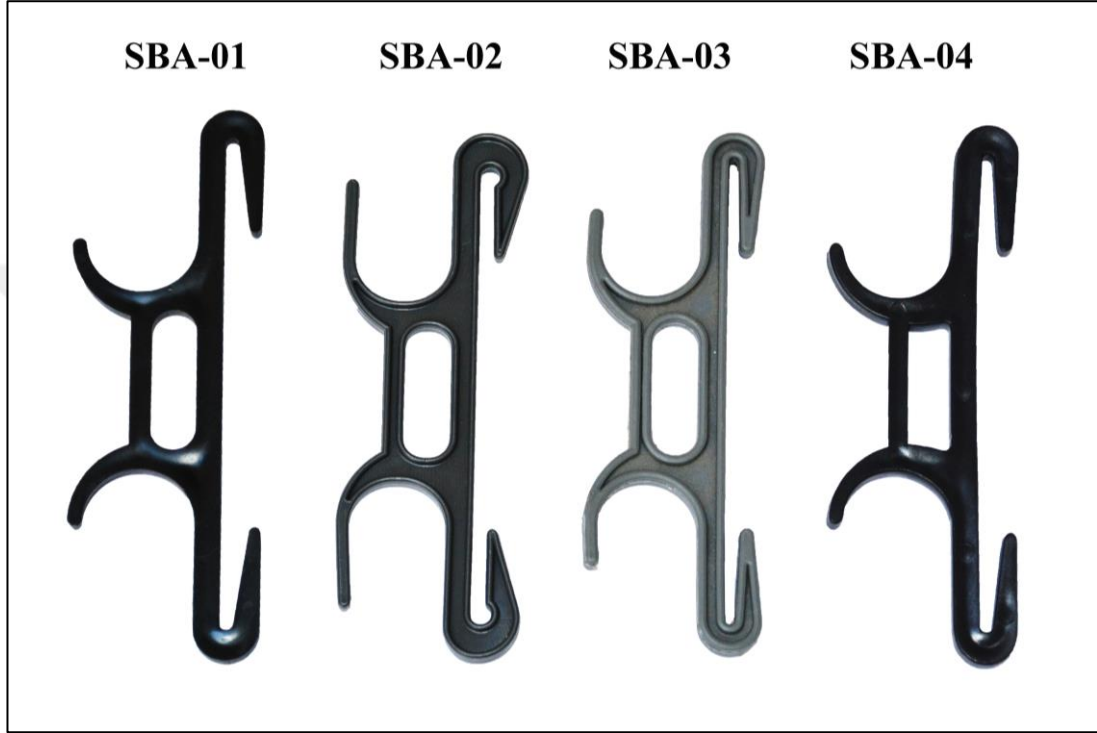
Gerçek koşullarda ipe ve dolayısıyla sera bitki askısına etkiyen maksimum yükün hesaplanması için örnek ürün olarak domates bitkisi seçilmiştir. Buna göre domates üretimi esnasında sera bitki askısına etkiyen yükler domates meyvesi ağırlıkları ve bitki ağırlığı olacaktır. Meyve ve bitki ağırlıkları, üretilen çeşite göre değişmekle birlikte bu çalışma kapsamında, yapılan araştırmalar ve literatür incelemeleri sonucunda rastlanan maksimum meyve ve bitki ağırlıkları baz alınmıştır. Elde edilen bulgulara göre tane meyve ağırlığı yaklaşık 250 g, yaş bitki ağırlığı ise yaklaşık 1800 g civarındadır. Her salkımda 8 meyve olduğu ve ilk 3 salkımın olgunlaşma durumundaki ağırlığı göz önüne alınarak toplam ağırlık hesaplanmıştır (Altundaş 2016; Çolpan 2011; rijkszwaan.com; altintohumculuk.com). Buna göre sera bitki askısına etkiyen toplam kuvvet yaklaşık 7800 g olarak hesaplanmıştır. Ancak yapılan araştırmalarda rastlanılamayan ve meyve ağırlığı daha fazla çeşitlerin olabilme ihtimaline karşı sera bitki askısına etkiyen toplam yük 10 kg olarak kabul edilmiştir.

Tez çalışmasında örnek uygulama için kullanılacak olan plastik malzeme esaslı sera bitki askısı ve kullanımına dair bir örnek Şekil 4.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Örnek sera askısı ve kullanımı

Yapılan örnek uygulama için dört farklı tasarıma sahip plastik malzeme esaslı sera bitki askısı ele alınmıştır. Ele alınan bu sera bitki askılarının kullanım amaçları aynı olup sadece mevcut tasarımlarında farklılıklar bulunmaktadır. Örnek uygulama kapsamında kullanılacak olan farklı tasarımlara sahip elemanlar SBA-01, SBA-02, SBA-03 ve SBA-04 olarak kodlanmış ve Şekil 4.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Tez çalışmasında incelenen SBA’lar (SBA-01, SBA-02, SBA-03, SBA-04)

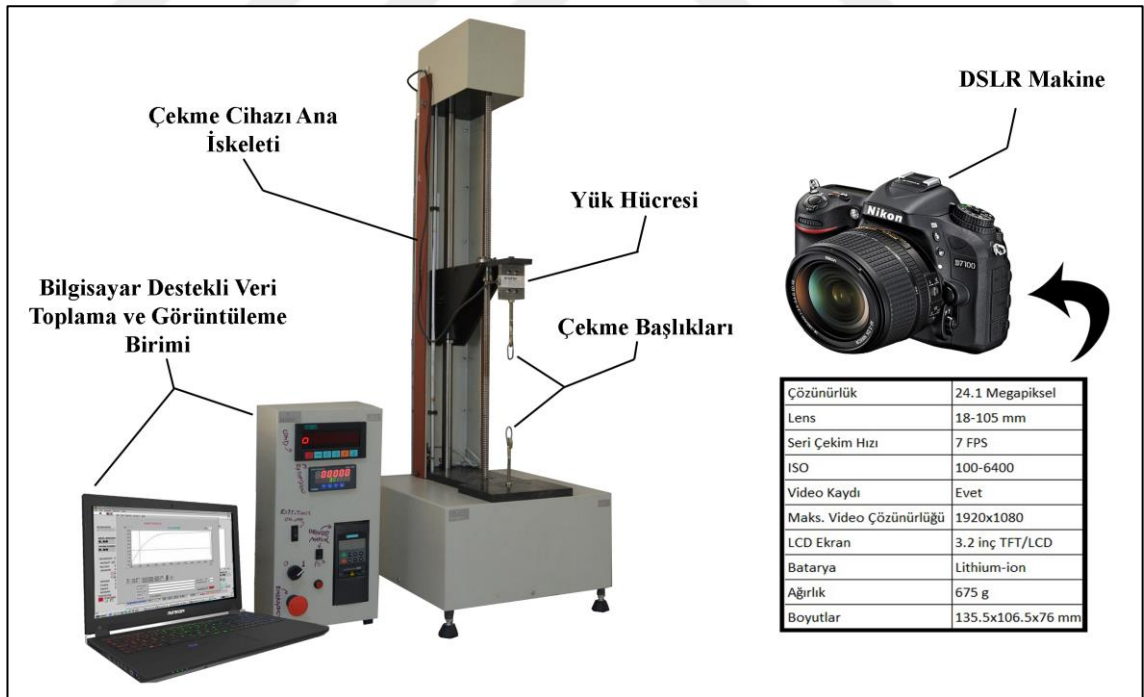
4.2.2. Mukavemete dayalı tasarım incelemesi

4.2.2.1. Çekme deneyi

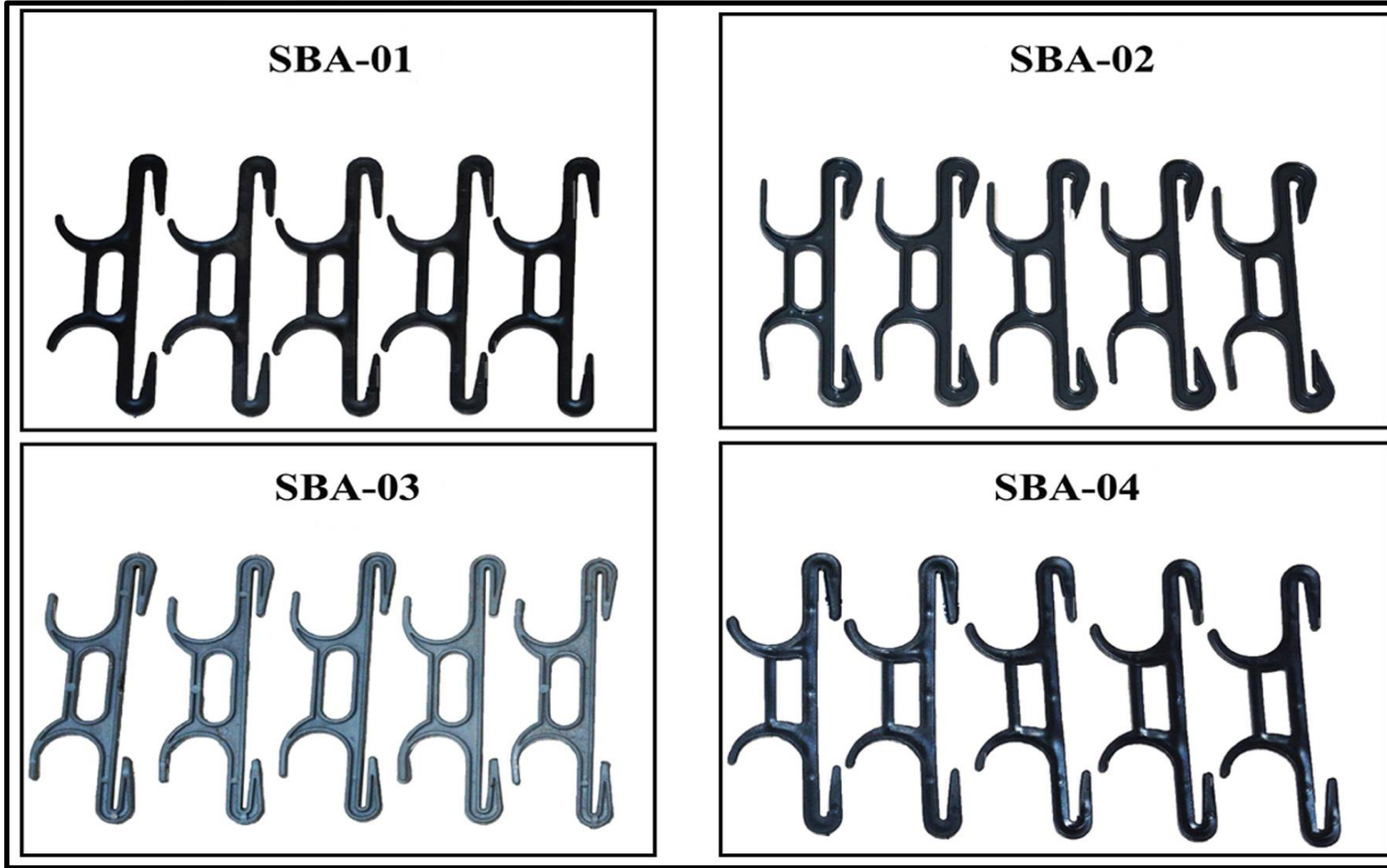
Çekme deneyi, elemanlara ait deformasyon davranışının gözlemlenmesi ve malzemenin bazı mekanik özellikleri ve karakteri hakkında bilgiler edinilmesini sağlamak için oldukça yaygın kullanılan bir deney yöntemidir. Çalışma kapsamında yapılan bu deneyin amacı, elemanların statik yük altında elastik ve plastik davranışlarını gözlemlmek, yükleme koşullarında elemanların taşıyabildiği maksimum kuvveti belirlemek, elemanlara ait malzemelerin bazı mekanik özelliklerini belirlemek ve elemanların farklı yüklenme koşullarındaki deformasyon davranışını gözlemleyerek optimizasyon öngörüsü için bilgiler edinmektir.

Çekme deneyleri, Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Tasarım ve Ölçme Laboratuvarı'nda bulunan MARES markalı çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak çekme testi esnasında SBA elemanlarında oluşan deformasyonların simülasyon çıktıları ile kıyaslanması amacıyla çekilen görseller, Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Tasarım ve Ölçme Laboratuvarı'nda bulunan Nikon D7100 marka ve modeli DSLR makine ile gerçekleştirilmiştir. MARES markalı ve 2000 N kapasiteli çekme test cihazı ile görseller için kullanılan Nikon markalı DSLR makine ve makineye ait teknik özellikler Şekil 4.7' de gösterilmiştir.

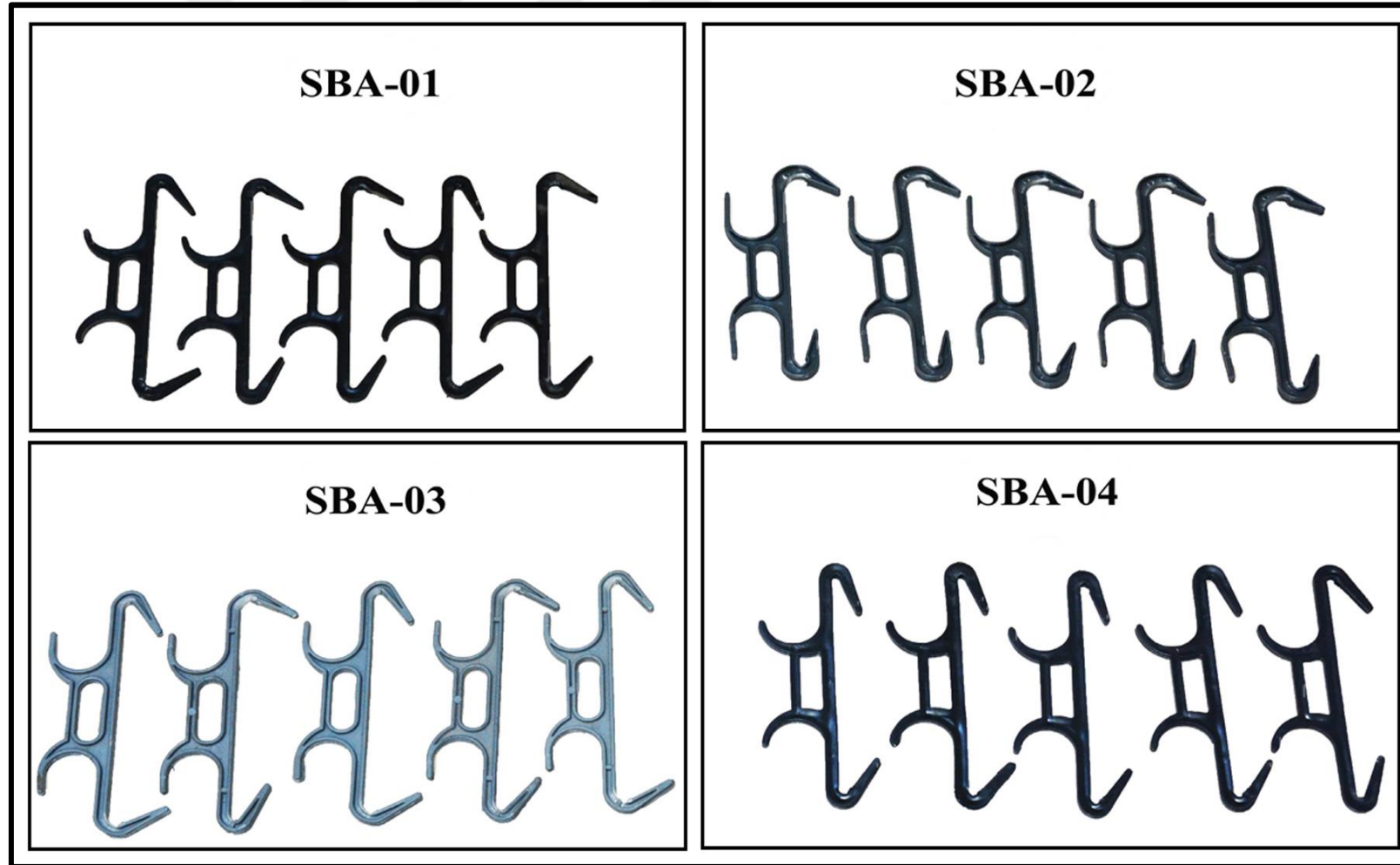
Çekme deneyi, sera bitki askılarının kabul edilen kuvvet etki noktalarına göre kurgulanmıştır. Her bir tasarımdan beş farklı numune kullanılmak üzere toplamda yirmi adet çekme deneyi gerçekleştirilmiş ve testler tamamlanmıştır. Çekme deneyi öncesi numuneler Şekil 4.8' de, deney sonrası numuneler Şekil 4.9' da ve deney esnasından bir görsel Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Ayrıca bitkisel üretimde kullanılan ve bitkinin SBA'ya bağlanmasını sağlayan, 1 mm ve 2.5 mm olmak üzere iki farklı kalınlığa sahip ip, çekme testine dahil edilmiş ve iplerin kuvvet altındaki maksimum dayanımları incelenmiştir. Her bir kalınlıktaki ip için beş farklı tekerrür gerçekleştirilmiş. Testlere dahil edilen ipler ve çekme testi anından bir görsel Şekil 4.11' de verilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme Test Cihazı ve DSLR makine



şekil 4.8. Çekme deneyi öncesi numuneler



şekil 4.9. Çekme deneyi sonrası numuneler



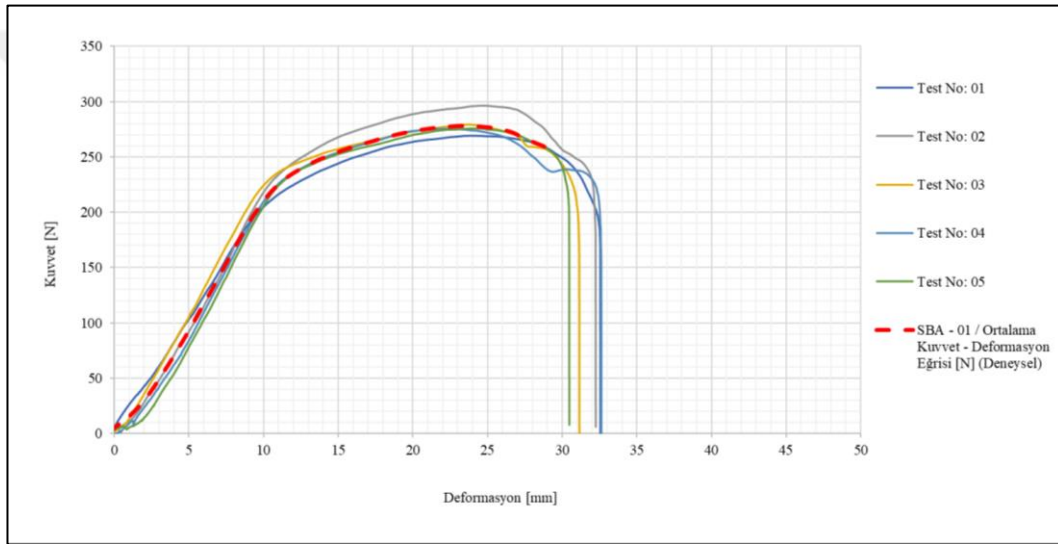
Şekil 4.10. SBA çekme deneyinden bir görsel



Şekil 4.11. Bitkisel üretim ipleri ve çekme deneyinden bir görsel

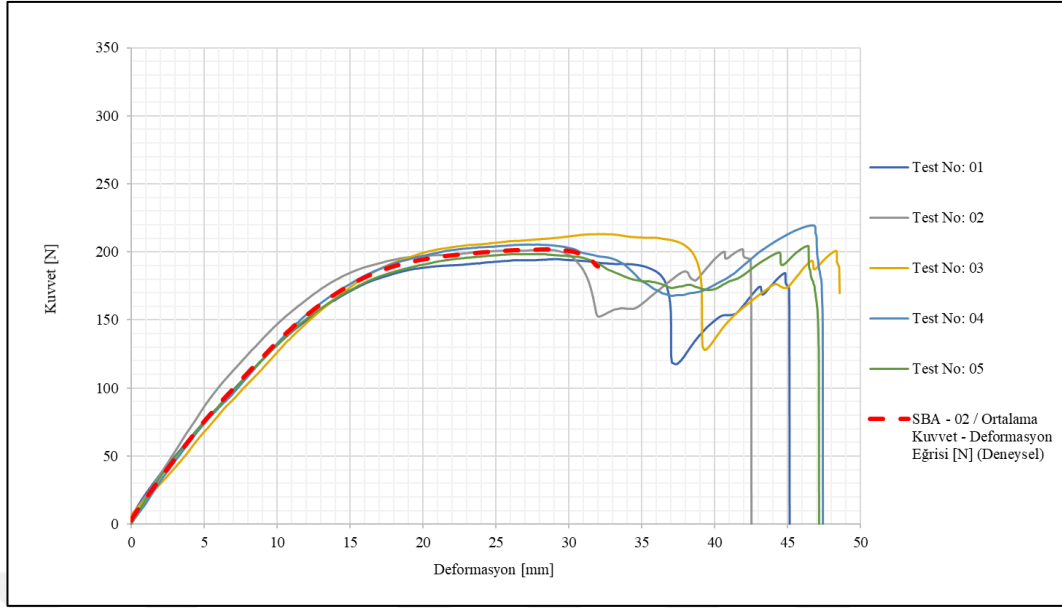
Yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen veriler ile numunelere ait Kuvvet-Deformasyon diyagramları oluşturulmuştur. Her tasarıma ait beş farklı tekerrür için oluşturulan kuvvet-deformasyon eğrileri ve bu eğrilerin ortalaması SBA-01, SBA-02, SBA-03 ve SBA-04 tasarımlarına göre aşağıda sırası ile verilmiştir. Ayrıca bitkisel üretimde kullanılan ve bitkilerin SBA'ya asılmasını sağlayan iki farklı kalınlıktaki ipin kuvvet-deformasyon eğrileri ve bu eğrilerin ortalaması sunulmuştur.

SBA-01 için elde edilen kuvvet-deformasyon diyagramı Şekil 4.12' de gösterilmiştir. Tasarıma ait beş farklı çekme testinin ortalama eğrisi incelendiğinde maksimum kuvvet 278.17 N ve maksimum kuvvetteki deformasyon değeri ise 23.58 mm olarak gözlemlenmiştir.



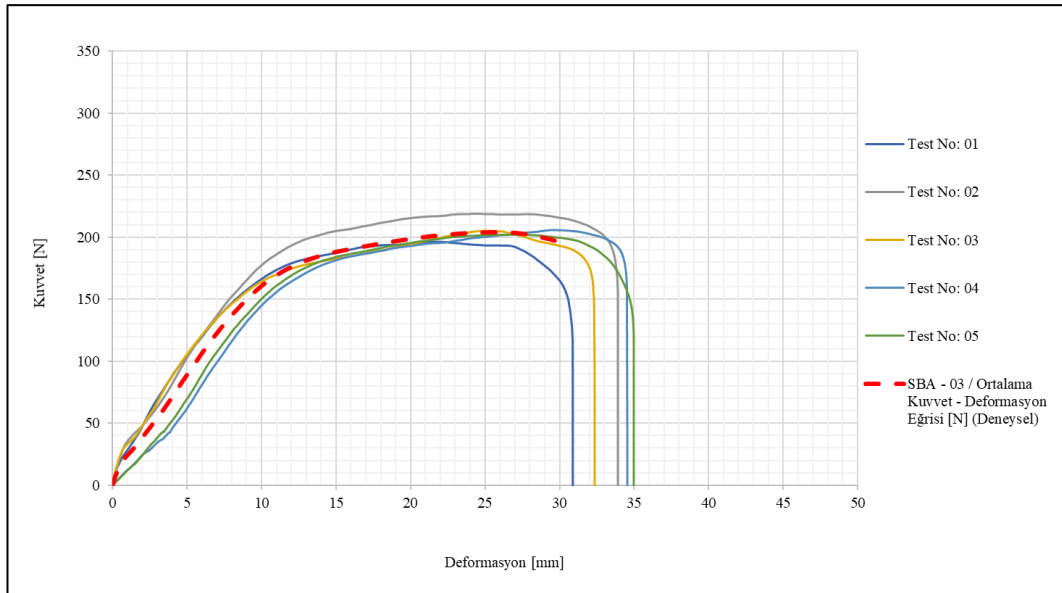
Şekil 4.12. SBA-01 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği

SBA-02 için elde edilen kuvvet-deformasyon diyagramı Şekil 4.13' te gösterilmiştir. Tasarıma ait beş farklı çekme testinin ortalama eğrisi incelendiğinde maksimum kuvvet 201.93 N ve maksimum kuvvetteki deformasyon değeri ise 28.48 mm olarak gözlemlenmiştir.



