

**ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN
YENİ BİR EKSTRUDER
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Fatih YURAN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2022

Bu tez çalışması 17.FENBiL.75 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN
YENİ BİR EKSTRUDER TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

Ahmet Fatih YURAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet Fatih YURAN tarafından hazırlanan “Üç Boyutlu Yazıcılar İçin Yeni Bir Ekstruder Tasarımı ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 04 / 02 / 2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ

Başkan : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Arif GÖK
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04 / 02 / 2022

Ahmet Fatih YURAN

ÖZET

Doktora Tezi

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN YENİ BİR EKSTRUDER TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Ahmet Fatih YURAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ

3B yazıcılar geleneksel üretim araçlarının aksine hammaddenin katmanlar halinde üst üste eklenerek üretim yapılması prensibini kullanır. Her biri farklı teknoloji kullanan yirmiden fazla farklı yazıcı türü vardır. Malzeme ekstrüzyonu prensibini kullanan 3B yazıcılar en sık kullanılan 3B yazıcı türüdür. Bu çalışmada malzeme ekstrüzyonu ile üretim yapan 3B yazıcılar ile yapılan üretimlerde karşılaşılan üretim sorunları tespit edilmiştir. Çalışmada tespit edilen her bir üretim sorunu detaylı görseller ile sunulmuş, sorunun sebeplerine dair bilgiler verilmiş ve bazı çözüm önerileri tavsiye edilmiştir. Elde edilen bulgular üretim sorunlarının önemli bir kısmının 3B yazıcıların ekstruder olarak adlandırılan sistemi ile ilgili olduğu görülmüştür. Filamentin davranışının tespit edilmesi amacıyla nozul içerisindeki newton tipi olmayan akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular nozul çapının, nozul açısının, filamentin nozul içerisindeki sıcaklığının ekstruder tasarımında önemli parametreler olduğunu göstermiştir. Nozul sıcaklıklarının filamentin istenen sürede eritilebilmesi için önemli olduğu tespit edilmiştir. Düşük nozul sıcaklıklarında filamentin homojen bir şekilde eritilemediği tespit edilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda ekstruder üzerinde bulunan her bir elemanın optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve yeni bir ekstruder üretilmiştir.

2022, xiv + 216 sayfa

Anahtar Kelimeler: 3B Yazıcı, Eklemeli imalat, Ekstruder, Sonlu hacimler yöntemi, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A NOVEL EXTRUDER FOR 3D PRINTER

Ahmet Fatih YURAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. İbrahim YAVUZ

Unlike traditional production tools, 3D printers create new objects by bonding layer upon layer until the desired shape has been achieved. There are more than twenty different types of printers, each using different technology. Among them, material extrusion is the most commonly used technology. In this study, the problems experienced in 3D printers using the material extrusion method were evaluated. Each production problem identified in the study was presented with detailed visuals, comprehensive information given about the causes of the problem, and solution advice suggested. The findings show that a significant amount of the production problems are related to the extruder system of 3D printers. For the optimization of the extruder, studies were carried out on nozzle, heat barrier, heater block, and cooler. To determine the flow behavior of the filament in the nozzle, Non – Newtonian flow analyses were carried out. The findings showed that nozzle diameter, nozzle angle, and the temperature of the filament in the nozzle are essential parameters in extruder design. Also nozzle temperatures are important for melting the filament in the desired time. It has been determined that the filament cannot be melted homogeneously at low nozzle temperatures. In line with the results obtained from the analyses, each extruder element was optimized, and a novel extruder was designed.

2022, xiv + 216 pages

Keywords: 3D Printing, Additive manufacturing, Extruder, Finite volume method, Computational fluid dynamics.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ'a teşekkür ederim. 17.FENBiL.75 numaralı proje ile destek sağlayan Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimine teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ahmet Fatih YURAN
Afyonkarahisar, 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	5
2.1 Endüstri 4.0 ve 3B Yazıcılar	5
2.2 3B Yazıcıların Geçmişi ve Sektörel Durum Analizi	8
2.3 3B Yazıcı Teknolojileri	12
2.3.1 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting).....	15
2.3.2 Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition).....	17
2.3.3 Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion).....	18
2.3.4 Malzeme Jeti (Material Jetting)	20
2.3.5 Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion).....	23
2.3.6 Foto Polimerizasyon (Photopolymerization)	26
2.4. Eritilmiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication / FFF) 3B Yazıcılar ...	29
2.4.1 FFF 3B Yazıcıların Türleri	33
2.4.2 FFF 3B Yazıcılarda Ekstruder	35
2.4.2.1 Filament Besleyici.....	37
2.4.2.2 Soğutma ve Isıtma Modülleri.....	40
2.5 Literatürdeki Çalışmalar ve Farklı Ekstruder Tasarımları	42
3. MATERYAL ve YÖNTEM	51
3.1 Çalışmalar Sırasında Kullanılan 3B Yazıcılar	51
3.2 Çalışmalar Sırasında Kullanılan Yazılımlar	54
3.2.1 Dilimleyici Yazılımlar ve Parametreler	55
3.2.2 Bilgisayar Destekli Tasarım ve Mühendislik Yazılımları.....	58

3.3 Sonlu Elemanlar Metodu	59
3.3.1 Sonlu Elemanlar Metodunda Geometrik Model ve Ağ Yapısı	61
3.3.2 Sonlu Elemanlar Metodunda Elemanlar ve Şekil Fonksiyonları	62
3.4 Isı Transfer Denklemleri	63
3.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Denklemleri	64
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	73
4.1 FFF 3B Yazıcılarda Karşılaşılan Üretim Sorunları	74
4.1.1 Ekstrüzyon Sürecinde Karşılaşılan Sorunlar.....	77
4.1.2 Katmanların Üretiminde Karşılaşılan Sorunlar.....	82
4.1.3 Ekstruder ve Tolerans Sorunları.....	86
4.1.4 Ürün Yüzeyleriyle İlgili Üretim Sorunları	89
4.2 Nozul Üzerinde Yapılan Optimizasyon Çalışmaları	92
4.2.1 Nozul Tasarımları ve Sınır Şartları	94
4.2.2 Ağ Yapısı Optimizasyonu	96
4.2.3 Ağ Yapısından Bağımsızlık Çalışmaları.....	98
4.2.4 Filamentin Malzeme Modeli	100
4.2.5 Nozul Açısı ile İlgili Bulgular.....	103
4.2.6 Nozul Çapı ile İlgili Bulgular.....	107
4.2.7 Giriş Hızı ile İlgili Bulgular	110
4.2.8 Giriş Sıcaklığı ile İlgili Bulgular.....	113
4.2.9 Duvar Sıcaklığı ile İlgili Bulgular.....	118
4.3 Isıtıcı Blok Üzerinde Yapılan Optimizasyon Çalışmaları	121
4.3.1 Isıtıcı Blok Tasarımı.....	124
4.3.2 Sensör Konumunun Sıcaklık Dalgalanmalarına Etkisi	133
4.4 Isı Bariyeri Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	137
4.4.1 Çalışmada Kullanılan 3B Model ve Özellikleri	138
4.4.2 Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları.....	140
4.4.3 Deneysel Çalışmalar ve Termal Kamera Özellikleri	142
4.4.4 Analiz Sonuçları ve Termal Kamera Görüntüleri	143
4.5 Soğutma Modülü Üzerinde Yapılan Optimizasyon Çalışmaları	147
4.5.1 Soğutma Modülü Tasarımları	149
4.5.2 Soğutma Modülü Simülasyonları, Ağ Yapısı ve Sınır Şartları.....	152

4.5.3 T1 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	157
4.5.4 T2 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	164
4.5.5 T3 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	168
4.5.6 T4 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular	173
4.6 Soğutucu Fanlarla Yapılan Deneysel Çalışmalar	179
4.6.2 Deney Düzenegi ve Sıcaklık Sensörü Konumları.....	181
4.6.3 Soğutucu Fan Deneyle Bulguları.....	182
4.7 Ekstruder Karakterizasyonu ve Performans Karşılaştırmaları.....	187
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	198
6. KAYNAKLAR.....	203
ÖZGEÇMİŞ.....	214

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
γ	Deformasyon hızı
T_m	Erime sıcaklığı
Q_f	Filament akış hızı
V_f	Filament hızı
q	Isı iletimi
β	Isıl genleşme katsayısı
k	Isı transfer katsayısı
λ	İkinci viskozite katsayısı
Γ_k	Kinetik enerji difüzyon etkisi
θ°	Nozul açısı
$\varnothing_\ç$	Nozul çıkış çapı
\varnothing_g	Nozul giriş çapı
c_p	Özgül ısı
Γ_ω	Özgül yutulma difüzyon etkisi
Re	Reynolds Sayısı
η_0	Sıfır kayma viskozitesi
ε_θ	Sınır yüzey yayıcılığı
ρ	Yoğunluk
μ	Viskozite

Kısaltmalar

3B	Üç boyutlu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Computer Numerical Control / Bilgisayar Nümerik Kontrol
FDM	Fused Deposition Modelling / Eriyik Yığılma Modelleme
FFF	Free Form Fabrication / Serbest Biçim Üretimi
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HIPS	Yüksek Darbe Dayanımlı Polistren
PA	Poliamid
PET	Polietilen Tereftalat
PLA	Polilaktik Asit
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes Equations
REPRAP	Replicating Rapid Prototyper
RP	Rapid Prototyping / Hızlı Prototipleme
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SST	Shear stress transport
STL	Standart Triangle Language

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Endüstri devrimlerinde kritik kavramlar ve tarihsel gelişimi.	5
Şekil 2.2 Kullanıcının evindeki fabrika; 3B yazıcı.	7
Şekil 2.3 3B yazıcı ekonomisinin yıllara göre gelişimi.....	10
Şekil 2.4 2009 ve 2019 yılları arasında 3B yazıcılar ile ilgili yapılan akademik çalışmaların dağılımı.	11
Şekil 2.5 3B yazıcılar ile üretim süreci	12
Şekil 2.6 Farklı 3B yazıcı teknolojileri.	14
Şekil 2.7 Bağlayıcı püskürtme teknolojisi; işlenmemiş toz (a), parça (b), inkjet nozul (c), yapıştırıcı sıvı (d), toz hammadde (e), toz yayıcı (f), baskı tablası (g).	16
Şekil 2.8 Doğrudan enerji biriktirme teknolojisi; parça (a), elektron ark kaynağı (b), tel hammadde (c), ekstruder (d), baskı tablası (e).	17
Şekil 2.9 Malzeme ekstrüzyonu teknolojisi; baskı tablası (a), parça (b), ısıtıcı (c), ekstruder (d), filament (e), destek yapı (f).....	19
Şekil 2.10 Malzeme jeti teknolojisi; fotopolimer malzeme (a), çözülebilir destek malzemesi (b), UV Işık kaynağı (c), nozul (d), destek yapı (e), kürlenmiş parça (f), tabla (g).....	21
Şekil 2.11 Toz yatak füzyonu teknolojisi; işlenmemiş toz (a), parça (b), laser/elektron ark kaynağı (c), baskı tablası (d), toz hammadde (e), toz yayıcı (f).....	23
Şekil 2.12 Foto polimerizasyon teknolojisi; UV Işık kaynağı (a), parça (b), yansıtıcı ayna (c), reçine temizleyici (d), kürlenmemiş fotopolimer (e), tabla (f).....	27
Şekil 2.13 SLA ve DLP teknolojilerinde voksel kavramı.	28
Şekil 2.14 STL model ve üçgen yapılar.	30
Şekil 2.15 Ekstrüzyon ile üretim yapan 3B yazıcının ana parçaları.....	32
Şekil 2.16 Mekanizmalarına göre 3B Yazıcı türleri; kartezyen, delta ve polar.	33
Şekil 2.17 Ekstrüzyon 3B yazıcının çalışma prensibi; filament (a), ekstruder (b), üretilen parça (c), destek yapı (d), baskı tablası (e).....	35
Şekil 2.18 Ekstrüzyon sisteminin ayrıntılı yapısı.....	36
Şekil 2.19 Direct drive filament besleyici (a) ve bowden filament besleyici (b).....	38
Şekil 2.20 Isıtma ve soğutma modülü parçaları, soğutucu (a), ısı bariyeri (b), ısıtıcı blok (c), nozul (d).	40
Şekil 2.21 Üç farklı ekstruder tasarım önerisi; ekstruder'ın kesit görünüşü (a), BCNozzle (b), Twist3D (c), HelicoidalTwist3D (d).....	45
Şekil 2.22 Çift kanallı ekstruder tasarımı; taşıyıcı yapı (a), ısıtıcı blok (b), nozul içerisinde sıcaklık dağılımı (c).	47
Şekil 2.23 Çoklu ekstruder tasarımı; beşli ekstruder (a), taşıyıcı yapı simülasyon sonuçları (b).....	48

Şekil 3.1 Soğutucu tasarımı; 3B model (a), 3 mm elemandan oluşturulan ağ yapısı (b), 0,7 mm elemandan oluşturulan ağ yapısı (c).....	61
Şekil 3.2 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan farklı eleman tipleri	62
Şekil 3.3 P merkezli dx, dy, dz boyutlarında bir kontrol hacmi.....	66
Şekil 3.4 Kontrol hacmi üzerinde kütle giriş ve çıkışları.....	67
Şekil 3.5 Kontrol hacmine etkiyen kuvvetler.....	69
Şekil 4.1 Simülasyonlarda kullanılan nozul modeli ve sınır şartları.....	94
Şekil 4.2 Analizlerde kullanılan farklı açılara sahip nozul modelleri.....	95
Şekil 4.3 Multi zone tekniği ile oluşturulan ağ yapısı.....	97
Şekil 4.4 Basınç sonuçları için ağdan bağımsızlık grafiği.....	99
Şekil 4.5 Hız parametresi için ağdan bağımsızlık grafiği.....	100
Şekil 4.6 Farklı akışkan tiplerinin reolojik davranışları (Cengel, Yunus A, 1998).....	101
Şekil 4.7 Nozul açısının viskozite değişimine etkisi.....	103
Şekil 4.8 Farklı nozul açıları için basınç dağılımları.....	104
Şekil 4.9 Farklı nozul açıları için elde edilen basınç değerleri.....	105
Şekil 4.10 Farklı nozul açıları için elde edilen hız vektör gradyanları.....	106
Şekil 4.11 Farklı nozul çapları için basınç dağılımları.....	108
Şekil 4.12 Farklı nozul çaplarında oluşan basınç değerleri.....	108
Şekil 4.13 Farklı nozul çapları için elde edilen çıkış hızları.....	109
Şekil 4.14 Farklı giriş hızları için filamentin nozul içerisindeki hız değişimi.....	111
Şekil 4.15 Farklı giriş hızları için nozul çıkışında elde edilen filament hızları.....	111
Şekil 4.16 Farklı giriş hızlarında filamentin viskozite değişimi.....	112
Şekil 4.17 Aynı çaptaki nozullarda farklı giriş hızları için basınç dağılımları.....	113
Şekil 4.18 Farklı giriş hızlarında nozul içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	114
Şekil 4.19 Farklı giriş hızları için filamentin nozul içerisindeki sıcaklık değerleri.....	115
Şekil 4.20 Giriş sıcaklığının, filamentin sıcaklık dağılımına etkisi.....	117
Şekil 4.21 Farklı giriş sıcaklıklarında filamentin sıcaklık değerleri.....	117
Şekil 4.22 Farklı duvar sıcaklıklarının nozul içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisi.....	119
Şekil 4.23 Farklı duvar sıcaklıklarında filamentin nozul boyunca ulaştığı sıcaklıklar.....	119
Şekil 4.24 Duvar sıcaklıklarının nozul içerisindeki basınca etkisi.....	120
Şekil 4.25 Dilimleyici yazılımda sıcaklık dalgalanmalarını gösteren grafik.....	121
Şekil 4.26 3B yazıcılarda PID kontrol.....	123
Şekil 4.27 Farklı ısıtıcı blok tasarımları.....	124

Şekil 4.28 Mevcut ısıtıcı blok tasarımı, ağ yapısı ve zamana bağlı analizlerde sınır şartları.	125
Şekil 4.29 Mevcut tasarımda 5s ve 75s aralığında ısıtma modülü üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları.	127
Şekil 4.30 Mevcut tasarımda 90s ve 150s aralığında ısıtma modülü üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları.	127
Şekil 4.31 Mevcut tasarımda ısıtıcı blokta oluşan ortalama sıcaklık grafiği.....	128
Şekil 4.32 Çalışma kapsamında önerilen ısıtma modülü tasarımı ve ağ yapısı.	129
Şekil 4.33 Önerilen ısıtma modülü üzerinde zamana bağlı sıcaklık dağılımları.....	130
Şekil 4.34 Silindir ısıtıcı blok için ortalama sıcaklık değerleri.	131
Şekil 4.35 Mevcut ısıtma modülü tasarımları ve önerilen tasarım.....	132
Şekil 4.36 Mevcut ısıtıcı bloklar üzerindeki sıcaklık sensörü konumları.	133
Şekil 4.37 Farklı sensör konumlarında ısıtma modülünde oluşan sıcaklık dalgalanmaları.	134
Şekil 4.38 Önerilen ısıtıcı blok tasarımı ve üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörünün konumu.	135
Şekil 4.39 Silindir bloğa sahip ısıtma modülünde zamana bağlı ortalama sıcaklık değişimi.	136
Şekil 4.40 Soğutma ve ısıtma modüllerinin bağlantısını sağlayan yapı; ısı bariyeri. ..	138
Şekil 4.41 Çalışmada kullanılan ekstruder'ın boyutları, HB1 ve HB0 olarak adlandırılan iki farklı ısı bariyeri.	140
Şekil 4.42 Isı bariyeri optimizasyonu için kullanılan ağ yapıları.....	141
Şekil 4.43 HB0 ısı bariyeri (a) ve HB1 ısı bariyerine ait termal kamera görüntüleri (b).	143
Şekil 4.44 HB 0 modeli (a) ve HB 1 modeli için sıcaklık dağılımı (b) simülasyon sonuçları.	145
Şekil 4.45 HB 0 modeli için ısı bariyeri üzerinde oluşan ısı akısı (a) ve HB 1 modeli için ısı bariyeri üzerinde oluşan ısı akısı dağılımı (b).	146
Şekil 4.46 Soğutma modülünde kullanılan farklı soğutucu tasarımları.	148
Şekil 4.47 Soğutma modülünde kullanılan fanların konumu ve boyutları.....	148
Şekil 4.48 Çalışmalarda kullanılan dört farklı ekstruder tasarımı.....	150
Şekil 4.49 T1 tasarımında kullanılan soğutucu ve kanat uzunluğu artırılmış soğutucu tasarımı.	151
Şekil 4.50 T3 (a) ve T4 (b) tasarımları ile önerilen yeni soğutucular.	152
Şekil 4.51 Soğutma modülü simülasyonlarında model ve sınır şartları.....	153
Şekil 4.52 Modelin Cut – Cell yöntemi ile oluşturulan ağ yapısı.	154
Şekil 4.53 T1 Tasarımı için 1,5 mm/s giriş hızında akım çizgileri.	158

Şekil 4.54 Soğutucunun merkez düzlemindeki hız vektörleri.....	158
Şekil 4.55 T1 tasarımında fanın 1,5 m/s hızı için soğutucudaki sıcaklık dağılımları. .	159
Şekil 4.56 T1 tasarımı için 1,5 m/s fan hızında filamentin soğutucu içindeki sıcaklık değerleri.....	160
Şekil 4.57 T1 tasarımında 230 °C sınır şartı için farklı fan hızlarında soğutucudaki sıcaklık dağılımları.	161
Şekil 4.58 Farklı fan hızlarında 230 °C sınır şartı için filament sıcaklıkları.....	162
Şekil 4.59 Kare ısıtıcı blok tasarıma sahip modelde farklı fan hızlarında akışkan sıcaklıklarının değişimi.	163
Şekil 4.60 T1 ve T2 tasarımı için fanın 1,5 m/s hızı için farklı nozul sıcaklıklarında soğutucudaki sıcaklık dağılımları.....	165
Şekil 4.61 T2 tasarımında 1,5 m/s fan hızında farklı giriş hızları için filament sıcaklık değerleri.....	166
Şekil 4.62 T2 tasarımında 230 °C için farklı fan hızlarında akışkanın sıcaklık dağılımları.	167
Şekil 4.63 T ₁ ve T ₂ tasarımlarında 1,5 m/s fan hızı için filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları.	168
Şekil 4.64 Optimize edilmiş soğutucu tasarımı.....	169
Şekil 4.65 T2 ve T3 tasarımlarında kullanılan soğutucuların farklı sıcaklıklarda 1,5 m/s fan hızında sıcaklık dağılımı.	170
Şekil 4.66 T3 tasarımı için farklı sıcaklıklarda filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları.	171
Şekil 4.67 T2 ve T3 tasarımlarında, 230 °C nozul sınır şartında, soğutucu içerisindeki filamentin sıcaklıkları.....	172
Şekil 4.68 T3 tasarımında akışkanın kanatçıklar arasından geçerken ısınması.	172
Şekil 4.69 T4 tasarımıyla önerilen yeni soğutucu modeli.....	173
Şekil 4.70 T4 tasarımının 1,5 m/s fan hızında farklı sıcaklıklarda sıcaklık dağılımı...	174
Şekil 4.71 T4 tasarımında ilk kanatçık etrafında akışkan sıcaklığı.....	174
Şekil 4.72 T4 tasarımı için 1,5 m/s fan hızında filamentin soğutucu içindeki sıcaklık dağılımı.....	175
Şekil 4.73 T4 ve T3 tasarımlarının 230 °C nozul sıcaklığında filament sıcaklıklarının karşılaştırılması.	176
Şekil 4.74 T4 tasarımı için 1,5 m/s fan hızı için farklı nozul sıcaklıklarında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları.	177
Şekil 4.75 T1 ve T4 tasarımlarında 290 °C sınır şartı için soğutucu içerisindeki filament sıcaklıklarının karşılaştırması.....	178
Şekil 4.76 Deneyler sırasında kullanılan sıcaklık sensörlerinin konumları.	181
Şekil 4.77 40 mm fan ile yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık değerleri.	183

Şekil 4.78 30 mm fan ile yapılan deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri.	183
Şekil 4.79 40 mm fan için nozulun ısınma süresince farklı noktalardan ölçülen sıcaklık değerleri.	185
Şekil 4.80 Deneylerin 4 – 8 dakikaları arasında elde edilen sıcaklık değerleri.....	186
Şekil 4.81 Deneylerin 8 – 21 dakikaları arasında elde edilen sıcaklık değerleri.....	187
Şekil 4.82 T1 tasarımına sahip ekstruder’ın farklı çaplardaki nozullar için akış performansı.....	194
Şekil 4.83 Çalışma kapsamında geliştirilen ekstruder’ın farklı çaplardaki nozullar için akış performansı.	195
Şekil 4.84 Nozul çapı 0.2 mm için T1 ve T4 ekstruder tasarımlarında filament akış hızları.....	196
Şekil 4.85 Nozul çapı 0.3 mm için T1 ve T4 ekstruder tasarımlarında filament akış hızları.....	196
Şekil 4.86 Nozul çapı 0.4 mm için T1 ve T4 ekstruder tasarımlarında filament akış hızları.....	197

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Farklı 3B yazıcı teknolojileri	13
Çizelge 2.2 3B yazıcının temel unsurları	29
Çizelge 3.1 Çalışmalarda kullanılan düşük maliyetli 3B yazıcılar.	52
Çizelge 3.2 Çalışmalarda kullanılan profesyonel 3B yazıcılar.	53
Çizelge 4.1 3B yazıcılarda tespit edilen üretim sorunları	76
Çizelge 4.2 Analizlerde kullanılan değişkenlere ait parametreler.....	96
Çizelge 4.3 Simülasyonlarda kullanılan hücrelerin kalite değerleri.....	97
Çizelge 4.4 Filament için tanımlanan malzeme modeli parametreleri.....	103
Çizelge 4.5 Isıtıcı blok analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri.	125
Çizelge 4.6 Isıtıcı blok simülasyonlarında zamana bağlı sınır şartı parametreleri.....	126
Çizelge 4.7 Isı bariyeri optimizasyonu için kullanılan malzeme özellikleri.	139
Çizelge 4.8 Çalışmada kullanılan termal kameranın özellikleri.....	142
Çizelge 4.9 Soğutma modülü simülasyonlarında kullanılan malzeme özellikleri.	152
Çizelge 4.10 Simülasyonlarda kullanılan tasarımların ortalama eleman kaliteleri.	155
Çizelge 4.11 Fan ile ilgili deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler.....	179
Çizelge 4.12 Deneysel çalışmalarda kullanılan data logger'ın özellikleri.....	180
Çizelge 4.13 Ekstruder performans değerlendirme deney parametreleri.	192

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Açık kaynak kodlu farklı ekstruder tasarımları.	43
Resim 2.2 NASA’da yapılan çalışmada kullanılan açık kaynak yazıcı (a), yazıcıya eklenen kabin (b) ve yazıcıda kullanılan ekstruder (c).....	46
Resim 2.3 Granül ile üretim yapan ekstruder tasarımı, ekstruder genel görünümü (a), ekstruder üzerinde sıcaklık dağılımı (b).	49
Resim 4.1 Ekstrüzyon sırasında karşılaşılan sorunlar; ilk katman ekstrüzyon sorunları (S1), fazla ekstrüzyon (S2), yetersiz ekstrüzyon (S3).	78
Resim 4.2 Ekstrüzyon sırasında karşılaşılan sorunlar, tutarsız ekstrüzyon (S4), ekstrüzyonun yarıda kesilmesi (S5), yüksek sıcaklıkta ekstrüzyon (S6).	79
Resim 4.3 Ekstrüzyon sırasında karşılaşılan sorunlar; ürün yüzeyinde taşmalar (S7) ve lif oluşumları (S8).	81
Resim 4.4 Katmanların üretiminde karşılaşılan sorunlar; ilk katmanda adezyon sorunu (S9), katman kaymaları (S10).	83
Resim 4.5 Katmanların üretiminde karşılaşılan sorunlar; ilk katmanda adezyon sorunu (S9), katman kaymaları (S10).	85
Resim 4.6 Ekstruder ve tolerans sorunları; tolerans sorunları (S13), küçük detayların üretim sorunları (S14), destek yapıların neden olduğu sorunlar (S15).	86
Resim 4.7 Ekstruder ve tolerans sorunları; filament aşınmaları (S16), nozul tıkanması (S17).	88
Resim 4.8 Ürün yüzeyleriyle ilgili üretim sorunları; yüzey boşlukları (S18), yüzeyde çarpılmalar (S19), yüzeyde iz oluşumları (S20), zayıf iç yapı (S21).	90
Resim 4.9 İç yapının oluşturulabildiği farklı dolgu tipleri (Karavaikin 2014).	91
Resim 4.10 Farklı çaplardaki nozullar.	93
Resim 4.11 Deneylerde kullanılan 40 ve 30 mm boyutundaki fanlar.	182
Resim 4.12 Geleneksel bir ekstruder (a) ve yeni tasarlanan ekstruder’a (b) ait termal kamera görüntüleri.	188
Resim 4.13 Ekstruder (a) ve filament kuvvetinin şematik gösterimi (b).	190
Resim 4.14 Filament besleyicinin filamentini aşındırması.	193

1. GİRİŞ

Tarih boyunca toplumların yaşamını köklü değişime uğratan iki konuda önemli devrim yaşanmıştır. Bunlardan biri yerleşik hayata geçilmesini sağlayan tarım devrimidir. Diğer devrim ise üretim araçlarının makineleşmesi ve sonrasında üretim araçlarının otomatikleştirilmesi ile anılan endüstri devrimleridir. Endüstri devrimleri toplum hayatında alışkanlıkları, ekonomik yaşamı ve toplum yapısını baştan sona değiştirmiştir. Üretimlerini otomatik hale getirmeyi başaran toplumlar hızla ekonomik refaha kavuşmuştur.