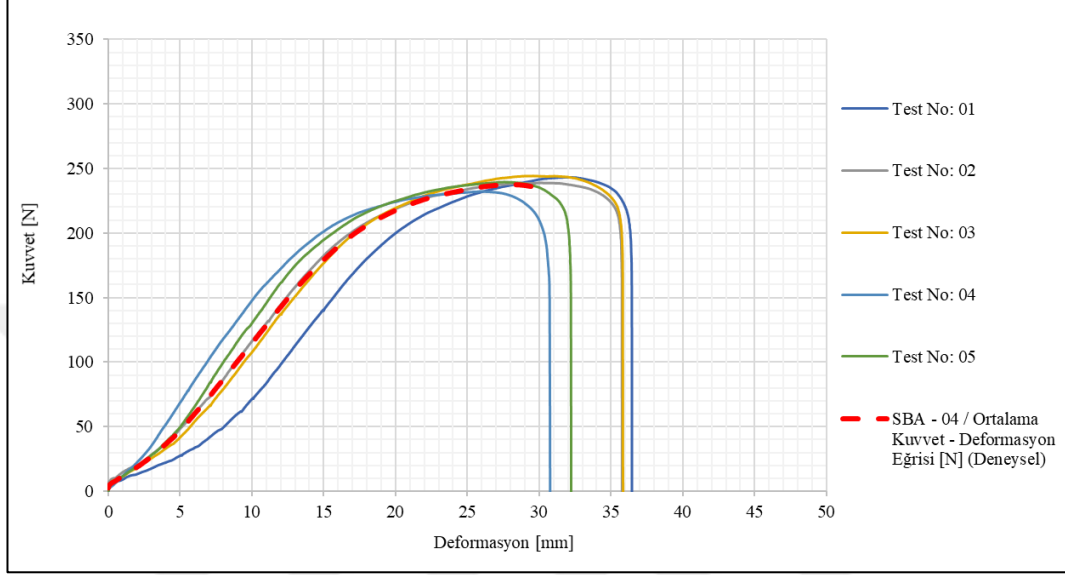
Şekil 4.13. SBA-02 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği

SBA-03 için elde edilen kuvvet-deformasyon diyagramı Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Tasarıma ait beş farklı çekme testinin ortalama eğrisi incelendiğinde maksimum kuvvet 203.98 N ve maksimum kuvvetteki deformasyon değeri ise 25.80 mm olarak gözlemlenmiştir.



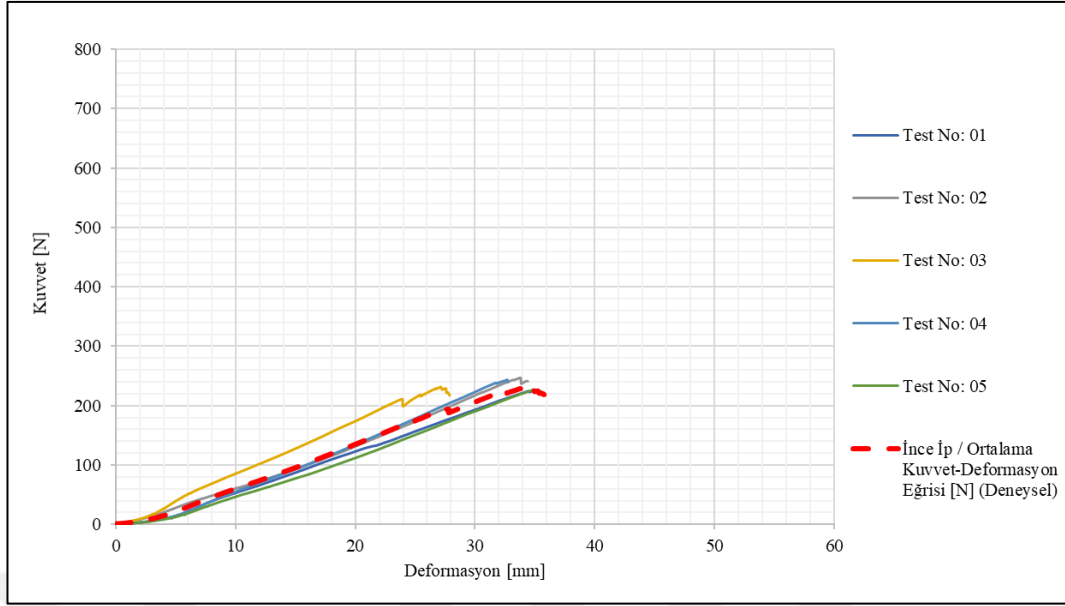
Şekil 4.14. SBA-03 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği

SBA-04 için elde edilen kuvvet-deformasyon diyagramı Şekil 4.15’te gösterilmiştir. Tasarıma ait beş farklı çekme testinin ortalama eğrisi incelendiğinde maksimum kuvvet 237.50 N ve maksimum kuvvetteki deformasyon değeri ise 27.91 mm olarak gözlemlenmiştir.



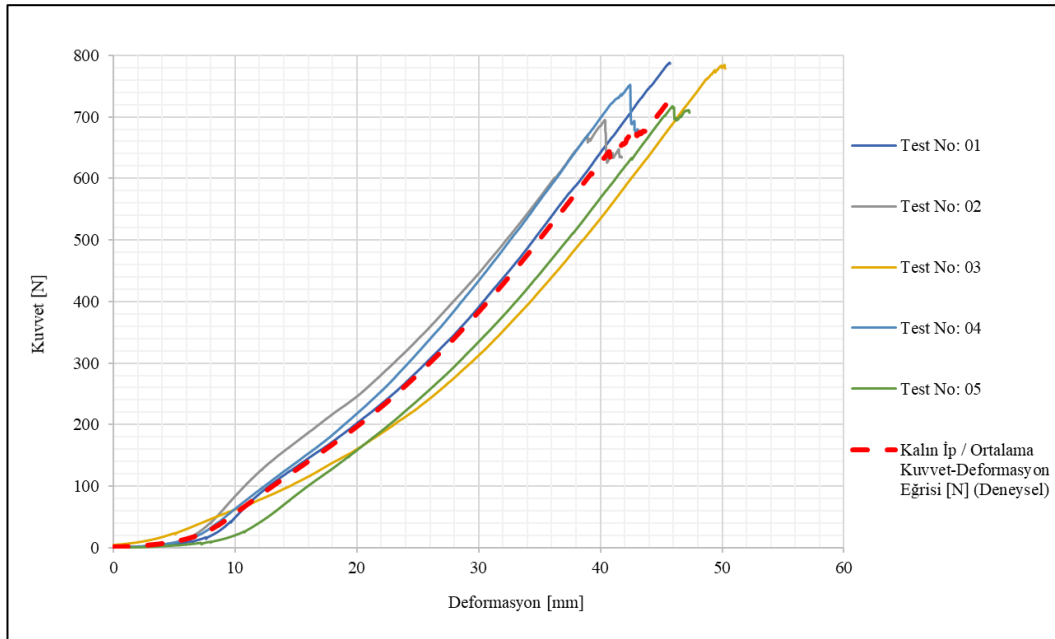
Şekil 4.15. SBA-04 çekme testi kuvvet-deformasyon grafiğı

İp (1 mm) için elde edilen kuvvet-deformasyon diyagramı Şekil 4.16’da gösterilmiştir. İpe ait beş farklı çekme testinin ortalama eğrisi incelendiğinde maksimum kuvvet 229.75 N ve maksimum kuvvetteki deformasyon değeri ise 34.39 mm olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. İp (1 mm) çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği

İp (2.5 mm) için elde edilen kuvvet-deformasyon diyagramı Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. İpe ait beş farklı çekme testinin ortalama eğrisi incelendiğinde maksimum kuvvet 721.95 N ve maksimum kuvvetteki deformasyon değeri ise 45.92 mm olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17. İp (2.5 mm) çekme testi kuvvet-deformasyon grafiği

4.2.2.2. Sertlik ölçümü

Sertlik, izafi bir ölçü olup, yalın bir tabirle malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Malzemelere kolay bir şekilde uygulanabilirliği ve sertlik değerlerinin, malzemenin diğer mekanik özellikleri hakkında bilgiler vermesinden dolayı oldukça önemli ve sıkça kullanılan bir yöntemdir (Köksal 2016). Bu çalışmada ele alınan SBA'ların sertlikleri ölçülerek, dört farklı elemana ait sertlik değerleri belirlenmiştir. SBA elemanlarının üretiminde kullanılan malzemeler, atık plastiklerin geri dönüşümüyle elde edilmekte ve standart malzeme özellikleri bulunmamaktadır. Bu yüzden çalışma kapsamında elemanlara ait malzeme özelliklerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Elde edilen sertlik değerleri, elemanlara ait bazı malzeme özelliklerinin tahminlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan sertlik ölçümleri, Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Tasarım ve Ölçme Laboratuvarı'nda bulunan ve seçilen plastik malzemelere uygun olan Shore D Durometer sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmış ve uygulamada ele alınan sera bitki askılarının sertlikleri belirlenmiştir. Sertlik ölçümlerinde, her bir tasarıma ait sera bitki askısından beş farklı ürün kullanılmış ve her ürünün beş farklı yerinden ölçüm yapılmıştır. Kullanılan sertlik ölçüm cihazı Şekil 4.18' de gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen sertlik ölçüm verilerinin ortalama değerleri ve standart sapmaları Çizelge 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.18. Shore D Durometer sertlik test cihazı

Çizelge 4.1. SBA tasarımları Shore D sertlik ölçüm değerleri

Parametre	SBA-01	SBA-02	SBA-03	SBA-04
Ortalama Sertlik (Shore D)	68.46 ±0.46	57.54 ±2.11	66.92 ±1.48	62.82 ±1.17

4.2.2.3. Kütle ölçümü

Çalışma kapsamında malzemelerin yoğunluk gibi fiziksel özelliklerini belirlemek ve yapılacak simülasyon çalışmalarında malzeme tanımlaması yapılırken kullanmak için SBA elemanlarının kütleleri ölçülmüştür. Belirlenen dört farklı tasarıma sahip SBA elemanlarının kütle ölçümleri, Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Bölümü, Tasarım ve Ölçme Laboratuvarı'nda bulunan $\pm 0.001\text{g}$ hassasiyete sahip dijital terazide gerçekleştirilmiştir.

Kütle ölçümlerinde her tasarıma ait on farklı örnek üzerinden ölçüm yapılmış ve elde edilen verilerin ortalamaları alınarak SBA-01, SBA-02, SBA-03 ve SBA-04 elemanlarının kütleleri belirlenmiştir. Ayrıca elemanlara ait CAD modeller üzerinden SolidWorks yazılımı aracılığı ile hacimleri elde edilmiş ve yoğunlukları hesaplanmıştır. Söz konusu verileri içeren tablo, Çizelge 4.2' de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. SBA tasarımları kütle, hacim ve yoğunluk değerleri

Parametre	SBA-01	SBA-02	SBA-03	SBA-04
Ortalama Kütle [g]	7.14 ± 0.08	7.34 ± 0.09	7.81 ± 0.07	7.72 ± 0.03
Hacim [mm^3]	8258.43	7790.59	8200.07	8393.70
Yoğunluk [kg/m^3]	865.01	941.86	952.96	920.33

4.2.2.4. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Tez çalışmasında ele alınan plastik bazlı elemanları üretmek için kullanılan malzemeler atık plastiklerin geri dönüşümleriyle elde edilen polipropilen esaslı malzemelerdir. Bu malzemelerin malzeme özellikleri birbiri arasında tutarsız ve değişkenlik gösterebilmektedir. Bu sebepten dolayı yapılacak simülasyon çalışmalarında tanımlanması ve elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için malzeme tahminlemesi yapılmıştır. Tahminlemede elastisite modülü, akma noktası gibi bazı malzeme özelliklerinin belirlenmesi için ölçülen sertlik değerleri kullanılmıştır. Ayrıca elemanların kütle ve hacimleri ölçülerek yoğunlukları elde edilmiş ve diğer malzeme özellikleri belirlenmiştir.

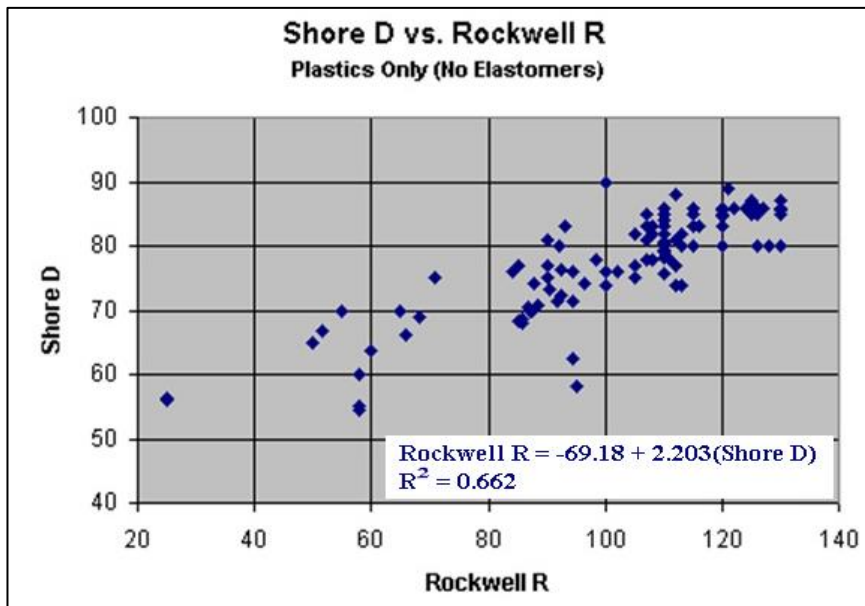
Sertlik, malzemenin kalıcı şekil değiştirmeye karşı bir ölçütüdür ve malzemenin elastisite modülü, akma dayanımı gibi bazı mekanik özellikleri ile ilişkilidir (Aran 2007; Aköz ve Yüzer 2009; Qi vd. 2003; Köksal 2016). Bu sebeple aşağıdaki eşitlik kullanılarak Shore D sertlik değerleri ile SBA elemanlarında kullanılan malzemenin elastisite modülleri belirlenmiştir (Qi vd. 2003; ASTM D2240).

$$S_D = 100 - \frac{20(-78.188 + \sqrt{6113.36 + 781.88E})}{E}$$

Eşitlikte S_D malzemeye ait Shore D sertlik değeri ve E [MPa] elastisite modülünü temsil etmektedir.

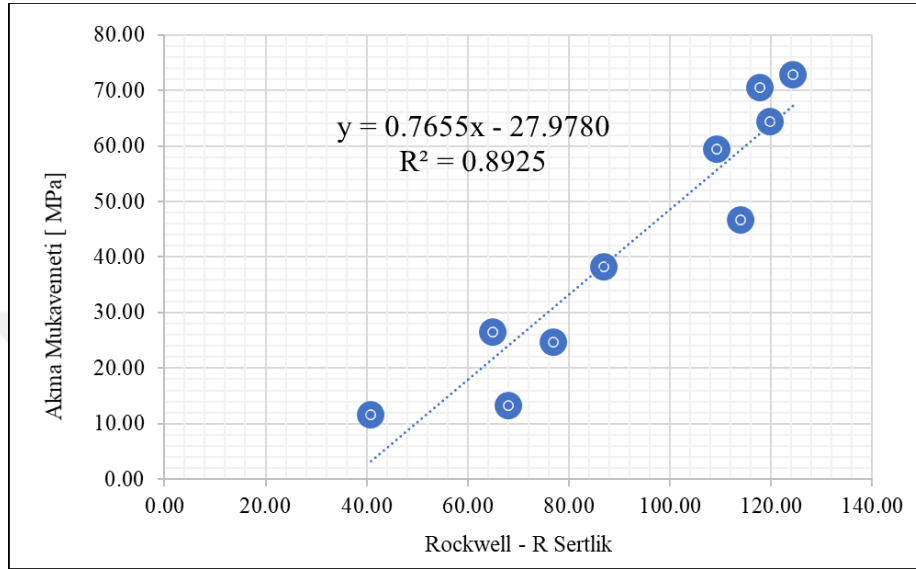
Belirlenen elastisite modüllerinin ardından çekme testinden elde edilen kuvvet-deformasyon eğrileri gözetilerek ön analizler gerçekleştirilmiş ve bu çalışmaya özgü plastik bölge parametresi olan tanjant modülü, elastisite modülünün 1/20 si olarak kabul edilmiştir.

Ayrıca yapılan araştırmalarda Rockwell R sertlik değeri kullanılarak plastik malzemelere ait akma noktası hakkında bilgiler edinilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (polymerdatabase.com). Çalışma kapsamında sertlik ölçümü için Shore D Durometer kullanılmış ve Rockwell R dönüşümü için Şekil 4.19’da verilen Shore D - Rockwell R dönüşüm diyagramından yararlanılmıştır (matweb.com). Verilen diyagramda iki farklı sertlik ölçüm yönteminin arasındaki dönüşüm korelasyonu %66.2 olarak belirlenmiştir (onlineconversion.vbulletin.net). Elde edilen Rockwell R sertlik değerleri değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 4.19. Shore D - Rockwell R sertlik dönüşüm diyagramı

Elde edilen Rockwell R sertlik değerleri kullanılarak Şekil 4.20’ de verilen diyagram aracılığı ile SBA tasarımlarında kullanılan malzemelere ait akma mukavemeti değerleri belirlenmiştir (polymerdatabase.com). Diyagramda Rockwell R sertlik değeri ile akma mukavemeti arasındaki korelasyon %89.25’tir.



Şekil 4.20. Rockwell R - Akma mukavemeti diyagramı

Çalışmada ele alınan SBA tasarımlarına ait malzeme özellikleri, yapılan test, ölçüm ve hesaplamalar sonucunda elde edilmiş ve Çizelge 4.3’ te gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. SBA malzeme özellikleri (Bi-lineer elastoplastik malzeme modeli)

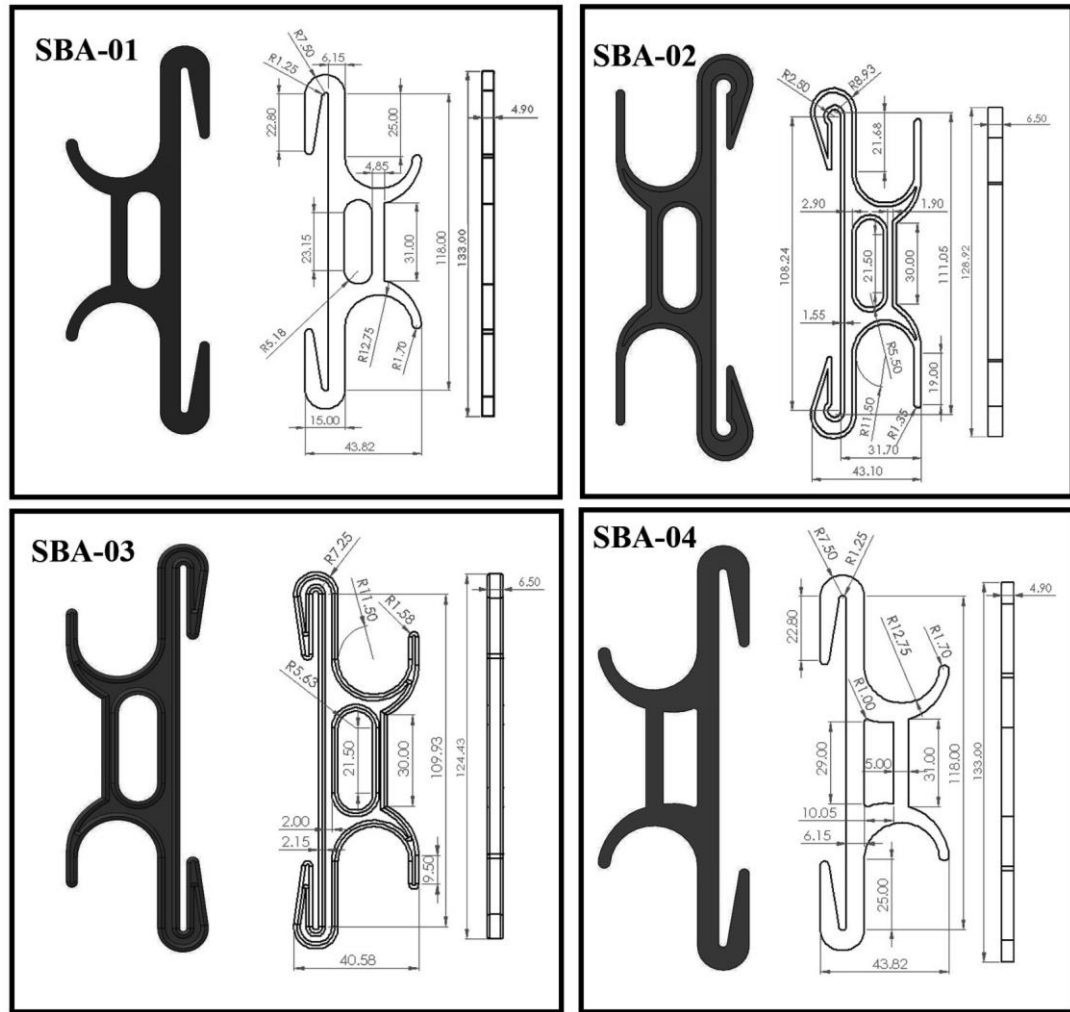
Model	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Akma Noktası (MPa)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg / m ³)	Shore - D (-)	Rockwell - R (-)
SBA-01	215.30	10.77	34.52	0.42	865.01	68.46	81.64
SBA-02	102.00	5.10	16.10	0.42	941.86	57.54	57.58
SBA-03	206.40	10.32	31.92	0.42	952.96	66.92	78.24
SBA-04	142.10	7.11	25.00	0.42	920.33	62.82	69.21

*Çalışma kapsamında poisson oranı 0.42 olarak kabul edilmiştir (Azeez ve Mohammed 2018)

4.2.2.5. Tersine mühendislik - CAD süreci

Belirlenen dört farklı tasarıma ait sera bitki askısı, tersine mühendislik yaklaşımı ile ele alınmış ve üç boyutlu (3D) katı modellerin oluşturulmasında, SolidWorks 3D parametrik katı modelleme yazılımı kullanılmıştır. SolidWorks yazılımı, Dassault Systemes SolidWorks Crop. tarafından 1990'lı yıllarda geliştirilmiş ve Türkiye ölçeğinde, makine tasarımı ve imalat sanayiinde en yaygın kullanılan yazılımlardan biridir (Çelik 2013).

SBA örnekleri için katı modelleme süreci, tersine mühendislik yaklaşımı ile ele alınmış ve plastik esaslı elemanlara ait geometrik ölçüler ± 0.01 mm hassasiyete sahip kumpas kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen ölçüler SolidWorks yazılımına tanımlanarak elemanların katı modelleri elde edilmiştir. Elemanlara ait katı model görselleri ve geometrik ölçülerini gösteren teknik resimler Şekil 4.21' de verilmiştir.



Şekil 4.21. SBA katı model ve geometrik ölçüleri

4.2.2.6. SBA sonlu elemanlar analizi süreci

Üzerinde çalışılacak olan herhangi bir makinenin ve/veya elemanın gerçek çalışma koşullarının veya bu makine ve/veya elemana fiziksel olarak etkiyen yüklerin dağılımlarının bilinmesi, tasarım ve iyileştirme süreçlerinde başarıya ulaşmak için oldukça önemli bir faktördür. Ayrıca sonlu elemanlar analizi sürecinde elde edilen görsel çıktılar ve sayısal veriler sayesinde herhangi bir tasarım üzerinde yapısal optimizasyon öngörüsü hakkında faydalı değerlendirmeler yapılabilmektedir.

Yapılan bu analizin temel amacı, deneysel olarak elde edilen görsel çıktı ve sayısal sonuçlarının, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak yapılan analizlerin doğrulanmasıdır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, tasarım iyileştirme/yapısal optimizasyonun uygulanabilirliğine dair karar mekanizması konumundadır. Buna ek olarak çalışmada belirlenen malzeme özelliklerinin ne derecede geçerli olduğu da test edilebilmektedir.

SBA için uygulanan sonlu elemanlar analizi, ticari sonlu elemanlar kodu ANSYS Workbench ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS Workbench, ANSYS Inc. tarafından geliştirilen, genel olarak mühendislik çalışmalarında analiz ve simülasyonların yapıldığı multidisipliner bir mühendislik simülasyon yazılımıdır.

Bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi uygulamaları analiz yapılan ürünün boyutlarına ve özellikle analizde kullanılan ve sonlu sayıda elemanlara bölme işlemine bağlı olarak oldukça güçlü çözücülere ihtiyaç duyabilmektedir. Söz konusu analizler için güçlü iş istasyonlarının kullanılması, zaman kaybının en aza indirilmesine ve daha doğru sonuçlara ulaşılmasına olanak sağlamaktadır. Tez çalışması kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizi uygulaması için Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Tasarım ve Ölçme Laboratuvarı'nda bulunan Monster Markut M5 V5.1.1 marka ve modeli iş istasyonu kullanılmıştır (Intel i7-7700HQ işlemci, 32 GB ram, 6 GB Nvidia Quadro P3000 ekran kartı). Kullanılan iş istasyonu Şekil 4.22' de gösterilmiştir.

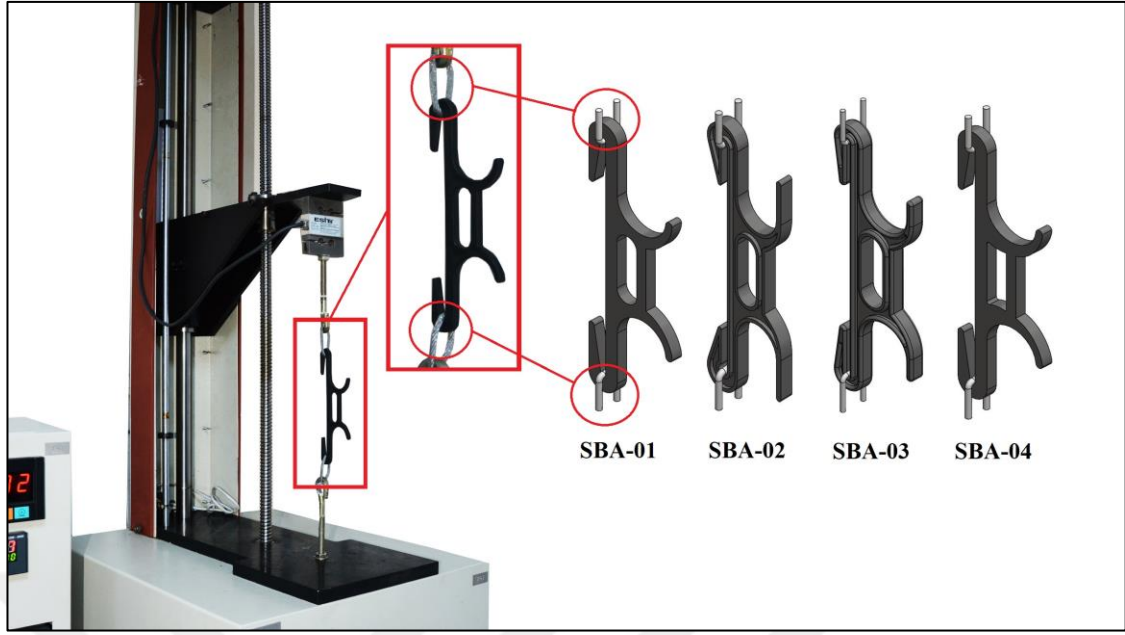


Şekil 4.22. Monster Markut M5 V5.1.1 marka ve modeli iş istasyonu

SBA için uygulanan sonlu elemanlar analizi sürecinde, standart sonlu elemanlar uygulama adımları takip edilmiştir. Bu adımlar ve adımlarda kullanılan koşul ve parametreler aşağıda sırası ile verilmiştir.

SBA sonlu elemanlar analizi için CAD modeli

İlk olarak SBA için hazırlanan CAD modeller, sonlu elemanlar analizi uygulamasına uygun olarak tekrar düzenlenmiş, CAD modellere çekme testlerindeki bağlantı noktalarında bulunan çelik teli ve gerçek kullanım koşullarında sera tavan telini en iyi derecede temsil edebilmesi için metal malzemeden tel modellenerek eklemeler yapılmıştır. Yapılan eklemelerde, tez kapsamında ele alınan elemanların orijinal geometrisi korunmuş ve analiz sürecinde elemanlara etkiyecek olan yük noktalarının, çekme deneylerini en iyi şekilde tarif edebilmeleri için benzetimler yapılmıştır. Yapılan bu eklemeler Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Ardından CAD modeller, SolidWorks yazılımından ANSYS Workbench yazılımına aktarılmış ve analizin ilk adımı tamamlanmıştır.



Şekil 4.23. SBA sonlu elemanlar analizi için CAD modeli düzenlemeleri

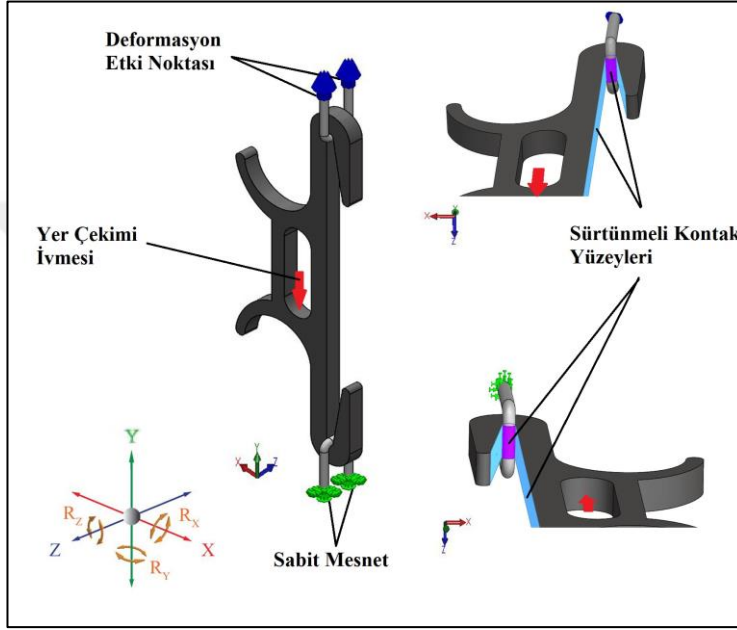
SBA sonlu elemanlar analizi için malzeme özelliklerinin tanımlanması

Tez kapsamında uygulamaya konulan SBA'ların deneysel yöntemlerle tahminlemesi yapılan malzeme özellikleri sonlu elemanlar analizi yapılacak programa (ANSYS Workbench) tanımlanmıştır. Doğrulama analizlerinde gerçek çalışma koşullarına daha iyi yaklaşılması amacıyla bi-lineer elasto-plastik malzeme modeli kabulü yapılmıştır. Böylelikle tasarımların plastik deformasyon davranışlarının fiziksel testlerle karşılaştırılması daha iyi yapılabilmektedir. Malzeme modelinde fiziksel test sonuçları değerlendirilmiş ve tanjant modülü elastik modülünün 1/20'si alınmıştır. Tanımlanan malzeme özellikleri ilgili alanda Çizelge 4.3' te verilmiştir.

SBA sonlu elemanlar analizi için sınır koşulları

Sonlu elemanlar yöntemi analiz sonuçları ile deneysel çalışmadan elde edilen verilerin kıyaslanmasında diğer önemli bir husus ise sınır koşullarının programa tanıtılmasıdır. SBA sonlu elemanlar analizi için sınır koşulları, gerçek çalışma şartları ve çekme testleri esnasındaki fiziksel yükleme durumları göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. ANSYS Workbench yazılımı ile tanımlanan sınır koşulları Şekil 4.24' te verilen örnek tasarımda gösterilmiştir. SBA'nın alt kısmına eklenen tasarıma sabit mesnet uygulanmıştır. Tanımlanan sabit mesnet ile seçili yüzeylerdeki X, Y, Z düzlemlerindeki ve R_x , R_y , R_z eksenlerindeki tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır. Elemanlara 9.81 m s^{-2} yer çekimi ivmesi tanımlanmıştır. SBA'nın üst kısmına eklenen

tasarımdaki deformasyon etki noktalarına 15 mm deformasyon tanımlanmıştır. Analiz süresinin fazla uzamaması ve 15 mm deformasyonun kıyaslama ve optimizasyon öngörüsü için yeterli olacağı öngörülmüştür. Ayrıca alt ve üst kısma eklenen tasarımlar ile SBA arasına birbirleri üzerinde kayar hareket edebilmeleri amacı ile sürtünmeli kontak tanımlanmış ve sürtünme katsayısı 0.3 verilmiştir (Moore ve Turner 2001). Tanımlanan bu sınır koşulları, dört farklı tasarıma ait SBA'lar için eşdeğer şekilde uygulanmıştır.



Şekil 4.24. SBA sonlu elemanlar analizi sınır koşulları

SBA sonlu elemanlar analizi için sonlu eleman modelinin oluşturulması (Meshing)

Sonlu elemanlar analizi problemlerinin çözümlenmesinde en önemli aşamalardan bir tanesi sonlu eleman modelinin oluşturulması (meshing)'dir (Ovalı ve Esen 2017). Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılırken uygun eleman boyutları (mesh size) ve eleman tipi seçimi, analiz sonuçlarının doğruluğu açısından oldukça önemli bir faktördür. Seçilecek olan eleman tipi ve boyutları, analizi yapılmak istenen elemanın boyutlarına, geometrik yapısına ve çözüm yapılacak platformun özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında ele alınan SBA'ların analizleri için kullanılacak eleman boyutlarının belirlenmesinde Skewness değerlendirme kriteri kullanılmıştır. Skewness kriteri, en yaygın kullanılan ve geçerliliği yüksek bir eleman boyutu belirleme yöntemlerinden biridir ve aşağıda verilen formüle göre hesaplanmaktadır (Ovalı ve Esen 2017).

$$Skewness = \frac{Optimum\ Eleman\ Boyutu - Aktif\ Eleman\ Boyutu}{Optimum\ Eleman\ Boyutu}$$

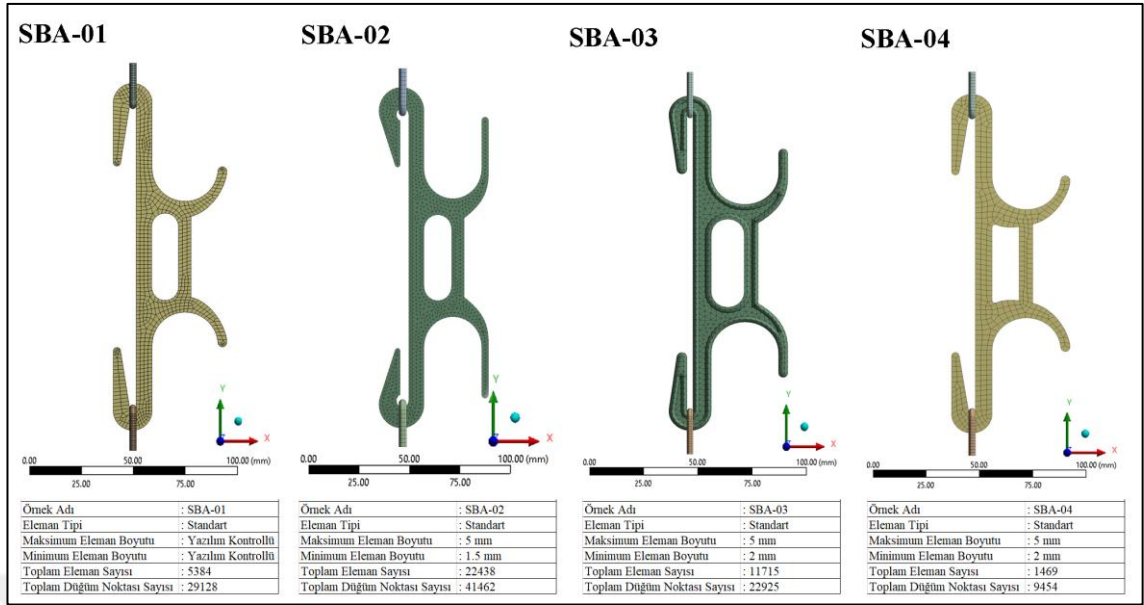
Bu formülde, başka bir ifade ile olması gereken eleman boyutu ile gerçek boyut arasındaki farka bakılarak değerlendirme yapılmaktadır. Formülden elde edilen sonuç;

- 0.98 – 1.00 aralığında ise, kabul edilemez bir mesh kalitesi;
- 0.95 – 0.97 aralığında ise, kötü bir mesh kalitesi;
- 0.80 – 0.94 aralığında ise kabul edilebilir bir mesh kalitesi;
- 0.50 – 0.80 aralığında ise iyi bir mesh kalitesi;
- 0.25 – 0.50 aralığında ise çok iyi bir mesh kalitesi;
- 0 – 0.25 aralığında ise mükemmel bir mesh kalitesi olarak kabul edilmektedir.

SBA tasarımları için belirlenen ve uygun olarak görülen eleman boyutlarının Skewness değerlendirme kriterine göre sonuçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- SBA-01 için Skewness değerlendirme kriteri sonucu 0.23 bulunmuştur.
- SBA-02 için Skewness değerlendirme kriteri sonucu 0.31 bulunmuştur.
- SBA-03 için Skewness değerlendirme kriteri sonucu 0.40 bulunmuştur.
- SBA-04 için Skewness değerlendirme kriteri sonucu 0.18 bulunmuştur.

Skewness değerlendirme kriteri göz önünde bulundurularak alınan sonuçlara göre, SBA-01 ve SBA-04 tasarımları için belirlenen eleman boyutu “mükemmel bir eleman kalitesi”, SBA-02 ve SBA-03 tasarımları için ise “çok iyi bir eleman kalitesi” aralığındadır. SBA tasarımlarına farklı eleman boyutlarının girilmesinin sebebi, analizlerin nonlinear yapılması ve plastisite malzeme modelinin kullanılmasıdır. Buna göre SBA’ların sonlu eleman modeli oluşturulmuş şekilde görselleri ve oluşturulan sonlu eleman modeli özellikleri Şekil 4.25’ te gösterilmiştir.

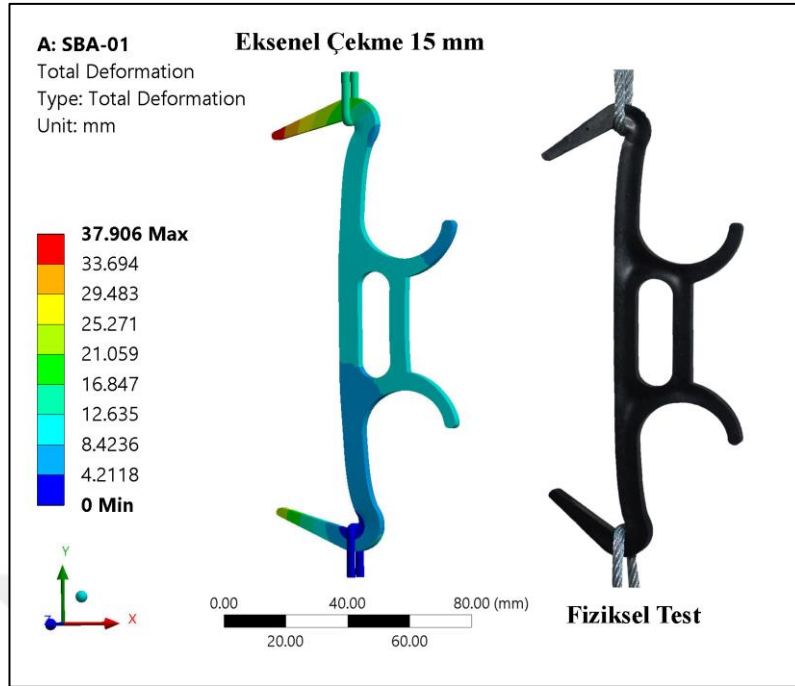


Şekil 4.25. SBA sonlu elemanlar modeli ve özellikleri

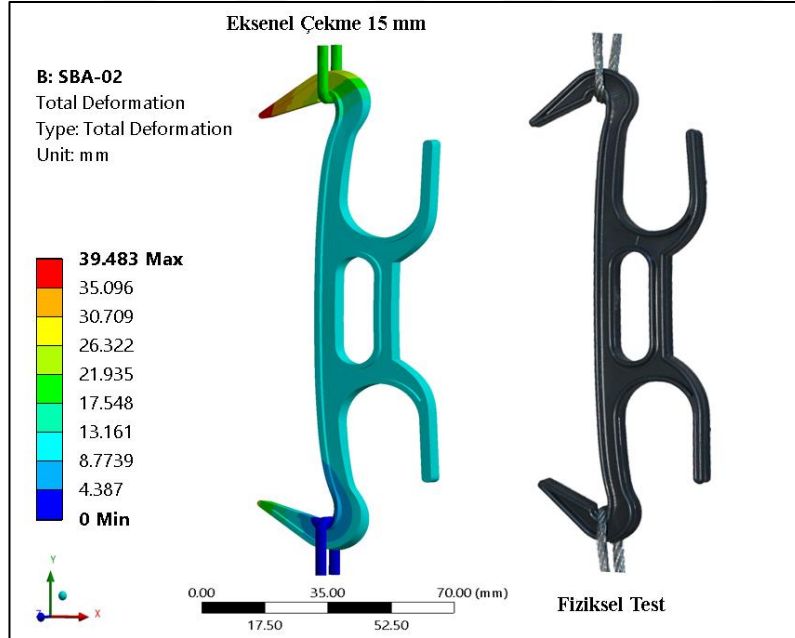
SBA sonlu elemanlar analizi çözüm işlemi

Sonlu elemanlar analizi uygulama adımlarının tamamlanmasının ardından kurgulanan senaryo için çözümler gerçekleştirilmiş, görsel ve sayısal veriler elde edilmiştir.

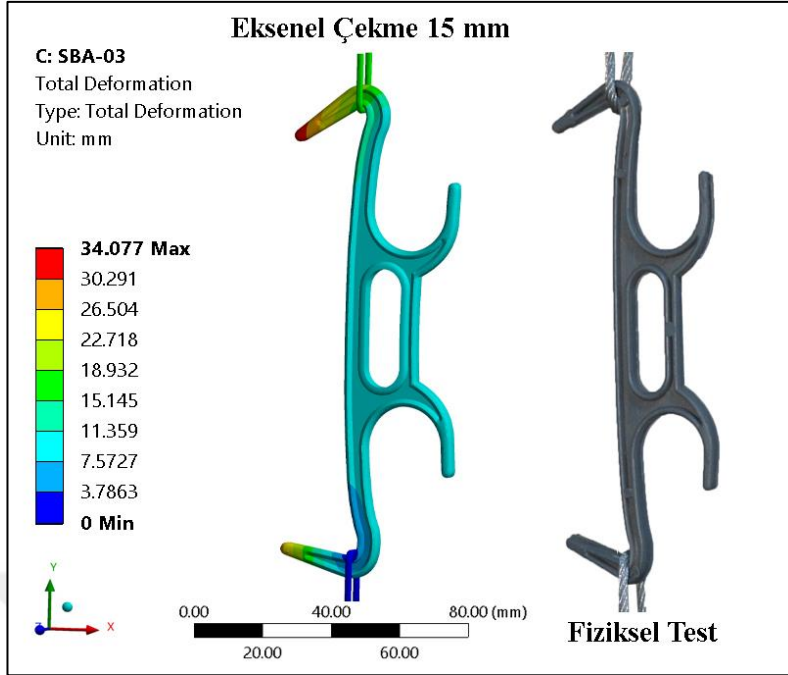
Herhangi bir elemanın sonlu elemanlar analiziyle elde edilen görsel ve sayısal verileri sayesinde, elemanın fiziksel yüklenme koşullarındaki deformasyon davranışının incelenmesi, uğradığı deformasyon miktarının gözlemlenmesi, sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmaların karşılaştırılarak yapılan test ve analizlerin doğrulanması, optimizasyon ve/veya yapılabilecek tasarım değişiklikleri hakkında fikirler edinilmesi gibi konular hakkında önemli çıktılar elde edilebilmektedir. Yapılan bu simülasyon çalışmasında, kurgulanan yükleme durumları ve sınır şartları sonucunda, 15 mm çekme etkisi altında elde edilen toplam deformasyon (total deformation) çıktıları ve çekme testlerinden elde edilen 15 mm anındaki deformasyon görüntüleri karşılaştırılmış ve SBA tasarımlarına göre sırası ile Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da sunulmuştur.