Otomatikleştirilmiş üretim süreçleri yıllar boyunca ekonominin en önemli parçası olmuştur. Endüstri 1.0 ile üretimde makineleşme, Endüstri 2.0 ile elektriğin üretim araçlarında kullanımı ve Endüstri 3.0 ile otomasyonun yaygınlaşması üretim süreçlerinin otomatik hale gelmesini sağlamıştır. 2011 yılında ise ilk kez Endüstri 4.0 kavramı hayatımıza girmiştir. Endüstri 4.0 geleneksel üretim süreçlerine bilişim teknolojilerinin pratiklerinin uygulanmasıyla yeni üretim sistemlerinin geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda Endüstri 4.0'ın üretim sürecinde kullanılacak yazılım ortamları ve üretim araçları olmak üzere iki önemli ayağı bulunmaktadır. Sürecin yazılım kısmında Nesnelerin İnterneti (IoT), Büyük Veri (Big Data) ve Bulut Bilişim (Cloud Computing) gibi kavramlar öne çıkmaktadır (Dilberoglu vd. 2017). Sürecin üretim araçları kısmında ise Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE), robotik ve özellikle üç boyutlu üretim gibi kavramlar öne çıkmaktadır (Dilberoglu vd. 2017). 3B yazıcılar sahip oldukları potansiyel nedeniyle Endüstri 4.0 için hayati öneme sahiptir. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilemeyecek karmaşıklıkta parçaların 3B yazıcılar ile üretilebilmesi mümkündür. Aynı zamanda klasik üretim tezgahlarının sahip olamayacağı kadar dijital üretime yatkın, Endüstri 4.0 ruhuna uygun, cihazlardır.

Bu araştırmanın amacı 3B yazıcıların en önemli yapısı olan ekstruderların iyileştirilmesidir. Bu amaçla 3B yazıcı teknolojileri değerlendirilmiş ve çalışmanın konusu olan yazıcılar ile ilgili detaylı literatür bilgileri sunulmuştur. Ekstruder tasarımının iyileştirilmesi için mevcut ekstruderlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda ekstruder'ın her bir parçası için optimizasyon çalışmaları

gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının ilk bölümünde endüstri devrimlerinin gelişimi ve toplumu nasıl etkilediğine dair kısa bilgiler verilmiştir. Tarihte yaşanan bu devrimlerin bir benzeri olan ve günümüzün en güncel konularından biri olan Endüstri 4.0 devrimi ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Endüstri 4.0’la birlikte anılan en önemli teknolojilerden biri 3B yazıcı teknolojileridir. 3B yazıcı teknolojilerinin önemi, mevcut durumu ve geleceğine dair öngörüler Endüstri 4.0 kapsamında değerlendirilmiştir.

3B yazıcılar geleneksel üretim araçlarının aksine hammaddenin katmanlar halinde üst üste eklenerek üretim yapılması prensibini kullanır. Bu nedenle eklemeli imalat, katmanlı üretim veya hızlı prototipleme gibi bazı terimler 3B yazıcılar eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. 3B yazıcılar ile ilgili temel tanımlar ve sınıflandırmalar American Society of Testing and Materials tarafından yapılmıştır (ISO/ASTM 2015). 3B yazıcılar yedi temel prensibi kullanarak üretim yaparlar; Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting), Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition), Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion), Malzeme Jeti (Material Jetting), Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion), Sac Laminasyon (Sheet Lamination), Fotopolimerizasyon (Photopolymerization). Her bir tekniği kullanan ve aralarında çok küçük farklılıklar bulunan yirmiden fazla farklı yazıcı türü vardır (Gibson vd. 2014). Mevcut 3B yazıcı teknolojileri detaylı olarak incelenmiş ve her bir teknolojinin özellikleri ve çalışma prensipleri “2.3 3B Yazıcı Teknolojileri” bölümünde sunulmuştur.

3B yazıcı teknolojileri arasında malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion) prensibini kullanan 3B yazıcılar en sık kullanılan 3B yazıcı türüdür. Malzeme ekstrüzyonu ile üretim yapan yazıcılar çoğunlukla filament adı verilen termoplastik bir polimer ile üretim yaparlar. Tez çalışmasının esas konusu olan ekstrüzyon ile üretim yapan 3B yazıcılarla ilgili detaylı bilgiler “2.4. FFF 3B yazıcılar” başlığı altında verilmiştir. Bu bölümde FFF 3B yazıcıların türleri ve bu yazıcıların önemli özelliklerine dair bilgiler sunulmuştur. Yapılan çalışmada 3B yazıcılar için yeni bir ekstruder geliştirilmiştir. Bu kapsamda literatürde 3B yazıcıların ekstruder’ı üzerinde yapılan güncel çalışmalar derlenmiştir.

“Materyal ve Yöntem” başlığı altında tez çalışması sırasında kullanılan 3B yazıcılar ve özellikleri sunulmuştur. 3B yazıcılar ile üretim yapabilmek için bilgisayar destekli tasarım programlarında 3B model oluşturulması ve sonrasında bir dilimleyici yazılım yardımıyla modelin katmanlarının oluşturulması gerekmektedir. Tez çalışması sırasında kullanılan bilgisayar destekli tasarım programları ve dilimleyici yazılımlar hakkında bilgiler sunulmuştur.

3B yazıcılarda kullanılan mevcut ekstruderlarının incelenmesi, yeni ekstruder tasarımı ve optimizasyonu için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yapılırken sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Simülasyonlar sırasında kullanılan yazılımlar, hesaplama yöntemleri ve çözülen temel denklemler “3. Materyal ve Yöntem” başlığı altında sunulmuştur.

Ekstruder tasarımı geliştirilmesi öncesinde birçok farklı 3B yazıcıda çok sayıda üretim yapılmıştır. Yapılan üretimler sırasında 3B yazıcılarda karşılaşılan üretim sorunları sistematik olarak kaydedilmiştir. 3B yazıcılarda karşılaşılan bu sorunların nedenleri ve 3B yazıcının hangi donanımıyla ilgili olduğu tespit edilmiştir. 3B yazıcılarda karşılaşılan üretim sorunlarının önemli bir kısmının 3B yazıcıların ekstruder sistemi ile ilgili olduğu görülmüştür. 3B yazıcılarda karşılaşılan üretim sorunlarıyla ilgili elde edilen bulgular “4.1 FFF 3B yazıcılarda karşılaşılan üretim sorunları” başlığı altında sunulmuştur.

Çalışmada mevcut 3B yazıcılarda kullanılan ekstruder sistemleri incelenmiş ve üretim sorunlarına neden olabilecek tasarım değişkenleri belirlenmiştir. 3B yazıcının ekstruder’ı ısıtma modülü, soğutma modülü ve filament besleyici olmak üzere üç ana yapıdan oluşmaktadır. Yapılan analizler üretim hatalarının azaltılması için bu üç yapının birbiriyle uyumlu çalışması gerektiğini göstermiştir.

3B yazıcıda bulunan ekstruderların optimizasyonu için öncelikle nozul içerisinde gerçekleşen ekstrüzyon süreci incelenmiştir. Filament normal şartlarda katı halde bulunurken nozul içerisinde eritildiğinde newton tipi olmayan bir akışkan hale gelmektedir. Yapılan çalışmada filamentin davranışının tespit edilmesi amacıyla nozul içerisindeki newton tipi olmayan akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 0.2 mm,

0.4 mm ve 0.6 mm olmak üzere üç farklı nozul çapı ve 30°, 45°, 60° ve 90° olmak üzere dört farklı açığa sahip nozullar üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte 190 °C, 210 °C ve 230 °C duvar sıcaklıklarının nozul içerisindeki akışa etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular nozul çapının, nozul açısının, filamentin nozul içerisindeki sıcaklığının ekstruder tasarımında önemli parametreler olduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgulara göre nozul açısının 45°'den daha fazla olduğu durumlarda nozul içerisindeki akışın düzensizleştiği tespit edilmiştir. Farklı nozul çapları ile yapılan analizlerde nozul çapı azaltıldığında sistemde oluşan basıncın arttığı tespit edilmiştir. Nozul sıcaklıklarının filamentin istenen sürede eritilebilmesi için önemli olduğu tespit edilmiştir. Düşük nozul sıcaklıklarında filamentin homojen bir şekilde eritilemediği tespit edilmiştir.

Filamentin ısıtma modülünde istenen sıcaklıklara ulaştırılabilmesi için rezistans ve ısıtıcı blok kullanılmaktadır. Isıtma modülünün sıcaklık kontrolü ise termistör veya termal çift gibi sensörlerle yapılmaktadır. Yapılan çalışmada ısıtıcı blok tasarımı ve blok üzerine yerleştirilecek olan sensörlerin konumu optimize edilmiştir.

Ekstruder'in sorunsuz çalışması için filament sıcaklığının ısıtma modülü haricindeki diğer bölgelerde camsı geçiş sıcaklığından düşük olması gerekmektedir. Filamentin sıcaklığına ısıtma modülü ve soğutma modülü arasındaki Isı bariyeri adı verilen parçanın tasarımı etki etmektedir. Bununla birlikte soğutma modülünde kullanılan soğutucu ve fan filamentin sıcaklık kontrolü için önemlidir. Yapılan çalışmada ekstruder'in ısı bariyeri ve soğutucu tasarımı optimize edilmiştir.

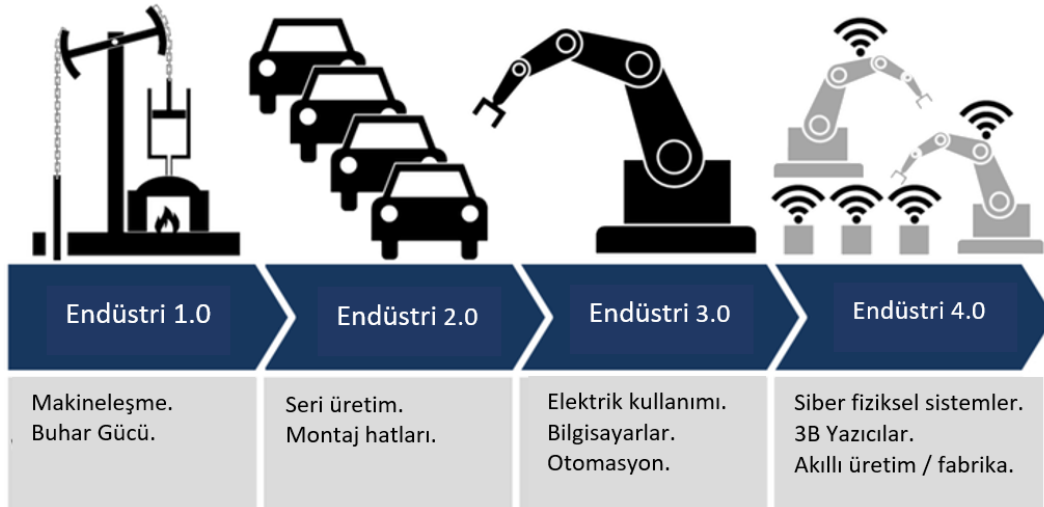
Çalışmanın en son bölümünde ekstruder'in soğutma modülü üzerinde bulunan soğutucunun optimizasyonuna yer verilmiştir. Yeni bir soğutucu tasarımı önerilmiş ve önerilen soğutucunun soğutucu performansı değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Endüstri 4.0 ve 3B Yazıcılar

Sanayi veya diğer adıyla endüstri, mekanize ve otomatikleştirilmiş üretim süreçlerini içeren rolü ile ekonominin en önemli parçasıdır. Avrupa'da 18., 19. ve 20. Yüzyıllarda yaşanan teknolojik sıçramalar bugün eski adıyla "endüstriyel devrimler" olarak adlandırılan paradigma kaymalarına yol açmıştır (Lasi vd. 2014). Endüstride tarih boyunca makineleşme, seri üretim ve dijitalleşme olmak üzere üç ana devrim yaşanmıştır.

Birinci endüstri devrimi (Endüstri 1.0) su ve buhar gücünün keşfi ile makineleşmeyi sağlayarak üretimin değişimine yol açmıştır. Daha önce üretim neredeyse tamamen insan gücüne bağılıken bu devrim sonrasında üretimin temelini makineler almaya başlamıştır. İkinci endüstri devrimini (Endüstri 2.0) elektrik enerjisinin kullanım alanının yaygınlaşması tetiklemiştir. Birinci endüstri devriminde ortaya çıkan ve yaygınlaşan makineler, ikinci endüstri devrimi ile birlikte elektrik enerjisi ile çalışma imkânı kazanmıştır. Böylece; sanat ve zanaat içeren eski üretim yöntemlerinin yerini seri üretim kavramı almıştır. Seri üretim ile çok sayıda ürün eskisine göre çok daha kısa zamanda üretebilmektedir. Üçüncü endüstri devrimi (Endüstri 3.0); üretimde elektronik sistemlerin kullanımı ve bilgi teknolojilerinin üretime dahil edilmesi ile yaşanmıştır. Bu devrim ile birlikte yeni nesil makine ve tezgahlar geliştirilmiş, üretimde otomasyon önem kazanmıştır (Şekil 2.1).



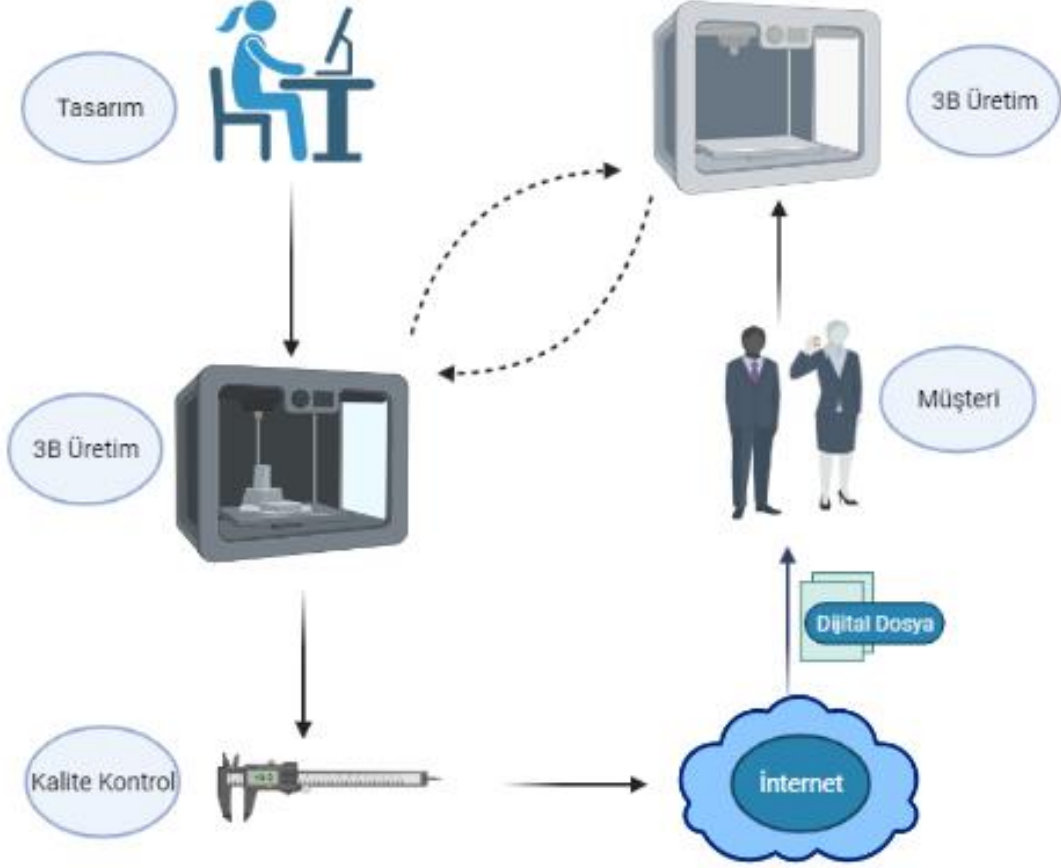
Şekil 2.1 Endüstri devrimlerinde kritik kavramlar ve tarihsel gelişimi.

Dördüncü endüstri devrimi ya da diğer adıyla Endüstri 4.0 ise robotik, 3B (üç boyutlu) yazıcılar, akıllı üretim, nano teknolojilerde yaşanan gelişmeler ve nesnelere interneti (IoT) gibi kavramlar ile birlikte hayatımıza girmiştir. Endüstri 4.0 terimi ilk kez Almanya Federal Eğitim ve Araştırma Bakanlığı tarafından 2020 yüksek teknoloji stratejisi bağlamında gelecekteki bir projeyi ifade etmek için kullanılmıştır (Ege 2014). Daha sonra 2016 yılında Davos'ta düzenlenen Dünya Ekonomik Forumu'nun da ana konusu olmuş ve böylece tüm dünyada konuşulmaya başlanmıştır. Endüstri 4.0 üretim sistemlerinin dijital dönüşümü sayesinde "akıllı üretim" dönemi olarak tanımlanabilir (Culot vd. 2020). "Akıllı üretim" ile fabrikaların kendi içinde iş birliği yapabilmesi için gerekli olan internet tabanlı sanal sistemler ve fiziksel üretim sistemlerinin kullanımı kastedilir (Dilberoglu vd. 2017). Endüstri 4.0, sanal sistemler ve yazılımlar ile ilişkili kısmında; nesnelere interneti, büyük veri, bulut hesaplama, optimizasyon ve simülasyon gibi kavramlar bulunur (Liu ve Xu 2017). Fiziksel kısmında ise; başta eklemeli imalat olmak üzere, 3B yazıcılar, otonom robotlar ve üretim tezgahlarının iş birliği gibi kavramlar öne çıkmaktadır (Liu ve Xu 2017).

3B yazıcılar sahip oldukları potansiyel nedeniyle endüstri 4.0 için hayati öneme sahiptir. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilemeyecek parçaların 3B yazıcılar ile üretilebilmesi mümkündür. Aynı zamanda klasik üretim tezgahlarının sahip olamayacağı kadar dijital üretime yakın, Endüstri 4.0 ruhuna uygun, cihazlardır.

3B yazıcılar ile birlikte geleneksel tedarik zinciri derinden etkilenecektir. Mevcut tedarik zinciri anlayışında, fabrikalar sürecin en başında yer almaktadır. Klasik anlayışta üretim için gerekli hammaddeler temin edilir ve bir fabrikada çeşitli süreçlerden geçerek son ürün haline getirilir. Ürünün kalite kontrolü gerçekleştirildikten sonra paketlenir ve pazara sunulmak üzere satış merkezlerine transfer edilir. Üretilecek olan ürün miktarından bağımsız olarak geleneksel yaklaşımdaki süreç çoğunlukla benzerdir. 3B yazıcılar yaygınlaştıkça bu klasik anlayışın da değişeceği öngörülmektedir (Mavri 2015, Oettmeier ve Hofmann 2016). 3B yazıcılar yaygınlaştıkça geleneksel fabrikalara olan ihtiyaç azalacaktır. Hatta bu durum "Karanlık Fabrika" kavramıyla ifade edilmektedir. Karanlık Fabrika kavramıyla, üretim sürecinde insan müdahalesini minimum düzeyde tutarak üretimi gerçekleştiren makinelerin operatöre veya gözetime ihtiyaç duymadan

tamamen otomatik olarak çalışmasını hedefleyen bir üretim yöntemidir. Bu anlamda 3B yazıcılar hedeflenen bu konseptin gerçekleştirilmesi için en ideal araçlardır (Kablan 2020).



Şekil 2.2 Kullanıcının evindeki fabrika; 3B yazıcı.

3B yazıcı teknolojileri geliştikçe kullanıcının evindeki 3B yazıcı bir fabrika işlevi görecektir (Şekil 2.2). Ürünün paketlenmesi veya satış için bir markete duyulan ihtiyaç ortadan kalkacaktır. Kullanıcı ihtiyaç duyduğu ürünün kendisini satın almak yerine dijital dosyalarını internet üzerinden satın alarak kendi evinde üretebilecektir (Shewbridge vd. 2014). Geleneksel tedarik zincirindeki geleneksel fabrika anlayışı, ürün lojistiği ve paketleme gereksinimleri ortadan kalkacaktır. Böyle bir sürecin başarılı bir şekilde yürütülebilmesi için 3B yazıcıların üretim yeteneklerinin standartlaşması gerekmektedir. Tasarımcının kullandığı 3B yazıcı ve müşterinin kullandığı 3B yazıcı aynı kalitede üretim yapabilmelidir. Bu çalışmada önerilen yeni ekstruder tasarımı ve elde edilen bulgular ile 3B yazıcıların üretim kalitesini standartlaştırmaya yönelik katkı sağlanmaktadır.

2.2 3B Yazıcıların Geçmişi ve Sektörel Durum Analizi

Üretim bir hammaddenin istenen geometri ve özellikler kazandırılmasıdır. Ürünün istenen şekil ve özelliklere sahip olabilmesi için üretim sürecinde çeşitli işlemler uygulanır. Genel olarak üretim için üç ana prensip bulunur:

- Kalıpla Üretim: Kalıpla üretimde ürünün şekli, hammaddeye yüksek basınç uygulanmasıyla oluşturulur. Döküm, enjeksiyon veya saç bükümü endüstride sık kullanılan üretim tekniklerindedir.
- Talaşlı Üretim: Talaşlı üretimde ürünün şekli hammadde üzerinden malzeme çıkarılarak istenen geometrinin elde edilmesini içerir. Tornalama, freze ve matkap gibi üretim süreçleri en sık kullanılan üretim yöntemleridir.
- Eklemeli Üretim: Eklemeli üretimde istenen ürünün şekli hammaddenin çeşitli tekniklerle üst üste eklenmesi ile oluşturulur.

Kalıp ve talaşlı üretim endüstri 1.0 ile birlikte hayatımıza girmiş endüstri 2.0 ve 3.0 ile gelişimi ve kullanımı hızlanmıştır. Bugüne kadar üretimin büyük bir bölümü bu iki prensibe dayalı teknolojilerle gerçekleştirilmiştir. Halen endüstrinin çok önemli bir bölümü bu prensipleri temel alan üretim yöntemlerini kullanmaktadır. Teknolojinin gelişimiyle birlikte bu prensiplere de yenilikler eklenmiştir. Örneğin nümerik kontrollü üretim tezgâhları bilgisayar teknolojisinin eklenmesiyle bilgisayar kontrollü hale getirilmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerinde temel özellik hammadde üzerinden parça çıkarılmasıdır (Subtractive Manufacturing).

Eklemeli imalat teknolojilerinde geleneksel üretim yöntemlerinin aksine hammadde üzerinden parça çıkarmak yerine, hammaddenin katmanlar halinde üst üste eklenmesiyle üretilir (Additive Manufacturing). Eklemeli imalat veya eklemeli üretim dijital modeller üzerinden malzeme ekleme prensibini esas alan teknoloji ve yöntemler için şemsiye terim olarak kabul edilebilir. Literatürdeki birçok çalışmada “Eklemeli imalat” ve “3B yazıcı” terimi ile eş anlamlı olarak kullanılmıştır (ISO/ASTM 2015). “3B Yazıcı” ve “Eklemeli İmalat / Üretim” terimlerinin yanı sıra; “Katmanlı Üretim (Layer Manufacturing)”, “Serbest Biçim Üretimi (FreeForm Fabrication)” ve “Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping)” gibi terimler de kullanılmaktadır (Baumann ve Roller 2017). Bu terimler arasında “3B Yazıcı” terimi Gebhardt (2011)’ a göre basitliği nedeniyle gelecekte diğer

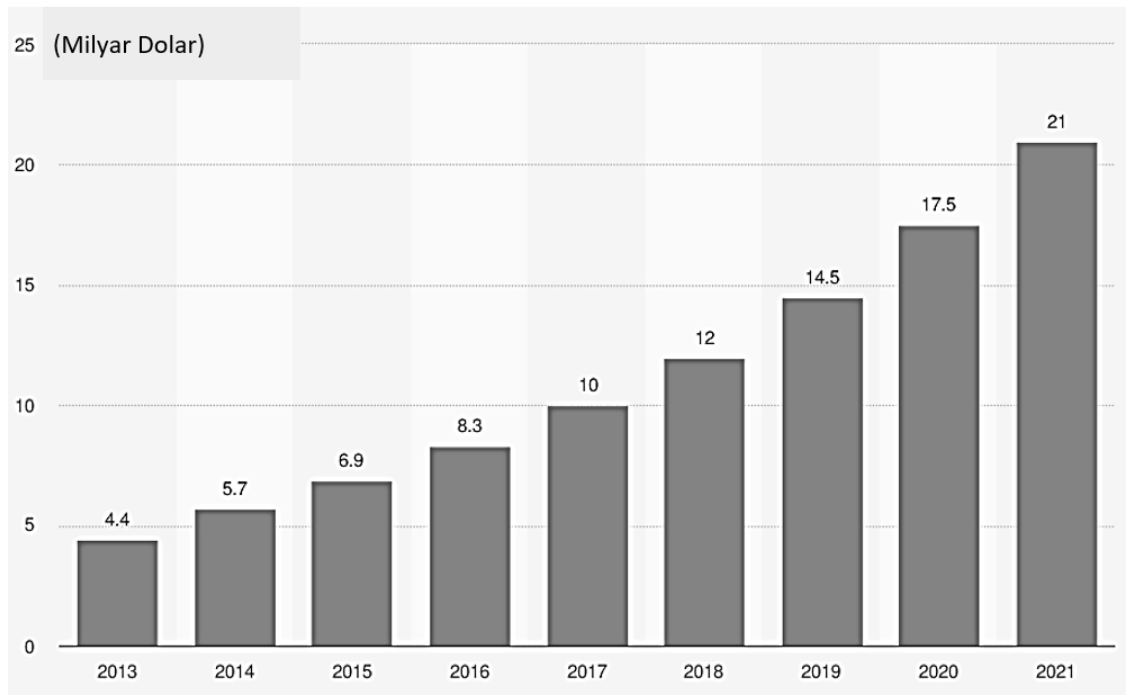
terimlerin yerini alacak ve tek başına kullanılacaktır. Bu çalışmada kullanılan “3B Yazıcı” terimi sadece bir cihazı ifade etmekten çok katmanların üst üste eklenerek üretim yapıldığı teknolojiyi ifade etmektedir. Hızlı Prototipleme seri üretimden önce üründe ortaya çıkabilecek hataları görmek için ürünün birebir ya da yakın özelliklere sahip bir örneğinin üretilmesidir. 3B yazıcıların ilk örnekleri son üretim yerine hızlı prototipleme amacına yönelik üretilmiştir.

3B yazıcılarla ilgili ilk ticarileşen patent Charles W. Hull tarafından 1991’de alınmıştır (Hull vd. 1993). Stereolithography (SLA) teknolojisi sıvı bir polimerin ışık ile kurlenmesi esasına dayanır. 1990’lı yılların başlarında S. Scott Crump, Stratasys firması adına Fused Deposition Modelling (FDM) teknolojisini kullanan bir cihaz ile ilgili patent alınmıştır (Crump 1989). Yine yakın zamanda hammadde olarak toz malzemeler kullanan Selective Laser Sintering (SLS) esasına dayanan bir başka cihazın patenti alınmıştır (Beaman ve Deckard 1990). 1990’ların başında patentleri alınan bu cihazların tamamı bilgisayar ve yazılım destekli üretim sistemleriydi ve öncelikli amaçları prototip üretimiydi. 3B yazıcıların ilk örnekleri olan bu çalışmalar endüstrinin farklı kollarında daha çok kullanılmaya ve yıllar içinde daha çok talep görmeye başladı. Özellikle medikal (D. Singh vd. 2018), otomotiv (Lim vd. 2016), uzay (Joshi ve Sheikh 2015) ve havacılık (Manda vd. 2018) gibi alanlarda 3B yazıcılar her geçen gün çok daha fazla kullanılmaya başlanmıştır.

3B yazıcılar ile ilgili buluşlar 1990’ların başında başlamasına rağmen 2000’li yıllara kadar satış oranları oldukça düşüktü. 1997’de ticari olarak satışı yapılan 3B yazıcı sayısı 1000 civarındaydı (Kruth vd. 1998). 2010’a kadar 3DSystems SLA yazıcılarla, Stratasys FDM yazıcılarla ve EOS SLS yazıcılarıyla sektörde öncü durumdaydı (Wohlers ve Gornet 2012).

Önemli bir FDM patentinin (Crump 1989) süresinin dolmasıyla 2010 yılından sonra 3B yazıcılar için yeni bir dönem başladı. Bu dönemde özellikle FDM 3B yazıcılarla ilgili her geçen gün yeni bir ürün sektöre girmeye başladı. İlk 3B yazıcılar hızlı prototipleme amacıyla piyasaya çıktığında, şaşırtıcı olmayan bir şekilde çok pahalıydılar. Ancak 2010 yılından sonra özellikle Maker Hareketi’nin de desteği ile 3B yazıcı fiyatları önemli

ölçüde düştü. Aynı zamanda yeni markalar ve yazıcılar da hızla sektöre girdi. Böylece 3B yazıcı üretimi önemli ölçüde artışa geçmiştir (Şekil 2.3). 3B yazıcı ekonomisi 2013 yılında 4,4 milyar dolardan, 2021 yılında 21 milyar dolara çıkarak beş kat artmıştır (Nikitakos vd. 2020). Bu süreçte “Maker Hareketi” önemli rol oynamıştır. Hareketin kurucusu Dale Dougherty’nin tanımına göre, Maker ruhunun temelinde rekabet yerine paylaşım, para yerine yetenek, ezber yerine deneyim vardır (Dougherty 2012). Maker’lık, probleme yönelik çözüm üretmeyi amaçlar ve yaratıcılık gerektirir. Buna karşılık ustalık ve zanaatkarlık, sadece belirli bir işi yapmak için var olan mesleklerdir.



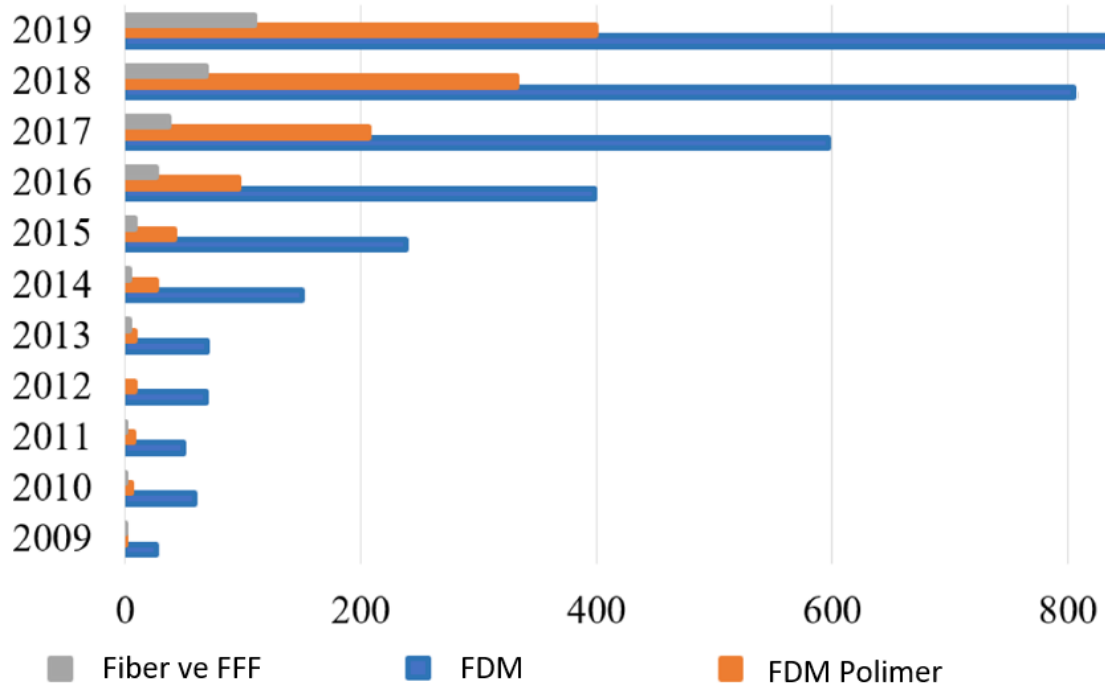
Şekil 2.3 3B yazıcı ekonomisinin yıllara göre gelişimi

3B yazıcılar konusunda maker hareketinin öncü projesi Rep-Rap olarak bilinen projedir (Jones vd. 2011). Rep-Rap “Replicating Rapid Prototyper” kelimelerinin kısaltmasıyla oluşturulmuştur. Kendi parçalarını üretebilen 3B yazıcılara vurgu yapar. Açık tasarım olarak, projenin ürettiği tüm tasarımlar özgür yazılım lisansı altında yayınlanmaktadır.

Rep – Rap projesi 3B yazıcı sektörünü önemli ölçüde etkilemiştir. Proje ile birlikte hızla yeni tasarımlar ve yeni ürünler ortaya çıkmıştır. Bu durum rekabeti tetikleyerek mevcut 3B yazıcıların maliyetlerini düşürmüştür. İnovasyon, ilk başlarda teknolojinin keşfini yapan öncü firmalara bağlıken Rep – Rap projesi ile birlikte kolektif bir inovasyon

ortamı oluşmuştur. Böylece yeni küçük ölçekli firmalar sektöre girmeye başlarken eski büyük ölçekli firmalar yine aynı alanda farklı teknolojiler geliştirmeye odaklanmıştır. Rep – Rap projesinin tetiklediği birçok yeni firma sektöre giriş yapmış ve özellikle 3B FDM yazıcılardaki pazar payının çok büyük bir kısmı bu firmaların eline geçmiştir. Prusa, Ultimaker, MakerBot, Zortrax, FormLabs gibi firmalar 2010 – 2015 yılları arasında kurulmuş ve başarılı olmuş önemli firmalardır. 2015’ten sonraki yıllarda Creality, AnyCubic, Anet, Monoprice, XYZ Printing gibi birçok firma daha sektöre girmiştir.

Üretim esnekliği ve maliyetlerinin düşüklüğü nedeniyle 2011 yılından bu yana FDM 3B yazıcılar sektörde en büyük paya sahiptir ve halen bu payını korumaktadır (S. Singh vd. 2020). Yapılan akademik çalışmalar da bu konunun hala gündemde olduğunu göstermektedir (Wickramasinghe vd. 2020). Şekil 2.4’te hazırlanan bu tez çalışmasının da konusu olan 3B yazıcılar ile ilgili yapılan akademik çalışmalar Web of Science üzerinden üç anahtar kelime ile derlenmiştir (Wickramasinghe vd. 2020). Görüldüğü üzere FDM 3B yazıcılar üzerine yapılan akademik çalışmalar 2010 yılından itibaren ivmelenerek artmış ve halen artmaya devam etmektedir.



Şekil 2.4 2009 ve 2019 yılları arasında 3B yazıcılar ile ilgili yapılan akademik çalışmaların dağılımı.

2.3 3B Yazıcı Teknolojileri

3B yazıcıların tamamı malzemelerin katmanlar halinde birbirine eklenmesi prensibine göre üretim yapar. Ancak katmanların birbirine eklenmesi sürecinde farklı teknikleri ve malzemeleri kullanan yazıcı türleri vardır. Farklı teknolojiler ile çalışan 3B yazıcılar bulunsada hepsi temel olarak aynı süreçleri kullanarak üretim yapmaktadır. Sadece katmanların üretilmesi sırasında kullanılan teknoloji ve kullandıkları hammadde yelpazesi farklıdır. Bunun dışında Şekil 2.5’de gösterildiği gibi üretim süreci ve bu süreçte kullanılan temel yaklaşımlar aynı kalmaktadır. Hepsinde de ortak olarak üretilecek olan nesnenin bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları yardımıyla 3B dijital modeli oluşturulur. Daha sonra 3B model STL (STereoLithography / Standard Triangle Language) formatına dönüştürülür. Elde edilen STL dosyasından dilimleme yazılımları yardımıyla katmanlara ayrılır. Her bir katmana ait geometrik veriler G-Code dosyası ile 3B yazıcıya aktarılır ve üretim yapılır.



Şekil 2.5 3B yazıcılar ile üretim süreci

3B yazıcılar ile ilgili temel tanımlar ve sınıflandırmalar American Society of Testing and Materials tarafından yapılmıştır (ISO/ASTM 2015). ASTM’nin işlem süreçlerini, teknolojileri ve bu teknolojilerle kullanılabilen malzemeler Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi 3B yazıcıların kullandığı işlem kategorilerini yedi ana başlıkta incelemek mümkündür. Bu ana teknolojiler;

Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting): Massachusetts Institute of Technology (MIT)’de yapılan çalışmalarla keşfedilmiş bu teknoloji “3D Printer” adıyla patentlenmiştir. Bu süreçte toz halinde hammaddeler kullanılır. Hammadde olarak metal, polimerler veya seramik malzemeler kullanılabilir. Toz materyal üzerine hareketli bir kafa istenen bölgeye sıvı haldeki yapıştırıcı malzeme uygulanır. Yapıştırıcı toz hammaddenin birbirine yapışmasını sağlar.

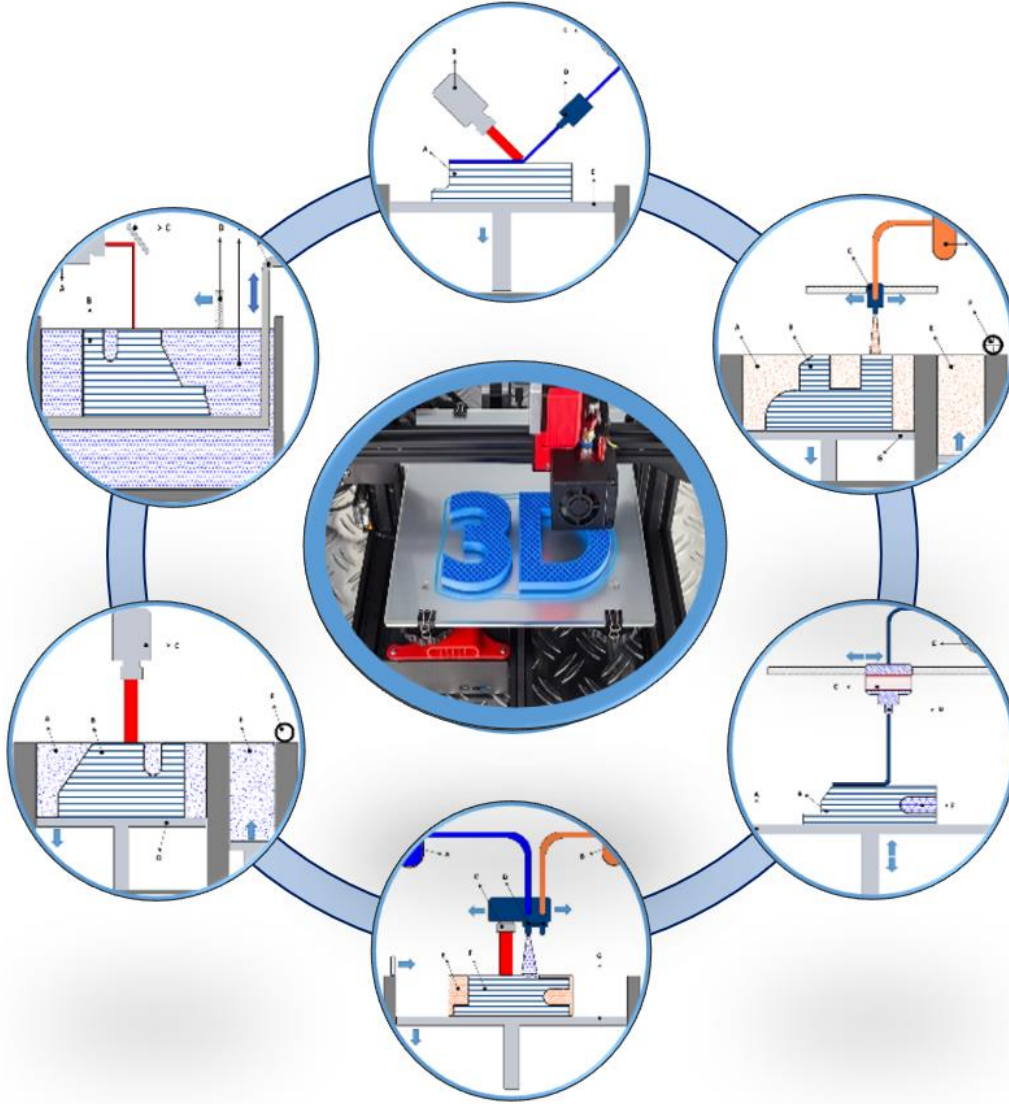
Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition): Bu süreçte hammadde doğrudan yüksek ısı kaynağı ile birlikte baskı tablası üzerine dökülür. Hammadde tel halde veya toz halde olabilir. Kullanılan ısı kaynağı lazer veya plazma ark kaynağı olabilir.

Çizelge 2.1 Farklı 3B yazıcı teknolojileri

İşlem Kategorileri	Teknoloji	Malzeme
Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)	Mürekkep Püskürtme (Ink Jetting)	Metal
	S Print	Polimer
	M Print	Seramik
Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)	Doğrudan Metal Biriktirme (Direct Metal Deposition)	Metal Tozları
	Lazer Biriktirme (Laser Deposition)	Tel Metal
	Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Direct Melting)	
Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)	Ergimiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication)	Polimer
		Termoplastik
Malzeme Jeti (Material Jetting)	Çoklu Püskürtme (Polyjet)	Fotopolimer
	Mürekkep Püskürtme (Ink Jetting) Thermojet	
Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion)	Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)	Metal
	Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)	Polimer
	Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting)	Seramik
Sac Laminasyon (Sheet Lamination)	Tabakalı Nesne Üretimi (Laminated Object Manufacturing)	Metal
	Ultrasonik Katmanlı Üretim (Ultrasonic Consolidation)	Seramik
Fotopolimerizasyon (Photopolymerization)	Stereolitografi	Foto polimer
	Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing)	Seramik

Her bir 3B yazıcı teknolojisinin temel çalışma yapıları Şekil 2.6’da görülmektedir. Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion): Tel halindeki termoplastik hammaddenin hareketli bir nozul yardımıyla baskı tablası üzerinde istenen bölgeye dökülerek üretim yapılan yöntemdir. Çalışmanın ana konusu olan bu tekniğe dair ayrıntılı bilgiler diğer bölümlerde verilmiştir.

Malzeme Jeti (Material Jetting): PolyJet markasıyla bilinen teknolojidir. Üretim için kullanılan malzemeyi damlacıklar halinde istenen noktaya püskürterek üretim yapılır. Püskürtme işlemi sonrasında belirli bir UV dalga boyunda ışık uygulanarak kütleme işlemi gerçekleştirilir. Fotopolimerler ve balmumu benzeri malzemeler hammadde olarak kullanılır.



Şekil 2.6 Farklı 3B yazıcı teknolojileri.

Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion): Bu yöntemde malzeme tozunu eritmek ve kaynaştırmak için bir lazer veya elektron ışını kullanılır. Bu yöntemi kullanan bazı sistemlerde vakumlu ortama ihtiyaç duyulabilir. Toz hammadde kendinden önceki katmanın üstüne serilerek termal enerji yardımıyla katmanlar birbirine eklenir.

Sac Laminasyon (Sheet Laminations): Çok ince levha halinde hammaddelerin katmanlar halinde birleştirilerek üretimin yapıldığı bir tekniktir.

Fotopolimerizasyon (Photo – Polymerization): Bir tank içerisindeki sıvı haldeki foto polimer malzemenin belirli dalga boyundaki ışığın istenen bölgeye uygulanarak katmanların oluşturulduğu üretim yöntemidir. Kullanılan foto polimerler reçine olarak da adlandırılır.

2.3.1 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)

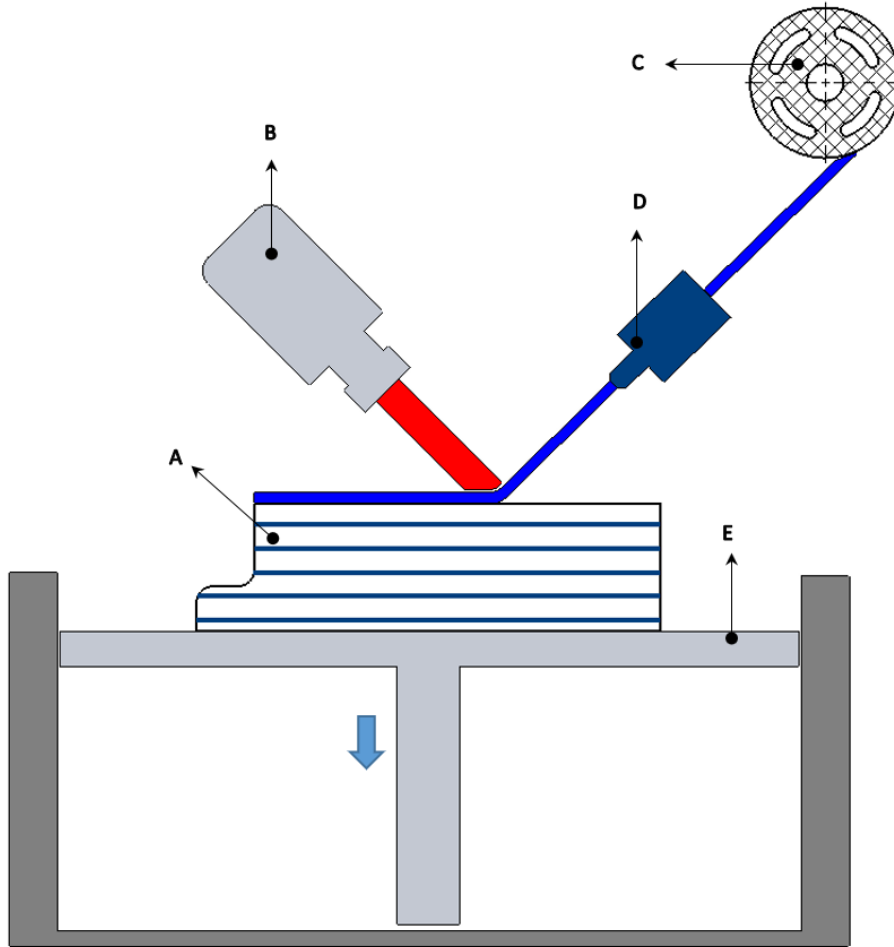
Massachusetts Institute of Technology (MIT)'de yapılan çalışmalarla keşfedilmiş bu teknoloji “3D Printer” adıyla patentlenmiştir. Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting / BJ) 3B yazıcılar genel olarak ince toz hammaddenin üzerine bir yapıştırıcı kimyasal uygulamasıyla katmanların oluşturulduğu teknolojidir (Gibson vd. 2021). Seramik esaslı veya metal tozları hammadde olarak kullanılabilir (Gonzalez vd. 2016).

Yazıcının nozulları baskı tablası üzerinde hareket ederek toz partiküllerinin üzerine kimyasal yapıştırıcı damlacıklarını püskürtür (Şekil 2.7). Katmanın üretimi tamamlandığında baskı tablası z eksinde katman kalınlığı kadar aşağıya iner ve diğer katmanın üretimi başlar. Bütün katmanların üretimi tamamlandığında ürünün tamamlanabilmesi için son işlem (Post – Processing) yapılması gerekir.

Son işlemler, üretim sırasında kullanılan malzemeye göre bazı durumlarda endüstriyel bir fırında fırınlama veya başka bir malzemenin ürüne emdirilmesi işlemlerini içerebilir (Gonzalez vd. 2016). Ürünlerin renklendirilmesi için akrilik veya başka bir kaplama işlemi de gerekebilir. BJ 3B yazıcıdan çıkan ürünlerin porozitesi yüksektir ve dolayısıyla mekanik özellikleri oldukça zayıftır. Uygulanan son işlemler ile ürünün porozitesi

2.3.2 Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)

Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition / DED) prensibi ile üretimin esası tel veya toz haldeki hammaddenin doğrudan ergitilerek katmanların üretimini sağlanmasıdır (Friel 2015). Bu süreçte hammadde doğrudan yüksek ısı kaynağı ile birlikte baskı tablası üzerine dökülür (Bae vd. 2018). Hammadde tel halde veya toz halde olabilir. Kullanılan ısı kaynağı lazer veya plazma ark kaynağı olabilir. Sistemin genel çalışma prensibi Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8 Doğrudan enerji biriktirme teknolojisi; parça (a), elektron ark kaynağı (b), tel hammadde (c), ekstruder (d), baskı tablası (e).

Doğrudan Enerji Biriktirme prensibini kullanan 3B yazıcılar doğrudan yeni bir parçanın üretiminin yanı sıra hasarlı parçaların onarımı için de kullanılabilir (Oh vd. 2019). Bu prensip ile çalışan yazıcılar genellikle endüstriyel düzeyde kullanılmaktadır ve

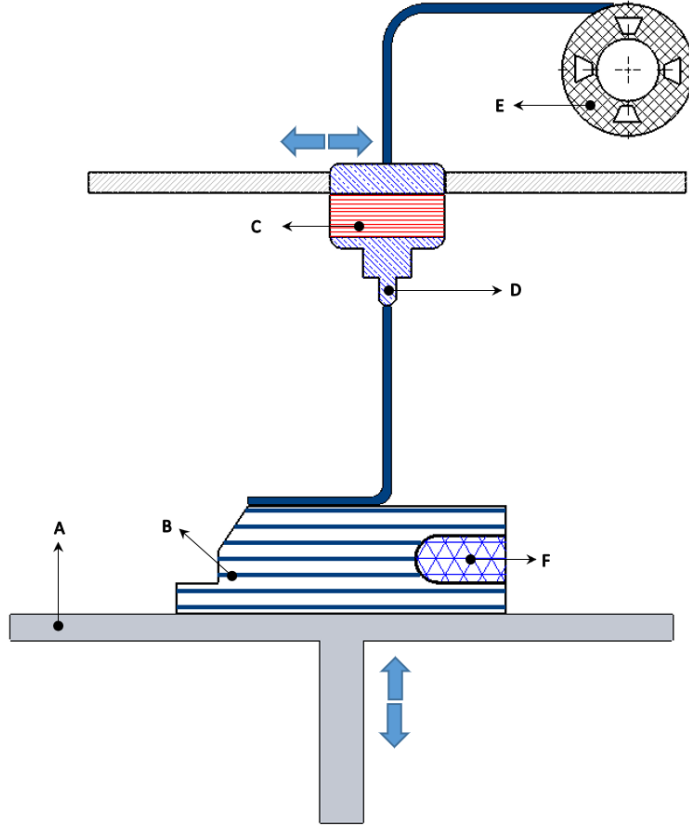
operatörlüğü için kontrollü ortamlara ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) 3B yazıcılar genellikle kapalı bir kabin içerisinde ve nozul hareketi çok eksenli robot kollar ile sağlanır. Bu prensibin uygulaması Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekli (Laser Engineered Net Shape / LENS) ve Elektron Işını Eklemeli Üretimi (Electron Beam Additive Manufacturing / EBAM) 3B yazıcı teknolojilerinde kullanılmaktadır.

Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekli (Laser Engineered Net Shape): LENS 3B yazıcılarda hareketli bir taşıyıcı üzerinde güçlü bir lazer ve toz partikülleri püskürtebilen bir nozul bulunur (Atwood vd. 2018). Bütün üretim işlemi kapalı ve içinde argon gazıyla dolu bir kabin içinde gerçekleştirilir. Böylece ortamdaki oksijen ve nem oranı düşük tutularak, ürünün oksidasyona uğraması engellenir (Hofmeister vd. 1999). Taşıyıcı kafa üzerinde bulunan lazer, üretimin yapıldığı bölgede bir ergime alanı oluşturur ve toz bu bölgeye ulaştığı anda ergir. Eriyik haldeki toz döküldüğü alanda katılarak katman oluşturur. Bütün katmanlar üretildikten sonra parçaya gerekliyse ısı işlemler veya diğer geleneksel yöntemlerle son işlem uygulanabilir.

Elektron Işını Eklemeli Üretimi (Electron Beam Additive Manufacturing / EBAM): EBAM 3B yazıcılarda hammadde olarak tel veya toz halde metaller kullanılabilir. Titanyum, tantalum ve nikel hammaddeler ile üretim yapılabilir. Kaynak ve elektron ışını kaynakları üzerine uzmanlaşmış bir firma olan Sciaky patentli bir teknolojidir. LENS 3B yazıcılarla benzer şekilde çalışır ancak ısı kaynağı lazer yerine elektron ışınıdır ve vakumlu bir kabinde üretim gerçekleştirilir (Cheng vd. 2014). Bu teknoloji aynı zamanda hasarlı parçaların tamiri ve düzeltilmesi için de kullanılmaktadır.

2.3.3 Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)

Hammaddenin bir nozulun içinde işleminden geçirilerek baskı tablası üzerinde istenen bölgeye katmanlar halinde dökülerek üretim yapılması prensibidir. Nozul üretilecek olan parçanın kesiti boyunca tabla üzerinde hareket eder. Bu prensibi kullanan 3B yazıcılar Ergimiş Filament Üretimi, Fused Deposition Modeling (FDM) veya Fused Filament Fabrication (FFF) olarak bilinir. En çok bilinen ve yaygın olarak kullanılan yazıcılardır.



Şekil 2.9 Malzeme ekstrüzyonu teknolojisi; baskı tablası (a), parça (b), ısıtıcı (c), ekstruder (d), filament (e), destek yapı (f).

Ergimiş Filament Üretimi (Fused Deposition Modeling / FDM): Ergimiş Filament Üretimi (FDM) teknolojisini kullanan 3B yazıcılarda hammadde olarak ABS, PLA veya Ultem gibi termoplastikler kullanılır (Marcincinova 2012). Bu termoplastikler tel haldedir ve Filament olarak adlandırılır (Şekil 2.9). FDM 3B yazıcılarda baskı tablası 2 veya 3 ekseninde hareket edebilir.

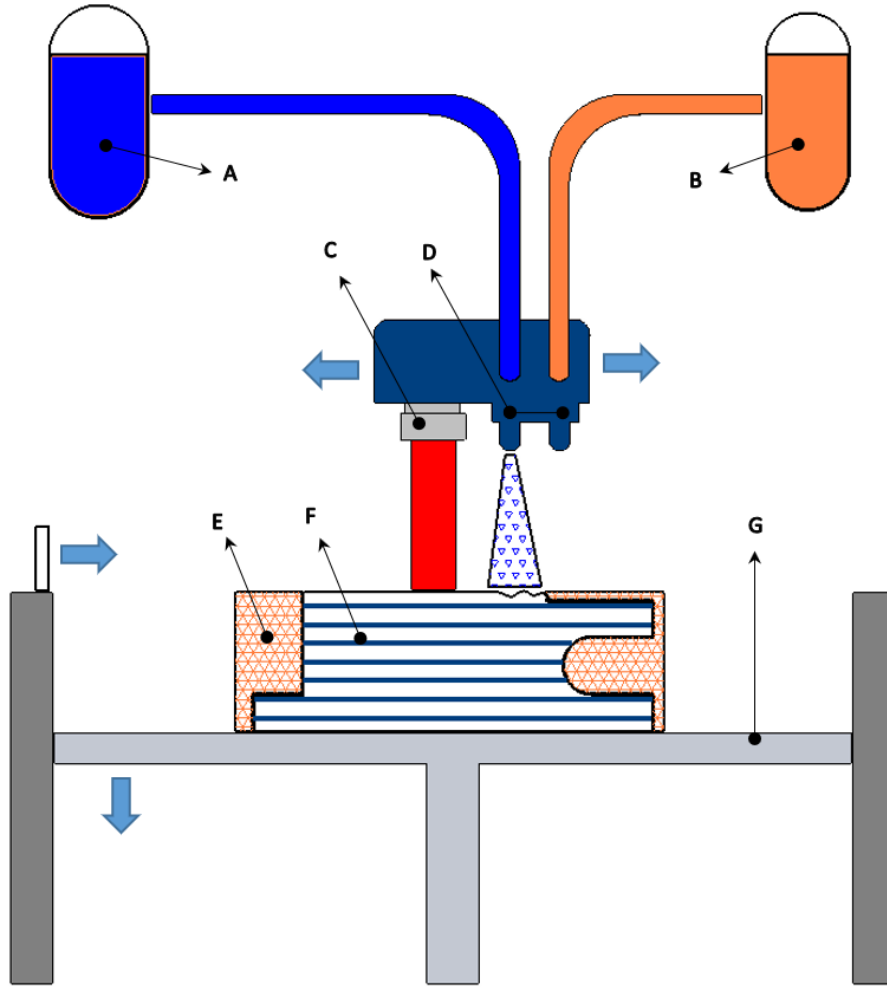
Nozul termoplastiğin camsı geçiş sıcaklığına ulaşmasını sağlar. Ergiyen termoplastik parçanın kesitine uygun şekilde bir katman halinde tabla üzerine dökülür. Termoplastik baskı tablasına döküldüğünde katlaşır ve parçanın bir katmanı üretilmiş olur. İlgili katmanın üretimi tamamlandığında baskı tablası veya nozul Z ekseninde katman kalınlığı kadar alçaltılır veya yükseltilir. Daha sonra parçanın diğer kesitine ait katman ilk katmanın üzerine örülür. Parçanın bütün kesitleri katmanlar halinde üretilerek tamamlandığında ürün kullanıma hazır olur.