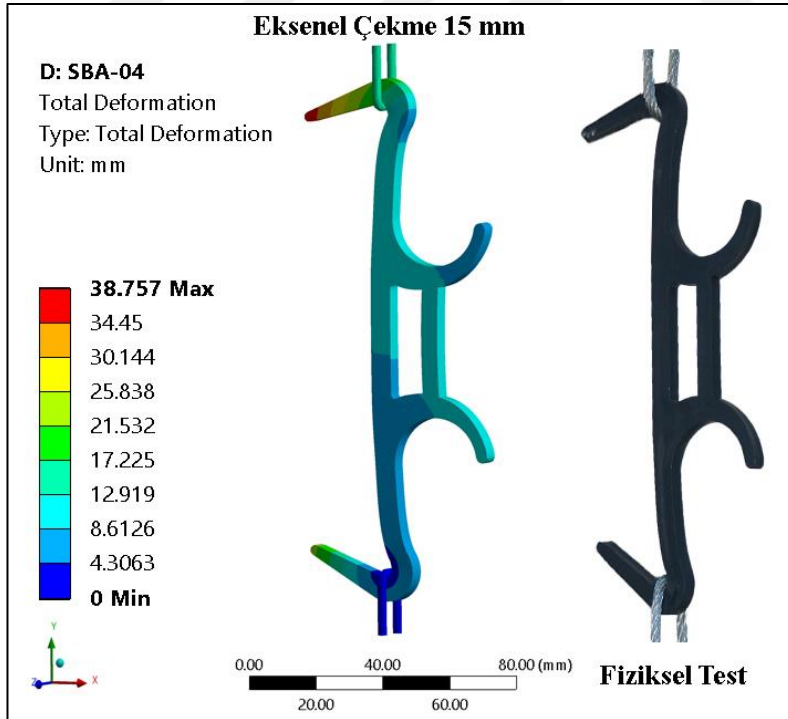
Şekil 4.26. SBA-01 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları



Şekil 4.27. SBA-02 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları



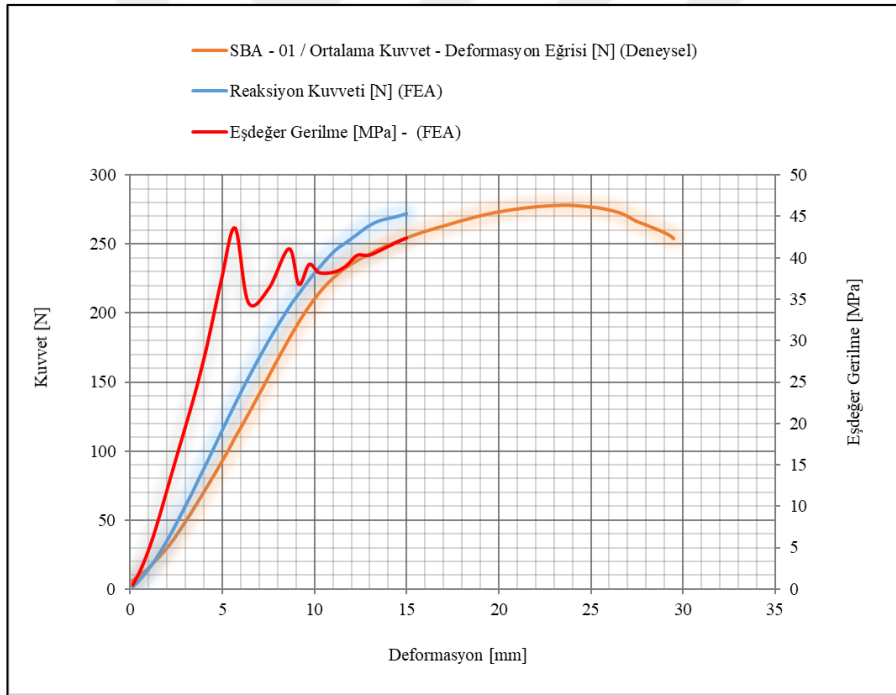
Şekil 4.28. SBA-03 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları



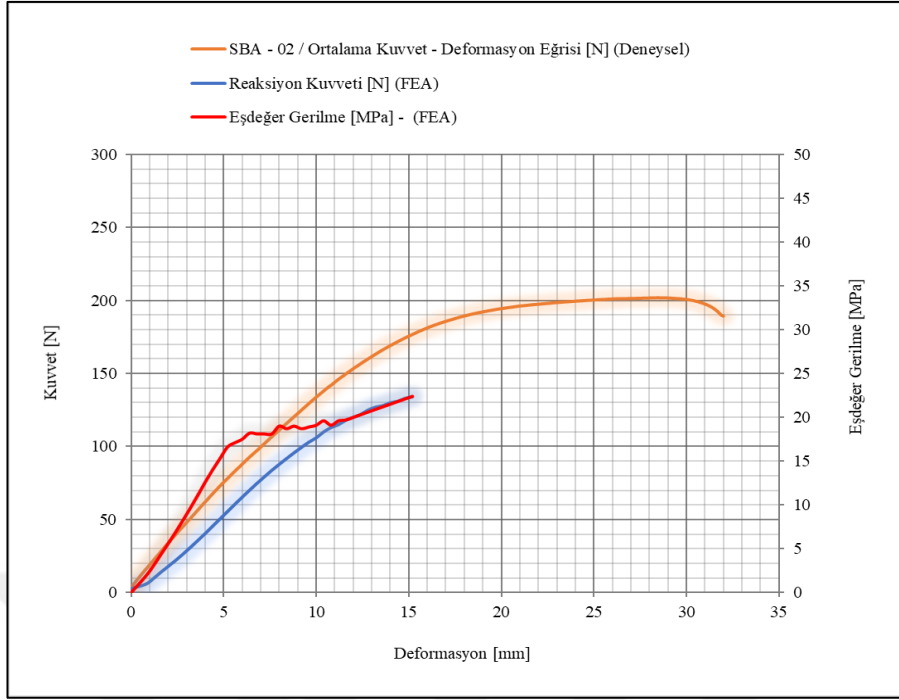
Şekil 4.29. SBA-04 15 mm çekme etkisi altındaki simülasyon ve çekme deneyi sonuçları

SBA tasarımları için uygulanan sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre 15 mm eksenel çekme etkisi altında; SBA-01 elemanının maksimum deformasyon miktarı 37.906 mm, SBA-02 elemanının maksimum deformasyonu 39.483 mm, SBA-03 elemanının maksimum deformasyonu 34.077 mm ve SBA-04 elemanının maksimum deformasyonu 38.757 mm olarak bulunmuştur. Tüm elemanların simülasyonlarında deformasyon bölgesi eşdeğer çift taraflı açılma göstermiş ve maksimum deformasyon üst bağlantı noktasının uç kısmında oluşmuştur. Sonlu elemanlar analizi simülasyon çıktılarına göre SBA tasarımları için meydana gelen deformasyon davranışının simülasyon sonuçları çekme testleri ile kıyaslandığında, görsel olarak uyumlu bulunmuştur.

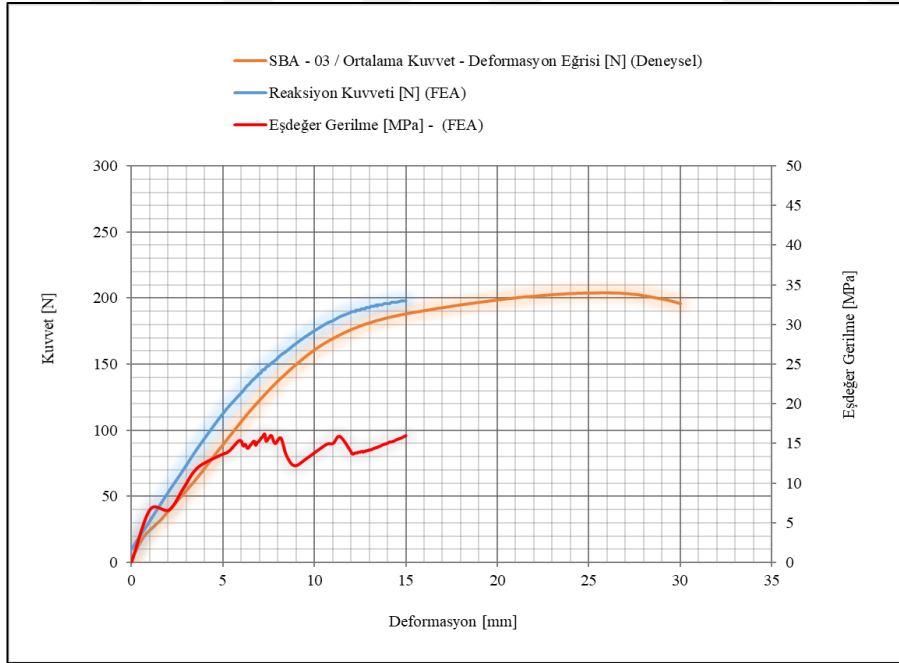
SBA tasarımlarının çekme testi sayısal verileri ile sonlu elemanlar analizi (FEA) sayısal verilerin kuvvet-deformasyon diyagramları Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33' te gösterilmiştir. Ayrıca sunulan diyagramlarda, sonlu elemanlar analizinde 15 mm çekme etkisi altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri verilmiştir.



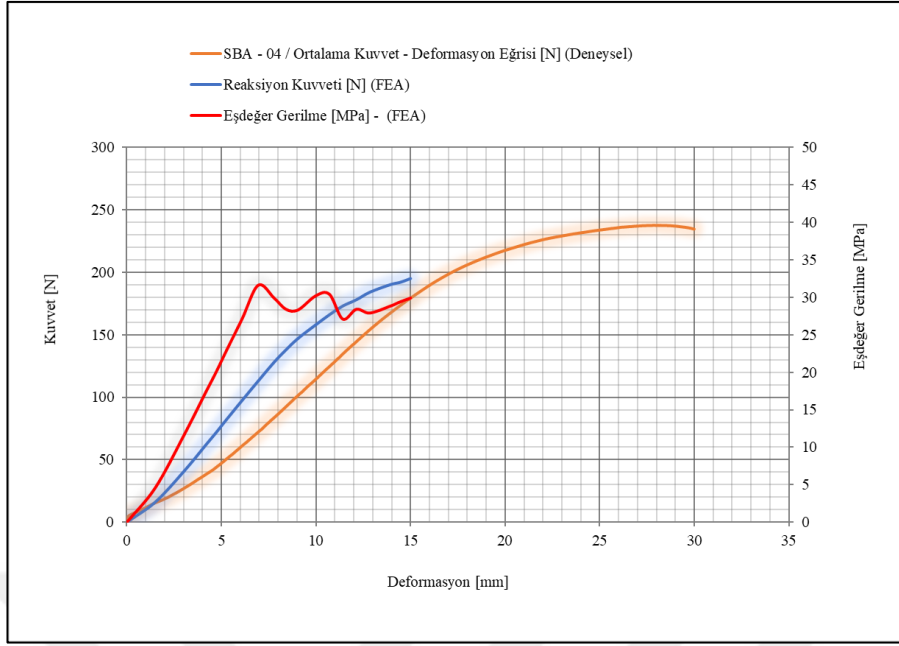
Şekil 4.30. SBA-01 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği



Şekil 4.31. SBA-02 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği



Şekil 4.32. SBA-03 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği



Şekil 4.33. SBA-04 deneysel ve simülasyon kuvvet-deformasyon ve eşdeğer gerilme grafiği

Elde edilen simülasyon/sonlu elemanlar analizi kuvvet-deformasyon değerleri ile deneysel/çekme testi kuvvet-deformasyon değerlerinin birbiri ile kıyaslanması ve simülasyon değerlerinin doğrulanması analiz, yapısal optimizasyon ve/veya yeniden tasarım süreçlerinin güvenilirliği bakımından oldukça önemli olmaktadır. Bu sebeple deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sayısal veriler arasındaki fark aşağıda bulunan eşitlik ile hesaplanmış, 5 mm, 10 mm ve 15 mm deformasyondaki kuvvet değerleri kıyaslanarak oluşturulan % göreceli fark tablosu Çizelge 4.4’te sunulmuştur (Kurowski ve Szabo 1997).

$$\text{Göreceli Fark [\%]} = \frac{F_{\text{Deneysel}} - F_{\text{Simülasyon}}}{F_{\text{Deneysel}}} \times 100$$

Eşitlikte F_{Deneysel} [N] ve $F_{\text{Simülasyon}}$ [N] sırasıyla deneysel ve sonlu elemanlar analizi temelli simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen kuvvet değerleri olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 4.4. SBA tasarımlarının 5 mm, 10 mm ve 15 mm deformasyondaki kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

Parametre	SBA-01			SBA-02			SBA-03			SBA-04		
	Eksenel Yer Değiştirme (Çekme)			Eksenel Yer Değiştirme (Çekme)			Eksenel Yer Değiştirme (Çekme)			Eksenel Yer Değiştirme (Çekme)		
	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
Deneysel-Kuvvet [N]	93.02	210.33	254.48	75.56	133.87	175.64	89.00	160.64	188.10	47.28	114.50	179.23
Simülasyon-Kuvvet [N]	115.00	229.00	272.00	52.90	106.00	133.50	112.90	175.90	197.90	75.30	158.00	195.00
Göreceli Fark [%]	23.63	8.88	6.88	29.99	20.82	23.99	26.85	9.50	5.21	59.26	37.99	8.80
Göreceli Fark Ortalaması [%]	13.13			24.93			13.85			35.35		
Toplam Göreceli Fark Ortalaması [%]	21.82											

SBA tasarımlarının 5 mm, 10 mm ve 15 mm eksenel çekme altında oluşan deformasyondaki kuvvet değerlerinin karşılaştırmalarında göreceli fark oranları %13.13 (SBA-01) ile %35.35 (SBA-04) arasında değişmektedir. Yapılan çalışmalarda tüm göreceli farkların ortalamaları ise %21.82 olarak hesaplanmıştır.

Deneyisel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ile ilgili yapılan bazı bilimsel nitelikli çalışmalar incelendiğinde, karşılaştırmalardaki göreceli farkın yaklaşık olarak %10 - %30 arasında değiştiği görülmüştür (Çelik 2013; Çalışkan 2011). Ancak bazı bilimsel çalışmalarda bu farkın %10 civarında olması gerektiği belirtilmiştir (Sakakibara 2008; Krutz vd. 1984).

Çalışma kapsamında yapılan deneyisel ve simülasyon karşılaştırma sonucunda toplam ortalama göreceli fark %21.82 olarak bulunmuş ve bu farkın genel görüşten bir miktar yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu sonucun çalışmaya özgü yapılan bazı kabuller, SBA elemanlarının malzeme tahminlemesindeki yaklaşımdan kaynaklı farklılıklar gibi etkenlerden kaynaklı olduğu değerlendirilmiş ve SBA elemanlarının fiziksel ve simülasyon deformasyon davranışlarında herhangi bir anormallik görülmemesi dikkate alınarak elde edilen göreceli fark sonuçlarının kabul sınırları içerisinde değerlendirilebileceği ve optimizasyon değerlendirmesi aşamasına geçiş için yeterli düzeyde olduğu görüşüne varılmıştır.

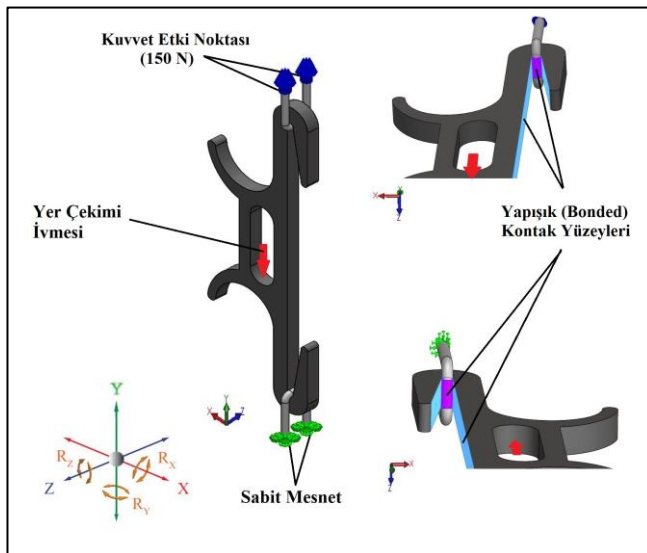
4.2.3. SBA yapısal optimizasyon kurgusu

Yapılan SBA test ve analizlerinin ardından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, SBA elemanlarının, seracılar ile yapılan görüşmelerde tahminlenen 10 kg maksimum yüklenme şartlarında dahi herhangi bir hasar almayacağı, elemanlar üzerinde oluşan maksimum gerilmenin malzemenin akma değerinin altında kalacağı anlaşılmıştır.

Ancak herhangi bir elemanın istenilen görevi yerine getiriyor olması, o elemanın en ideal tasarıma sahip olduğu anlamına gelmemektedir. Elemanın istenilen görevi yerine getirmesinin yanında üretim maliyetinin de minimuma düzeyde tutulması, üreticiler ve kullanıcılar açısından büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden gerçek koşullardaki yükleme durumları ve test/simülasyon sonuçları göz önüne alınarak, örnek uygulama için en uygun optimizasyon yönteminin boyut optimizasyonu olacağı kararına varılmıştır. Uygulama için SBA-01 elemanı referans alınmış ve boyut optimizasyonu sürecinde uygulanan adımlar sırası ile örneklendirilmiştir.

4.2.3.1. SBA sonlu elemanlar tabanlı boyut optimizasyonu süreci

SBA boyut optimizasyonu kararının ardından ilk adım, optimizasyon için referans alınan SBA-01 elemanının CAD modelinin ANSYS Workbench modülüne aktarılmasıdır. Yazılıma aktarılan CAD modele ilk aşamada sonlu elemanlar analizi uygulanmış ve ardından gerekli parametrelerin tanımlanmasıyla optimizasyon modülüne geçiş yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için sınır koşulları Şekil 4.34’te gösterildiği şekilde daha önce tanımlanan analiz kurgusuna uygun şekilde kurulmuştur.



Şekil 4.34. SBA-01 boyut optimizasyonu sınır koşulları

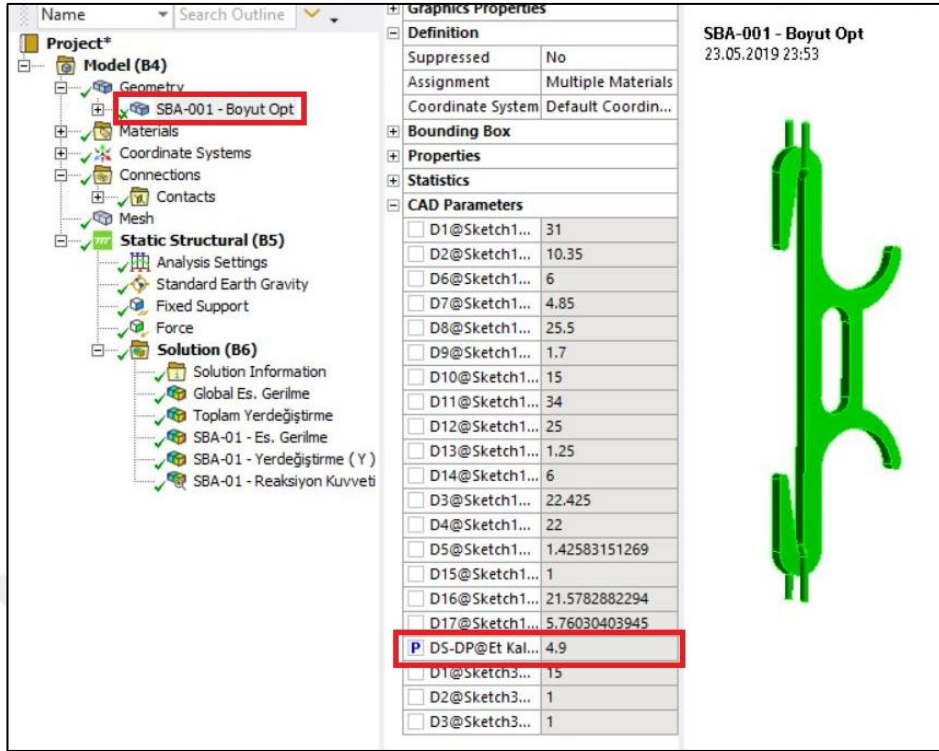
Uygulanan sınır koşullarında etki kuvveti verilirken, SBA'ya gerçek koşullar için tahminlenen yükün maksimum 10 kg civarında olduğu hesaplanmış, önceden tahmin edilemeyen çalışma koşulları dikkate alınarak 1.5 kat güvenlik katsayısı ile 150 N kuvvet uygulanmıştır. SBA'nın alt kısmından sabit mesnet tanımlanmış ve tanımlanan sabit mesnet ile seçili yüzeylerdeki X, Y, Z düzlemlerindeki ve R_x , R_y , R_z eksenlerindeki tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır. Simülasyon için CAD modele 9.81 m s^{-2} yer çekimi ivmesi tanımlanmıştır. Ayrıca alt ve üst kısımda bulunan kanca noktalarına yapışık temas (Bonded) tanımlanarak optimizasyonda daha stabil sonuçlar elde etmek amacıyla SBA elemanı ve tel modeli arasındaki kayma yok varsayılmıştır. Simülasyon için Skewness değerlendirme kriteri göz önünde bulundurularak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Eleman boyutu 2.5 mm seçilmiştir. Skewness değerlendirme kriterine göre “mükemmel bir eleman kalitesi” elde edilmiştir. Son olarak SBA-01 elemanı için malzeme seçimi yapılmıştır. Optimizasyon çalışmasında iterasyonları daha kısa zamanda analiz etmek ve gerilme değerlerinin lineer artışını görmek için lineer malzeme modeli kabulü yapılmıştır. Kullanılan özellikler SBA-01 elemanı için tanımlanan lineerize edilmiş malzeme modelidir. Seçilen malzeme özellikleri Çizelge 4.5’ te verilmiştir. Simülasyonun tüm adımlarının tamamlanmasının ardından çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.5. Malzeme özellikleri (Lineer Model)

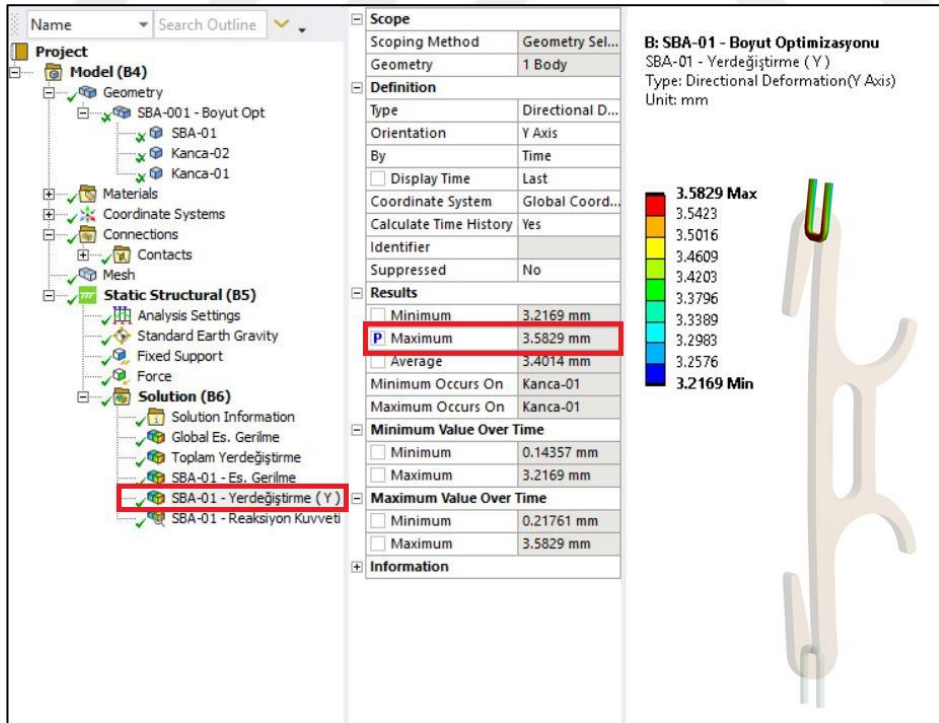
Elastisite Modülü [MPa]	Poisson Oranı [-]	Malzeme Yoğunluğu [kg/m ³]	Akma Mukavemeti [MPa]
215.30	0.42	865.01	34.52

Analiz sonrasında SBA-01 elemanı için eşdeğer gerilme 24 MPa çıkmıştır. Maksimum yer değiştirme, kuvvetin etkidiği üst kancada 3.58 mm bulunmuştur. Yapılan analizin ardından sonuçlar incelendiğinde SBA-01 elemanında oluşan maksimum gerilme değeri malzemenin akma değerinin altındadır. Bu sebeple SBA-01 elemanının kalınlık optimizasyonu için ANSYS Workbench içerisinde bulunan DesignXplorer modülü kullanılmıştır. Optimizasyon, bu modüldeki “Design of Experiment” (DOE) metodu temel alınarak gerçekleştirilmiştir. DOE metodu, optimizasyon için analiz sonrası sonuçları temel alarak örnek tasarım noktalarını belirlemek için kullanılan bir tekniktir (Çelik 2006).