2.3.4 Malzeme Jeti (Material Jetting)

Malzeme Jeti (Material Jetting) diğer 3B yazıcı türlerine göre nispeten daha yeni bir tekniğe sahiptir. İşlem süreci oldukça hassas ve hızlıdır. UV ışığına veya yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında sertleşen foto polimerler veya balmumu gibi malzemeler katmanların oluşturulması için kullanılır. Çok malzemeli üretime imkân tanıyan bir teknolojidir. Tek parça üzerinde farklı renklerde ve malzemeler ile üretim yapılabilir. Ancak üretim maliyetleri yüksek ve ortaya çıkan ürünler mekanik olarak kırılgan yapıdadır.

Teknolojinin temelinde hammaddenin nozuldan sıvı olarak damlacıklar halinde spreyleneceğiyle katmanların oluşturulması vardır (He vd. 2016). Çoklu Jet Füzyonu (Multi Jet Fusion / MJF), Nano Parçacık Püskürtme (Nano Particle Jetting / NPJ) ve Sıvı Metal Damlatma (Drop – On – Demand / DOD) teknolojilerine sahip 3B yazıcılar bu prensipten faydalanarak üretim yaparlar.

Çoklu Jet Füzyon (Multi Jet Fusion / MJF): Çoklu Jet Füzyonu (MJF) tekniğini kullanan 3B yazıcılarda hareketli bir kafa üzerinde yüzlerce küçük nozul bulunur (Şekil 2.10). Bu nozullardan foto polimer hammadde spreylenecek katmanlarla birlikte parça oluşturur. Kafa üzerindeki nozul sayısının fazla olması sayesinde diğer 3B yazıcılardaki gibi noktasal olarak üretim yapmak yerine çizgisel bir alanda üretim yapılır. Böylece üretim hızı nispeten daha yüksektir. Damlacıklar, baskı tablasında biriktikçe, UV ışığı kullanılarak kürlenir. UV ışığına maruz kalan bölgeler katılır, ışığa maruz kalmayan bölgeler sıvı halde kalır. Farklı malzemelerle eş zamanlı üretim yapma imkânı sayesinde parça üzerinde oluşturulan destek yapılar ana parçadan farklı bir malzemedan üretilebilir. Böylece üretim sonrasında destek malzemelerin sökülmesi için gerekli olan son işlem (Post – Processing) sürecini kolaylaştırır. MJF 3B yazıcılarda ABS, kauçuk benzeri plastikler ve şeffaf plastikler hammadde olarak kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde görsel anlamda diğer 3B yazıcılara göre daha iyi ürünler elde etmek mümkündür.



Şekil 2.10 Malzeme jeti teknolojisi; fotopolimer malzeme (a), çözülebilir destek malzemesi (b), UV Işık kaynağı (c), nozul (d), destek yapı (e), kürlenmiş parça (f), tabla (g).

Çoklu Jet Füzyon (MJF) 3B yazıcılarda hammadde olarak kullanılan sıvı reçinenin spreylenebilmesi için ideal viskoziteye sahip olması gerekir. İstenen viskozite reçinenin 30-60 °C sıcaklığa ısıtılmasıyla sağlanır (H. Kim vd. 2016). Daha sonra reçine yazıcının hareketli kafası baskı tablası üzerinde hareket ederken çok sayıdaki nozulardan yüzlerce küçük damlacıklar halinde spreylenebilir. Yazıcının hareketli kafası üzerinde bir de UV ışık kaynağı bulunur. Damlacıklar baskı tablasına yapıştıkça eşzamanlı olarak UV kürlenme işlemi gerçekleştirilir. UV ışığın temas ettiği yüzeyler katlaşır. İlgili katman üretildikten sonra baskı tablasının z ekseninde katman kalınlığı kadar hareket eder ve diğer katmanın üretim süreci başlar. MJF 3B yazıcılar da SLA yazıcılar gibi foto polimerizasyondan faydalanarak üretim yaparlar. Ancak MJF 3B yazıcılar, SLA yazıcılardaki gibi son işlem olarak yapılan ikinci bir ışık kürüne ihtiyaç duymazlar.

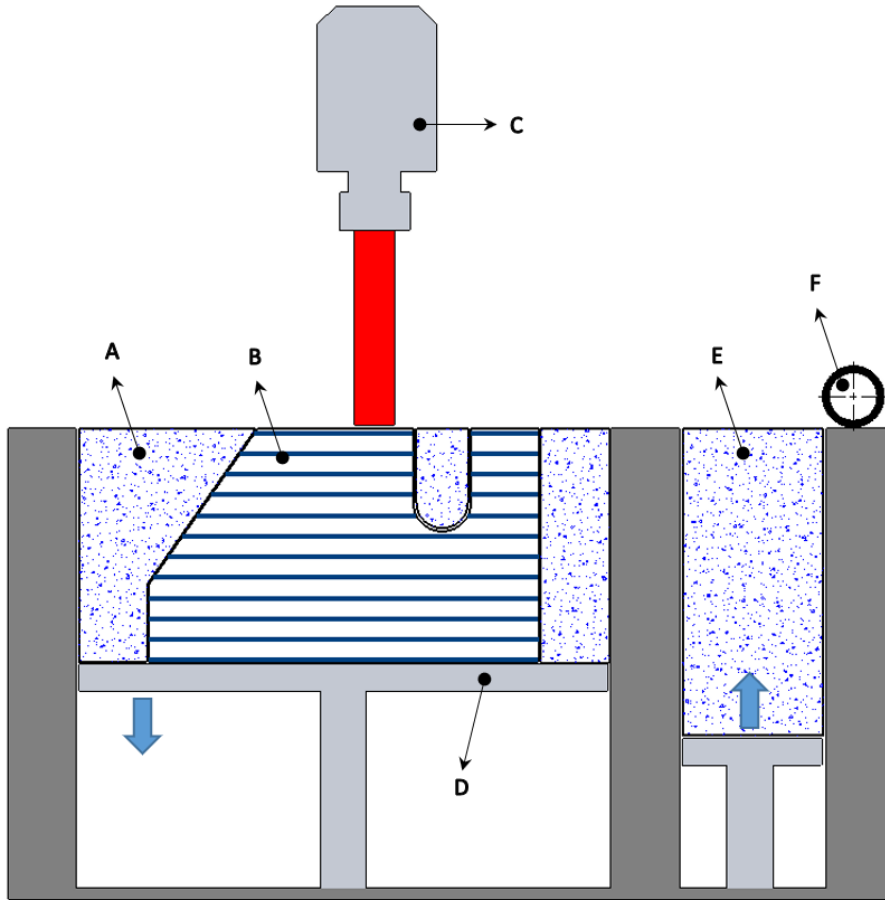
MJF 3B yazıcılarda operatör kontrolü oldukça kısıtlıdır. Yazıcıya ait çok az parametreye müdahale edilebilir. Örneğin; diğer bütün yazıcılarda katman kalınlığı operatör tarafından belirlenebilirken, MJF 3B yazıcılarda katman kalınlığı kullanılan hammaddeye bağlı standart olarak belirlenir. Bunun nedeni nozullardan püskürtülen damlacıkların oluşumunun fiziksel anlamda çok zor olmasıyla ilgilidir (Tan 2016). MJF 3B yazıcılar için bir diğer farklı özellik üretimi renkli yapabilmesi nedeniyle STL dosyalarının yerine ürünün renk bilgisini de barındıran OBJ veya VRML uzantılı dosya türleriyle çalışılması gerekir. MJF 3B yazıcılar ile her ne kadar renkli ve görsel anlamda ilgi çekici ürünler üretilbilse de dayanımları ve mekanik özellikleri açısından oldukça zayıftır (Tasch vd. 2019). Dolayısıyla daha dayanıklı veya fonksiyonel ürünlerin üretimi bu teknoloji ile kolay değildir.

Nano Parçacık Püskürtme (Nano Particle Jetting): Nano Parçacık Püskürtme (NPJ) tekniğini kullanan 3B yazıcılar, içinde metal veya seramik nano partiküller barındıran bir sıvıyı hammadde olarak kullanır. Üretim 250 °C sıcaklığındaki bir baskı tablasında gerçekleştirilir. Bu sıcaklık sayesinde nano partiküller ve sıvı karışım halde spreyleneşmesine rağmen tablaya ulaştığında sıvı buharlaşır ve geriye sadece metal partiküller kalır. XJet firması tarafından ticarileştirilen bu teknolojiye zirkona ve 316L paslanmaz çelik malzemeler ile üretim yapılabilir (Oh vd. 2019). Üretim sırasında parçanın gerekli bölgelerine suda çözünebilen destek malzemesi uygulanır. Üretilen parçaya yazıcıdan çıktıktan sonra bir takım son işlem uygulanması gerekir. Parça suda bekletilerek destek malzemelerinin suda çözdürülmesi gerekir. Ardından parça üzerinde kalan yapıştırıcı kimyasalların temizlenmesi için fırında ısıl işlem uygulanır.

Sıvı Metal Damlatma (Drop-On-Demand / DOD): Sıvı Metal Damlatma (DOD) tekniğini kullanan 3B yazıcılar, MJF tekniğini kullanan 3B yazıcılarla oldukça benzer bir prensiple üretim yapar. DOD 3B yazıcılarda spreyleme için iki adet kafa bulunur. Bu kafalardan biri balmumu benzeri hammaddeyi püskürtürken, diğeri çözülebilir destek malzemesi için kullanılır. MFJ yazıcıların hammadde sürekli olarak spreyleneşirken DOD 3B yazıcılarda sadece gerekli zamanda gerekli bölgeye spreyleneşir (Simonelli vd. 2019). Diğer 3B yazıcılardan farklı olarak bir üst katmanın daha düzgün bir zemin üzerine örülmesi için önceki katman üzerinde düzleştirmek için ek bir işlem uygulanır.

2.3.5 Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion)

Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion / PBF) teknolojilerini kullanan 3B yazıcılar, toz parçacıklarının katmanlar oluşturacak şekilde ergitilerek veya sinterlenerek birbirine kaynatılması prensibini kullanır. Toz halindeki hammadde erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa belli bir süre maruz bırakıldığında parçacıklar birbirlerine temas ettikleri noktalardan başlayarak birbirine kaynamaya başlar (Martin vd. 2019).



Şekil 2.11 Toz yatak füzyonu teknolojisi; işlenmemiş toz (a), parça (b), laser/elektron ark kaynağı (c), baskı tablası (d), toz hammadde (e), toz yayıcı (f).

Toz Yatak Füzyonu (PBF) teknolojisinde kullanılan hammadde plastik veya metal toz parçaları olabilir. PBF 3B yazıcılar, üretim sürecinde lazer veya elektron ışını gibi kullandığı enerji kaynaklarına göre ile farklılaşır. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering / SLS), Seçici Lazer Eritme (Selective Laser Melting / SLM), Elektron Işın Ergitme (Electron Beam Melting / EBM) ve Çoklu Jet Füzyonu (Multi Jet Fusion /

MJF) benzer prensibi kullanan farklı teknolojilerdendir.

Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering / SLS): Seçici Lazer Sinterleme (SLS) 3B yazıcılarda, hammadde olarak plastik, cam veya seramik ince toz malzemeler kullanılır (Şekil 2.11). Katmanların üretilmesi için toz parçacıklar güçlü bir lazer kaynağı ile sinterlenir. Süreç, baskı tablası üzerine ince bir toz tabakasının serilmesiyle başlar. Serilen toz katmanı 0,1 mm ve bazı uygulamalarda çok daha incedir (Wai ve Gibson 2000). Toz katmanı serildikten sonra parçanın üretilecek olan kesit geometrisine uygun konulara lazer odaklanır. Lazerin odaklandığı bölgedeki toz tanecikleri sinterlenerek katlaşır ve birbirine yapışır (Wang vd. 2007). Üretilcek parçanın ilgili kesitinin tamamı katılaştıktan sonra baskı tablası z ekseninde katman kalınlığı kadar aşağı doğru iner. Tekrar yeni bir toz katmanı serilir. İşlem, istenen parçanın tamamı üretilinceye kadar tekrar eder. Süreç tamamlandığında, baskı tablası üzerinde tamamen sinterlenmemiş toz parçacıklarının arasında katılmış son ürün bulunur. Hazne ve ürün soğuduktan sonra tabladan çıkarılır ve etrafındaki tozlardan temizlenir. Tozların temizlenmesi için kompresör ve fırçalardan faydalanılır. Kalan tozlar tekrar kullanılabilir. Ürün üzerinde bazı üretim sonrası işlemler (Post – Processing) uygulandıktan sonra kullanıma hazır hale gelir.

Seçici Lazer Eritme (Selective Laser Melting / SLM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering / DMLS): Metal 3B yazıcılar terimi genellikle en çok bilinen bu teknikleri kullanan 3B yazıcı türleri için kullanılır. Seçici Lazer Eritme (SLM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) 3B yazıcılar, Seçici Lazer Sinterleme (SLS) 3B yazıcılar ile oldukça benzer prensipleri kullanan teknolojilerdir. Hammadde olarak kullandıkları tozlar nedeniyle birbirlerinden farklılaşırlar. SLS 3B yazıcılarda hammadde olarak plastik, cam veya seramik ince toz malzemeler kullanılırken, SLM ve DMLS 3B yazıcılarda metal tozları kullanılır. SLM 3B yazıcılar metal tozlarını tamamen ergiterek birbirleri ile birleşmesini sağlar. DMLS 3B yazıcılar ise tozları tamamen ergitmek yerine ergime noktasına yakın sıcaklıklara ulaştırır (Duda ve Raghavan 2016). Böylece toz parçacıklarının kimyasal olarak bağlanmalarına imkân tanıyacak kadar ısıtır. Dolayısıyla iki teknoloji birinin ergitme değerinin sinterleme kullanmasıyla birbirinden farklılaşır. Ortak yönleri ise; her ikisinin

de toz halindeki partiküllere lazer kaynağı ile seçici olarak işlem yapmasıdır. SLM 3B yazıcılar tek türde metal tozlarıyla üretim yapabilirken, DMLS 3B yazıcılar metal alaşımları kullanarak üretim yapabilir.

SLM ve DMLS 3B yazıcılarla yapılan üretimin temel bileşenleri birbirine oldukça benzerdir. Üretim izolasyonlu kapalı bir kabin içinde gerçekleştirilir. Kapalı kabinin içi argon gibi inert gazlar ile doldurulur. Daha sonra toz hammadde gerekli üretim sıcaklığına kadar ısıtılır. Çok ince bir tabaka halinde metal tozları baskı tablasına serilir. Yüksek güçteki bir lazer kaynağı üretilecek olan parçanın kesit geometrisine göre metal tozlarını tabla üzerinde ergitir. Bu esnada metal tozları hem baskı tablasına hem de birbirine kaynatılmış olur. Daha sonra baskı tablası katman kalınlığı kadar z ekseninde alçaltılır ve aynı işlem parça geometrisinin ikinci katmanı için gerçekleştirilir. Bu yazıcılarda katman kalınlıkları kullanılan tozların özelliklerine bağlı olarak 20-50 mikron kadar olabilir (N'Dri vd. 2015). Parçanın tüm kesiti katman katman aynı şekilde işlenir ve üretim tamamlanır.

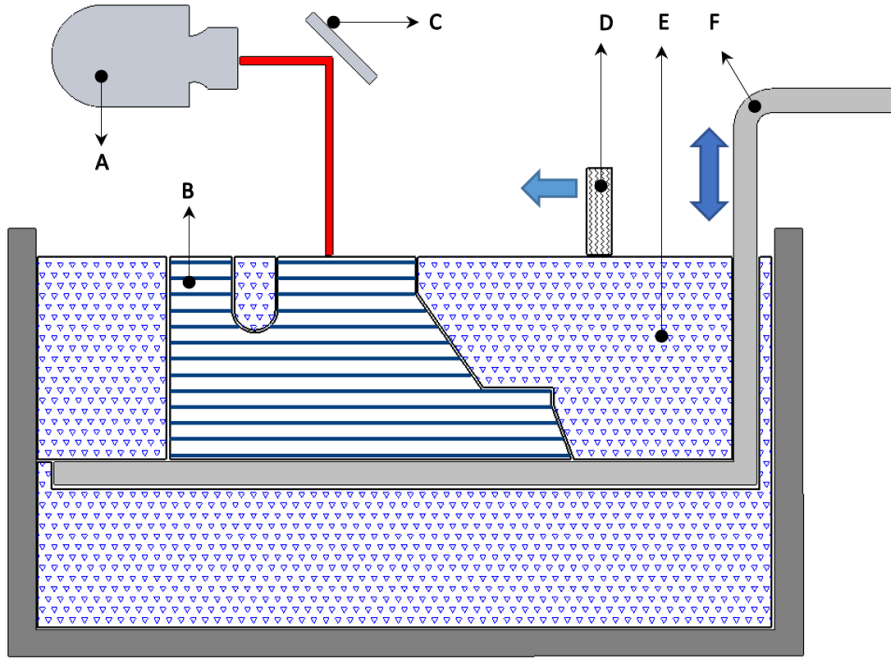
Üretim tamamlandığında işlenmemiş toz partiküller ve ürün haline gelmiş parça birbiri içinde bulunur. Kabin soğutulur ve daha sonra ürün için son işlemler (Post – Processing) uygulanır. Ürün baskı tablasına kaynamış halde üretildiği için elektro erozyon makinesi (EDM, Electrical Discharging Machine) veya talaşlı imalat yöntemleri ile baskı tablasından ayrılması gerekir. Üretim sırasında oluşturulan destek yapıların temizlenmesi gerekir. Aynı zamanda kumlama ve benzeri uygulamalarla parça yüzeyi daha iyi hale getirilebilir. Bu yazıcılarla üretilen parçaların toleransları ± 0.1 mm civarındadır. SLM ve DMLS 3B yazıcılarda kullanılan toz hammadde açısından bakıldığında sarfiyatı oldukça azdır. Üretim sonrasında baskı tablasına yayılan tozların sadece %5'i kullanılamaz hale gelir. Dolayısıyla ürünün üzerinden temizlenen tozların çoğu tekrar kullanılabilir. Kayıplar sadece kullanılan destek yapılarından kaynaklanır. Dolayısıyla karmaşık ve çok destek yapısı gerektiren parçalarda toz maliyeti artacaktır. Aynı sebeple ürünün tasarımı ve üretim sırasında baskı tablasına konumlandırılması sırasında daha az destek yapısına ihtiyaç duyacak şekilde optimize edilmesi gerekir.

Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting / EBM): Elektron Işını Ergitme (EBM) 3B yazıcılar elektron ışını ile metal toz partiküllerin ergitilmesi prensibini kullanarak üretimi gerçekleştirir (Seifi vd. 2015). İsveç’de bulunan ARCAM firması bu yazıcılardaki öncü firmadır. DMLS yazıcılar ile arasındaki fark EBM’de lazer yerine ısı kaynağı olarak elektron ışınlarının kullanılmasıdır. Bunun yanında EBM 3B yazıcılarda vakumlu bir kabin kullanılır. Aynı zamanda hammadde olarak kullanılan tozların iletken olması gerekir. Bunun haricinde üretim prensipleri DMLS yazıcı ile oldukça benzerdir.

Çoklu Jet Füzyonu (Multi Jet Fusion / MJF): Çoklu Jet Füzyonu (MJF) 3B yazıcılar bir anlamda püskürtmeli kâğıt yazıcılara benzerdir. Zaten teknolojinin öncüsü olan firma (HP) kâğıt yazıcılar üreten bir firmadır. Üzerinde 2B kâğıt yazıcıların inkjet nozullarına benzer nozullar bulunur. 2B yazıcılarda bu nozullardan mürekkep püskürtülürken MJF 3B yazıcılarda ise toz plastik parçaların birbirine yapışmasını sağlayan kimyasal bir sıvı (fusing agent) püskürtülür (Safka vd. 2020). MJF 3B yazıcıda hammadde olarak toz halde naylon veya poliamid (PA 6, PA 11 ve PA12) termoplastik malzeme kullanılır. Toz hammadde baskı tablasına serilir daha sonra üretilen parçanın kesimine uygun şekilde agent ilgili bölgelere damlatılır. Süreç tamamlandıktan sonra katman ısıtılır. Isıtma işlemi esnasında damlatılan kimyasal ile temas eden toz partikülleri bağlanır ve katılır. SLS 3B yazıcılara benzer bir prensiple çalışan MJF 3B yazıcıların farkı ısı kaynağıdır. SLS yazıcılarda toz partiküllerini sinterlemek için ısı kaynağı olarak lazer kullanılır. MJF yazıcılarda ise toz partiküllerinin kızıl ötesi ışığı absorbe etmesini kolaylaştıracak bir kimyasal kullanılır. Sonrasında kızıl ötesi bir enerji kaynağı kullanılarak tozlar sinterlenir.

2.3.6 Foto Polimerizasyon (Photopolymerization)

Foto polimerizasyon, bir foto polimer reçinenin belirli bir dalga boyunun ışığına maruz kaldığında kimyasal bir reaksiyonla katı hale geldiği süreçtir (Bagheri ve Jin 2019). Bazı 3B yazıcılar katmanları oluşturmak için foto polimerizasyon prensibini kullanır. Stereolithografi (SLA), Doğrudan Işık İşleme (Direct Light Processing / DLP) ve Sürekli Doğrudan Işık İşleme (Continuous Direct Light Processing / CDLP) teknolojileri bu prensibi kullanan 3B yazıcılardır.

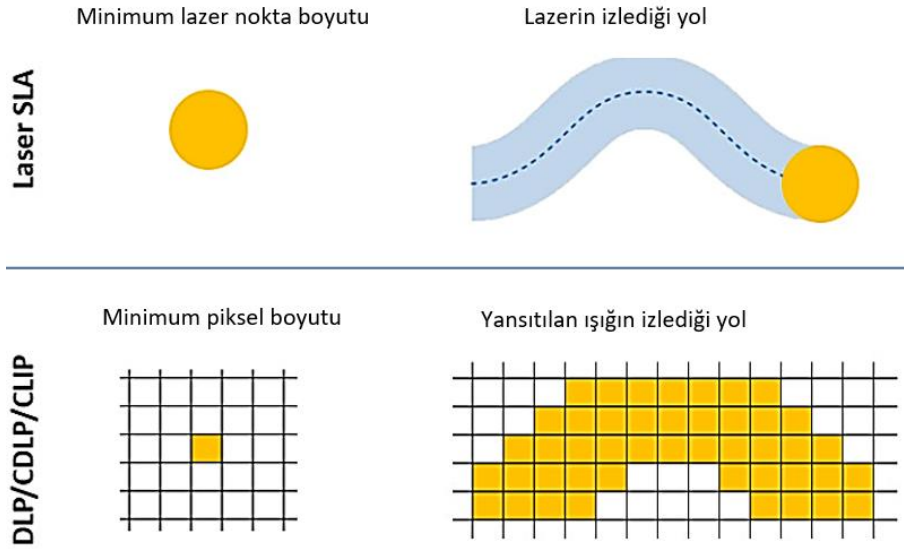


Şekil 2.12 Foto polimerizasyon teknolojisi; UV Işık kaynağı (a), parça (b), yansıtıcı ayna (c), reçine temizleyici (d), kirlenmemiş fotopolimer (e), tabla (f).

Stereolitografi (SLA): Bu teknolojiye sıvı fotopolimer reçineyle doldurulmuş bir hammadde haznesi vardır (Şekil 2.12). Haznenin içinde bir baskı tablası bulunur. SLA'da kullanılan hammadde sıvı haldedir ve reçine olarak da adlandırılır. Reçine olarak ışığa duyarlı termoset polimerler kullanılır. Fotopolimerizasyon sırasında, sıvı reçineyi oluşturan monomer karbon zincirleri, UV lazerin ışığı ile aktive olur ve birbirleri arasında güçlü kırılmaz bağlar oluşturarak katlaşır (Salonitis 2014). Baskı tablası sıvı reçinenin içine daldırıldıktan sonra, makinenin içine yerleştirilen tek nokta lazerin değdiği bölge katlaşır. Böylece istenen katman oluşturulur. İlgili katmanın tüm kesiti üretildikten sonra, platform yukarı kalkar ve bu katmanın altında katlaşmamış sıvı reçinenin akmasına izin verir. Lazer bu noktada oluşturulacak nesnenin kesitine uygun bölgeleri tekrar katlaştırır ve bir önceki katmana yapışmasını sağlar. Bu işlem, katı bir parça üretmek için katman katman tekrarlanır.

SLA teknolojisinde üretilecek parçaların her bir katmanının yüksekliği 25-100 mikron arasında değişir (Kazmer 2017). Katman kalınlığı ne kadar düşük seçilirse, parçanın geometrisi daha doğru bir şekilde üretilebilir. Ancak bu durum üretim süresini ve maliyeti

artırır. Üretimi yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya doğru yapan SLA 3B yazıcılar vardır. Yukarıdan aşağıya üretim yapan SLA yazıcılarda lazer kaynağı baskı tablasının üzerine yerleştirir ve parça yukarı bakacak şekilde üretilir. Baskı tablası reçine haznesinin en üst kısmında ilk katmanı üretir ve üretilen her katmandan sonra aşağı doğru hareket eder. Aşağıdan yukarıya üretim yapan 3B SLA yazıcılarda lazer kaynağı reçine haznesinin altına yerleştirir ve parça baş aşağı bakacak şekilde oluşturulur. Bu tip 3B SLA yazıcıların hem üretimi hem de kullanımı daha kolaydır. Ancak Z ekseninde üretim yapabilme kapasitesi diğer SLA 3B yazıcıya göre daha düşüktür. Katılaştırılmış parça sıvı reçinenin içinden yukarı doğru çekilirken sistem içinde oluşan kuvvetler ve parçanın kendi ağırlığı üretimi zorlaştırır. Bu durum aşağıdan yukarıya üretim yapan SLA 3B yazıcılarda sorun oluşturmaz. Bu nedenle daha profesyonel endüstriyel uygulamalarda aşağıdan yukarıya üretim yapan SLA yazıcılar tercih edilir. Formlabs ve 3D Systems sektöründe pazar payı yüksek SLA 3B yazıcı üreticilerindedir.



Şekil 2.13 SLA ve DLP teknolojilerinde voksel kavramı.

Doğrudan Işık İşleme (Direct Light Processing / DLP): Doğrudan Işık İşleme (DLP) 3B yazıcılar, SLA 3B yazıcılar ile neredeyse aynı prensibe dayanarak üretim yapar. Aralarındaki temel fark, SLA 3B yazıcılarda ışık kaynağı olarak lazer kullanılırken, DLP 3B yazıcılarda ışık kaynağı bir projektördür. Lazer ilgili katmanı üretirken o katman üzerinde parçanın kesiti boyunca hareket ederken, projektör ile ilgili katmanın kesiti tek seferde üretilir (Şekil 2.13). Ancak burada projektör ile katmanlar voksel adı verilen kare

şeklinde pikseller ile üretilir (Pagac vd. 2021).

Projektörün yansıttığı ışık alanının lazere göre çok daha büyük olması nedeniyle 3B DLP yazıcıların üretim hızı, SLA 3B yazıcılara göre daha fazladır. Hem SLA hem de DLP 3B yazıcılar ile üretilen parçalar için bazı son işlem (Post – Processing) süreçleri uygulanır. Son işlem sürecinde üretilen parçaların yazıcıdan çıktıktan sonra destek yapılarının temizlenmesi gerekir. Parçanın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için UV ışığı ile son işlem olarak tekrar kürlenmesi gerekebilir. Bazı durumlarda üretilen parçaların yüksek sıcaklıktaki bir kabinde bekletilmesi veya fırınlanması ürünün dayanımını artırmak için gerekli olabilir.

2.4. Eritilmiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication / FFF) 3B Yazıcılar

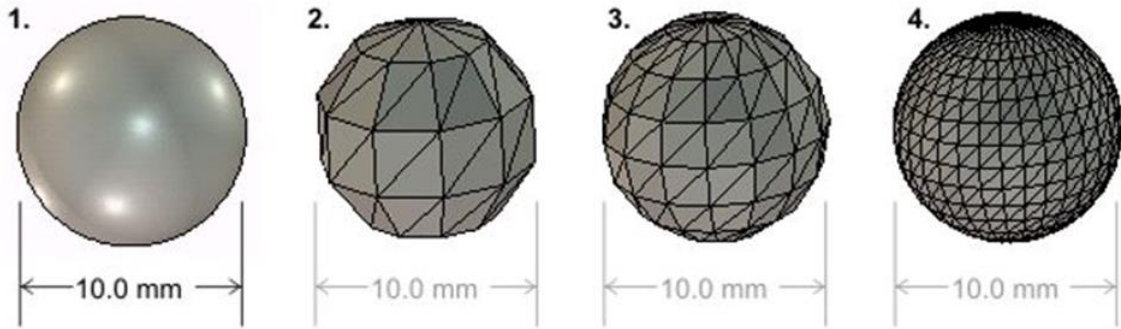
Bu bölümde çalışmanın ana konusu olan Eritilmiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication) (FFF) veya Fused Deposition Modelling (FDM) olarak adlandırılan 3B yazıcıların temel çalışma prensibi hakkında bilgiler sunulacaktır. FFF 3B yazıcılar yazılım, elektronik, mekanik ve termal sistemlerin bir arada uyum içinde çalıştığı elektromekanik cihazlardır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 3B yazıcının temel unsurları

Yazılım	Elektronik	Mekanik	Termal
<ul style="list-style-type: none">• Bilgisayar Destekli Tasarım Yazılımları	<ul style="list-style-type: none">• Kontrol Kartı• Step Motorlar• Motor Sürücü	<ul style="list-style-type: none">• Kayış kasnak sistemleri• Dişli sistemleri	<ul style="list-style-type: none">• Ekstruder• Kabin• Baskı Tablası
<ul style="list-style-type: none">• Dilimleyici Yazılımlar• Firmware			

FFF 3B yazıcılar ile üretim yapabilmek için öncelikle üretilecek olan parçanın 3B dijital modelinin hazırlanması gerekir. 3B dijital modeller Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) yazılımları yardımıyla oluşturulur. BDT yazılımları bir ürünün dijital modelinin parametrik olarak oluşturulmasında ve daha sonra kolayca değiştirilebilmesine olanak

sağlar. Bu aşamada profesyonel veya açık kaynaklı BDT yazılımlarından faydalanılabilir (Junk ve Kuen, 2016). 3B model oluşturmak için profesyonel BDT programları arasında CATIA, SolidWorks ve SpaceClaim en çok kullanılan yazılımlardır. Benzer modeller FreeCAD, SketchUp, TinkerCAD ve Blender gibi açık kaynaklı BDT yazılımları ile de üretilir. STL dosya formatında kayıt edebilen herhangi bir BDT programı kullanılabilir.



Şekil 2.14 STL model ve üçgen yapılar.

BDT programında tasarlanan 3B dijital model daha sonra “STL” formatına dönüştürülerek modelin ağ yapısı oluşturulur. STL, 3B bir modelin yüzeylerine ait geometrik bilgileri içeren bir dosya formatıdır. STL ‘in açılımı STereoLithography’dir ancak bazı kaynaklarda “Standard Triangle Language” veya “Standard Tessellation Language” olarak da kullanılmıştır (Iancu vd. 2010).

Şekil 2.14’te görüldüğü gibi STL dosya formatı binlerce hatta milyonlarca üçgenler kullanarak söz konusu katı modelin yüzey geometrisini yeniden oluşturur. Basit bir modelin yüzeyi için birkaç üçgen yeterliyken, yüksek çözünürlüklü modeller için çok daha fazla üçgen gereklidir. Model yüzeyindeki üçgenleri arttırmak çözünürlüğü, kaliteyi ve detayı arttırmaya yarar ancak bu durum dosya boyutlarının da çok fazla olmasına sebebiyet vermektedir.

FFF 3B yazıcılarla üretim yapabilmek için STL dosyaları tek başına yeterli değildir. Sonraki süreçte STL verilerinin G – Code olarak adlandırılan kodlara dönüştürülmesi gerekmektedir. G – Code dijital üretimde nümerik kontrol amaçlı kullanılan bir

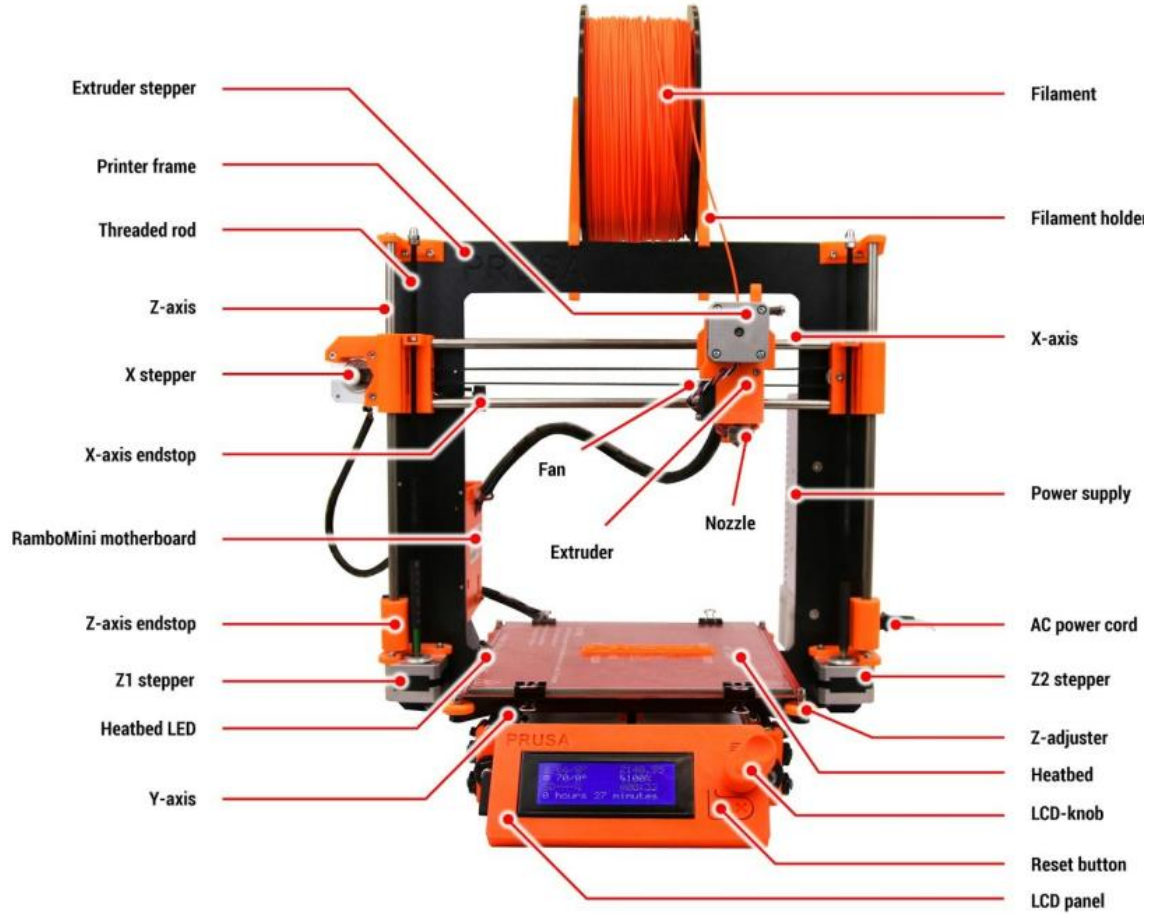
programlama dilidir. G – Code’lar ilk olarak Bilgisayar Nümerik Kontrollü (Computer Numeric Control / CNC) cihazlarda kullanılmış, 3B yazıcılar ile birlikte bu alanda da kullanımı devam etmektedir. 3B Yazıcıda üretim sırasında hareketli parçaların ilgili koordinatlara hareket ettirecek olan motorların kontrolü için G – Code’lar kullanılır. STL dosyalarından G – Code üretebilmek için dilimleyici (Slicer) adı verilen yazılımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Dilimleyici yazılımlar verilen parametreler doğrultusunda 3B modeli kesitler halinde işler ve her katmanın verisini G – Code olarak üretir (Šljivic vd. 2019). Dilimleyici yazılımların arasında Cura, Slic3r ve OctoPrint gibi açık kaynaklı ücretsiz programların yanı sıra; Simplify3D, Z-Suite ve Netfabb gibi ücretli ticari programlar da bulunmaktadır.

Yerleşik yazılım (Firmware); 3B yazıcının donanımları ile yazılımı arasında köprüyü oluşturan yazılımdır (Stanciulescu vd. 2015). Firmware; dilimleyici yazılımından gelen G kodlarını gerekli elektrik sinyallere dönüştürerek yazıcının bütün donanımlarının gerektiği gibi çalışmasını sağlar (Moore vd. 2016). G kodları ile gelen komutlar 3B yazıcının motorlarının hareketlerini, ısıtıcıların çalıştırılması ve benzeri işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlayacak sinyallere dönüştürülür. Örneğin “G1 X60 Y30 E25” gibi bir G kodu firmware tarafından işlenerek mikro denetleyicinin donanıma gerekli sinyalleri göndermesini sağlar. “G1” kodu ile motorların doğrusal hareketi sağlanır. Yazıcıda bulunan ısıtıcılar, fanlar, motorlar ve sensörler firmware yardımıyla koordineli bir şekilde çalıştırılarak üretim yapılır.

FFF 3B yazıcıların elektronik ekipmanları mikro denetleyici, step motorlar ve bu motorların sürücülerinden oluşur. Birçok 3B yazıcı ATMEL AVR işlemciye sahip bir mikro denetleyici ile kontrol edilir. Firmware yazılımı bu denetleyici içinde çalıştırılır. Mikro denetleyici 3B yazıcıda bulunan step motorları kontrolünden sorumludur. FFF 3B yazıcılarda eksenlerin kontrolü için step motorlardan faydalanılır. Step motorlar klasik motorlardaki gibi sadece dönme hareketi gerçekleştirmezler. Bunun yerine tam dairesel bir dönme hareketini belirli açılarda adım adım tamamlarlar. Bu nedenle adım motoru olarak da adlandırılırlar. Dolayısıyla step motorun adım açısı ne kadar düşükse konum pozisyonlama hassasiyeti de o kadar iyi olacaktır. 3B yazıcılarda olduğu gibi yüksek

konum hassasiyeti gerektiren durumlarda bu nedenle step motorlar tercih edilir. Yazıcıda kullanılan mekanizmaya bağlı olarak kullanılan motor sayısı değişebilir.

Birçok FFF 3B yazıcıda filamentin sürülmesi için bir adet olmak üzere, baskı tablasının X, Y ve Z eksenlerinde hareketini sağlamak için üç veya dört step motor kullanılabilir. Her bir motor için step motor sürücüsü kullanılır. Step motor sürücüler, motorun istenen yönde istenen adım kadar hareket etmesini sağlayan sinyalleri kontrol eder. Step motora sinyaller halinde çeşitli fazlar üzerinden akım göndererek çalışır. Adım sayısı 400 olan bir step motor, bir tam tur dönüşünü 400 adımda tamamlar. Bu durumda bir adımın açısı $360/400 = 0.9$ derecedir. Bir devirdeki adım sayısı yükseldikçe step motor hassasiyeti ve dolayısıyla maliyeti artar. Dolayısıyla 3B yazıcılarda üretilen ürünün geometrik doğruluğu yazıcıda kullanılan step motorların hassasiyetiyle ilgilidir.

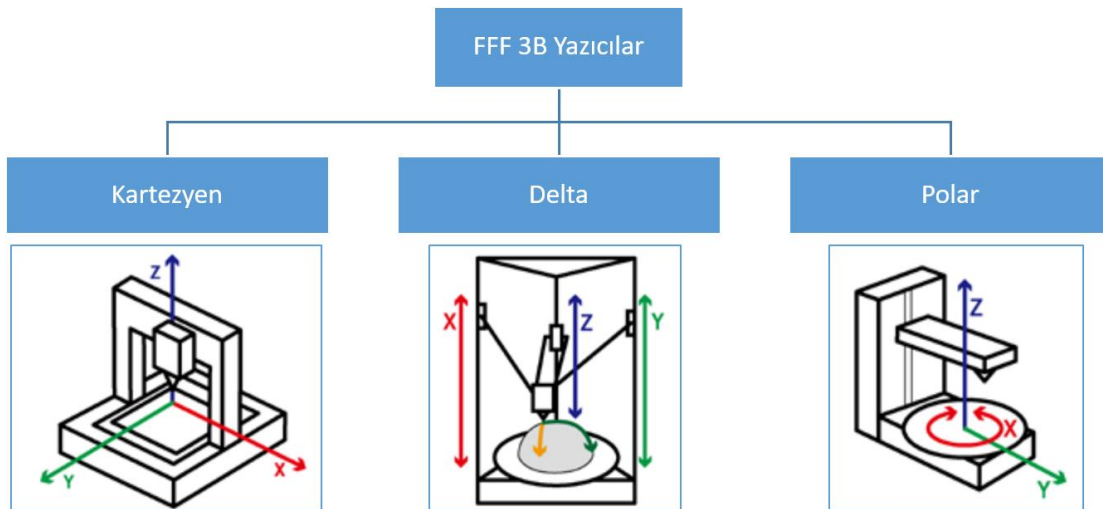


Şekil 2.15 Ekstrüzyon ile üretim yapan 3B yazıcının ana parçaları.

FFF 3B yazıcılarda baskı tablası ve ekstruder'ın hareketi step motorlara bağlı olan kayışlarla sağlanır (Şekil 2.15). Step motorların hassasiyeti ne kadar iyi olursa olsun eğer kayışlarda kayma veya başka sorunlar yaşanıyorsa geometrik doğruluğu sağlamak zorlaşır. Kayma ve sıyrılmayı azaltmak için üzerinde dişler bulunan zamanlama kayışları tercih edilir. Step motor ve kayış mekanizmasıyla pozisyonlama hızı nispeten yüksektir. Daha hassas pozisyonlamaya ihtiyaç duyulan durumlarda kayış kasnak mekanizması yerine dişli sistemleri tercih edilebilir. Step motor ve dişli sistemi özellikle hıza çok fazla ihtiyaç duyulmayan hareketler için tercih edilir. Özellikle Z eksenindeki hareket mekanizmaları için genellikle step motor ile birlikte diş açılmış bir mil sistemi tercih edilir. Bu mekanizma; bazı FFF 3B yazıcılarda Z ekseninde baskı tablasını hareket ettirenken, diğerlerinde ekstruder'ın hareketi için kullanılır.

2.4.1 FFF 3B Yazıcıların Türleri

Farklı 3B yazıcı teknolojilerinde olduğu gibi FFF 3B yazıcılar da kendi içinde farklı türlere sahiptir. FFF 3B yazıcıları kendi içinde sınıflandırırken mekanizmaların hareket esaslarına göre ve ekstruder tipine göre iki farklı kategoride sınıflandırılabilir. Hareket mekanizmalarına göre üç farklı FFF 3B yazıcı türü vardır; Delta, Kartezyen, Polar (Şekil 2.16). Bunun haricinde çeşitli robot kolların üzerine yerleştirilen ekstruderlar ile yapılan deneysel çalışmalar bulunmaktadır (Zagidullin vd. 2021).



Şekil 2.16 Mekanizmalarına göre 3B Yazıcı türleri; kartezyen, delta ve polar.

Hareket mekanizmalarına göre değerlendirildiğinde Kartezyen 3B yazıcılar en sık kullanılan yazıcılardır (Şekil 2.16). Polar ve Delta tipi FFF 3B yazıcılarda dairesel olan baskı tablasının aksine kare veya dikdörtgen yapıda olan baskı tablası bulunur (Şekil 2.16). Kartezyen 3B yazıcılarda ürünün nerede yazdırılacağı belirlenirken Kartezyen koordinatlar dikkate alınır. Polar yazıcılar da ise kutupsal koordinat sistemi kullanılır. Baskı tablası ve ekstruder X, Y ve Z eksenlerinde doğrusal olarak hareket edebilir. Bazı yazıcılarda çoğunlukla ekstruder sadece Z ekseninde vidalı mil mekanizmasıyla hareket ettirilir. Baskı tablası ise X ve Y ekseninde kayış kasnak mekanizmasıyla hareket eder. Benzer şekilde ekstruder'ın X ve Y eksenlerinde lineer hareket ettirildiği ve baskı tablasının Z ekseninde hareket ettirildiği mekanizmalar da kullanılır.

Kartezyen yazıcılar düşük maliyetleri ve bakımlarının kolay olmasıyla öne çıkarlar. Ancak Z ekseninde kısıtlı hareketleri nedeniyle ürün yüksekliğinin az olması dezavantajlarıdır. Ağır ve büyük şaselerinin olması ve Delta yazıcılara göre birim zamanda üretim hızları nispeten yavaştır.

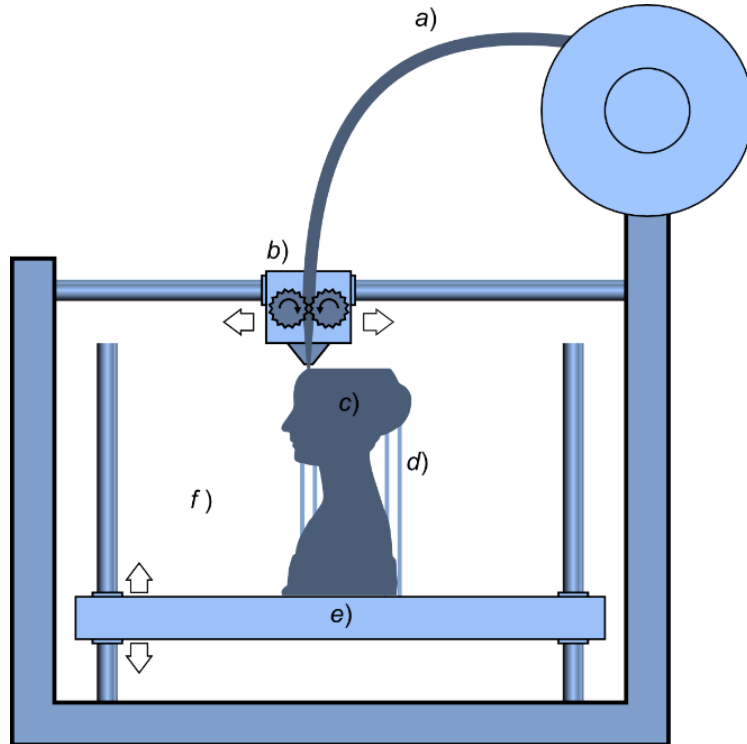
Delta tipi 3B FFF yazıcılarda kartezyen koordinat sistemi kullanılır. Bu yazıcılarda ekstruder dikey yataklarda hareket eden kolların olduğu bir mekanizma ile ekstruder hareketi sağlanır. Bütün motorlar eşzamanlı olarak kontrol edilir ve böylece ekstruder konumu ayarlanır. Her üç kolun eşzamanlı hareketleri Z ekseninde hareketi ve ekstruder'ın baskı tablası üzerinde X ve Y eksenlerindeki konumunu kontrol eder. Sahip olduğu hareket mekanizması ile diğer yazıcılardan rahatça ayırt edilebilir. Kartezyen yazıcılara göre üretim hızları ve üretim kaliteleri daha yüksektir. Ancak bu yazıcılardaki en büyük dezavantaj kollara bağlı olan ekstruder ve benzeri yapıların mutlaka daha hafif tasarlanması gerekliliğidir.

Polar 3B yazıcılarda baskı tablası Delta yazıcılardaki gibi dairesel bir yapıya sahiptir. Kartezyen ve Delta yazıcılarda Kartezyen koordinat sistemi ile üretim yapılırken, polar yazıcılarda kutupsal koordinat sistemi kullanılır. Bu yazıcılarda ekstruder istenen bir konumda pozisyonlamak için açı ve mesafe bilgileri kullanılır. Polar yazıcılarda dönebilen dairesel bir baskı tablası bulunur. Bu yazıcılardaki step motor sayısı diğerlerine

göre daha azdır ve nispeten daha sessiz çalışırlar. Ancak konumlama hassasiyetleri daha az ve yavaş yazıcılardır.

2.4.2 FFF 3B Yazıcılarda Ekstruder

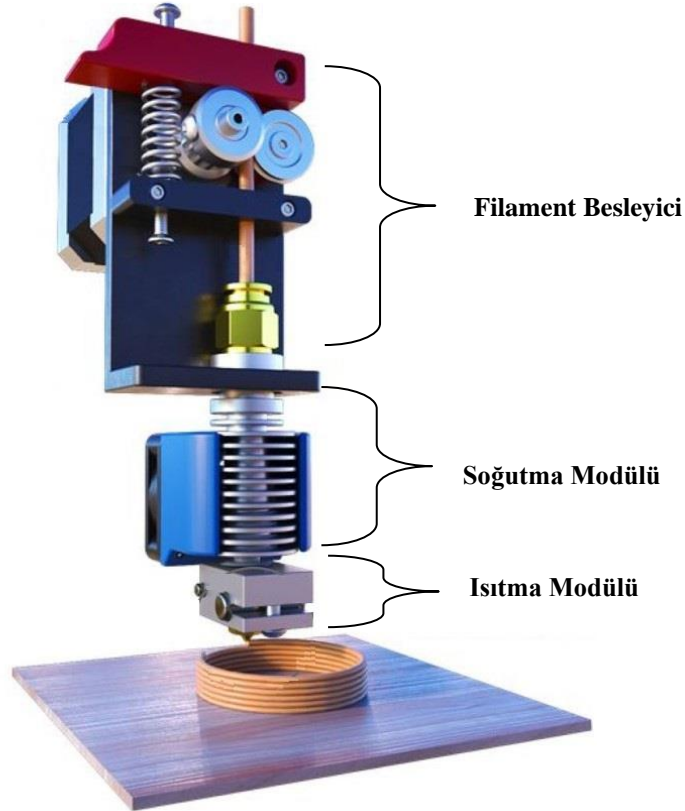
3B yazıcı teknolojileri, “eklemeli imalat” ve “hızlı prototipleme” gibi terimlerle anılırlar. Her ne kadar “hızlı prototipleme” teriminde sürecin hızlı işlediği algılsa da 3B yazıcılarda üretim hızları oldukça düşüktür. Her bir katmanın ve her katmandaki ince ayrıntıların hassas bir şekilde üretilmesi için uzun bir zaman gereklidir. Bazı küçük ürünlerin üretilmesi için birkaç saat gerekirken, daha büyük ve detaylı ürünlerin üretimi günler sürebilir. 3B yazıcı teknolojilerinin tamamı için bu durum en önemli sorun olarak görülmektedir. FFF 3B yazıcılar için de üretim süreleri önemli sorunlardan biridir (Yuran vd. 2020). FFF 3B yazıcılarda baskı süreleri 50 mm/s ile 200 mm/s gibi aralıklarda değişebilmektedir. Bu hızlar delta türü 3B yazıcılarda biraz daha fazla iken kartezyen 3B yazıcılarda daha düşüktür.



Şekil 2.17 Ekstrüzyon 3B yazıcının çalışma prensibi; filament (a), ekstruder (b), üretilen parça (c), destek yapı (d), baskı tablası (e).

FFF 3B yazıcılarda fonksiyonel prototiplerin üretilebilmesi için çoğunlukla termoplastikler hammadde olarak kullanılmaktadır. PLA, ABS ve Naylon gibi malzemeler istenen çaplarda tel hale getirilerek FDM yazıcılarda hammadde olarak kullanılabilir. Tel haldeki hammaddeler filament olarak adlandırılır. Tel halindeki Filament ekstruder yardımıyla eritilerek üretimi sağlar.

FFF 3B yazıcılarda filament (Şekil 2.17a), ekstruder (Şekil 2.17b) olarak adlandırılan bölgeye yönlendirilir (Scopigno vd. 2017). Ekstruder içinde termoplastik işleme parametrelerine uygun sıcaklığa getirilir ve filament bu bölgede yarı sıvı olacak halde eritilir. Ortamın sıcaklığı dökülen filamentin ergime sıcaklığından çok daha az olduğu için malzeme nozuldan ayrıldıktan sonra hızla katlaşır. Yarı sıvı filament 3B dijital modele ait kesitlere uygun olarak tablaya (Şekil 2.17e) dökülür. Ergitilen filamentin istenen bölgeye dökülebilmesi için sistemin tablası ve / veya nozul bölgesi hareketli olarak tasarlanmıştır (Yuran ve Yavuz 2020). Üretilecek olan parçanın kesitinin bir katmanı örüldükten sonra bir üst katman örülmeye başlar. Katmanların tamamı örüldüğünde 3B model (Şekil 2.17c) üretilmiş olur.



Şekil 2.18 Ekstrüzyon sisteminin ayrıntılı yapısı.

Ekstruder filament besleyici, soğutma modülü ve ısıtma modülü olmak üzere üç yapıdan oluşur (Şekil 2.18). Filament besleyici filamentin üretim sırasında gereken miktarda ısıtma modülüne sürülmesinden, ısıtma modülü ise gelen filamentin eritilmesinden sorumludur (Shaqour vd. 2021).