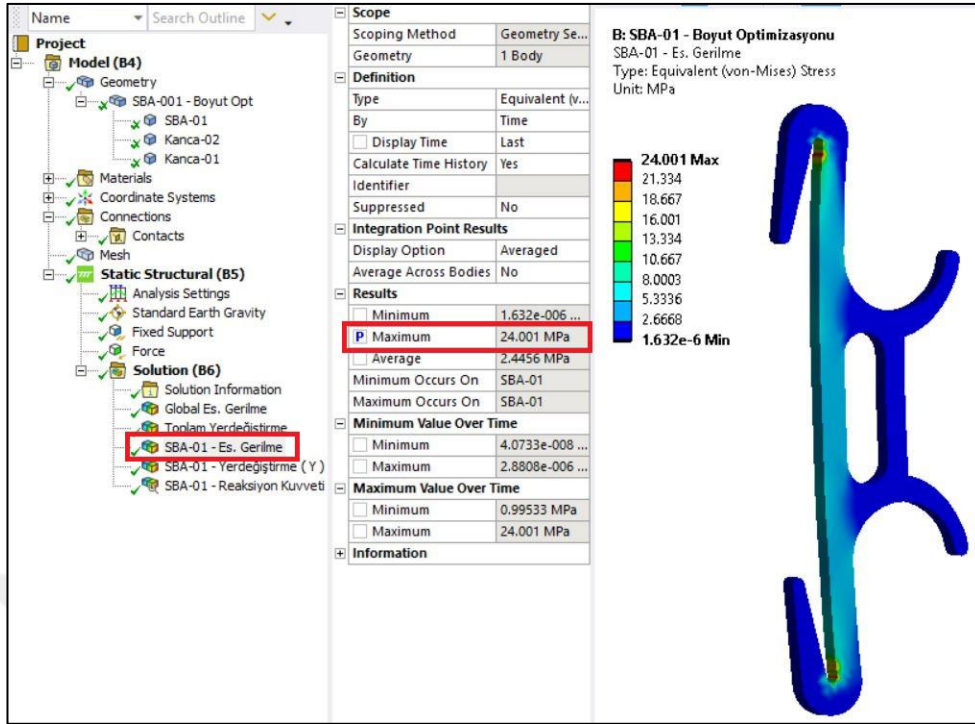
Söz konusu çalışmada optimizasyon işlemi için tasarım değişkeni (girdi parametresi) olarak sadece eleman kalınlığı tanımlanmıştır. Başlangıç eleman kalınlığı 4.9 mm’dir. Cevap parametreleri içinse maksimum yer değiştirme, maksimum eşdeğer gerilme ve doğrulama amacına yönelik olarak toplam reaksiyon kuvveti seçilmiştir. Kullanılacak olan parametreler, optimizasyon modülüne aktarılmak üzere işaretlenmiş ve tanımlanmıştır. Bu parametreler Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’ de gösterilmiştir.



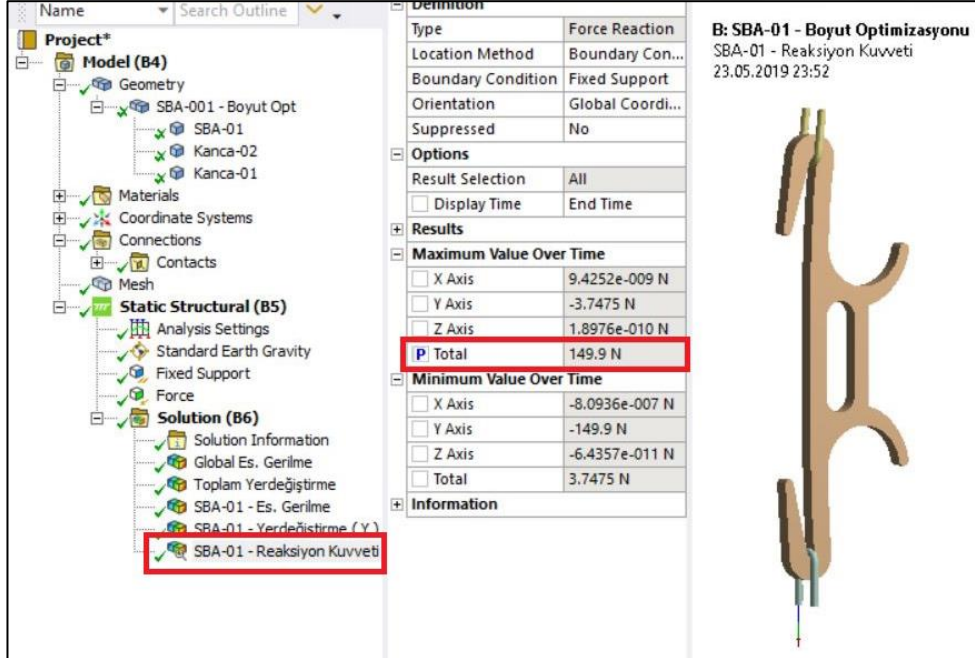
Şekil 4.35. SBA-01 kalınlık tasarım değişkeni (girdi parametresi) seçimi



Şekil 4.36. SBA-01 maksimum yer değiştirme (cevap parametresi)



Şekil 4.37. SBA-01 maksimum eşdeğer gerilme (cevap parametresi)

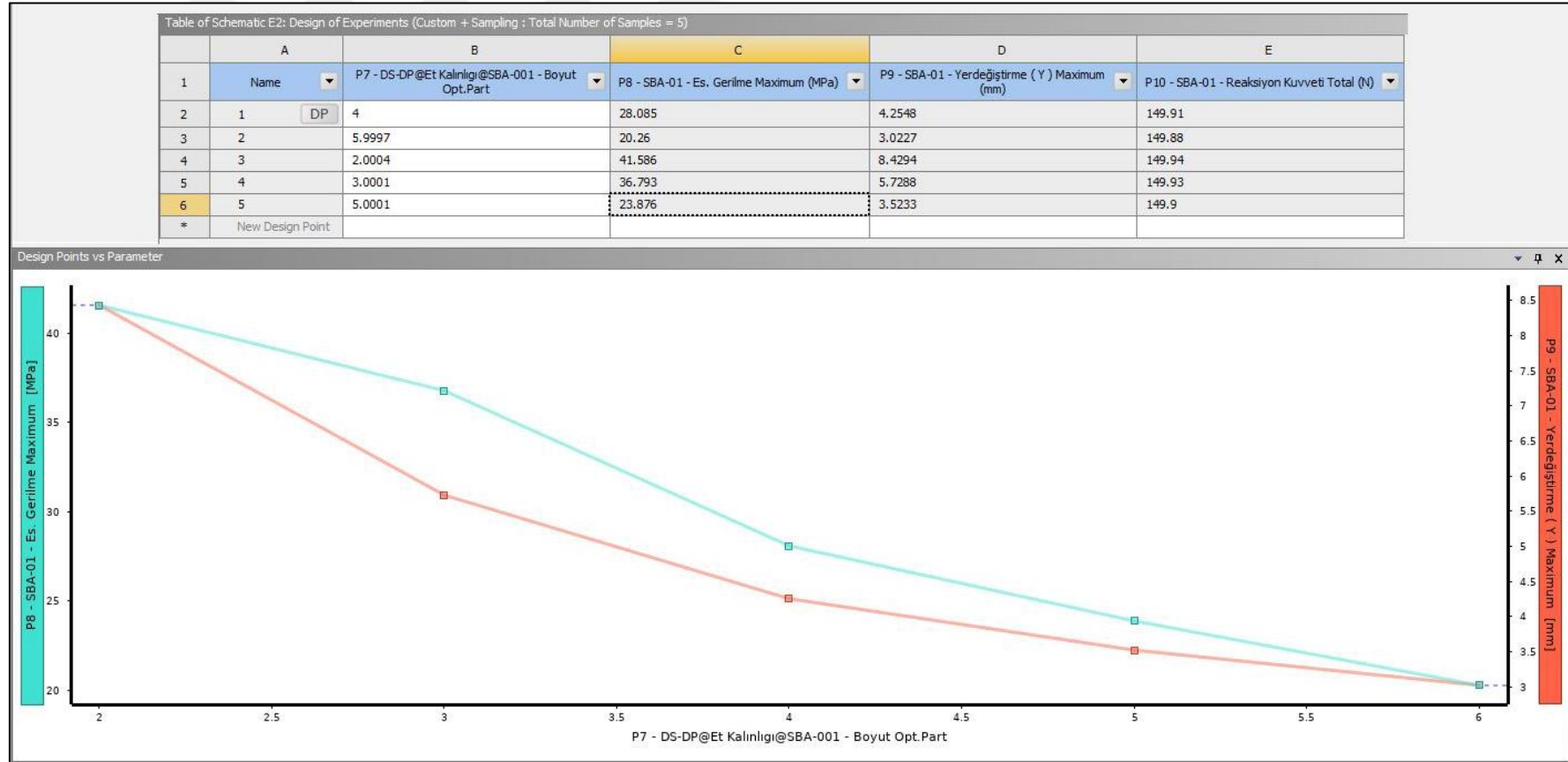


Şekil 4.38. SBA-01 toplam reaksiyon kuvveti (cevap parametresi-doğrulama)

Optimizasyon çalışması için belirlenen tasarım değişkenleri ve tasarım değişkenleri için kullanılan tasarım sınırlamaları Çizelge 4.6’ da verilmiştir. Ayrıca tasarım eğrisini oluşturmak için yazılım tarafından oluşturulan tasarım noktaları (5 adet), bu noktalardaki değerlere bağlı girdi-cevap parametreleri ve bu parametrelerin değişim-ilişki grafiği Şekil 4.39’ da verilmiştir.

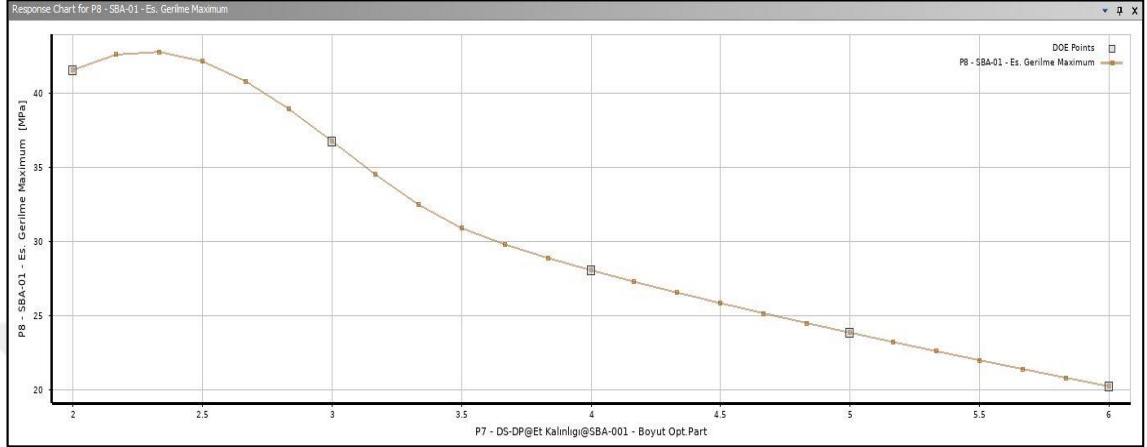
Çizelge 4.6. Tasarım değişkenleri için kullanılan tasarım sınırlamaları

Tasarım Değişkeni	İlk Tasarım Değişkeni Değeri	Tasarım Değişkeni Sınırlaması
SBA-01 Kalınlık (t)	4.9 [mm]	$2 \text{ [mm]} \leq t \leq 6 \text{ [mm]}$



Şekil 4.39. Oluşturulan tasarım noktaları ve cevap parametrelerinin sonuçları

Yazılım tarafından otomatik olarak oluşturulan tasarım noktalarının cevap değerlerinin belirlenmesi amacıyla DesignXplorer çözümüne geçilmiştir. DesignXplorer tasarım-cevap parametrelerine göre otomatik olarak tasarım eğrisi oluşturmaktadır. tasarım eğrisi Şekil 4.40' ta gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Tasarım eğrisi

Sonraki adım, tasarım setlerinin oluşturulmasından sonra hedef fonksiyon doğrultusunda ulaşılmak istenilen değerler, sınırlamalar ve önceliklerin tanımlanmasıdır. SBA-01 elemanı için hedef fonksiyon minimum kalınlıktır. Bununla birlikte eşdeğer gerilme ve yer değiştirme değerlerinin de hangi değerler arasında istendiği tanımlanmıştır. Tanımlamaya göre eleman kalınlığı minimum, yer değiştirme minimum ve eşdeğer gerilme hedefi 34 MPa (Malzeme akma mukavemeti), alt sınırı ise 30 MPa olarak tanımlanmıştır. Buna göre amaç, minimum kalınlıkta ve minimum yer değiştirmede, eşdeğer gerilme alt sınırı 30 MPa olacak şekilde 34 MPa'a eşit veya en yakın noktayı elde etmektir. Tanımlanan değerler, sınırlamalar ve öncelikler Şekil 4.41' de gösterilmiştir.

Table of Schematic E4: Optimization						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	Parameter	HEDEF (Objective)		KISITLAMA (Constraint)	
2			Type	Target	Type	Lower Bound
3	Seek P8 = 34 MPa; P8 >= 30 MPa	P8 - SBA-01 - Es. Gerilme Maximum	Seek Target	34	Values >= Lower Bound	30
4	Minimize P7	P7 - DS-DP@Et Kalınlığı@SBA-001 - Boyut Opt .Part	Minimize		No Constraint	
5	Minimize P9	P9 - SBA-01 - Yer değiştirme (Y) Maximum	Minimize		No Constraint	
*		Select a Parameter				

Şekil 4.41. Aday tasarım değerleri ve tanımlamalar

Optimizasyon aşamalarının tamamının bitirilmesi ve aday tasarım değerleri ve tanımlamalara hedef fonksiyon doğrultusunda ulaşılmak istenilen değerler, sınırlamalar ve önceliklerin tanımlanmasının ardından bir sonraki işlem sonuçların görüntülenmesi aşamasıdır. Sonuçların görüntülenmesinde uygunluğu değerlendirebilmek için yaklaşıma yazılım tarafından yıldızlar ile bir ölçü tanımlanmış ve kolayca anlaşılabilir bir sınıflandırma yapılmıştır. Buna göre elde edilen üç farklı aday noktaları ve yazılım tarafından yıldızlar ile tanımlanan sınıflandırma ölçüleri Şekil 4.42’ de gösterilmiştir.

Table of Schematic E4: Optimization , Candidate Points								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Reference	P7 - DS-OP@Et Kalınlığı (SBA-001 - Boyut Opt .Part		P8 - SBA-01 - Es. Gerilme Maximum (MPa)		P9 - SBA-01 - Yerdeğiştirme (Y) Maximum (mm)		P10 - SBA-01 - Reaksiyon Kuvveti Total (N)
2		Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	
3	●	Candidate Point 1	★ 3.21 %0.00	★★★ 33.999 %0.00	⇒ 5.3374 %0.00	★ 5.1167 %4.14	149.93	
4	○	Candidate Point 2	★ 3.342 %4.11	★★ 32.422 %4.64	★ 4.896 %8.27	149.92		
5	○	Candidate Point 3	★ 3.486 %8.60	★ 31.035 %8.72				
*		New Custom Candidate Point	4					

Şekil 4.42. Önerilen aday tasarım noktaları

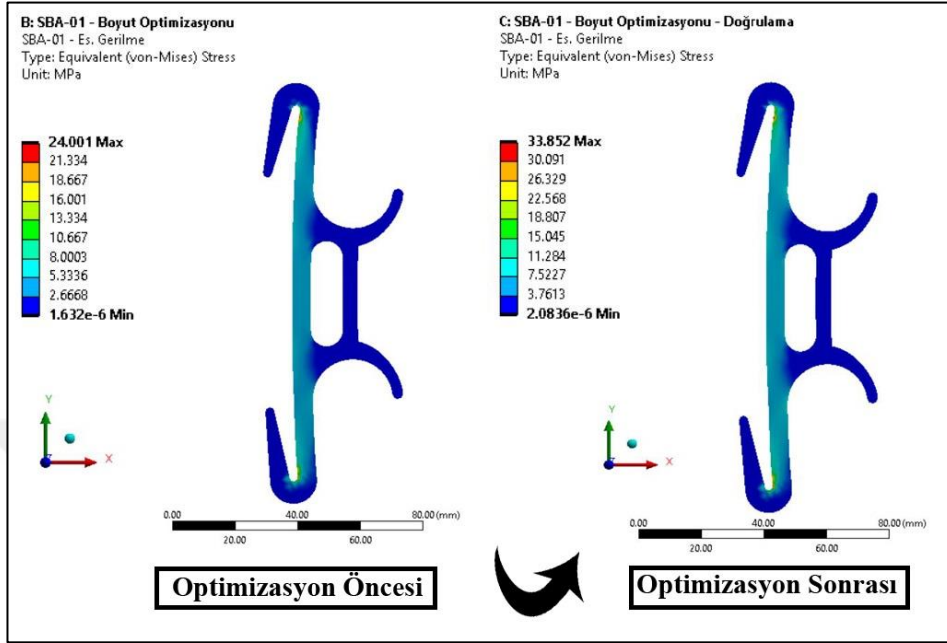
Aday noktası 1, 2 ve 3 sonuçları değerlendirildiğinde tanımlanan hedefler ve sınırlamalar doğrultusunda yazılımın da verdiği uygunluk derecesi göz önüne alınarak aday noktası 1’in diğer noktalara göre daha uygun olduğu belirlenmiş ve SBA-01 elemanı aday noktası 1’deki değerlere göre yenilenmesine karar verilmiştir.

Optimizasyon sürecinde en son işlem, seçilen tasarım değerlerinin, ele alınan elemanın CAD modeline uygunluğu, kontrolü ve analizle doğrulanması aşamasıdır. Bu amaçla optimizasyon sürecinden elde edilen kalınlık değerine göre (3.21 mm) CAD model yenilenmiş ve analizi yapılarak doğrulanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre optimizasyon öncesi, sonrası ve doğrulama işleminden elde edilen değerler Çizelge 4.7’ de verilmiştir.

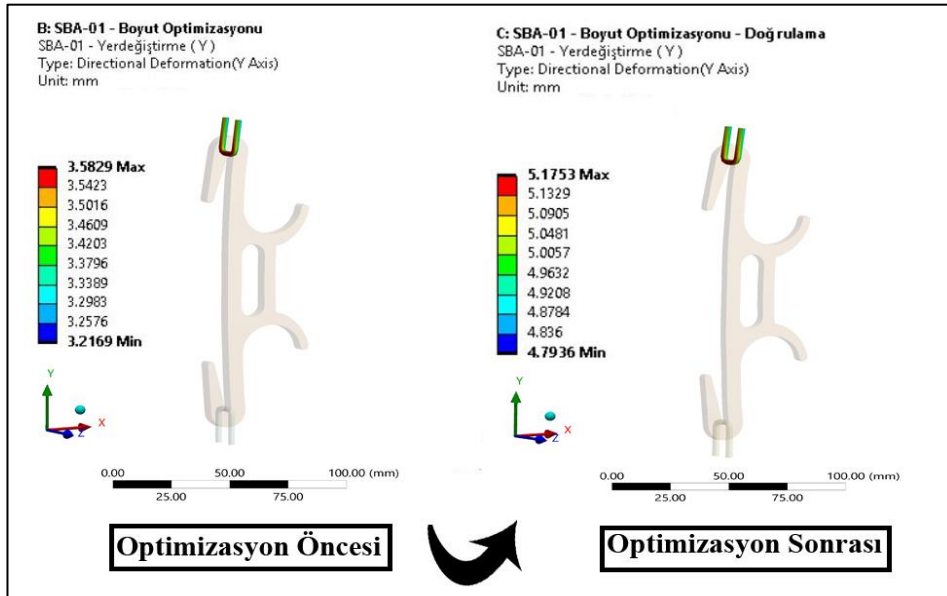
Çizelge 4.7. Optimizasyon öncesi, sonrası ve doğrulama değerleri

Parametreler	Optimizasyon Öncesi Değerler	Optimizasyon Sonrası Değerler	Analiz Doğrulama Değerleri	
SBA-01 Kalınlık (t) [mm]	4.90	3.21	3.21	
Maksimum Eşdeğer Gerilme [MPa]	24.001	33.999	33.852	Fark [%] = 0.43
Maksimum Yer Değiştirme [mm]	3.5829	5.3374	5.1753	Fark [%] = 3.04
Toplam Reaksiyon Kuvveti [N]	149.90	149.93	149.93	
Kütle [g]	7.1372	4.6756	4.6756	
Kütle Değişimi (Kütledeki Azalma) [%]				34.49

Ayrıca optimizasyon öncesi ve doğrulama sonucunda elde edilen Von Mises eşdeğer gerilme simülasyon çıktıları Şekil 4.43’ te, yer değiştirme simülasyon çıktıları ise Şekil 4.44’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.43. Optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası (doğrulama) Von Mises eşdeğer gerilme simülasyon çıktıları



Şekil 4.44. Optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası (doğrulama) yer değiştirme simülasyon çıktıları

Yapılan optimizasyon çalışmasında, örnek uygulama kapsamında ele alınan SBA-01 elemanına dair bir çalışma yürütülmüştür. İlk olarak SolidWorks katı modelleme yazılımında oluşturulan CAD modele ANSYS Workbench yazılımında gerilme analizi yapılmıştır. Gerilme analizinde kullanılan etki kuvveti, SBA elemanının gerçek fiziksel yüklenme durumları göz önünde bulundurularak ve bu yük değerlerine 1.5 kat emniyet katsayısı verilerek maksimum sınırdaki (150 N) uygulanmış ve analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, maksimum yükleme koşullarında dahi oluşan maksimum gerilmenin malzeme akma noktasını aşmadığı ve eleman kalınlığı için bir iyileştirme yapılabileceği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak ANSYS Workbench DesignXplorer optimizasyon modülünde minimum kalınlık, tasarım sınırlamalarına bağlı kalarak optimize edilmiştir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde, eleman kalınlığı yaklaşık olarak 1.69 mm inceltilmiş ve elemanın kütlesi yaklaşık 2.46 g azaltılmıştır. Bu da kütle bazında yaklaşık %34.49'luk bir kazanç elde edildiğini göstermektedir. Bu değerler özellikle seri üretim yapan üreticiler ve dolayısıyla kullanıcılar için maddi açıdan önemli bir iyileştirme değildir. Ayrıca optimizasyon sürecinde elde edilen değerler, doğrulama açısından SBA elemanının CAD modelin yansıtılmış ve yeni tasarım parametreleri kullanılarak doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında gerilme ve deformasyon değerleri ilk değerlerden yüksek çıkmasına rağmen, maksimum eşdeğer gerilme malzemenin akma mukavemetinin altında kalmış ve hedeflenen değere çok yakın bir sonuç elde edilmiştir. Elde edilen reaksiyon kuvvetleri, uygulanan kuvvetle oldukça tutarlıdır. Sonuç olarak optimize edilen parametreler yeni tasarım parametreleri olarak kabul edilmiştir.

4.2.4. SBA katmanlı imalat/hızlı prototipleme kurgusu

Tez çalışması kapsamında oluşturulan uygulama algoritmasında optimizasyon kısmının ardından sonraki aşama katmanlı imalat/hızlı prototipleme aşamasıdır. Bu aşamada, SBA-01 elemanının optimizasyon ile belirlenen yeni tasarım parametreleri uygulanmış CAD modeli, katmanlı imalat teknolojileri ile üretilmiş ve üretilen prototip amaçlı elemanın optimize edilen geometriyi temsil etme kabiliyeti görsel olarak değerlendirilmiştir. Katmanlı imalat/hızlı prototipleme sürecinde uygulanan adımlar sırası ile verilmiştir.

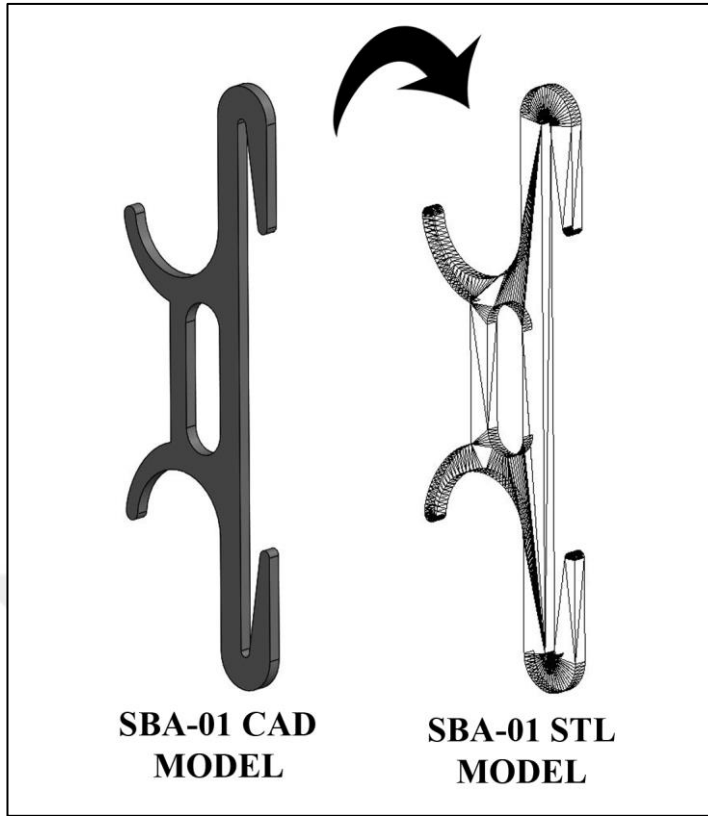
4.2.4.1. En uygun katmanlı imalat/hızlı prototipleme yönteminin belirlenmesi

Katmanlı imalat teknolojileri, 1980’li yıllarda prototip üretmek amacıyla hayatımıza girmiş, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla bazı avantaj ve dezavantajlara sahip bir üretim tekniğidir. Ancak günümüzde prototipin dışında son kullanıcı için doğrudan üretim yapma kabiliyetine sahip birçok farklı katmanlı imalat yöntemi geliştirilmiştir. İhtiyaca uygun katmanlı imalat yönteminin belirlenmesi üretimde kullanılacak olan malzeme, üretilen somut ürünün kalitesi, detay seviyesi ve mukavemet özellikleri, imalatın amacı (son ürün/prototip) vb. gibi birçok farklı etkene bağlı olarak değişmekle beraber, yapılacak olan çalışmanın amacına ulaşması için oldukça önemli bir faktördür.

Yapılan bu örnek uygulamada optimize edilen SBA-01 elemanının görsel olarak değerlendirilmesi için prototip üretimine ihtiyaç duyulmuş ve bu amaç doğrultusunda FDM tekniğiyle üretim yapan bir katmanlı imalat yönteminin seçilmesi uygun görülmüştür. FDM tekniği maddi açıdan kolay erişilebilirliği, üretim sürecinin basitliği ve güvenilirliği, CAD yazılımları ile kolay entegrasyonu gibi özellikleriyle kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen katmanlı imalat teknolojilerinden biridir (Gibson vd. 2015). Bu teknik genel olarak prototip üretimi için kullanılmaktadır.

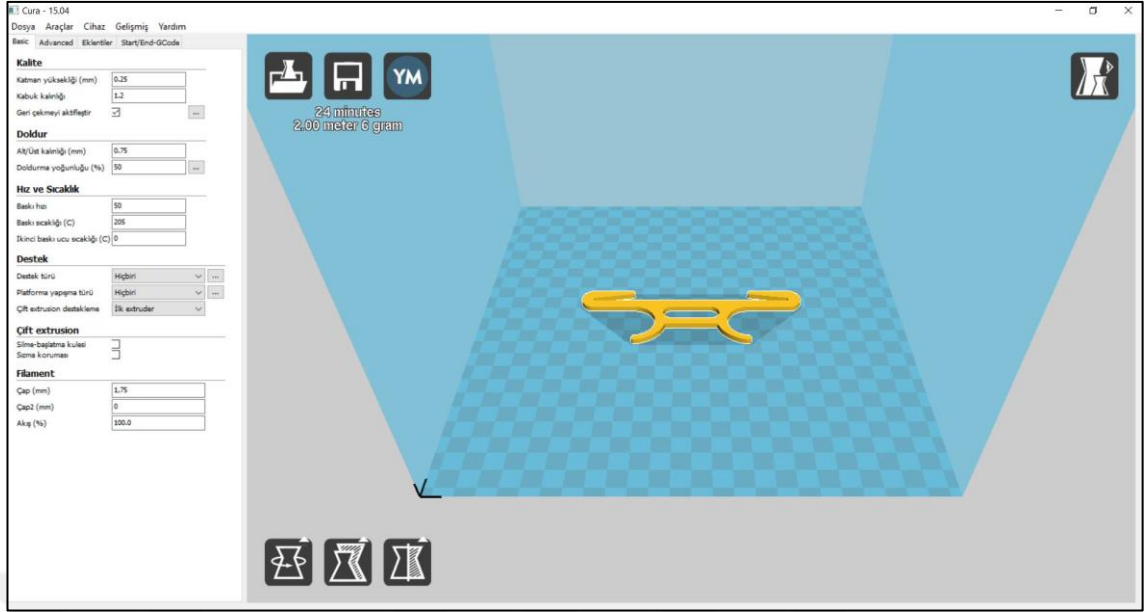
4.2.4.2. SBA katmanlı imalat/hızlı prototipleme süreci

Katmanlı imalat/hızlı prototipleme için ilk adım CAD modelin oluşturulmasıdır. Optimizasyon sonucunda elde edilmiş, optimum kalınlığa sahip CAD model, SolidWorks yazılımına aktarılmıştır. Ardından üretimin sonraki aşaması olan modelin STL formatına dönüştürülmesi işlemi, SolidWorks yazılımı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen ve STL formatına dönüştürülen model Şekil 4.45’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.45. Optimizasyon sonucu elde edilen ve STL formatına dönüştürülen CAD model

STL formatına dönüştürülen CAD model, üretim parametrelerinin tanımlanması için slicer adı verilen dilimleyici sistem yazılımlarına aktarılmaktadır. Çalışma kapsamında üretim parametrelerinin tanımlanması için Cura isimli dilimleyici yazılım kullanılmıştır. STL formatındaki modelin yazılım içerisine aktarılmasının ardından ilk adım, modeli üretim şekline göre yazılımın arayüzündeki cihaz tablasına konumlandırmaktır. Üretilen ürün yazılım üzerinde tablaya nasıl konumlandırılırsa, üretim o şekilde başlayacaktır. Modelin tabla üzerine konumlandırılma şekli ve tabladaki konumu Şekil 4.46’da gösterilmiştir. Sonraki aşamada yazılıma üretim parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametreler kullanılan malzemenin özelliklerine, modelin geometrik yapısına, ürünün istenilen yüzey kalitesine ve mukavemet özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca bu parametrelerin tanımlanmasında kullanıcı tecrübesinin büyük bir önemi vardır. SBA-01 elemanına ait prototip üretimi için uygun bulunan ve yazılıma tanımlanan üretim parametreleri Şekil 4.47’de verilmiştir.



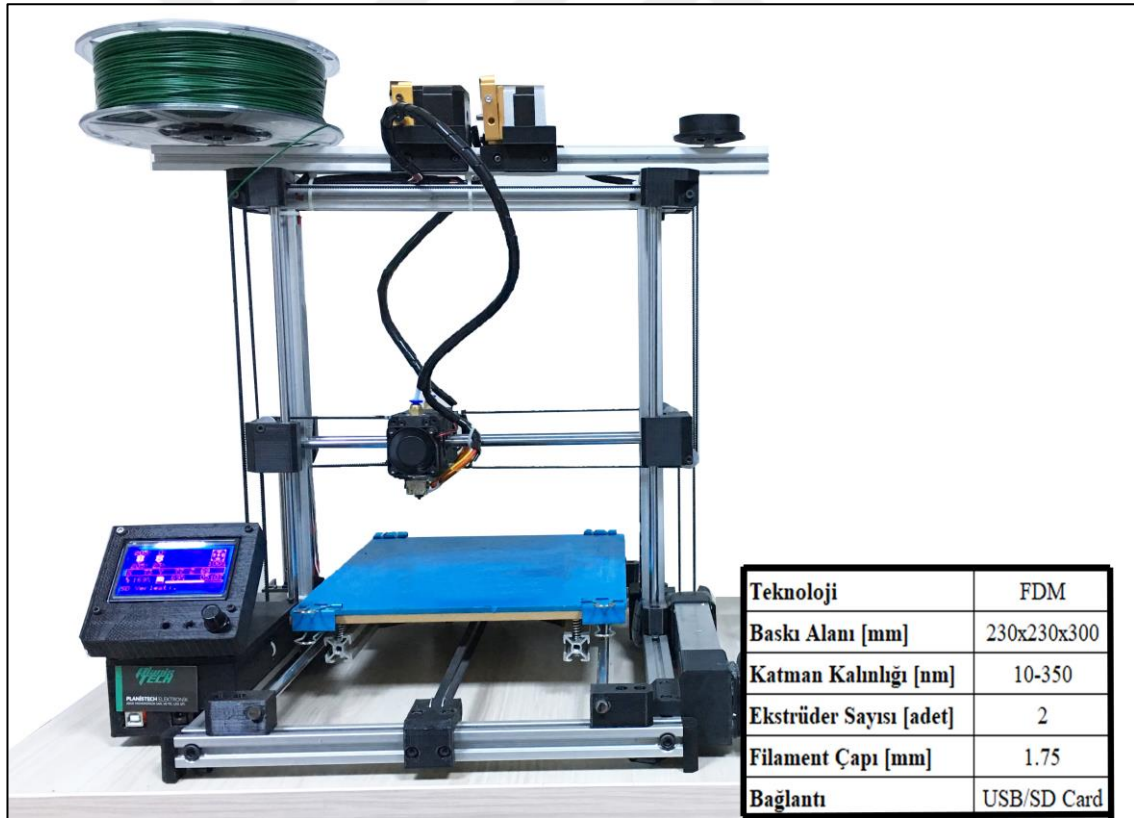
Şekil 4.46. Cura yazılımı STL modelin tabla üzerine konumlandırılması



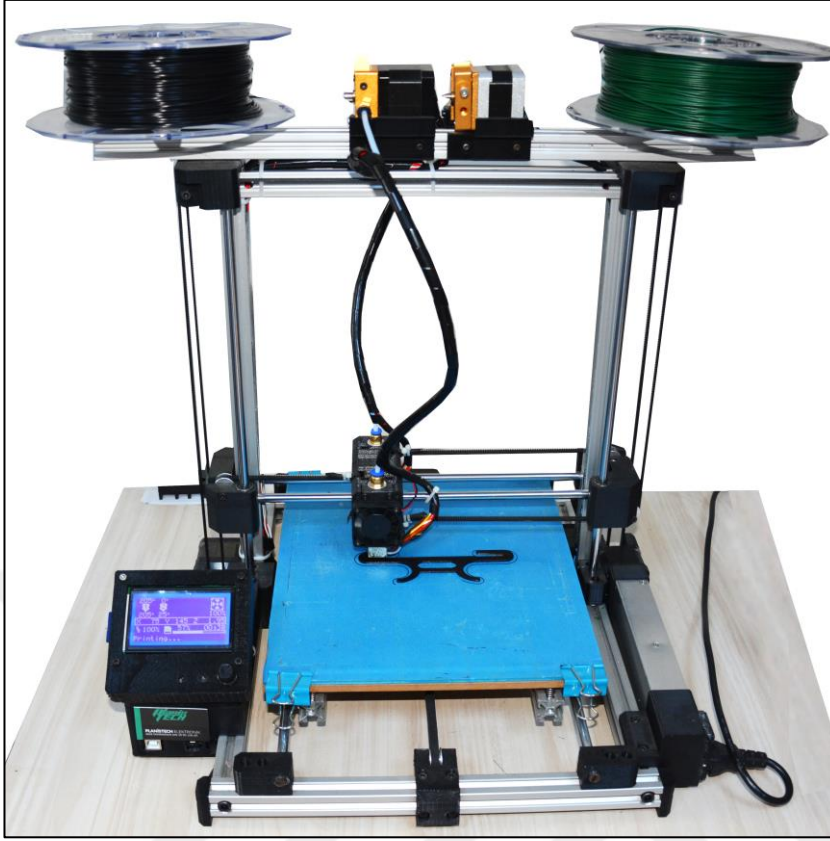
Şekil 4.47. Cura yazılımı tanımlanan üretim parametreleri

Üretim için tüm ayarlamaların ve parametrelerin tanımlanmasının ardından sonraki adım Cura yazılımı aracılığıyla, hazırlanan üretim parametrelerini G-code formatına dönüştürmek ve G-code uzantılı dosyayı katmanlı imalat cihazına aktarmaktır. G-code, cihazın üretim başlığının koordinat düzleminde izlemesi gereken rotayı, üretilecek ürünün geometrik yapısını, üretim hızını, ekstrüderden akıtılacak olan malzemenin oranını vb. gibi birçok bilgiyi cihaza tanıtmaya yarayan bir dosya formatıdır. G-code uzantılı dosyanın katmanlı imalat cihazına aktarılması ve bu dosyanın seçilmesiyle birlikte üretim işlemi başlamaktadır.

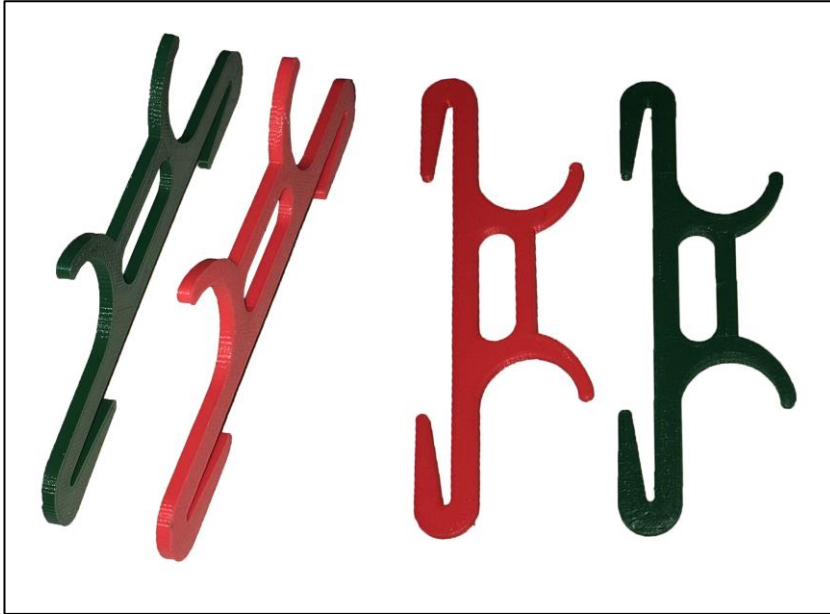
SBA-01 elemanı için katmanlı imalat/hızlı prototipleme işlemi, Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Tasarım ve Ölçme Laboratuvarı'nda bulunan FDM tipi katmanlı imalat cihazında gerçekleştirilmiştir. Üretim hammadde olarak PLA filament kullanılmıştır. Üretim yapılan FDM tip katmanlı imalat cihazı ve cihazın teknik özellikleri Şekil 4.48' de, üretim esnasından bir görsel Şekil 4.49' da, üretilen optimize edilmiş SBA-01 elemanı prototipleri ise Şekil 4.50' de gösterilmiştir.



Şekil 4.48. FDM katmanlı imalat cihazı ve teknik özellikleri



şekil 4.49. SBA-01 elemanın prototip üretim aşaması



şekil 4.50. Optimize edilmiş modele ait hızlı prototip örnekleri

Prototip, tasarım sürecindeki en önemli adımlardan birisidir. Tasarımı yapılmış veya mevcut tasarım üzerinde yenilikler yapılmış ürünlerin imalat öncesi somut bir örneğinin değerlendirilmesi ve değerlendirme sonucuna göre imalat veya yeniden düzenleme kararının alınması prototipin genel amaçlarından birisidir. Ayrıca katmanlı imalat teknolojilerindeki büyük gelişmeler sayesinde hızlı prototipleme kavramı çok daha geniş bir boyut kazanmıştır.

Bu kapsamda yapılan tez çalışmasında SBA-01 elemanı için optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve elde edilen yeni parametreler tasarıma yansıtılarak katmanlı imalat teknolojileri ile ürünün görsel ve boyutsal olarak değerlendirilmesine yönelik prototipleri üretilmiştir. Üretilen prototipler ile optimize edilen ürün görsel olarak değerlendirilmiş ve prototipin optimizasyon sonucunda elde edilen modeli tam anlamıyla temsil ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca SBA-01 elemanında yapılan tasarım değişiklikleri üretilen prototiplerde incelenmiş ve yapılan değişikliklerin gerçek çalışma koşullarında kullanıma engel bir durumu gözlemlenmemiştir. Bu sonuç doğrultusunda elde edilen değerlendirmeler yeterli bulunmuştur. Ayrıca SBA-01 elemanının üretim malzemesi (geri dönüşüm plastik) ile prototip üretim malzemesi (PLA plastik) aynı mekanik özelliklere sahip olmadığından dolayı, üretilen prototipler için fiziksel test ve ölçümlere gerek görülmemiştir.

4.3. Uygulama Algoritması Toplam Süreç Değerlendirmesi

Bu tez çalışması kapsamında tarımsal üretimde kullanılan ürün, alet ve makine tasarımlarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerinde kullanılabilecek bir uygulama algoritması geliştirilmiştir. Uygulama algoritması temel üç ana gruptan oluşturulmuştur. Bu gruplar; odak ürün olarak seçilen mevcut elemanların mukavemete dayalı tasarım incelemeleri, yapısal optimizasyon ve katmanlı imalat/hızlı prototipleme süreçlerini içermektedir. Bu algoritma, odak ürün olarak seçilmiş dört farklı tasarıma sahip sera bitki askıları (SBA) uygulamaya konulmuş ve örneklendirilmiştir. Örneklendirmede elde edilen toplam süreç sonuçları aşağıda sırası ile verilmiştir.

İlk olarak uygulama için ele alınan plastik malzeme esaslı SBA elemanlarının mukavemete dayalı tasarım incelemeleri için fiziksel test ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasıyla çekme deneyi, sertlik ölçümü ve kütle ölçümü gibi fiziksel testleri kapsamaktadır. Kullanılan SBA'ların üretim malzemeleri atık plastiklerden oluştuğu için malzeme özelliklerine ulaşamamış, malzeme tahminlemesine ihtiyaç duyulmuş ve ilk aşamada, testlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, odak ürünlere ait malzeme tahminlemesi yapılmıştır. Elde edilen malzeme özellikleri, ilgili kısımdaki Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ardında SBA elemanlarına ait CAD modeller oluşturulmuş ve bu modeller sonlu elemanlar analizine tabii tutularak kuvvet-deformasyon sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, çekme deneyleriyle elde edilen sonuçlarla görsel ve sayısal olarak karşılaştırılmış ve yapılan analizlerin doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardaki görsel değerlendirmede SBA elemanlarının deformasyon davranışlarının oldukça benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Sayısal değerlendirmede ise deneysel ve simülasyon sonuçlarının arasındaki toplam ortalama göreceli farkın %21.82 civarında olduğu hesaplanmıştır. Bu farkın deney ve simülasyon çalışmalarında yapılan bazı kabullerden kaynaklandığı sonucuna varılmış ve yaklaşımın kabul sınırları dahilinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, SBA tasarımları için optimizasyon yapılabileceği öngörülmüş ve yapısal optimizasyon aşamasına geçilmiştir.

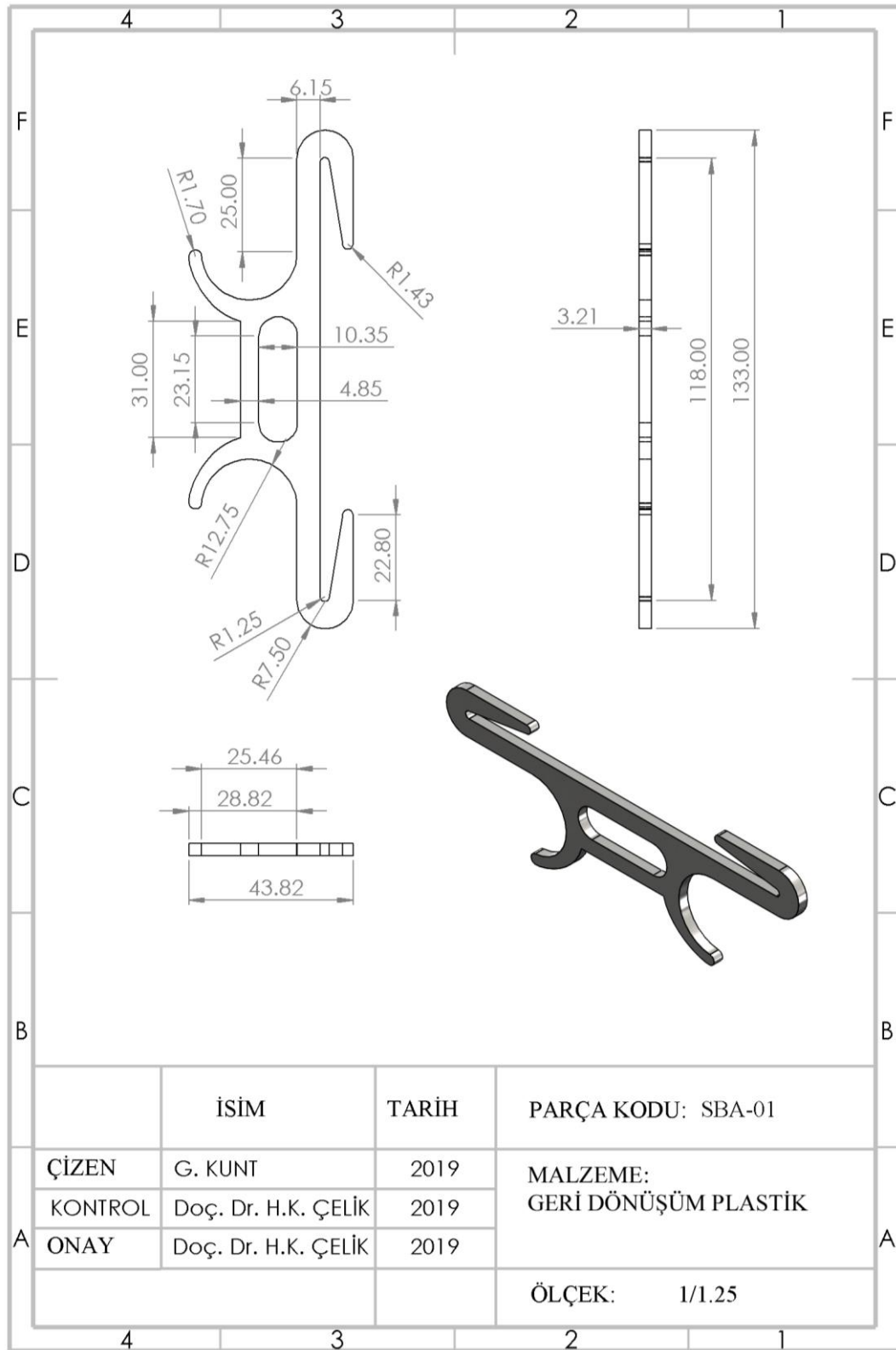
Yapısal optimizasyon için dört farklı SBA tasarımından bir odak ürün (SBA-01) seçilmiş ve bu odak ürünle optimizasyon sürecine gidilmiştir. SBA-01 elemanına ait gerçek koşullardaki maksimum yükleme durumları için yapılan analizler incelenmiş ve maksimum yükleme durumlarının 1.5 güvenlik katsayısıyla dahi eşdeğer gerilmenin malzemenin akma mukavemetini aşmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden elemana boyut optimizasyonu yapılması uygun görülmüştür. Yapılan boyut optimizasyonunda, elemana gerçek koşullarda etkiyen maksimum yüklenmenin 1.5 kat güvenlik katsayısı ile kuvvet uygulanmış ve bu kuvvet altında elemanda oluşan eşdeğer gerilmenin, malzeme akma noktasına en yakın alt seviyesinde elemanın kalınlığının minimuma indirgenmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonuçlandırılmış ve optimizasyon öncesi 4.9 mm olan eleman kalınlığı, optimizasyon sonrası 3.21 mm'ye düşürülerek kütle bazında yaklaşık olarak %34.49'luk bir kazanç elde edilmiştir. Ardından optimizasyon

sürecinden elde edilen yeni tasarım parametreleri, elemanın CAD modeline yansıtılarak bir doğrulama analizi yapılmış ve sonuçlarda herhangi bir tutarsızlık gözlenmemiştir. Optimizasyon süreci tamamlanmış ve elde edilen SBA-01 elemanına ait yeni tasarım parametrelerinin görsel olarak değerlendirilmesi için katmanlı imalat/hızlı prototipleme aşamasına geçilmiştir.