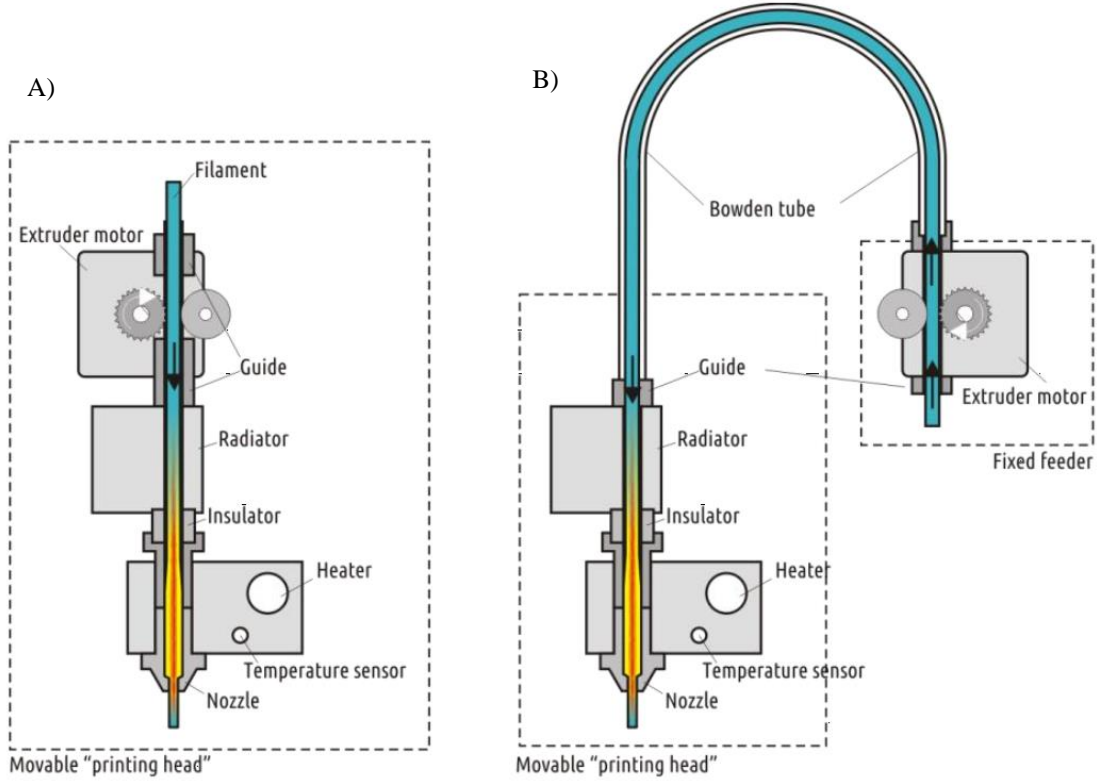
Soğutma modülü ise besleyici ve ısıtma modülü arasında filamentin sürülebilecek kadar düşük sıcaklıkta tutulmasını sağlar. 3B FFF yazıcılardaki kayış kasnak mekanizmaları, baskı tablası ve benzeri donanımlar ekstruderın istenen konuma getirilmesiyle alakalı sistemlerdir. Dolayısıyla ekstruder 3B FFF yazıcıların en kritik donanımıdır. Bu yapının performansı bütün sistemi etkiler. Isıtma modülü filamenti kararlı bir şekilde eritebilmelidir. Filament besleyici ise birim zamanda istenen miktarda filament eritmek üzere iletebilmesi gerekir. 3B FFF yazıcının hareket mekanizmaları, motorları ve benzeri donanımları ekstruder'ın çalışma performansına göre belirlenir. Ekstruder baskı tablası üzerinde istenen konuma pozisyonlandırılabilmesi için eğer hassas ve hızlı motorlar seçilirse üretim süresinin azalacağı düşünülebilir. Ancak burada Filament besleyici, soğutma modülü ve ısıtma modülünün birbirleri arasındaki uyum ve performansı devreye girer. Eğer bu aşamada yeterli miktarda filamentin ekstrüzyonu sağlanamazsa üretiminde gerçekleşmesi mümkün olmaz. Benzer şekilde fazla ekstrüzyon da ürünün kalitesini ve hassasiyetini etkileyecektir.

2.4.2.1 Filament Besleyici

FFF 3B yazıcılar Filament besleyici yapılarına göre Direct Drive ve Bowden olmak üzere iki farklı tür ile sınıflandırılabilir. Her iki ekstruder da camsı geçiş sıcaklığına (T_g) kadar ulaşmış termoplastik bir filamentin nozula sürülmesini sağlar. Aralarındaki fark filamentin sürülmesinden sorumlu olan besleyicinin bulunduğu konum ile ilgilidir. Direct Drive besleyicilerde filament süren motor ve mekanizma nozula yakın bir yere yerleştirilir. Böylece baskı kafası ile birlikte hareket eder. Bowden tipi bir besleyicilerde ise filamentin sürülmesini sağlayan motor ve ilgili mekanizmalar yazıcının şasesi üzerine sabitlenmiştir. Filament, hareketli olan nozula PTFE bir boru yardımıyla iletilir. Her iki yapı da aynı işlemi gerçekleştirir ancak birbirlerine göre bazı farklılıklar ve avantajları vardır.

İki farklı filament besleyici yapısı Şekil 2.19'da görülmektedir (Kuznetsov vd. 2019). Direct Drive (Şekil 2.19 a) ve Bowden Filament (Şekil 2.19 b) besleyicilerin avantaj ve dezavantajları birkaç maddede karşılaştırılabilir;

- Güvenilir Ekstrüzyon: Konumu gereği filament sürülen mekanizma ile nozul birbirine yakındır. Bu nedenle filamentin nozula sürülmesi daha kolaydır. Bowden Filament besleyicilerde ise bu mesafe arttığı için nozuldaki erimiş filamentin kontrolü daha zordur.



Şekil 2.19 Direct drive filament besleyici (a) ve bowden filament besleyici (b).

- Daha iyi geri çekme (Retraction): Üretim sırasında bazı bölgelerde filamentin dökülmesi gerekirken bazı bölgelerde ise ekstrüzyonun tamamen durması gerekir. Ekstrüzyonun olmaması gereken esnada nozul içinde eriyik halde bulunan filament yerçekimi ile akmaya devam eder. Bu durumun önüne geçmek için besleyici filamentin bir miktar geri çeker. Bu işlem geri çekme olarak adlandırılır.

Direct Drive besleyicide mesafenin kısa olması sebebiyle geri çekme çok daha kolay kontrol edilebilir. Böyle durumlarda Direct Drive besleyicilerde 0.5 mm gibi bir geri çekme mesafesi nozulda eriyik filamentin dökülmesini engelleyecek kadar negatif basınç oluşturabilir. Bowden besleyicilerde ise geri çekme mesafesi 10 mm'e kadar çıkabilir.

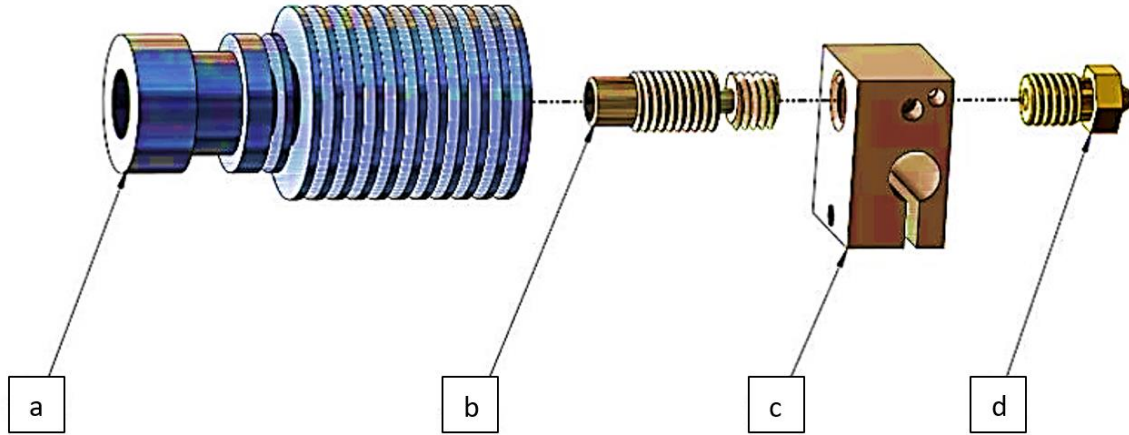
- Ekstruder Motoru: Filamentin sürüleceği mesafe daha az olduğu için Direct Drive besleyicilerde, Bowden besleyicilere göre daha düşük torka sahip step motorlar kullanılabilir.
- Filament çeşitliliği: Besleyici ve ısıtma modülü arasındaki mesafenin az olması yazıcıda kullanılacak filamentlerin çeşitliliğini de artırır. Farklı çaplarda ve mekanik özelliklerdeki filamentler aradaki mesafenin fazla olması nedeniyle Bowden besleyiciler daha zor kontrol edilir. Özellikle daha esnek filamentlerin ekstrüzyonu için Direct Drive besleyiciler daha avantajlıdır.
- Titreşim: Direct Drive besleyicilerde, soğutma modülü, ısıtma modülü ve bunlara ek olarak besleyici motoru bir bütün olarak ekstrudera yerleştirilmiştir. Dolayısıyla artan kütle ile birlikte hareketli mekanizmalarda titreşimlerin artması kaçınılmazdır. Bu nedenle direct drive besleyicilerde üretim hızlarının daha düşük seçilmesi gerekir. Bowden besleyici kullanan yazıcılarda ise ekstruder'ın yükünün bir kısmı şaseye sabitlendiğinden titreşimler nispeten daha azdır. Aynı zamanda ilgili bölgedeki kütlenin azaltılması ekstruder'ın daha hızlı hareket ettirilebilmesine olanak sağlar.
- Üretim hacmi: Direct Drive besleyicilerde filamentin süren mekanizma ve diğer modüller bir arada olduğu için ekstruder daha çok yer kaplar. Bu nedenle Direct Drive Besleyiciye sahip yazıcılarda Z eksenindeki üretim hacmi Bowden besleyiciye sahip yazıcılara göre daha azdır.

Genel olarak değerlendirildiğine her iki sistemin de birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak her iki sistemde de soğutma ve ısıtma modülleri

benzer yapıdadır. Kartezyen ve polar yazıcılarda ekstruder'ın ağır olması ve taşıyıcı sistemler üzerindeki kütlenin fazla olması sorun oluşturmayabilir. Bu nedenle bu yazıcılarda hem Direct Drive hem de Bowden Filament besleyici sistemleri kullanılabilir. Ancak Delta tipi yazıcılarda Direct Drive besleyicinin kullanılması oldukça zordur. Delta tipi yazıcılarda taşıyıcı kollara fazladan bir step motor ve diğer mekanizmaların ağırlığı eklendiğinde ekstruder'ın konumlandırılması zorlaşır. Bu nedenle Delta tipi 3B yazıcılarda Bowden Filament besleyiciler kullanılır. Delta yazıcılarda da soğutma ve ısıtma modülleri benzer şekilde tasarlanır. Ancak bu yapıların delta yazıcılarda daha hafifletilmesi önemlidir.

2.4.2.2 Soğutma ve Isıtma Modülleri

Filament besleyici, ısıtma ve soğutma modülleri birlikte çalışarak eritilen filamentin istenen miktarda gönderilmesini ve katmanların oluşturulmasını sağlar. Ekstruder Filament besleyici haricinde soğutma modülü ve ısıtma modülü olmak üzere iki ana yapıdan oluşur. (Şekil 2.20) Soğutma ve ısıtma modülleri birbirinden ısıl olarak ayrılmış durumdadır.



Şekil 2.20 Isıtma ve soğutma modülü parçaları, soğutucu (a), ısı bariyeri (b), ısıtıcı blok (c), nozul (d).

Soğutma modülü filamentin sürülmesi esnasında filamentin erimesini engeller. Isıtma modülü ise nozul bölgesine sürülen filamentin eritilmesi ve katmanların oluşturulmasından sorumludur. Filamentin düzgün bir şekilde istenen bölgeye

sürülebilmesi ve nozulda ergitilebilmesi için her iki yapı arasında ısı transferi mutlaka engellenmelidir. Eğer bu bölgede oluşan ısı transferi engellenmezse sıcaklık filamentin üst bölgelerine yayılarak sürülmesini zorlaştıracak hatta imkânsız hale getirecektir. Böyle bir durumda ekstruder parça üretimini gerçekleştiremeyecek veya üretilen ürün istenen kalitede olmayacaktır.

Soğutma modülünde soğutucu adı verilen bir parça bulunur. Soğutucu (Şekil 2.20 a) kanatlı bir yapıya sahiptir ve bu yapıya genellikle bir fan bağlıdır. Fan ve kanatçıklar sayesinde arttırılmış yüzey alanı ile bu bölgede zorlanmış taşınım gerçekleşir. Böylece daha yüksek bir ısı transferi sağlanarak soğutma modülü bölgesinin daha iyi soğutulması amaçlanır. Isıtıcı blok (Şekil 2.20 b) ısıtma modülü kısmında bulunur. Soğutucunun aksine bu parça ısıyı daha iyi ileterek ısıtma modülünü filamentin camısı geçiş sıcaklığına (T_g) yükseltilmesinden sorumludur. Isıtma modülün içine bir ısıtıcı rezistans ve sıcaklık ölçümü için termistör yerleştirilir. Isıtıcı blok üretim parametresi olarak belirlenen sıcaklığa ulaşana kadar (örneğin PLA için ergime sıcaklığı olan 220°C) rezistans çalışır. Bu esnada termistör sürekli olarak sıcaklık ölçümü yapmaya devam eder. Isıtma modülü bölgesinde istenen sıcaklık (220°C) elde edildiğinde termistörden bu veri okunur ve rezistans kapatılır. Eğer sıcaklık üretim sıcaklığının altına düştüyse rezistans tekrar çalıştırılarak ısıtıcı blok sıcaklığı tekrar arttırılır. Bu nedenle ısıtma modülündeki sıcaklık sürekli dalgalanma halindedir. Çoğunlukla ısıtma modülünün sıcaklığını sabit tutmak mümkün değildir. Sıcaklıktaki bu dalgalanmalar filamentin erimesini anlık olarak etkileyebilir. Sıcaklık dalgalanmaları ekstruder'ın genel sıcaklık dağılımını çok fazla etkilememekle beraber nozul içerisinde gerçekleşen ekstrüzyon sürecini etkileyecektir.

Nozul (Şekil 2.20 d) ısıtıcı blok tarafından iletimle ısıtılan bir parçadır. Nozul 0.1 mm ve 1 mm aralığında farklı çaplarda kullanılabilir. Isı bariyeri (Şekil 2.20 b) ısıtma ve soğutma modüllerini birleştiren yapıdır. Isıtma modülünde oluşan yüksek sıcaklıkların soğutma modülüne daha az iletilmesini sağlayan parçadır. Soğutucu ile birlikte ekstruder'ın genel sıcaklık dağılımında önemli etkiye sahiptir. Isı transferini azaltmak için termal iletkenliği daha düşük sayılabilecek malzemelerden üretilir.

Mevcut ekstruder tasarımlarında karşılaşılan en büyük problem sistem üzerinde yaşanan

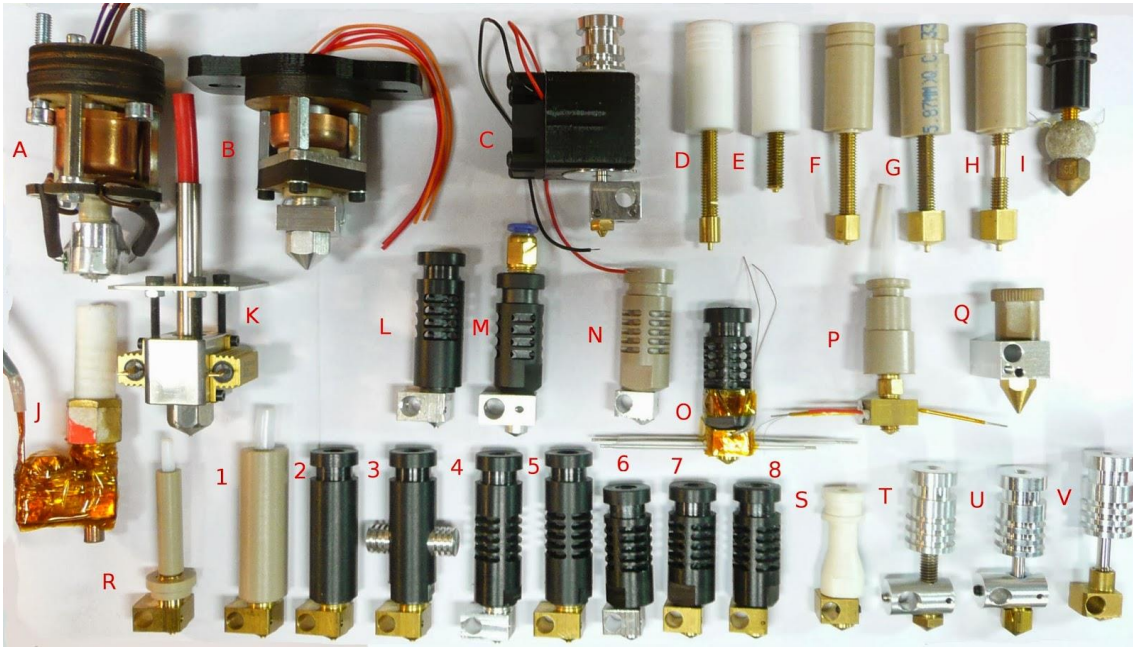
ısı transfer mekanizmaları ile ilgilidir. Parçanın sorunsuz üretilebilmesi için besleyicinin, ısıtma ve soğutma modüllerinin uyum içinde çalışması gerekmektedir. Ekstrüzyon sürecinin ideal termal davranışı; soğutma modülünün mümkün olduğu kadar oda sıcaklığına (20 °C) yakın, ısıtma modülünün ise mümkün olduğu kadar filamentin camsı geçiş (T_g) sıcaklığına yakın ve sabit olduğu durumdur.

2.5 Literatürdeki Çalışmalar ve Farklı Ekstruder Tasarımları

Isıtma modülü plastik filamentin eritilmesi ve ekstrüzyonu gibi zorlu işlemleri yerine getiren parçadır. Bu nedenle 3B yazıcılar için en kritik parçalardan biridir. Termoplastik filament bu bölge içinde eritilir. Termoplastiğin farklı sıcaklıktaki davranışları için camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) olmak üzere iki önemli özelliği bulunur. Filament camsı geçiş sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda katı haldedir ve kuvvete karşı yeterli direnci gösterebilecek durumdadır. Ancak filamentin sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığını geçtiğinde katılığını kaybederek ne katı ne de sıvı ancak katı haline göre daha akışkan bir yapıya geçer. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) arasındaki sıcaklıklar geçiş fazı olarak adlandırılır ve ekstrüzyon süreci için önemli etkilere sahiptir. Bu aşamada filament katı haline göre bir miktar genişler ve hacmi artar. Filamentin sıcaklığı arttırılmaya devam edildikçe akışkanlığı artmaya devam eder. Erime sıcaklığına (T_m) ulaşıldığında ise filament tamamen sıvı forma dönüşür. Filament sıvılaştığında üretim için uygun hale gelir ve ekstrüzyonu kolaylaşır. Bu aşamada ekstruderda oluşan genel sıcaklık dağılımının her bölgede iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Isıtma modülünün olduğu bölgede filament mutlaka erime sıcaklığına ulaştırılması gerekirken soğutma modülünün olduğu bölgelerde ise filamentin camsı geçiş sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda tutulması gerekir. 3B FFF yazıcıların yaygınlaşmaya başladığı ilk günlerden itibaren bahsedilen problemlerin önüne geçebilecek ekstruder tasarımları üzerine çalışılmıştır.

İlk kez doksanlı yılların başında patenti alınan teknoloji, 2010 yılına kadar sadece ticari olarak sunulmuştur. Alınan ilk patente konu olan kritik donanımlardan biri ekstruderdir. İlgili patentin süresinin dolmasından sonra Rep – Rap projesi ile teknoloji açık kaynak olarak paylaşılmaya başlanmıştır. Rep – Rap projesinin internet üzerinde organize olan

topluluğu ile birlikte FFF 3B yazıcılar büyük bir hızla yaygınlaşmıştır (Jones vd. 2011). Günümüzde bu projenin katkılarıyla kadar yüzün üzerinde farklı FFF 3B yazıcı bulunmaktadır (Stanko 2020). Proje ile ilişkili olarak geliştirilen bu yazıcılar çoğunlukla açık kaynak olarak dağıtılmış ve bir kısmı da ticari ürün haline gelmiştir. Yazıcıların genel tasarımlarının yanı sıra yazıcıların kritik parçalarından biri olan ekstruderler için de çok sayıda yeni tasarım önerilmiştir. Ticari ürünlerin patent süresinin dolmasından sonra yapılan ilk ekstruder tasarımları 2011 yılında açık kaynak olarak Adrian Bowyer ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Resim 2.1 D, E, F, G, H, I). Ekip geliştirdikleri deneysel ekstruder tasarımlarını internet ortamında kurdukları bir topluluğu ile halka açık olarak paylaştılar. Sonraki yıllarda topluluk üyelerinin katkılarıyla mevcut ekstruder tasarımları geliştirilmiş ve bunlara yeni tasarımlar eklenmiştir (Resim 2.1 K, L, M, Q, T).



Resim 2.1 Açık kaynak kodlu farklı ekstruder tasarımları.

3B yazıcı projelerinin açık kaynak ile paylaşılması yaklaşımı ve Rep – Rap topluluğu bu konudaki inovasyonun hızlanmasını ve yeni tasarımların artmasını sağlamıştır. Rep – Rap topluluğu çok farklı uzmanlıklarda, farklı deneyimlere sahip ve hatta farklı dillere sahip çok sayıda üyeye sahiptir. Topluluk içerisinde geliştirilen tasarımlar genellikle bireysel ve deneme yanılma yöntemine dayalıdır. Dolayısıyla geliştirilen bu tasarımların çok büyük bir kısmı bilimsel yaklaşımdan uzak çalışmalardır. Buna rağmen günümüzde çok

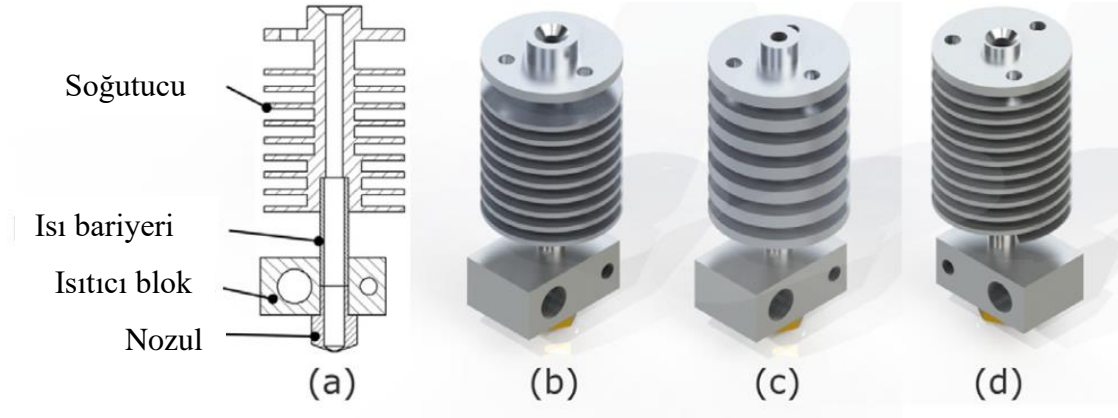
bilinen ve kullanılan Ultimaker (Resim 2.1 Q), MakerBot (Resim 2.1 K) ve Prusa (Resim 2.1 C) gibi markalar bu topluluk içerisindeki tasarımlardan yola çıkarak ticarileşmiştir.

Ekstruderlerin genel tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili yapılan bilimsel yayınların sayısı kısıtlıdır. Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu FFF 3B yazıcılarda kullanılan üretim parametrelerinin parça kalitesine etkisi ile ilgilidir (Narang ve Chhabra 2017, Samykano vd. 2019). FFF 3B yazıcılar ile üretilen ürünlerin mekanik özellikleri ve kalitesi; katman kalınlığı (Dave vd. 2019), baskı yönü (Kiendl ve Gao 2020), doluluk oranı (Dezaki ve Ariffin 2020), baskı hızı (Žarko vd. 2017) ve tarama açısı gibi parametrelerle doğrudan ilgilidir. Farklı filamentler kullanılarak yapılacak üretimlerde ekstruder sıcaklığı ürünün kalitesini etkilemektedir (Ding vd. 2019). Hatta aynı türdeki filamentin farklı renklerinin kullanımı için üretim sıcaklığının optimize edilmesi gerekmektedir (Soares vd. 2018). Ürünün mekanik özelliklerini ve kalitesini etkileyen bu parametrelerin birçoğu ekstruder'in tasarımı ile doğrudan ilgilidir. Ancak buna rağmen literatürde ekstruder'in genel tasarımı ve optimizasyonuna yönelik yapılan araştırmalar henüz az sayıdadır.

Ekstruder tasarımı üzerine yapılan bilimsel çalışmalardan biri Katalonya Politeknik Üniversitesinde Rep – Rap Barcelona projesi ile geliştirilen ve BCNozzle adı verilen ekstruder üzerinedir (Mesa vd. 2016). Önerilen tasarım Rep – Rap projesinde sunulan tasarımlardan birinden esinlenilerek geliştirilmiştir. İlgili tasarım şekil 2.21 b'de ve BCNozzle şekil 2.21 c'de görülmektedir.

Yapılan çalışmada proje ile geliştirilen ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımları sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Bilgisayar simülasyonları deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Ekstruder'in farklı fan hızlarındaki sıcaklık dağılımları incelenmiş ve geliştirilen ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu öne sürmüşlerdir. Ekstruder'in soğutma modülünün en üst kısmının, %30 fan hızında 25 °C sıcaklıklara, %10 fan hızında ise 80 °C kadar sıcaklıklara ulaşılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre; ekstruderlerin soğutma modülleri üzerindeki fanların üretim sırasında mutlaka aktif olması gerektiğini bildirmişlerdir. Aynı projenin devamında yapılan farklı bir çalışmada üç farklı ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımlarını

karşılaştırmışlardır (Jerez-Mesa vd., 2018).



Şekil 2.21 Üç farklı ekstruder tasarım önerisi; ekstruder'in kesit görünüşü (a), BCNozzle (b), Twist3D (c), HelicoidalTwist3D (d).

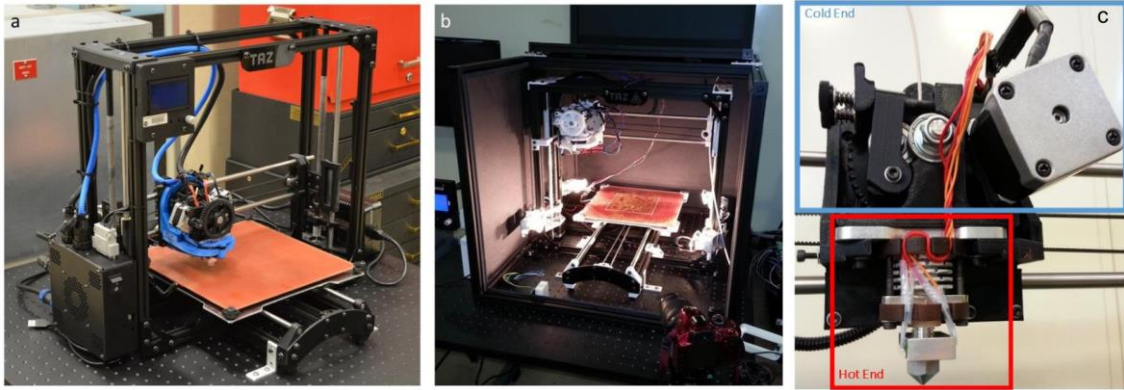
Çalışmada kullandıkları ekstruder tasarımları ilk çalışmada geliştirdikleri BCNozzle (Şekil 2.21 b) adındaki tasarımın yeni versiyonlarıdır. Yeni geliştirilen versiyonlara Twist3D (Şekil 2.21 c) ve HelicoidalTwist3D (Şekil 2.21 d) ismini vermişlerdir. İlk ekstruder tasarımı ana hatlarıyla aynı kalmakla beraber yeni tasarımlarda sadece soğutma modülleri üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır.

Üç farklı tasarım karşılaştırıldığında Twist3D tasarımı yüksek fan hızlarında sıcaklık dağılımı açısından daha iyi performans göstermiştir. Ancak düşük fan hızlarında ise BCNozzle'in sıcaklık dağılım performansının daha iyi olduğunu öne sürmüşlerdir. Soğutucu tasarımları arasında HelicoidalTwist3D'nin geometrisi karmaşık bir yapıya sahip olduğu için üretimi oldukça zordur. Çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında ekstruder'in ısıtma modülünde sıcaklık oluşan sıcaklık dalgalanmalarının üretim hatalarına ve ekstruder'in tıkanmasına neden olabileceği tespit edilmiştir. Bu anlamda ekstruderlerin iyileştirilebilmeleri için tasarımları üzerinde yeni araştırmaların yapılmasını tavsiye etmişlerdir.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) tarafından hazırlanan bir teknik raporda düşük maliyetli ve açık kaynak 3B FFF yazıcıların potansiyeline dikkat çekilmiştir (Gardner vd. 2018). Düşük maliyetli 3B FFF yazıcıların yaygınlaşmasına ve önemli bir potansiyele sahip olmasına rağmen, bu cihazların zorlu koşullarda dayanabilecek parçaların üretiminde yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Mevcut

ekstruderler çoğunlukla ABS veya PLA gibi düşük sıcaklıklarda üretimi yapılabilecek filamentler için tasarlanmıştır. Örneğin ABS için camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 100 – 110 °C civarındadır ve üretimi için ekstruder ısıtma modülünün sıcaklığının 220 – 250 °C ulaşabilmesi yeterlidir. Ancak fazla yüke maruz kalabilecek veya ortam sıcaklığının yüksek olduğu zorlu ortamlarda kullanılacak parçaların üretimi söz konusu olduğunda ABS veya PLA gibi filamentler ile üretilen parçalar yeterli olmamaktadır.