Hızlı prototipleme süreci için kullanılacak olan katmanlı imalat yöntemi FDM olarak seçilmiştir. İlk aşamada yeni tasarıma ait CAD model, STL formatına dönüştürülerek dilimleyici yazılıma aktarılmış, tabla konumlandırması ve üretim parametreleri tanımlanmıştır. Tanımlanan üretim parametreleri ve ayarlamaların ardından dilimleyici yazılım aracılığıyla G-code formatında bir dosya oluşturulmuş ve bu dosya FDM cihazına aktararak üretim işlemi başlatılmıştır. Üretim işleminin sona ermesinin ardından elde edilen prototip ürünler görsel olarak değerlendirilmiş ve yeni tasarım parametrelerine sahip SBA-01 elemanın gerçek koşullarda kullanımına engel bir duruma rastlanmamıştır. Ayrıca elde edilen prototip ürünlerin, optimizasyon sonucunda elde edilen tasarım parametrelerini somut olarak iyi derecede tarif ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.4. Nihai Tasarım İçin İmalat Resmi Çıktısı

Uygulama örneğinin son aşaması olarak optimize edilen SBA-01 elemanının nihai tasarım imalatı için teknik resimleri hazırlanmış ve Şekil 4.51’ de verilmiştir. Söz konusu uygulama örneğinin amacına uygun, başarılı bir şekilde tamamlandığına karar verilmiş ve elde edilen geometri onaylanarak uygulama örneği sonlandırılmıştır.



Şekil 4.51. SBA-01 nihai tasarım için imalat resmi

5. SONUÇLAR

Tarım makineleri tasarım ve imalat sektöründe aktif rol alan büyük ölçekli ve kurumsal yapılara sahip sınırlı sayıda işletme bulunmaktadır. Bunların dışında kalan işletmeler genellikle küçük ve orta ölçekli imalat kapasitesine sahip işletmelerdir. Bu işletmeler, yeni ürün tasarımı, var olan ürünler için tasarım iyileştirme/geliştirme/optimizasyon ve yeni imalat yöntemleri ile üretim yapabilme konularında ileri düzey mühendislik ve imalat teknolojilerinden diğer makine imalat alanlarına kıyasla yeterince yararlanamamaktadır. Özellikle ülkemizde tarım makineleri tasarımı ve imalatı alanında yeni imalat teknolojileri ve ileri düzey bilgisayar destekli tasarım/mühendislik araçlarının kullanımı oldukça sınırlı düzeyde olup, tarım alet ve makineleri üzerinde yapılan ileri düzey makine tasarımı, tasarım geliştirme ve yeni imalat teknolojileri içerikli araştırmalar yok denecek kadar az sayıdadır.

Gerçekleştirilen bu lisansüstü tez çalışmasında, yeni imalat teknolojilerinden biri olan katmanlı imalat teknolojileri hakkında ulusal ve uluslararası düzeyde güncel bilgiler derlenmiş, söz konusu imalat tekniğinin mevcut durumdaki eğilimi ve ülkemizdeki durumunun saptanması amacı ile var olan bilimsel nitelikli çalışmaları kapsayan geniş bir literatür/kaynak taraması yapılarak belirlenen sınırlamalar dahilinde içerik analizi yöntemiyle çıkarımlar yapılmıştır. Ardından katmanlı imalat teknolojilerinin tarım makineleri tasarım ve imalat alanı özelinde kullanılabilirliğine ve adaptasyonunun olabilirliğine dair bir uygulama algoritması geliştirilmiş, bu algoritma bitkisel üretimde kullanılan örnek bir ürün (SBA: Sera Bitki Askısı) üzerinden uygulamaya konulmuştur. Geliştirilen algoritma adımlarında tasarım iyileştirme/geliştirme optimizasyon (boyut optimizasyonu) ve hızlı prototipleme teknikleri başarı ile örneklendirilmiştir.

Katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili yapılan bilimsel nitelikli çalışmaların ülkeler bazında değerlendirilmesi sonucunda ise en fazla çalışmaların sırasıyla Amerika, Çin ve Almanya’da yapıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen literatür incelemesinde katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili yapılan çalışmalar arasında en fazla makale türünde yayınlara rastlanmıştır. Toplam çalışma sayılarının yıllara göre dağılımı incelendiğinde belirlenen yıllar bazında (2014-2018) her geçen yıl bir artış gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, katmanlı imalat teknolojileri üzerine birçok farklı alanda aktif olarak ve neredeyse her geçen yıl artış gösteren bir şekilde çalışmaların yapılmasına rağmen ülkemizde ve diğer ülkelerde tarımsal üretim, alet ve makineleri ile alakalı hiçbir çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu durum, tarım makineleri alanı özelinde, katmanlı imalat teknolojileri üzerine çalışılması gerektiğinin bir göstergesi olarak düşünülmektedir. Türkiye ölçeğinde yapılan incelemede ise 2014-2018 yılları arasında yapılan 3938 adet çalışmanın 25 tanesinin ülkemizde yapıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu da toplam çalışma sayısının yaklaşık %0.63’lük bir kısmına denk gelmekte ve katmanlı imalat teknolojilerinin ülkemiz açısından üzerinde durulması ve çalışılması gerektiğinin açık bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen uygulama algoritması başarı ile detaylandırılmıştır. Uygulama algoritmasındaki adımlar, konu ile alakalı sektör çalışanları ve araştırmacıların tarımsal üretimde kullanılan farklı bir ürün, alet ve makineyi iyileştirilme süreçlerinde kullanabilmeleri için sırası ile detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Geliştirilen algoritmanın sektör çalışanları ve araştırmacılar tarafından uygulamaya konulması ile kaliteli ürün, minimum üretim maliyeti ve maksimum kar, kısa imalat süresi ve verimlilik açısından önemli avantajlar sağlanacak potansiyeli bulunmaktadır.

Uygulama örneğinde odak ürün olarak seçilen SBA-01 elemanı, minimum kalınlık tasarım hedefine bağlı kalınarak optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda eleman kalınlığı yaklaşık 1.69 mm inceltilmiş ve kütle bazında yaklaşık %34.49'luk azalma sağlanmıştır. Elde edilen yeni tasarım parametreleri, simülasyon çalışmasıyla doğrulanmış ve sonuçlarda herhangi bir tutarsızlık gözlenmemiştir. Optimizasyon sürecinden edilen parametreler, yeni tasarım parametreleri olarak kabul edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasıyla elde edilen kütle azaltımının seri üretim yapan üreticiler için önemli bir iyileştirme olduğu düşünülmektedir. Hızlı prototipleme uygulaması ile üretilen fiziki prototipler görsel olarak değerlendirilmiş, SBA-01 elemanına ait yeni tasarım parametrelerinin gerçek koşullarda kullanıma engel bir durum teşkil etmediği sonucuna ulaşılmıştır.

Toplam süreçteki sonuçlar değerlendirildiğinde; tez çalışmasının temel konusu olan katmanlı imalat teknolojilerinin günümüz koşullarında birçok farklı alanda aktif bir şekilde kullanıldığı ve ilerleyen yıllarda, birçok imalat yönteminin yerini alacağı öngörülmektedir. Ancak ülkemiz bazında, özellikle tarım makineleri tasarım ve imalat alanı özelinde konu ile ilgili çalışmaların yetersiz kaldığı gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda net bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca katmanlı imalat teknolojileri ile ilgili uluslararası çalışmaların birçoğu hızlı prototiplemeden ziyade son kullanıcıya hitap eden nihai ürün imalatına yönelmiş ve bu konu üzerine çok sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Öyle ki günümüzde katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak tıp sektöründe canlı organ üretimi, havacılık sektöründe jet motoru üretimi gibi çalışmaları bulunmaktadır. Tarım makineleri tasarım ve imalat sektörüne de nihai ürün üretimi amacıyla bu tip teknolojik altyapılara yapılan yatırımlar, ulusal ve uluslararası rekabet gücünün artırılması anlamında oldukça faydalı olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Adekanye, S.A., Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T. and Owolabi, M.G. 2017. Additive manufacturing: Future of manufacturing. *Materiali in Tehnologije / Materials and Technology*, 51 (5): 709-715.
- Aköz, F. ve Yüzer, N. 2009. Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan yöntemler. İMO 1. İnşaat Mühendisliği Eğitimi Sempozyumu, Antalya.
- Akram C, Khaled H-H. and Frédéric V 2018. Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Comput. Ind. Eng.*, 126: 292-301.
- Alabort, E., Barba, D. and Reed, R.C. 2019. Design of metallic bone by additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 164: 110-114.
- Allaire, G. and Bogosel, B. 2018. Optimizing supports for additive manufacturing. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 30 p.
- Alpay, E. 2012. Implications of additive manufacturing applications for industrial design profession from the perspective of designers. MSc, Middle East Technical University, Ankara.
- Altuntaş, Ö. 2016. Prohexadione-Ca uygulamalarının domateste bitki büyümesi besin element alımı ve meyve kalitesi üzerine etkileri. *Tar. Bil. Derg.*, 26 (1): 98-105.
- Amara, E.H., Tamsaout, T. and Kheloufi, K. 2018. Laser additive manufacturing modeling. 5 p.
- Anand, S., Ghalsasi, O., Zhang, B. et. al. 2018. Additive manufacturing simulation tools in education. World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC) Albuquerque, NM, USA.
- Aran, A., 2007. Mal 201-Malzeme Bilgisi. İTÜ Makine Fakültesi Ders Notları, 94 s.
- Aslan, B. and Yıldız, A.R. 2018. Lattice structure optimization for additive manufacturing. International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Samsun.
- Aslan, E. ve Tavşancıl, E. 2001. İçerik Analiz ve Uygulama Örnekleri. İstanbul, Epsilon.
- ASTM D2240, Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.
- ASTM Standard F2792-12a. 2012. Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International.
- ASTM Standard, ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing - General principles - terminology

- Atzeni, E. and Salmi, A. 2012. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 1147-1155.
- Avinash, J., UdayKiran, K. and Srujita, K. 2018. The impact of additive manufacturing on Indian GDP. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 173-185.
- Aydın, M., Güler, B. ve Çetinkaya, K. 2018. Dikey ekstrüzyon (Filament) sistemi tasarım ve prototip imalatı. *International Journal of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (1): 1-10.
- Azeez, A.T. and Mohammed, S.S. 2018 Solidworks simulation of mechanical properties of recycled plastics/nanocomposite faces sandwich panels. *ARO-The Scientific Journal of Koya University* 6 (1): 65-70.
- Baino, F., Verne, E. and Massera, J. 2018. Additive manufacturing of bioactive glasses. *Journal of 3d Printing in Medicine*, 2 (2): 47-49.
- Bakkalbasi, N., Bauer, K., Glover, J. and Wang, L. 2006. Three options for citation tracking: Google Scholar, Scopus and Web of Science, Biomed. Digit. Libr. 10.1186/1742-5581-3-7
- Balcıoğlu, Y.S. 2014. 3 boyutlu yazıcı ve sinemada kullanımı. Yüksek lisans tezi, İzmir Yaşar Üniversitesi, İzmir.
- Ballardini, R.M. 2018. Intellectual property rights and additive manufacturing. *Additive Manufacturing - Developments in Training and Education*, 85-97.
- Bandyopadhyay, A., Gualtieri, T. and Bose, S. 2015. Global engineering and additive manufacturing. *Additive manufacturing*. Florida, pp. 1-18.
- Baumann, F.W., Eichhoff, J.R. and Roller, D. 2017. Resources and their description for additive manufacturing. *International Journal on Advances in Intelligent Systems*, 10 (3): 238-260.
- Baumers, M. and Tuck, C. 2018. Developing an understanding of the cost of additive manufacturing. *Additive Manufacturing - Developments in Training and Education*, 67-83.
- Bendsoe, M.P. and Sigmund, O. 2003. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, 393 p.
- Berdine, G.G., Dipaloo, M., Weinberg, M. 2019. Economic and regulatory perspectives on additive manufacturing. *3D Printing in Orthopaedic Surgery*, 41-48.
- Bhadeshia, H.K.H.D. 2016. Additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32 (7): 615-616.

- Bhushan, B. and Caspers, M. 2017. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsyst Technol.*, 23 (4): 1117–1124.
- Bijl, A. 1989. Computer Discipline and Design Practice. Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Bikas, H., Stavropoulos, P. and Chryssolouris, G. 2015. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol.*, 83: 389-405.
- Bircan, G. 2005. Kanca traverslerinin parametrik tasarlanmaları gerilme analizleri ve prototip üretim yöntemlerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 64 s.
- Blösch-Paidosh, A. and Shea, K. 2017. Design heuristics for additive manufacturing. *Proceedings of ICED'17 / the 21st International Conference on Engineering Design*, Canada, 5: 91-100.
- Bogue, R. 2013. 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing. *Assem. Autom.*, 33 (4): 307-311.
- Bose, S., Ke, D., Sahasrabudhe, H. and Bandyopadhyay, A. 2017. Additive manufacturing of biomaterials. *Progress in Materials Science*, 98 p.
- Bozdemir, M. 2018. Silah kabzasının 3B yazıcılarla tasarım ve imalatı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (1): 57-68.
- Brackett, D., Ashcroft, I. and Hague, R. 2011. Topology optimization for additive manufacturing. In *Solid Freeform Fabrication Symposium* 348-362.
- Childs, P.R.N. 2004. Mechanical Design. Butterworth-Heinemann, Oxford, 373 p.
- Chohan, J.S., Singh, R., Boparai, K.S., Penna, R. and Fraternali, F. 2017. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications. *Compos. B. Eng.*, 117: 138-149.
- Chua, C.K., Wong, C.H. and Yeong, W.Y. 2017. Benchmarking for additive manufacturing. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*, 181-212.
- Chua, C.K., Wong, C.H. and Yeong, W.Y. 2017. Material characterization for additive manufacturing. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*, 95-137.
- Chua, C.K., Wong, C.H. and Yeong, W.Y. 2017. Roadmap on additive manufacturing standards. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*, 31-55.

- Corcodel, R.I. and Ilies, H.T. 2017. Printability analysis in additive manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*.
- Criscenti, G., Maria, C.D., Vozzi, G. and Moroni, L. 2018. Characterization of additive manufactured scaffolds. *3D Printing and Biofabrication*, 55-78.
- Çalışkan, K. 2011. Traktör emniyet çerçevesinin dayanım optimizasyonunun laboratuvar test sonuçları ile doğrulanmış sonlu elemanlar yöntemi (sey) simülasyonu ile gerçekleştirilmesi. Doktora tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 91 s.
- Çelik, H.K. 2006. Dişli pompalarda dişli çark ve pompa gövdesinin sonlu elemanlar metodu ile gerilme analizi. Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 122 s.
- Çelik, H.K. 2013. Tarım makineleri tasarımında yapısal optimizasyon tekniklerinin uygulanması üzerine bir araştırma: Tamburlu çayır biçme makinesi. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 234 s.
- Çelik, H.K., Hambali, R.H., Rennie, A.E.W. and Akıncı, İ. 2011. Deformation simulation of additive manufacturing FDM parts: A case study for greenhouse clips. *Rapid Design Prototyping and Manufacturing*, 155-162.
- Çelik, H.K., Karayel, D., Çağlayan, N., Rennie, A.E.W. and Akıncı, İ. 2010. Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: Case study for a sample in-line drip emitter. *Virtual and Physical Prototyping*, 6 (1): 147-156.
- Çelik, H.K., Lupeanu, M.E., Rennie, A.E.W., Neagu, C. and Akıncı, İ. 2013. Product re-design using advanced engineering applications and function analysis: A case study for greenhouse clips. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35 (3): 305-318.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.C. ve Duysak, A. 2013. Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31: 53-69.
- Çolpan, E. 2011. Potasyum uygulamalarının sera koşullarında yetiştirilen sırık domatesin (*lycopersicon esculentum* l. var. şimşek) verim ve verim unsurlarına etkileri. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 43 s.
- Dehghanghadikolaie, A., Namdari, N., Mohammadian, B., Fotovvati, B.J.J.O.S. and Research, E. 2018. Additive manufacturing methods: a brief overview. *J. Sci. Eng. Res*, 5: 123-131.
- Delikanlı, K., Sofu, M.M. ve Bekci, U. 2005. Üretim sektöründe hızlı direkt imalat sistemlerinin yeri ve önemi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 33-39.

- Demir, E. ve Toktaş, İ. 2016. Tıp ve Sağlık Bilimleri Eğitimi İçin İnsan Vücudundaki Anatomik Yapıların Modellenmesi ve 3 Boyutlu Baskısı. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
- Demir, S., Sezer, H.K. ve Özdemir, V. 2018. Topolojik nesnelerin FDM (Ergiyik Biriktirerek Modelleme) yöntemiyle üretimi: Klein şişesi örneği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (2): 76-87.
- Durgun, İ. ve Başaran, D. 2010. FDM katmanlı üretim teknolojisinin araç geliştirme sürecindeki uygulamaları. 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
- Dvorak, F., Micali, M. and Mathieu, M., 2018. Planning and scheduling in additive manufacturing. *Intel. Artif.*, 21: 40-52.
- Eilam, E. 2005. Reversing: Secrets of Reverse Engineering. Indianapolis, 620 p.
- Elahinia, M., Moghaddam, N.S. et al. 2016. Fabrication of NiTi through additive manufacturing: A review. *Prog. Mater Sci.* 83: 630-663.
- Ermurat, M. 2002. Hızlı prototip ve üretim teknolojilerinin incelenmesi. Bitirme Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- Ertuğrul, O., Ünver, H.O. and Durlu, N. 2018. Additive manufacturing of titanium alloys. 17. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Bursa.
- Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K. and Clare, A.T. 2016. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Mater Des.*, 95: 431-445.
- Evlen, H., Erel, G. ve Yılmaz, E. 2018. 3 boyutlu yazıcı tasarımı ve yazdırma doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi. *International Journal of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (1) 23-31.
- Eyers, D. R., Potter, A. T., Gosling, J. and Naim, M. M. 2018. The flexibility of industrial additive manufacturing systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 38: 2313- 2343.
- Eyers, D.R. and Potter, A.T. 2017. Industrial additive manufacturing: A manufacturing systems perspective. *Comput. Ind.*, 92: 208-218.
- Ezeiruaku, S. 2015. Review of additive manufacturing technologies and characterization of additive manufacturing machine. Final project master, The University of New Mexico, 54 p.
- Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F. and Lambiase, A. 2018. Production management fundamentals for additive manufacturing. *3D Print., InTech.*, 71-88.

- Fetvacı, C. 2001. Düz dişli çarkların sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi ve gerilmelerin incelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 90 s.
- Ford, S. and Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, DOI No. 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- Francis, V. and Jain, P.K. 2018. Effect of stage-dependent addition of nanoparticles in additive manufacturing. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-20.
- Garner, E., Kolken, H.M., Wang, C.C., Zadpoor, A.A. and Wu, J. 2019. Compatibility in microstructural optimization for additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 26: 65-75.
- Gebhardt, A. 2011. Understanding Additive Manufacturing. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich, 168 p.
- Gebhardt, A. and Höttner, J.S. 2016. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich. 610 p.
- Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. 2010. Additive Manufacturing Technologies. Springer, New York, 510 p.
- Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies. 498 p.
- Gökçearslan, A. 2017. Üç boyutlu yazıcının grafik tasarım alanına yansımaları. *Fine Arts*, 12 (2): 135-148.
- Grant, G.T., Parthasarathy, J., Raman, S., Azevedo, B. and Scarfe, W.C. 2018. CBCT and additive manufacturing technology. *Maxillofacial Cone Beam Computed Tomography*, 1207-1242.
- Guo, N. and Leu M.C. 2013. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8 (3): 215-243.
- Guo, X., Cheng, G. and Liu, W.K. 2018. Additive manufacturing experimental methods and results, and additive manufacturing scalability. *Report of the Workshop Predictive Theoretical, Computational and Experimental Approaches for Additive Manufacturing*, 53-69.
- Gupta, B.M. and Dhawan, S.M. 2018. Three dimensional (3D) printing: a scientometric assessment of global publications output during 2007-16. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 38: 238-245.
- Gusarov, A.V., Grigoriev, S.N., Volosova, M.A., Melnik, Y.A., Laskin, A., Kotoban, D.V. and Okunkova, A.A. 2018. On productivity of laser additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 261: 213-232.

- Haigh, J.N., Dargaville, T.R. and Dalton, P.D. 2017. Additive manufacturing with polypropylene microfibers. *Mater Sci Eng C*, 77,883–887.
- Haleem, A., Javaid, M. and Saxena, A. 2018. Additive manufacturing applications in cardiology: A review. *The Egyptian Heart Journal*.
- Hathaway, B., Garde, K., Mantell, S. and Davidson, J. 2018. Design and Characterization of an additive manufactured hydraulic oil cooler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117: 188-200.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. and Emmelmann, C. 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta. Mater.*, 117: 371-392.
- Hillebrecht, M., Klemp, E., Mehmert, P. and Flügel, S. 2018. Additively manufactured hood hinges. *Lightweight Design Worldwide*, 11 (3): 42-47.
- Ho, C.M.B., Ng, S.H. and Yoon, Y.J. 2015. A review on 3d printed bioimplants. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 16 (5): 1035-1046.
- Horst, D.J., Duvoisin, C.D. and Vieira, R.A. 2018. Additive manufacturing at industry 4.0: a Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 8 (8), August.
- <http://www.3dportal.io/> [Son erişim tarihi: 04.09.2018].
- <http://www.altintohumculuk.com.tr/> [Son erişim tarihi: 03.03.2019].
- <http://www.matweb.com/> [Son erişim tarihi: 15.03.2019].
- <http://www.polymerdatabase.com> [Son erişim tarihi: 14.03.2019].
- <http://www.rigid3d.com/> [Son erişim tarihi: 04.07.2018].
- <http://www.tridi.co/> [Son erişim tarihi: 03.09.2018].
- <https://elektromanyetix.com/> [Son erişim tarihi: 18.10.2018].
- <https://priyoid.com/> [Son erişim tarihi: 14.04.2019].
- <https://tr.pinterest.com/> [Son erişim tarihi: 02.11.2018].
- <https://ultimaker.com/> [Son erişim tarihi: 06.06.2018].
- <https://www.3dhubs.com/> [Son erişim tarihi: 17.10.2018].
- <https://www.autodesk.com/> [Son erişim tarihi: 16.10.2018].
- <https://www.bintoa.com/> [Son erişim tarihi: 19.10.2018].
- <https://www.rijkzwaan.com/> [Son erişim tarihi: 03.03.2019].