Daha yüksek dayanıma sahip parçalar üretebilmek için üretimde kullanılan filamentlerin de özellikleri değişmektedir. Örneğin PEEK filamentlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 140 – 160 °C civarındadır ve üretimi için ekstruder ısıtma modülünün sıcaklığının 350 – 400 °C ulaşabilmesi gerekir. Hatta ULTEM gibi yüksek performans filamentler ile üretim yapabilmek için ısıtma modül sıcaklığının 400 °C'nin üzerine çıkabilmesi gerekir. NASA'da yapılan çalışmada bu durumun üzerinde durularak açık kaynak bir FFF 3B yazıcının baskı tablasını yüksek sıcaklıklara ulaştırabilecek değişiklikler yapmışlardır (Resim 2.2). Çalışmadaki asıl amaç baskı tablası üzerinde daha yüksek sıcaklıklar elde etmektir. Bu amaçla yazıcı kapalı bir kabine yerleştirilmiş ve baskı tablası üzerinde ekstra ısıtma sağlayacak kızıl ötesi ısıtıcılar yerleştirmişlerdir. Bu çalışmada ekstruder üzerinde doğrudan bir çalışma bulunmamakla beraber daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek ekstruderlara olan ihtiyacı net olarak ortaya koymaktadır.

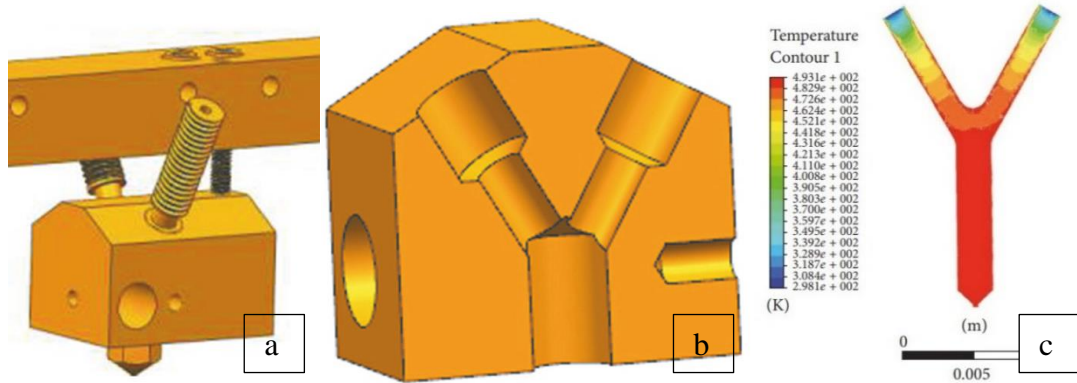


Resim 2.2 NASA'da yapılan çalışmada kullanılan açık kaynak yazıcı (a), yazıcıya eklenen kabin (b) ve yazıcıda kullanılan ekstruder (c).

FFF 3B yazıcılar ile yapılan üretimlerde bir diğer kısıtlama tek tipte ve renkte filamentler ile üretim yapılmasıdır. Tek bir yazıcı ile iki farklı filamenti eş zamanlı kullanarak üretim yapabilmek için iki ana strateji uygulanabilir. Birincisi yazıcı üzerinde birden fazla

ekstruder eklemektir. Ancak bu durum hareketli parçalar üzerinde ek bir ağırlık getireceğinden yazıcının kinematik kapasitesini zorlayan bir uygulamadır. İkinci alternatif ise ekstruder tasarımı üzerinde iyileştirmeler yapılarak, farklı filamentleri tek bir ekstruder üzerinde kullanmaktır. Bu durumda ise çözülmesi gereken sorunlardan ilki farklı filamentleri aynı ısıtma modülüne yönlendirebilecek bir filament besleyici yapının tasarlanmasıdır. Böyle bir filament besleyici yapı tasarlanırsa bile iki farklı filamentin aynı ısıtma modülünde işlenmesi sırasında başka problemlerin çözülmesi gerekir.

Her filament için üretim sıcaklığı farklıdır. Örneğin bazı PLA filamentler için 180 °C sıcaklıklarda üretim yapılırken, bazı ABS filamentlerde 240 °C’de üretim yapılır. Aynı ısıtma modülünde ilk olarak PLA daha sonra ABS filamentler ile üretim yapıldığında ekstruder tıkanmaları ve üretim hatalarıyla sık karşılaşılır. Bunun nedeni PLA ile yapılan ilk üretim sırasında ekstruderda PLA filament artıkları ile ilgilidir. Kalan artıklar sonraki üretimde ısıtma modülü ABS filament için 240 °C’ye çıkarıldığında yanmaya ve kömürleşmeye başlayarak, ekstruder’ın tıkanmasına neden olabilir. Benzer durum daha az karşılaşılma ile beraber aynı türde fakat farklı renklerde filament kullanıldığında bile yaşanabilir.



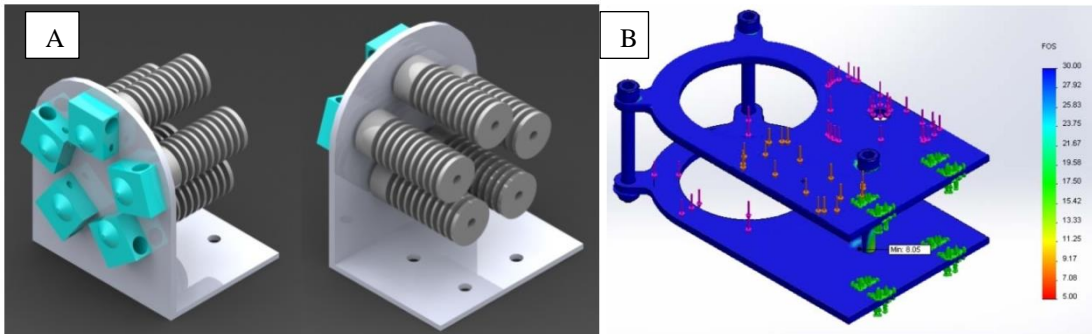
Şekil 2.22 Çift kanallı ekstruder tasarımı; taşıyıcı yapı (a), ısıtıcı blok (b), nozul içerisinde sıcaklık dağılımı (c).

Eşzamanlı olarak iki farklı filament ile üretim yapabilecek bir ekstrudera yönelik çalışmalardan birinde ekstruder’ın ısıtma modülü çift kanallı olarak tasarlanmıştır (Han vd. 2017). Yapılan çalışmada kullanılan filament besleyici ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmemiştir. Sadece ısıtma modülü üzerine birbiriyle 30° açı yapacak şekilde ek bir

kanal eklenmiştir (Şekil 2.22). Bu iki kanal üzerinde filamentlerin akışını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir.

Çalışmada yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında sınır şartlarından biri filamentin besleme hızı olarak belirlenmiştir. Filamentler her iki giriş için 0,2 mm/s, 0,5 mm/s ve 1 mm/s besleme hızlarında ısıtma modülüne sürülmüştür. Filament besleme hızının yanı sıra 220 °C, 230 °C ve 240 °C sıcaklıklarda belirlenen sınır şartlarında ısıtma modülü içindeki kanallarda oluşan sıcaklık değişimi, akış hızı ve basınç değerleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucuna göre farklı renklerdeki filamentlerin tek bir ısıtma modülü içerisinde verimli bir şekilde eritilebilmesi mümkün görünmektedir. Ancak çalışmada böyle bir ısıtma modülü tasarımının filament besleyici ile birlikte tasarlanması gerektiği belirtilmiştir. Bunun sebebi; kanallar içinde oluşan basınç değerlerinin filamentlerin sürülmesini zorlaştırmasıdır. Araştırmacılar filamentlerin karıştığı bölgede tıkanma riskinin yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Karşılaşılabilecek sorunların düzeltilmesi için bu ve benzeri tasarımların iyileştirilmesi yönünde yeni çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu belirtilmiştir.

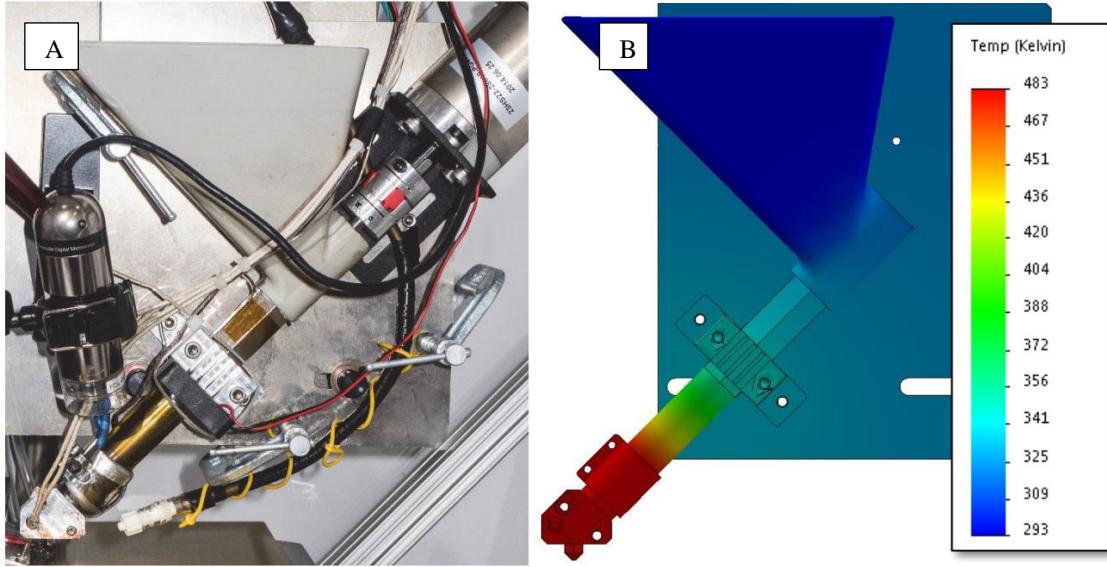
Literatürde tek bir yazıcı üzerinde birden fazla ekstruder'ın kullanıldığı çalışmalarda bulunmaktadır (Abilgaziye v d. 2015, Ali v d. 2016, Laureto ve Pearce 2017). Bu çalışmalardan birinde tek bir yazıcıda beş ekstruder kullanan bir tasarım önerilmiştir (Abilgaziye v d. 2015). Önerilen tasarımın yazdırma süresini azaltacağı ve farklı filamentlerin kullanımını kolaylaştıracağı öne sürülmüştür. Çalışmada beş ekstruderı da bir arada tutacak bir yapı tasarlanmıştır (Şekil 2.23 a). Bu yapının üretim sırasında beş ekstruderı sorunsuz şekilde taşıyabileceğini göstermek için dayanımı sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir (Şekil 2.23 b).



Şekil 2.23 Çoklu ekstruder tasarımı; beşli ekstruder (a), taşıyıcı yapı simülasyon sonuçları (b).

Araştırmacılar tasarladıkları sistemin yazıcının hareketli kafasının taşıyamayacağı kadar ağır olacağını öngördükleri için Bowden tipi bir Filament besleyici tercih etmişlerdir. Böylelikle filament besleyicinin ağırlığı şaseye yüklenmiş ve geriye sadece ısıtma ve soğutma modüllerinin ağırlığı kalmıştır. Önerilen sistemin ağırlığı 0,5 Kg civarında bir ağırlığa sahiptir. Araştırmacılar benzer sistemlerin daha verimli kullanılabilmesi için optimizasyon çalışmalarının ve deneysel çalışmaların artırılması gerektiğini bildirmişlerdir.

FFF 3B yazıcılarda çoğunlukla filament adı verilen tel haldeki hammaddeler kullanılmasına rağmen son zamanlarda filamentlerin haricinde granül yapıda hammaddelerin kullanılabilmesine olanak sağlayacak alternatif ekstruder tasarımları üzerinde çalışılmaktadır (Saari vd. 2015). Granül ya da pelet olarak bilinen termoplastikleri hammadde olarak kullanabilen ekstruder tasarımı Resim 2.3'te görülmektedir (Saari vd. 2015).



Resim 2.3 Granül ile üretim yapan ekstruder tasarımı, ekstruder genel görünümü (a), ekstruder üzerinde sıcaklık dağılımı (b).

Araştırmacılar bu çalışmada termoplastik elastomer granüllerini vidalı bir sistem ile ısıtma modülüne yönlendiren bir ekstruder tasarımı yapmışlardır. Ekstruder üzerinde iki bölgede ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. Termoplastik granüller nozula gelmeden önce ön ısıtmaya tabi tutulmakta ve nozul yakınlarında ek olarak tekrar ısıtılarak erime

sıcaklığına yükseltilmektedir. Böyle bir ekstruder tasarımıyla filament hale getirilemeyen, esnek termoplastiklerin üretimi amaçlanmıştır. Çalışmada Kraton D1161, Star Thermoplastic 3A ve Star Thermoplastic 20 elastomer granülleri kullanılmıştır. Ekstruder'in tasarımı sırasında sonlu elemanlar metodundan faydalanılarak termal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Resim 2.3 b). Klasik ekstruderlere benzer şekilde bu ekstruderde da sıcaklık dağılımı önemli rol oynamaktadır. Termoplastiğin sadece eritileceği bölgenin yüksek sıcaklıklarda olması ve ekstruder'in diğer kısımlarının mutlaka düşük sıcaklıkta tutulması şarttır.

Tasarlanan yeni ekstruder ile çekme testi için numuneler üretilmiş ve mekanik özellikleri ASTM D638-02a standardına göre test edilmiştir (Garrell vd. 2003). Test sonuçlarına göre Filament kullanan ekstruder tasarımlarıyla üretilen numunelere göre çok daha esnek parçaların üretilebildiği görülmüştür. Ancak çalışmada üretilen parçaların geometrik doğruluğu ve üretim süreleriyle ilgili ayrıntılı bilgi sunulmamıştır. Böyle bir ekstruder tasarımının hammadde yelpazesini oldukça genişletme potansiyeli bulunmaktadır. Ancak sistemin 3B yazıcının hareketli yapısına ek bir ağırlık getireceği aşikardır. Ayrıca üretim kalitesi, üretilen parçaların toleransları ve üretim hızları ile ilgili olumsuz etkileri olacaktır. Henüz deneysel olan bu tarz ekstruder tasarımlarının iyileştirilerek gelecekte daha geniş kullanım alanı bulması mümkün görünmektedir.

Ekstruderlerin genel tasarımı üzerine literatürde yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Burada sadece genel ekstruder tasarımı üzerine yapılan çalışmalardan örnekler sunulmuştur. Bunların haricinde FFF sürecine dair bazı matematiksel modeller öneren önemli çalışmalar bulunmaktadır (Bellini vd. 2004, Yardimci vd. 1997). Filament ekstruderden ayrıldıktan sonraki sürece dair nümerik analizler (Dabiri vd. 2014) ve filamentin ergime davranışına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır (Kaseem ve Ko 2017, Ramanath vd. 2008).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Mühendislik problemlerinin çözümü için analitik, sayısal veya deneysel olmak üzere üç temel yöntem kullanılabilir. Analitik yöntemlerle yapılan çözümler basit problemler için tam doğrulukta sonuçlar verir ancak karmaşık sistemlere uygulanmaları zordur. Sayısal yöntemler karmaşık problemlere daha kolay uygulanabilir ve daha hızlı çözümler elde edilir. Ancak elde edilen sonuçlar alınan kabuller doğrultusunda yaklaşık sonuçlardır. Deneysel yaklaşımlarla çözüm üretmek ise genellikle çok maliyetli ve hatta bazı durumlarda uygulanması imkansızdır.

FFF 3B yazıcılardaki ekstruderler karmaşık geometrileri ile analitik olarak incelenmesi oldukça zor bir sistemdir. Ekstruder'in bazı bölgelerinde sadece katı yapılar arasında ısı transfer mekanizmaları etkiliyken diğer bölgelerinde bir akışkanın yardımıyla soğutma mekanizmaları etkili olmaktadır. Aynı zamanda sistemin içinde faz değiştiren bir termoplastik bulunmaktadır. Bu nedenle ekstruder sistemi üzerine yapılan çalışmalarda analitik yöntemler uygulanamamıştır ve ağırlıklı olarak sayısal çözümlerden ve simülasyonlardan faydalanılmıştır. Bunun yanı sıra uygulanabilen durumlarda elde edilen sayısal çözümler deneysel yöntemlerle doğrulanmıştır.

Tezin bu bölümünde bahsedilen metot, yazılım ve donanımlar çalışma kapsamında yapılan uygulamaların genelinde kullanılmıştır. Yapılan uygulamalar ile ilgili ayrıntılar verilirken bu başlıkta tanıtılan materyal ve metotlara atıf yapılarak ayrıntılarına yer verilmeyecektir. Uygulamada burada bahsedilmeyen materyal veya metot o çalışma ile ilgili bölümde ayrı bir başlıkta sunulacaktır.

3.1 Çalışmalar Sırasında Kullanılan 3B Yazıcılar

FFF 3B yazıcılar maliyetlerine göre değerlendirildiğinde iki farklı sınıfta değerlendirilebilir. Bir grup 3B yazıcı düşük maliyetleri daha çok hobi amaçlı kullanıma yöneliktir. Diğer grup ise maliyeti daha yüksek olmakla beraber daha profesyonel yazıcılardır.

Her iki yazıcı türü de benzer karakteristiklere sahip ve aynı alt sistemleri kullanarak üretim yapar. Düşük maliyetli yazıcılar ile profesyonel yazıcılar arasındaki en önemli fark profesyonel yazıcıların daha çok son kullanıcıya hitap etmesidir. Profesyonel yazıcılarda üretim sürecindeki hata ihtimalleri daha düşüktür. Profesyonel yazıcıları üreten firmalar genellikle müşterilerine satış sonrası hizmetleri de sunar ve sorunların giderilmesi için destek sağlarlar. Profesyonel yazıcılar tak ve kullan mantığı ile tasarlanmışlardır. Profesyonel yazıcılarda kullanıcı üretim öncesinde temel bazı parametreleri ayarladıktan sonra üretim sürecine dahil olmaz. Düşük maliyetli yazıcılar çoğunlukla kit halde satılır. Bu yazıcılarda genellikle satış sonrası hizmet sunulmaz. Kullanıcılar bir sorunla karşılaştığında ya kendi deneyimleriyle ya da internet üzerindeki topluluklardan bilgi alarak çözüm üretmeye çalışırlar. Düşük maliyetli yazıcılarda açık kaynaklı dilimleyici yazılımlar kullanılabilir. Ancak profesyonel yazıcılarda kendilerine özgü dilimleyici yazılımlar kullanılmaktadır.

Üretim sürecinde profesyonel yazıcılara oranla daha çok hata ile karşılaşılır. Ürün kalitesi açısından bakıldığında teorik olarak düşük maliyetli yazıcılar, profesyonel yazıcılar ile yakın kalitede üretim yapabilir. Ancak bu durum kullanıcının deneyimine ve yeteneklerine bağlıdır.

Çizelge 3.1 Çalışmalarda kullanılan düşük maliyetli 3B yazıcılar.

Parametre	Mendel	Tevo	Anet	Ender 3
Baskı alanı (mm)	200x200x150	200x200x150	200x200x200	200x220x220
Baskı Hızı (mm/s)	30 – 50	100	100	150
Nozul Sıcaklığı (°C)	240	250	240	260
Nozul Çapı (mm)	0,2 – 1,0	0,4 / 0,6 / 0,8	0,4 / 0,6	0,4
Ekstruder	Direct Drive	Bowden	Direct Drive	Bowden
Katman (µ)	150 – 400	150 – 400	120 – 300	100 – 400
Tabla Sıcaklığı (°C)	Isıtma yok	100	105	110
Hammadde	PLA, ABS	PLA, ABS	PLA, ABS	PLA, ABS
Filament Çapı (mm)	1.75	1.75	1.75	1.75

Çalışmalar sırasında dört adet düşük maliyetli ve dört adet profesyonel FFF 3B yazıcı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan düşük maliyetli yazıcıların özellikleri Çizelge 3.1’de, profesyonel yazıcıların özellikleri ise Çizelge 3.2’de sunulmuştur. Düşük maliyetli yazıcılardan bir tanesi (Mendel) çalışma sırasında üretilmiş, diğerleri (Tevo, Anet, Ender) demonte kit halde temin edilmiş ve montajı yapılmıştır. Çalışmada kullanılan yazıcılardan bir tanesi Rep – Rap projesi esas alınarak tez çalışması sırasında üretilen bir FFF 3B yazıcıdır. Kartezyen tipinde olan bu yazıcı Mendel adıyla anılacaktır. Mendel 3B yazıcının şasesi sigma profillerden üretilmiştir. Şase için 7 adet 20x20 mm sigma profil kullanılmıştır. Motor kontrolleri için Arduino tabanlı MKS-Mini 3B yazıcı kontrol kartı kullanılmıştır. Motor ve sensör kontrolleri için kontrol kartı içinde açık kaynak kodlu Marlin yazılımı kullanılmıştır. Yazıcıda E3D markasına ait direct drive türü bir ekstruder tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan düşük maliyetli diğer yazıcılar; Tevo Tarantula, Anet ve Ender 3B FFF yazıcılarıdır. Bu yazıcılar de monte kit halde temin edilip sonra bir araya getirilmiş yazıcılarıdır.

Çizelge 3.2 Çalışmalarda kullanılan profesyonel 3B yazıcılar.

Parametre	Zortrax	Mass Portal	Ultimaker	Stratasys uPrint
Baskı alanı (mm)	200x200x200	Ø200 x 220	223x220x205	203x203x152
Baskı Hızı (mm/s)	200	300	300	300
Nozul Sıcaklığı (°C)	290	300	270	310
Nozul Çapı (mm)	0,3 / 0,4 / 0,5	0,2 / 0,4 / 0,6	0,2 / 0,3 / 0,4	0,2 / 0,4
Ekstruder	Direct Drive	Bowden	Bowden	-
Katman (µ)	80 – 400	10 – 600	20	10
Tabla Sıcaklığı (°C)	105	210	-	100
Hammadde	Z Filaments: PLA, ABS, HIPS, NYLON, FLEX	PLA, ABS, PVA, HIPS	PLA, ABS	Stratatsys Filament PLA, ABS, TPU, ULTEM
Filament Çapı (mm)	1.75	1.75	1,75 / 2,85	1.75
Yazılım	Z – Suite	Simplify3D	Cura	CatalystEX

Çalışmalarda dört adet profesyonel yazıcı kullanılmıştır. Bu yazıcılardan biri delta tipi bir yazıcıdır (Mass Portal Paraoh ED). Diğer yazıcılar ise Kartezyen tipi 3B yazıcılarıdır. Çalışma süresince Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de özellikleri verilen yazıcıların tamamı yoğun bir şekilde kullanılmış ve çeşitli üretimler yapılmıştır. Yazıcılarla yapılan üretimler

sırasında karşılaşılan hatalar sistematik olarak kaydedilmiştir. Üretimler sırasında karşılaşılan hatalar fotoğraflanmıştır. Karşılaşılan hatalar ile ilgili elde edilen bulgular Bölüm 4.1’de sunulmuştur.

3.2 Çalışmalar Sırasında Kullanılan Yazılımlar

Mevcut ekstruder tasarımlarının incelenmesi, değerlendirilmesi ve birbirleriyle karşılaştırılması için bilgisayar destekli tasarım programları kolaylık sağlar. Bununla birlikte ekstruder için önerilen yeni tasarımların değerlendirilmesi ve görselleştirilebilmesi için bilgisayar destekli tasarım programları kullanılmıştır. Farklı ekstruder tasarımları üzerinde simülasyon ve analizlerin yapılabilmesi için yine bilgisayar destekli tasarım programları gereklidir.

Ekstruder tasarımlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi için bilgisayar destekli tasarım programlarıyla elde edilen üç boyutlu dijital modeller tek başına yeterli değildir. Üç boyutlu dijital modeller ile sadece geometrik özellikler ve sistemin genel bir değerlendirmesi yapılabilir. Ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımları, ısı transfer mekanizmaları ve sistemin soğutulması esnasında akışkanlar dinamiği ile ilişkileri ancak bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarıyla incelenebilir. Böylece sisteme dair teorik veriler ile genel bir değerlendirme yapılabilir.

Ekstruderlerin bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli mühendislik yazılımları ile değerlendirilmesi sistemin optimizasyonu için önemli bilgiler sunar. Ancak yapılan analiz ve simülasyonların gerçek hayattaki uygulamalarda da benzer sonuçlar vermesi gerekir. Bunun için yapılan simülasyonlar ve analizler uygulama ve deneysel çalışmalarla desteklenmelidir. Yapılan çalışmalarda analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında 3B yazıcılarla üretimler yapılmıştır. Bu süreçte 3B yazıcılarda çeşitli dilimleyici yazılımlar kullanılmıştır. Çalışmalar sırasında kullanılan yazılımlar iki başlıkta incelenecektir. Birinci bölümde çalışmada kullanılan bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli mühendislik yazılımları, ikinci bölümde ise kullanılan dilimleyici yazılımlar hakkında temel bilgiler sunulacaktır.

3.2.1 Dilimleyici Yazılımlar ve Parametreler

Dilimleyici yazılımlar, 3B dijital modelin yazıcı donanımının kontrol edilebileceği belirli talimatlara dönüştürülmesi için kullanılan bilgisayar yazılımıdır. Bilgisayar destekli tasarım programı ile elde edilen STL formatındaki dijital bir model, dilimleyici yazılım ile g – kodu formatına dönüştürülür. Dilimleyici yazılım önce nesneyi bir düz katman yığını olarak kesitlere ayırır. Her bir kesit bir katmanı ifade eder. Daha sonra bu katmanların 3B yazıcı üzerinde hareketli olan tabla veya ekstruder'ın doğrusal hareketlerini sağlayacak G – kod'unu üretir. Hareket kodlarının yanı sıra 3B yazıcının üzerinde bulunan fan, ısıtıcı ve diğer sensörlerin bir arada uyumlu şekilde çalışacağı kodlar da bu dosyaya eklenir.

Cura, Slic3r ve Repetier gibi açık kaynak kodlu dilimleyici yazılımların yanı sıra Simplify3D ve Z – Suite gibi profesyonel dilimleyici yazılımları bulunmaktadır. Bütün dilimleyici yazılımlar benzer özellikleri barındırırlar ve hepsi yazıcılar için G – kodu üretirler. Ancak üretilen kodun algoritmaları yazılımlar arasında farklılıklar gösterebilir. Aynı dijital modele ait farklı dilimleyici yazılımlarla üretilmiş g – kodunda tabla veya ekstruder hareketleri dilimleyici yazılımlara göre farklılık gösterebilir. Buna rağmen bütün dilimleyici yazılımlarda ortak nokta olarak üretim sürecine etkisi olan; doluluk oranı, katman kalınlığı, üretim hızı ve dolgu tipi gibi parametrelerin ayarlanmasına olanak verir.