<https://www.simplify3d.com/> [Son erişim tarihi: 18.10.2018].

<https://www.artiboyut.com/> [Son erişim tarihi: 03.09.2018].

<https://onlineconversion.vbulletin.net/> [Son erişim tarihi: 09.012.2018].

Inamura, C., Stern, M., Lizardo, D., Houk, P. and Oxman, N. 2018. Additive manufacturing of transparent glass structures. *3D Print. Addit. Manuf.*, 5: 269-283.

Zhang, J. and Jung Y.G. 2018. Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications, Cambridge, MA (USA): Butterworth-Heinemann.

Jardini, A.L., Larosa, M.A., Kaasi, A. and Kharmandayan, P. 2017. Additive manufacturing in medicine. *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, 1-21.

Jasiuk, I., Abueidda, D.W., Kozuch, C., Pang, S., Su, F.Y. and McKittrick, J. 2018. An overview on additive manufacturing of polymers. *JOM*, 1-9.

Javaid, M. and Haleem, A. 2017. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature-based review. *Alexandria Journal of Medicine*, 12 p.

Jiang, J., Xu, X. and Stringer, J. 2018. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2: 64 p.

Jones, D.R., Fensin, S.J., Ndefru, B.G., Martinez, D.T., Trujillo, C.P. and Gray, G.T. 2018. Spall fracture in additive manufactured tantalum. *J. Appl. Phys.*, 124: 8 p.

Joran, W. B., Alperovich, J., Reid, T. N. and Raman, K. 2016. The design for additive manufacturing worksheet. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1: 15 p.

Jose, R.R., Rodriguez, M.J., Dixon, T.A., Omenetto, F. and Kaplan, D.L. 2016. Evolution of bioinks and additive manufacturing technologies for 3D bioprinting. *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 2: 1662-1678.

Kara, E., Buldum, B.B., Yılmaz, Ç. ve Özkaya, N. 2016. 3B Yazıcı ile Kişiye Özgü İmplant Tasarımı. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.

Kartal, F., Nazlı, C., Yerlikaya, Z., Simsek, F. ve Çetin, M.H. 2018. Yapım zamanı için erimiş birikim modelleme işlem parametrelerinin optimizasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (1): 96-103.

Kazakis, G., Kanellopoulos, I., Sotiropoulos, S. and Lagaros, N.D. 2017. Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. *Heliyon* 3 (10).

- Kelly, S., Paterson, A. and Bibb, R. 2015. A review of wrist splint designs for additive manufacture. Rapid Design, Prototyping and Manufacture conference (RDPM 14), Loughborough, Great Britain, 15-16 December, 12 p.
- Khan, F.A., Çelik, H.K., Oral, O. and Rennie, A.E.W. 2018. A short review on 4D printing. *International Journal Of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (2): 59-67.
- Khan, F.A., Çelik, H.K., Oral, O. and Rennie, A.E.W. 2018. A short review on 4D printing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (2) 59-67.
- Kontovourkis, O., Tryfonos, G. and Georgiou, C. 2019. Robotic additive manufacturing (RAM) with clay using topology optimization principles for toolpath planning: the example of a building element. *Architectural Science Review*, 13 p.
- Korinko, P.S., Bobbitt, J.T. et. al. 2016. Characterization of additive manufacturing for process tubing. *Submitted to Additive Manufacturing*, 71 (3): 1095-1104.
- Köksal, S. 2016. İmalat Müh. Deneysel Metotlar. Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, 6 s.
- Körner, C. 2016. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review. *Int. Mater. Rev.*, 61 (5): 361-377.
- Krueger, H. 2017. Standardization for additive manufacturing in aerospace. *Engineering*, 3: 585 p.
- Krutz, G., Thompson, L. and Claar, P. 1984. Design of Agricultural Machinery. John Willey & Sons, UK, 473 p.
- Kumar, H.A. and Kumarguru, S. 2018. Distortion in metal additive manufactured parts. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 281-295.
- Kumar, M., Sharma, A., Mohanty U.K. and Simhambhatla S. 2019. Additive manufacturing with welding. *Advances in Welding Technologies for Process Development*, 44 p.
- Kurowski, P. and Szabo, B. 1997. How to find errors in finite-element models. *Mach. Des.*, 69 (18): 93-98.
- Lachmayer, R., Wolf, A. and Kloppenburg, G. 2015. Additive manufacturing of optical components. *SPIE Newsroom*, 2 p.
- Leach, R. 2016. Metrology for additive manufacturing. *Meas. Control*, 49 (4): 132-135.
- Lee, H., Lim, C.H.J., Low, M.J., Tham, N., Murukeshan, V.M., et al. 2017. Lasers in additive manufacturing: A review. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, 4 (3): 307-322.

- Lee, H., Lim, J.H.J., Low, M.J., Tham, N., Murukeshan, V.M. and Kim Y-J. 2018. Erratum to: Lasers in Additive Manufacturing: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5 (5): 671.
- Lei, Y., Chen, X., Zhang, L., Li, L., Kang, Z., Wang, C. and Sun, W. 2019. Additive manufacturing in vascular stent fabrication. *International Conference on Materials Science and Manufacturing Engineering*, 253: 9 p.
- Lele, A. 2018. Additive Manufacturing (AM). 234 p.
- Levi, H. 2018. Additive manufacturing in technical ceramics. *Interceram - International Ceramic Review*, 67 (3): 12-13.
- Levy, N., Schindel, R. and Kruth, J.P. 2003. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (Lm) Technologies. *State of the Art and Future Perspectives, Cirp Annals*, 52 (2): 589-609.
- Lewandowski, J.J. and Seifi, M. 2016. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Ann Rev Mater Res*, 46: 151-186.
- Li, J., Wasley, T., Nguyen, T.T., Ta, V.D., Shephard, J.D., Stringer, J. et al. 2016. Hybrid additive manufacturing of 3D electronic systems. *J. Micromech Microeng.*, 26: 105005-105019.
- Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., Shi, G. and Blackburn, J. 2018. Progress in additive manufacturing on new materials, *Journal of Materials Science and Technology* 35: 242-269.
- Limido, J., Deconinck, P., Beaucamp, A. et. al. 2018. Additively manufactured penetrating warheads. *EPJ Web of Conferences* 6 p.
- Linari, M. 2012 Topology and Shape Optimization, pp.1-103, 5 Novembre.
- Liu, S.Y. and Shin, Y.C. 2018. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Mater. Des.*, 164: 64 p.
- Liu, Y.J., Li, S.J., Hou, W.T., Wang, S.G., Hao, Y.L., Yang, R., Sercombe, T. and Zhang, L.C. 2016. Electron beam melted beta-type Ti-24Nb-4Zr-8Sn porous structures with high strength-to-modulus ratio. *J. Mater. Sci. Technol.*, 13 p.
- Maad, A.Z., Rohib, R. and Irawan, A. 2018. Additive manufacturing for steels: A review. *Material Science and Engineering*, 285: 1-9.
- Manmadhachary, A., Malyala, S.K. and Alwala, A. 2019. Medical applications of additive manufacturing. *International Conference on ISMAC in Computational Vision and Bio-Engineering*, 1643-1653.
- Mao, M., He, J., Li, X., Zhang, B., Lei, Q., Liu, Y. and Li, D. 2017. The emerging frontiers and applications of high-resolution 3D printing. *Micromachines*, 8 (4): 113 p.

- Martínez, N.L., Rivoa M.S., Alvareza, J.D. and Frias, J.M. 2017 Additive manufacturing for a moon village. *Procedia Manuf.*, 13: 794-801.
- Melchels, F., Domingos, M., Klein, T., Malda, J., Bartolo, P. and Huttmacher, D. 2012. Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 37 (8): 1079-1104.
- Miar, S., Shafiee, A., Guda T. et al. 2018. Additive manufacturing for tissue engineering. *3D Printing and Biofabrication*, 3-54.
- Mihalko, W.M. 2019. Additive manufacturing of arthroplasty implants. *3D Printing Orthopaedic Surgery, Elsevier* 49-53.
- Molitch-Hou, M. 2018. Overview of additive manufacturing process. *Additive Manufacturing, Butterworth-Heinemann*, 1-38.
- Momeni, F., Hassani, N., Liu, X. and Ni, Jun. 2017. A review of 4D printing. *Materials & Design*, 122: 42-79.
- Moore, D.R. and Turner, S. 2001. Mechanical Evaluation Strategies for Plastics. Cambridge, Woodhead Publ; 328 p.
- Moritz, T., Partsch, U., Ziesche, S. et. al. 2014. Additive manufacturing of ceramic components. *Mater Process Annu. Rep.* 15: 28-31.
- Nadasbaş, S.E. ve Çileroğlu, B. 2018. Moda tasarımında 3 boyutlu yazıcıların malzeme-işlev-form odaklı kullanımları ve çok işlevli modüler giysi tasarımı çalışması. *The Journal of Academic Social Science Studies*, 231-257.
- Najmon, J.C., Raeisi, S. and Tovar, A. 2019. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7-31.
- Narkevich, I.A., Flisyuk, E.V., Terent'eva, O.A. and Semin, A.A. 2017. Drug synthesis methods and manufacturing technology. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 51 (11): 40-44.
- Narra, S.P., Mittwede, P.N., Wolf, S.D. and Urish, K.L. 2019. Additive manufacturing in total joint arthroplasty. *Orthopedic Clinics*, 50 (1): 13-20.
- Nayak, A. and K Jain, P.K. 2017. Additive manufacturing in civil engineering. *Civil Engineering Research Journal*, 1 (2): 1-4.
- Nespoli, A., Abedi, H., Fanciulli, C. and Villa, E. 2018. Additive manufacturing of miniature combustors.
- Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T. and Hui, D. 2018. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng*, 143-172

- Niaki, M.K. and Nonino, F. 2018. Selection and implementation of additive manufacturing. *In The Management of Additive Manufacturing*, Springer, Cham, 193-220.
- Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S., Grib, V.V. and Kartsov, S.K. 2017. Additive manufacturing with ultrasound. *Russian Engineering Research*, 37 (12): 1070-1073.
- Nohut, S., Dilibal, S. and Sahin, H. 2018. Ceramic additive manufacturing via lithography. *Ceramic Industry*, 22-26.
- Olgun, R. ve Yılmaz, T. 2014. Peyzaj mimarlığında bilgisayar destekli tasarım ve tasarım aşamaları. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (1): 48-59.
- Ovalı, İ. ve Esen, C. 2017. Ansys Workbench. 560 s.
- Öz, Ö., Aydın, M., Kara, A.S. ve Sancak, M.S. 2018. Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan doluluk oranının hasar yüküne olan etkisinin belirlenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (1): 32-39.
- Özbakış, M. 2008. Debriyaj sistemlerinde kullanılan diyafram yayların karakteristiğinin incelenmesi ve optimizasyonu. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 78 s.
- Özgür, O. 2015. Bilgisayar destekli tasarım eğitiminde farklı öğretim tekniklerinin öğrenme çıktıları üzerine etkileri. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 94 s.
- Parandoush, P. and Lin, D. 2017. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Compos. Struct.*, 182: 36-53.
- Popescu, D. and Laptoiu, D. 2016. Rapid prototyping for patient-specific surgical orthopaedics guides: a systematic literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 230 (6): 495-515.
- Poyraz, Ö. and Kuşhan, M.C. 2018. Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2): 729-742.
- Prakash, K.S., Nancharaih T. and Subba Rao, V.V. 2018. Additive manufacturing techniques in manufacturing - An overview, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 3873-3882.
- Qi, H.J., Joyce, K. and Boyce, M.C. 2003. Durometer hardness and the stress-strain behavior of elastomeric materials. *Rubber Chemistry and Technology*, 76 (2): 419-435.

- Qian M. and Bourell, D.L. 2017. Additive Manufacturing of Titanium Alloys. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*.
- Reed, K., Laird, T. and Lignell M. 2018. Additive Manufacturing Powder Removal, 86, p.
- Ribic, B. 2017. Metal additive manufacturing for aerospace. *Conference Paper* November.
- Roberts, C. and Bourell, D. 2018. Precursor additive manufacturing inventions. *JOM*, 70 (10) 2249-2253.
- Roschli, A., Gaul, K.T., Boulger, A.M., Post, B.K., Chesser, P.C., Love, L.J. and Blue, F. 2018. Designing for big area additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 46 p.
- Rubenchik, A.M., King, W.E. and Wu, S. 2018. Scaling laws for the additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 33 p.
- Ruiz, M.S.I., Frias, M.A.N., Rider, R.M., Guillen, A.P. and Rangel, A.G. 2015. Fundamentals of stereolithography, an useful tool for diagnosis in dentistry. *Int. J. Dent. Sci.*, 17 (1): 15-21.
- Saadlaoui, Y., Milan, J.L., Rossi, J.M. and Chabrand, P. 2017. Topology optimization and additive manufacturing: comparison of conception methods using industrial codes. *J. Manuf. Syst.*, 43: 178-186.
- Sağbaş, B., Boyacı, T.H. and Durakbasa, N.M. 2018. Precision metrology for additive manufacturing. *Proceedings of the International Symposium for Production Research*, 324-332.
- Sakakibara, N. 2008. Finite element method in fracture mechanics. The University of Texas at Austin, 18 p.
- Salvador, M.R. and Garcia, L.A.G. 2019. Additive manufacturing in healthcare. *Foresight and STI Governance*, 12 (1): 47-55.
- Sander, G., Tan, J., Balan, P. et. al. 2018. Corrosion of additively manufactured alloys: A review. *CORROSION*, 74 (12): 1318-1350.
- Santos, V.M.R., Maskery, I., Sims, D. and Thompson, A. 2018. Benchmarking of an additive manufacturing process. *Proc. ASPE/Euspen Advancing Precision in Additive Manufacturing*, Berkeley, USA.
- Sealy, M.P., Madireddy, G., Williams, R., Rao, P. and Toursangsaraki, M. 2018. Hybrid processes in additive manufacturing. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 140: 13 p.
- Serin, G., Ünver, H.O., Kahya, M. and Durlu, N. 2018. A review of additive manufacturing technologies. The 17th International Conference on Machine Design and Production, Bursa.

- Sevim, Ö. 2013. Yapay arı koloni algoritması kullanılarak 3 boyutlu çelik yapıların optimum tasarımı. Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, 89 s.
- Shirazi, S.F.S., Gharekhani, S., Mehrli, M., Yarmand, H., Metselaar, H.S.C., Kadri, N.A. et al. 2015. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Sci. Tech. Adv. Mat.*, 16, 033502. doi:10.1088/1468-6996/16/3/033502.
- Sing, S.L. 2018. Introduction to additive manufacturing for orthopaedic implants. *Selective Laser Melting of Novel Titanium-Tantalum Alloy as Orthopaedic Biomaterial*, 1-8.
- Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y. and Wiria, F.E. 2015. Laser and electronbeam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: a review on processes, materials and designs. *J Orthop Res*. doi:10.1002/jor.23075.
- Singh, S., Ramakrishna, S. and Singh, R. 2017. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 185-200.
- Singh, S., Ramakrishna, S. and Singh, R. 2017. Material issues in additive manufacturing: A review *J. Manuf. Processes*, 25: 185-200.
- Sisca, F.G., Angioletti, C.M., Taisch, M. and Colwill, J.A. 2016. Additive manufacturing as a strategic tool for industrial competition. *Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow (RTSI), 2016 IEEE 2nd International Forum on IEEE*, 1-7.
- Srivastava, S.K. 2016. Additive manufacturing.
- Stansbury, J.W. and Idacavage, M.J. 2016. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent. Mater.* 32: 54-64.
- Subramanyam, B., Vineeta, T.V., Garre, P., Bharadwaj, V.V.S.N. and Shashank, P.S. 2018. Comparative analysis of additive manufacturing over conventional manufacturing. *Materials Science and Engineering*, 455: 11 p.
- Suzić, N., Suzić, S. and Forza, C. 2017. In business of additive manufacturing. XVII International Scientific Conference on Industrial Systems (IS'17) Novi Sad, Serbia, 32-37.
- Şahin, K. ve Turan, B.O. 2018. Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin karşılaştırmalı analizi. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2 (2): 97-116.
- Tanttari, J., Komi, E., Hynninen, A. et. al. 2018. Additive manufacturing of silencers with microperforates. *Advances in Acoustics and Vibration*, 13 p.
- Tekil, M. 1997. 554 Sayılı KHK Çerçevesinde Endüstriyel Tasarım Kavramı ve Koruma Şartları, İHFM s. 233.

- Thompson, A., Maskery, I. and Leach, R.K. 2016. X-ray computed tomography for additive manufacturing: A review. *Meas. Sci Technol.*, 27: 17 p.
- Townsend, A., Senin, N., Blunt, L. and Leach, J. 2016. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precis. Eng.*, 46: 34-47.
- Turner, B.N. and Gold, S.A. 2015. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyp. J.*, 21 (3): 250-261.
- Türkay, M. 2006. Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metotları. Koç Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Türkel, E. 2008. Bilgisayar destekli tasarım programlarıyla seramik ürünlerin modellenmesi ve bir pisuar uygulaması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Seramik Anasanat Dalı / Sanatta Yeterlilik Tezi, İzmir, 208 s.
- Udofia, E.N. and Zhou, W. 2019. A guiding framework for microextrusion additive manufacturing. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 141 (5): 16 p.
- Uphoff, I.E., Gosselin, C., Rosen, D. and Laliberte, T., 2005. Rapid Prototyping for Robotics. *Cutting Edge Robotics*, pp. 17-46.
- Uriondo, A., Esperon-Miguez, M. and Perinpanayagam, S. 2015. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G: J. Aerosp. Eng.*, 229 (11): 2132-2147.
- Vlasceanu, D., Baci, F., Popescu, D., Hadar, A. and Marinescu, R. 2018. Development and 3D printing of an ABS ergonomic handle for medical use a case study. *Mat. Plast.*, 55 (4): 630-633.
- Vovrosh, J., Voulazeris, G., Petrov, P. and Zou, J. 2017. Additive manufacturing for quantum technologies. Preprint in Scientific Reports.
- Vyas, C., Pereira, R., Huang, B., Liu, F., Wang, W. and Bartolo, P. 2017. Engineering the vasculature with additive manufacturing. *Curr Opin Biomed Eng*, 2: 1-13.
- Wakimoto, T., Takamori, R., Eguchi, S. and Tanaka, H. 2018. Growable robot with 'additive-additive-manufacturing'. Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '18). ACM, New York, USA, 6 p.
- Walker, S., Yirmibeşoğlu, O.D., Daalkhaijav, U. and Mengüç, Y. 2019. Additive manufacturing of soft robots. *Woodhead Publishing in Materials*, 335-359.
- Wang, X., Gong, X. and Chou, K. 2016. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Proc IMechE Part B: J. Eng. Manuf.*, 1-14.

- Wang, X., Xu, S., Zhou, S. et al. 2016. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: a review. *Biomaterials*, 83: 127-141.
- Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P. 2016. Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32 (7): 641-647.
- Wohlers Report 2014: Global Reports
- Wong, K.V. and Hernandez, A. 2012. A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1-10.
- Wu, P., Wang, J. and Wang, X. 2016. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68: 21-31.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang H. and Zhao, J. 2015. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*, 8: 5834-5846
- XiaoHui, S., Wei, L., PingHui, S., QingYong, S., QingSong, W., YuSheng, S. et al. 2015. Selective laser sintering of aliphaticpolycarbonate/hydroxyapatite composite scaffolds for medical applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 81: 15-25.
- Yakout, M., Elbestawi, M.A. and Veldhuis, S.C. 2018. A review of metal additive manufacturing. *Technologies Solid State Phenomena*, 278: 1-14.
- Yalçın, B. ve Ergene, B. 2017. Endüstride yeni eğilim olan 3-B eklemeli imalat teknolojisi ve metalürjisi. *SDÜ. Uluslararası Teknolojik Araştırmalar Dergisi*, 9 (3): 65-88.
- Yang, S. and Zhao, Y.F. 2015. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80 (1): 327-342.
- Yang, Y., Wang, G., Liang, H., Gao, C., Peng, S., Shen, L. and Shuai, C. 2018. Additive manufacturing of bone scaffolds. *Int. J. Bioprint.*, 5 (1): 148.
- Yap, C.Y., Chua, C.K., Dong, Z.L., Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Loh, L.E. et al. 2015. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Appl Phys Rev* 2 (4): 21 p.
- Yavuzcan, H.G. 2016. Tasarım Sürecinin Yapılandırılması. Gazi Üniversitesi Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Bölümü Ders Notları, 61 s.
- Yıldız, A.R., Kaya, N. ve Öztürk F. 2003. Taşıt elemanlarının optimum topoloji yaklaşımı ile tasarımı. *TMMOB*, 1-10.

- Yıldız, Ö. 2017. Havacılıkta Tersine Mühendislik Uygulamaları. IX. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı, ss. 137-154, 6 Mayıs, Eskişehir.
- Zadpoor, A.A. 2018. Frontiers of additively manufactured metallic materials. *Materials*, 11 p.
- Zadpoor, A.A. and Malda, J. 2017. Additive manufacturing of biomaterials, tissues, and organs. *Ann. Biomed. Eng.*, 45: 1-11.
- Zenou, M. and Grainger, L. 2018. Additive manufacturing of metallic materials. *Additive Manufacturing, Butterworth-Heinemann*, 53-103 p.
- Zhang, J. and Jung, Y. 2018. Additive Manufacturing. Oxford: Elsevier Science & Technology. 350 p.
- Zhang, Y., Jarosinski, W. et. al. 2018. Additive manufacturing processes and equipment. *Addit. Manuf.*, 39-51.
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.G., Lee, J.H. and Zhang, J. 2017. Additive manufacturing of metallic materials: A review. *J Mater Eng Perform*, 27 p.
- Zuback, J.S. and DebRoy, T. 2018. The hardness of additively manufactured alloys. *Materials*, 11: 2070



ÖZGEÇMİŞ

Gökhan KUNT

gokhankunt@yahoo.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ	
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2010-2014	Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Çelik, H.K., Çınar, R., Kunt, G., Rennie, A.E.W., Uçar, M. and Akinci, İ. 2018. Finite element analysis of a PTO shaft used in an agricultural tractor. *Ergonomics International Journal*, 2, 147-147.
- 2- Çelik, H.K., Kunt, G., Rennie, A.E.W. and Akinci İ. 2017. Non-linear fem-based shattering simulation of shelled edible agricultural products: Walnut shattering by nut cracker hand tool. *International Journal of Technology and Engineering Studies*, 3, 84-92.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Özdemir, E., Kunt, G., Yılmaz, H., Karayel, D., Topakci, M. and Çelik, H.K. 2018. Seeding performance comparison of three different prototypes of a seed singulator used in a precision vacuum seeder. 19. World Congress of Cigr, Antalya, Türkiye, 22-25 Nisan 2018, 279-279.