Çalışmada ağırlıklı olarak profesyonel bir dilimleyici yazılım olan Simplify3D ve açık kaynak kodlu alternatifi olan Repetier yazılımı kullanılmıştır. Her iki dilimleyici yazılımda belirlenmesi gereken temel parametreler benzeşmektedir. Dilimleyici yazılımların parametre ayarları çok önemlidir. Çünkü kullanılan 3B yazıcılar, üretimde kullanılan hammaddeler birbirinden farklıdır. Üretilecek olan 3B modellerin geometrileri de çok farklılık gösterir. Bu nedenle, her bir yazıcı veya yazıcıda kullanılacak her hammadde, iyi bir baskı kalitesi elde etmek için kendine özgü farklı parametrelerin ayarlanmasını gerektirir. Dilimleyici yazılımlardaki önemli parametreler; ekstruder sıcaklığı, soğutma parametreleri, tabla sıcaklığı, katman kalınlığı, baskı hızı, geri çekme (retraction), ekstrüzyon çarpanı, destek yapı ayarları, dolgu oranı ve dolgu tipidir.

Ekstruder sıcaklığı üretim için en önemli parametrelerden biridir. Her üretim için kullanılan Filament de göz önünde bulundurularak uygun bir ekstruder sıcaklığı belirlenmelidir. Ekstruder sıcaklığı yeterli olmadığında üretim yapılamaz. Ekstruder sıcaklığı gereğinden fazla ayarlanırsa ürün istenen özelliklerde üretilemez. Her Filament için üreticinin belirlediği bir üretim sıcaklığı vardır. Üretimin bu sıcaklıklara uygun şekilde yapılması sağlanmalıdır.

3B yazıcılar üzerinde iki bölgede soğutucu fanlar kullanılır. Bunlardan en önemlisi ekstruderin soğutulmasını sağlayacak fanlardır. Diğer fanlar ise baskı tablası üzerinde parçanın soğutulmasını sağlayan fanlardır. Dilimleyici yazılımlarda bulunan soğutma parametreleri bu fanların hızlarını kontrol eder.

Tabla sıcaklığının da üretime uygun şekilde ayarlanması gerekir. Bazı üretimler için ısıtmalı baskı tablası kullanımı gerekmezken bazı üretimlerde mutlaka kullanılması gerekir. Özellikle ekstruder sıcaklığının yüksek olduğu ve parça boyutunun büyük olduğu üretimlerde ısıtıcı baskı tablası kullanımı şarttır. Baskı tablasının ısıtılması termoplastiğin tablaya döküldüğü esnada ve sonrasındaki sıcaklık farkının azaltılmasına yardımcı olur. Böylece termoplastiğin sıcaklık farkından dolayı oluşan termal gerilmeler nedeniyle şekil değişimi (çarpılması) azaltılmaya çalışılır. PLA ve benzeri üretim sıcaklığı düşük (~200 °C) termoplastiklerde eğer parça boyutu çok büyük değilse baskı tablasının ısıtılmasına gerek duyulmayabilir. Ancak ULTEM gibi daha yüksek sıcaklıklarda (~350 °C) üretimin yapılacağı durumlarda baskı tablası mutlaka ısıtılmalıdır.

Katman kalınlığı parçanın Z eksenindeki hassasiyeti ile ilgilidir. Daha düşük katman kalınlığı parçanın genel kalitesini artırırken üretim süresini uzatır. Üretilecek parçada çok küçük detaylar bulunuyorsa katman kalınlığının mümkün olduğu kadar düşürülmesi gerekir. Katman kalınlığı yazılım parametrelerinden çok 3B yazıcının sahip olduğu donanımlara bağlıdır. Filament besleyicide kullanılan step motorun adım sayısı, ekstruder'in genel performansı ve sıcaklık karakteristiği gibi donanım özellikleri ne kadar iyi ise katman kalınlığı o kadar düşük seçilebilir.

Dilimleyici yazılımda baskı hızı parametresi 3B yazıcının üretim hızını doğrudan belirler. Baskı hızı parametresi baskı tablasının ve ekstruder'in üretim sürecinin farklı aşamalarındaki hareket hızlarını belirler. Baskı hızı üretim sırasında değişkenlik gösterir. İlk katmanlar üretilirken termoplastiğin baskı tablasına daha iyi adezyonunun sağlanması için baskı hızı düşük seçilir. Sonraki katmanlarda ise baskı hızı artar. Benzer şekilde üretim sırasında ekstruder'in filamentini dökmeden boşta hareket ettiği durumlarda da baskı hızı daha yüksektir.

Üretim sırasında bazı bölgelerde filamentin dökülmesi gerekirken bazı bölgelerde ise ekstrüzyonun tamamen durması gerekir. Ekstrüzyonun olmaması gereken esnada nozul içinde eriyik halde bulunan filament yerçekimi ile akmaya devam eder. Bu durumun önüne geçmek için besleyici filamentini bir miktar geri çeker. Bu işlem dilimleyici yazılımdaki geri çekme (Retraction) parametresi ile ayarlanabilir. Direct Drive besleyicide mesafenin kısa olması sebebiyle geri çekme (Retraction) çok daha kolay kontrol edilebilir. Böyle durumlarda Direct Drive besleyicilerde 0.5 mm gibi bir geri çekme mesafesi nozulda eriyik filamentin dökülmesini engelleyecek kadar negatif basınç oluşturabilir. Bowden besleyicilerde ise geri çekme mesafesi 10 mm'ye kadar çıkabilir.

Dilimleyici yazılımlarda “ekstrüzyon çarpanı” parametresi bazı yazılımlarda “akış oranı” olarak da tanımlanmıştır. Ekstruder'in üretim esnasında birim zamanda nozuldan çıkacak olan erimiş Filament miktarını belirleyen parametredir. Genellikle bu parametre yüzde olarak ifade edilir. Örneğin %100'e ayarlanmış parametre için ekstruder belirli bir geometriyi üretmek için 10 mm uzunluğundaki filamentini eritip döker. Aynı geometri için ekstrüzyon çarpanı %90 seçildiğinde 9 mm uzunluğundaki filament eritilir. Ekstrüzyon çarpanı parametresi özellikle ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımları ile doğrudan ilgilidir. Akış oranının artırılabilmesi için nozul bölgesinde filamentin eritilebileceği hızda ısı transferi gerçekleşmesi gerekir.

Destek yapılarla ilgili parametreler dilimleyici yazılımlarının bir diğer önemli parametresidir. 3B yazıcılarda üretilen parçalar tabla üzerine veya bir önceki katmanın üzerine eklenerek üretilir. Ancak parçanın bazı bölgelerinin sahip olduğu geometri alt kısmı tamamen boş olabilir. Bazı bölgeler ise çıkıntı şeklinde eğimli bir yüzeye sahiptir.

Parçanın altı boş olan geometrilerini üretebilmek için bu bölgenin yapısal bütünlüğünü sağlayacak destek yapılar kullanılır. Destek yapılar eğimin 45⁰ dereceden fazla olan yerlerinde kullanılır. Destek yapılarının daha az veya çok olması parçanın baskı tablası üzerindeki pozisyonu ile doğrudan ilgilidir.

3B yazıcılarla üretilen parçaların iç yapısı genellikle boşluklu olarak üretilir. Tam doluluk toplam üretim süresini artırdığı için genellikle tercih edilmez. Bu nedenle parçadan beklenen dayanıma uygun şekilde iç yapısındaki doluluk oranı belirlenir. Doluluk oranı parametresi yüzde olarak belirlenen bir değerdir. Örneğin bir parça için %10 doluluk oranı ile üretilen parçanın bir katmanının iç yapısındaki malzeme miktarı o katmanın yüzey alanının %10'u kadar olacaktır. Geri kalan %90'lık kısım ise seçilen dolgu tipine göre üretilir. İç yapının boşluklu kısımları için kübik, bal peteği, ızgara ve benzeri çok sayıda farklı dolgu tipi tercih edilebilir.

3.2.2 Bilgisayar Destekli Tasarım ve Mühendislik Yazılımları

Bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design, CAD/BDT), bir tasarımın oluşturulması, değiştirilmesi ve görselleştirilmesine yardımcı olmak için bilgisayarlar ve çeşitli yazılımların kullanılmasıdır. Bilgisayar destekli tasarım yazılımları, tasarımcının üretkenliğini artırmak, tasarım kalitesini artırmak, dokümantasyon yoluyla iletişimi iyileştirmek ve üretim için bir veri tabanı oluşturmak için kullanılır. Endüstri 4.0 ile ilgili süreçlerde bilgisayar destekli tasarım yazılımları mutlaka kullanılması gereken bir standart hale gelmiştir. Bilgisayar kontrollü tezgahlar ve 3B yazıcılar gibi üretim araçlarında kullanılan 3B dijital modeller bilgisayar destekli tasarım programları ile elde edilir. 3B yazıcılarda üretim yapılabilmesi için kullanılacak olan dijital modellerin STL (Standard Triangle Language) dosya biçiminde kaydedilebilmesi gerekir.

Günümüzde bilgisayar destekli tasarım programlarının neredeyse tamamı STL dosya türünü destekler. Çalışmada 3B yazıcılar ile yapılacak üretimlerde çeşitli bilgisayar destekli tasarım yazılımlarından faydalanılmıştır. Bu programların arasında; OpenSCAD, FreeCAD, LibreCAD gibi açık kaynak yazılımların yanı sıra, SolidWorks, Catia ve benzeri profesyonel yazılımlar vardır.

Bilgisayar destekli mühendislik (Computer Aided Engineering, CAE), ürün tasarımlarını iyileştirmek veya mühendislik problemlerinin çözümüne yardımcı olmak amacıyla tasarım performansının analizlerinin ve simülasyonlarının yapılması için çeşitli bilgisayar yazılımlarının kullanılmasıdır. Bilgisayar destekli mühendislik, ürün tasarımları, üretim süreçleri ve üretim araçlarının simülasyonu, doğrulanması ve optimizasyonu için kullanılabilir. Tipik bir bilgisayar destekli mühendislik süreci, ön işlem, çözüm ve son işlem adımlarından oluşur. Ön işlem aşamasında mühendisler, geometriyi (veya bir sistem temsili) ve tasarımın fiziksel özelliklerini ve ayrıca çevreyi uygulanan yükler veya kısıtlamalar şeklinde modeller. Daha sonra model, temel fiziğin uygun bir matematiksel formülasyonu kullanılarak çözülür.

Bu çalışmada kullanılan matematiksel modeller ısı transfer denklemleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği denklemleri başlıkları altında incelenmiştir. Bilgisayar simülasyonları OpenFOAM ve Ansys yazılımı yardımıyla yapılmıştır.

3.3 Sonlu Elemanlar Metodu

Mühendislik Sonlu Elemanlar Metodu (SEM); gerilme analizi, ısı transferi ve akışkanların akışı ile ilgili karmaşık mühendislik problemlerine çözümler elde etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Analitik yöntemlerin uygulanmadığı problemlerde sonlu elemanlar metodu gibi sayısal yöntemler sık kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda fiziksel problemler matematiksel modellerle ifade edilir ve bu matematiksel modeller bir takım sınır şartları içeren diferansiyel denklemlerdir. Problemin matematiksel modeli doğanın temel kanun ve prensiplerinin bir sisteme uygulanmasıyla elde edilmektedir. Analitik çözümler sistem içerisindeki herhangi bir noktanın gerçek davranışını temsil eder. Sonlu elemanlar metodunda ise sistem bölüntülere (ağ veya mesh) ayrılır. Sistemin davranışı ağ yapı ve düğüm noktaları (node) adı verilen belirli noktalarda yaklaşık çözümler olarak hesaplanır. Elde edilen sonuçlar hiçbir zaman gerçek sonuçları veremez ve sadece yaklaşık sonuçlardır. Ancak sistem doğru şekilde modellendiğinde elde edilen sonuçlar birçok mühendislik problemi için yeterli ve geçerlidir. Bu çalışmada elde edilen sayısal çözümler ekstruder sistemde gerçekleşen fiziksel olayların daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

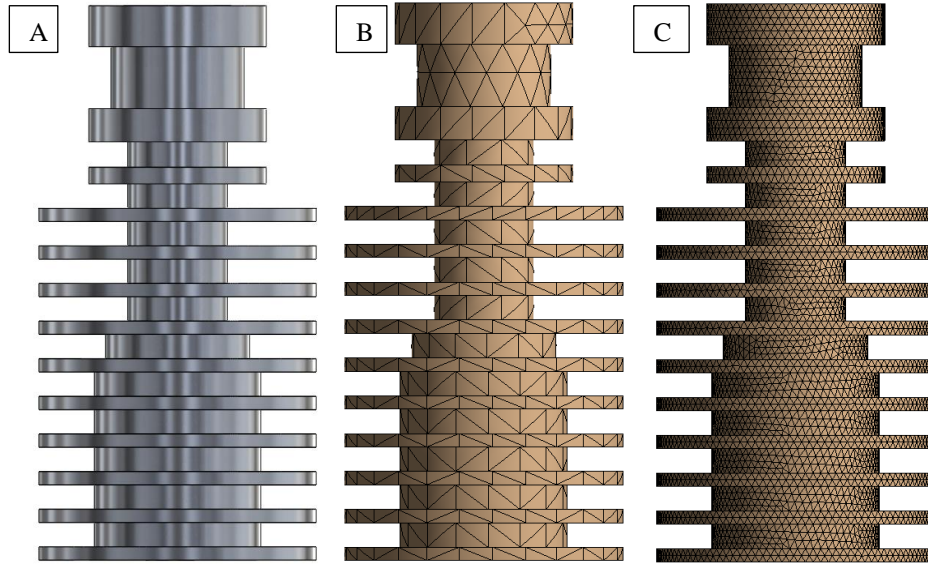
Courant Sonlu elemanlar metodunu ilk geliştiren araştırmacıdır (Sabat ve Kundu, 2021). Ancak metodun ilk yıllarında kullanım alanı oldukça kısıtlı kalmıştır. Sonraki yıllarda bilgisayar ve yazılım teknolojilerindeki gelişim ile birlikte kullanım potansiyeli artmıştır. Günüümüzde ise sonlu elemanlar metodunu esas alan yazılımların kullanılmadığı bir mühendislik uygulaması veya ürün tasarımı neredeyse imkânsız hale gelmiştir (Cengel ve Cimbala 2008). Bu metodun, bilgisayarlar ve yazılımlar ile birlikte sağladığı hesaplama gücü doğru kullanıldığında tasarımcılar için önemli kolaylıklar sağlamakta ve vazgeçilmez bir araç haline gelmektedir.

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde hesaplama yapılmadan önce problemin bir ön işlem (Pre – Processing, ön işlem aşaması) ile hazırlanması gerekir. Daha sonra oluşturulan matematiksel modelin çözüümü (Solution, çözüüm aşaması) sonlu elemanlar metodunu kullanan yazılımlara yaptırılır. Problemin diferansiyel denklemlerinin çözüümü başarıyla tamamlandıktan sonra sonuçlar değerlendirilir (Post – Processing, son işlem aşaması). Sonuçların değerlendirilmesi aşaması; diferansiyel denklemlerden elde edilen sonuçların ekstrapolasyonu ve verilerin görselleştirilmesi gibi işlemleri barındırır.

Sonlu elemanlar simülasyonları yedi temel adımda gerçekteştirilebilir. Birinci adım; geometrik tasarım ve ağ (mesh) oluşturulmasıdır. İkinci adım; her bir elemanın fiziksel davranışını temsil edecek Şekil fonksiyonlarının (Shape functions) belirlenmesidir. Üçüncü adım; her bir sonlu eleman için bünye denklemlerinin (Governing equations) tanımlanmasıdır. Dördüncü adım; problemi temsil etmek için elemanların birleştirilmesidir. Bu adımda problemin türüne göre global rijitlik matrisi veya global ısı iletim matrisi oluşturulur. Beşinci adım; sınır Őartlarının (Boundary conditions) belirlenmesi ve modele uygulanmasıdır. Altıncı adım; düğüm noktalarındaki çözüümlerin elde edilmesi için denklemlerinin eş zamanlı çözüümleridir. Yedinci ve son adım; denklemlerin çözüümleri elde edildikten sonra gerekli bilgilerin yardımcı tablo veya grafiklerle sunulması sürecidir.

3.3.1 Sonlu Elemanlar Metodunda Geometrik Model ve Ağ Yapısı

Sonlu elemanlar analizinde ilk adım; geometrik tasarım ve ağ (mesh) oluşturulmasıdır. Bu adımda çözümü yapılacak olan sistemin geometrik modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlar ile bölüntülenmesi gerçekleştirilir. Ağ yapısı geometriyi ne kadar iyi temsil ederse analiz sonuçları da o kadar gerçekçi olacaktır. Şekil 3.1’de bir ekstruder soğutucusuna ait geometrik model ve bu modele uygulanmış iki farklı ağ yapısı görülmektedir. Ağ yapısı oluşturulurken, yapılandırılmış / yapılandırılmamış ağ veya parça / montaj temelli ağ gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda çok sayıda ağ oluşturma yöntemi bulunmaktadır. Burada yöntemlerin tamamına yer verilmemiştir. Ancak çalışmanın yapılan analizle ilgili kısımlarında kullanılan ağ yapılarına dair önem arz eden bilgiler özet olarak belirtilmiştir.



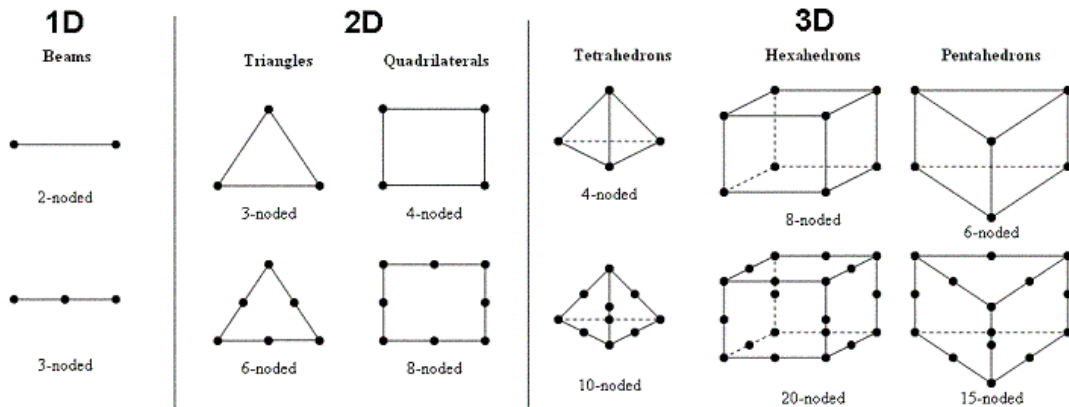
Şekil 3.1 Soğutucu tasarımı; 3B model (a), 3 mm elemandan oluşturulan ağ yapısı (b), 0,7 mm elemandan oluşturulan ağ yapısı (c).

Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısının kalitesi analiz sonuçlarını önemli ölçüde etkiler. Sistemde kullanılan ağ yapısının yeterli hassasiyette olması gerekir. Bu çalışmada yapılan analizlerin tamamında ağ hassasiyeti göz önünde bulundurulmuştur ve her analiz için çözümün ağdan bağımsızlığı test edilmiştir. Ağdan bağımsızlık testleri eleman boyutuna göre yapılmıştır. Her bir modelin eleman boyutu parametrik olarak belirlenmiş ve

küçültülerek analizler tekrarlanmıştır. Analizden elde edilen sonuçlar, eleman boyutuna göre çok az değiştiği durumlar tespit edilmiş ve eleman boyutları buna göre belirlenmiştir.

3.3.2 Sonlu Elemanlar Metodunda Elemanlar ve Şekil Fonksiyonları

Sonlu elemanlar analizinde ikinci adım her bir elemanın fiziksel davranışını temsil edecek şekil fonksiyonlarının (Shape functions) belirlenmesidir. Şekil fonksiyonları ağ yapısı içerisindeki her bir elemanın davranışını temsil eder ve her bir düğüm noktasında elde edilecek sonuçların interpolasyon ile elemana yayılmasını sağlar. Sonlu eleman analizinde ağ yapısını oluşturan elemanlar ve bu elemanlarda kullanılan şekil fonksiyonları yapılacak olan analize uygun olarak seçilmesi analiz doğruluğunu artırır. Sonlu elemanlar analizinde bir, iki ve üç boyutlu eleman tipleri kullanılabilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan farklı eleman tipleri

Ağ yapısındaki elemanların şekil değişimi lineer veya polinom fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla elemanlarda kullanılan şekil fonksiyonları lineer (First – Order) veya kuadratik (Second – Order) olabilir. Seçilen eleman tipi analiz sonuçlarında elde edilen sonuçların hassasiyetini ve doğruluğunu etkilediği gibi hesaplama süresini de etkiler. Kare veya dikdörtgen kesitli yapıların analizinde lineer şekil fonksiyonuna sahip elemanlar kullanıldığında daha kısa hesaplama sürelerinde, daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Daha karmaşık geometriye sahip yapıların analizlerinde ise kuadratik elemanların kullanılması gerekebilir.

Ağ yapısı içinde bulunan elemanların kalitesi analizin hassasiyetini önemli ölçüde etkiler (Katz ve Sankaran, 2011). Yapılan analizlerde kullanılan elemanların kalitesi üç temel parametre ile kontrol edilmiştir. Bu parametreler çarpıklık (Skewness), ortogonal kalite (Orthogonal Quality) ve eleman kalitesi (Element Quality)'dir. Çarpıklık, elemanların geometrisinin, eleman tiplerine ne kadar yakın olduğunu 0 ve 1 aralığında aldığı değerler ile gösteren bir parametredir. Bu değer 0'a yaklaştıkça elemanın kalitesinin iyi olduğunu, 1'e yaklaştıkça kötü olduğunu gösterir. Benzer şekilde ortogonal kalite göstergesi de 0 ve 1 arasında bir değer alır. Ortogonal kalite metriği 0'a yaklaştıkça eleman kalitesi azalırken 1'e yaklaştıkça artar. Her bir elemanın merkez vektörünün, yüzeye dik normal vektörü arasındaki açıyı ifade eder. Eleman kalitesi ise; elemanın hacminin elemanın bir kenarının karesine veya küpüne olan oranıdır. İki boyutlu elemanlar için elemanın kenar uzunluğunun karesi, üç boyutlu elemanlarda ise küpü oranlanır. Eleman kalitesi değeri 1 ise bu elemanın tam bir küp veya kare olduğunu gösterir.

3.4 Isı Transfer Denklemleri

Sonlu elemanlar analizinde her bir sonlu eleman için bünye denklemlerinin (Governing equations) çözülür. Problemin türüne göre kullanılacak olan denklemler değişiklik gösterecektir. Bu çalışmada ağırlıklı olarak ısı transferi analizleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri kullanılmıştır. Üç boyutlu ısı transferi analizlerinde kullanılan temel denklemlerden biri Fourier ısı iletimini ifade eden diferansiyel denklemdir (Eşitlik 3.1);

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = 0 \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de ρ malzemelerin yoğunluklarını (kg / m^3), c : malzemelerin öz ısılarını ($\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$), k : sırasıyla x, y ve z yönünde malzemelere ait ısı transfer katsayılarını ($\text{W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$), T : sıcaklığı, t : zamanı ifade etmektedir.

$Q(x, y, z, t)$ ifadesi iç ısı üretimini, ifade etmektedir. Isıl denge diferansiyel denklemi

sistemin her zaman dengede olduğunu gösterir. Sistemin başlangıç (T_0 anında) sınır şartı Eşitlik 3.2 ile ifade edilir;

$$T(x, y, z, t) |_{t=0} = T_0 \quad (3.2)$$

Ekstruder'in soğutulması doğal taşınım ile oluşmaktadır. Bunun yanı sıra sistemde ışıınım kaynaklı ısı transferi içermektedir. Sistemin sınır şartları Eşitlik 3.3 ile tanımlanabilir;

$$-K \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \varepsilon_{\theta} \sigma (T_{y=0}^4 - T_{\text{çev}}^4) + k(T_{y=0} - T_{\infty}) \quad (3.3)$$

ε_{θ} : sınır yüzeyin yayıcılığı, σ : Stefan – Boltzmann sabiti ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), $T_{\text{çev}}$: çevre sıcaklığı (295 K), k : ısı transfer katsayısıdır.

Ekstruder geometrisinin termal davranışa olan etkisini daha iyi anlayabilmek için parça üzerinde gerçekleşen birim zamandaki ısı transfer hızı (\dot{Q}) ve ısı akısının incelenmesi mümkündür. Ekstruder üzerinde oluşan ısı transfer hızı (Eşitlik 3.4) ve ısı akısı (Eşitlik 3.5) ile hesaplanabilir;

$$Q = \dot{Q} \Delta t(\text{J}) \quad (3.4)$$

Isı akısı (\dot{q}), birim zamanda, birim alan (A) başına transfer edilen ısı miktarını ifade eder.

$$\dot{q} = \dot{Q} / A(\text{W/m}^2) \quad (3.5)$$

3.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Denklemleri

Sonlu elemanlar analizinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümü için üç temel yasa kullanılır. Bu yasalar; kütlein korunumu, momentin korunumu (Newton'un ikinci yasası) ve enerjinin korunumu (termodinamiğin birinci yasası) yasalarıdır. Bu çalışmada yapılan analizlerde kullanılan akışkanların tek fazlı olduğu ve sürekli olduğu kabulleri alınmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği denklemlerinin

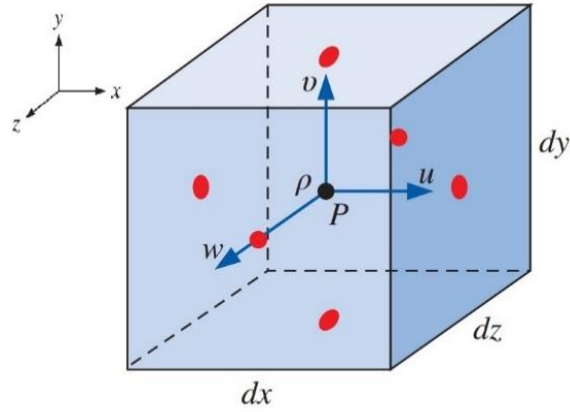
çözümlerinde akışkana dair hız vektörü (\vec{V}), basınç (p) ve sıcaklık (T) değerleri bulunabilir. Denklemlerin çözülebilmesi için akışkana ait yoğunluk (ρ), viskozite (μ) ve termal iletkenlik katsayısı (k) gibi değişkenlerin bilinmesi gerekir. Termal iletkenlik katsayısı (k); bir materyalin ısı iletilme özelliği gösteren fiziksel bir özelliktir. Bu değer yüksekse madde iyi bir iletken, düşükse iyi bir yalıtıcıdır. Bir akışkanın yoğunluğu (ρ); birim hacmindeki kütle miktarını ifade eder (Eşitlik 3.6).

$$\rho = \frac{M}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.6)$$

Bir akış, akış boyunca yoğunluğunun değişim miktarına göre sıkıştırılabilir veya sıkıştırılmaz olarak tanımlanabilir. Akışkanın yoğunluğu akış boyunca sabit kalıyorsa veya sabit olarak kabul edilmişse akışın sıkıştırılmaz olduğu söylenebilir. Bu durumda yapılan analizlerde akışkanın hacmi, hareketi boyunca değişmeyecektir. Viskozite (μ); akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnci ifade eder (Eşitlik 3.7).

$$\mu = \left[\frac{Ns}{m^2} \right] = [Posie] \quad (3.7)$$

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde akışkanın hareketini tanımlamak için kontrol hacimlerinden faydalanılır. Her bir kontrol hacmine kütle, momentum ve enerji korunum yasalarının uygulanarak akışkanın hareketi belirlenir. Şekil 3.3'de boyutları (d_x, d_y, d_z) ve merkezi orijinden uzakta rastgele bir nokta (P) olan bir kontrol hacmi gösterilmektedir. Kontrol hacminin merkezindeki yoğunluk ρ ve hız bileşenleri u, v ve w olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.3 P merkezli dx, dy, dz boyutlarında bir kontrol hacmi.

Şekil 3.3'te P merkezli bir kontrol hacmi görülmektedir (Cengel ve Cimbala 2008). Kontrol hacmi için kütle korunumu kanunu; kapalı bir sistemde var olan çevrimler ve işlemler ne olursa olsun, kütle sabit kalacağını belirten kanundur. Dolayısıyla bir kontrol hacmi için kütle korunumu Eşitlik 3.8'de verilmiştir.

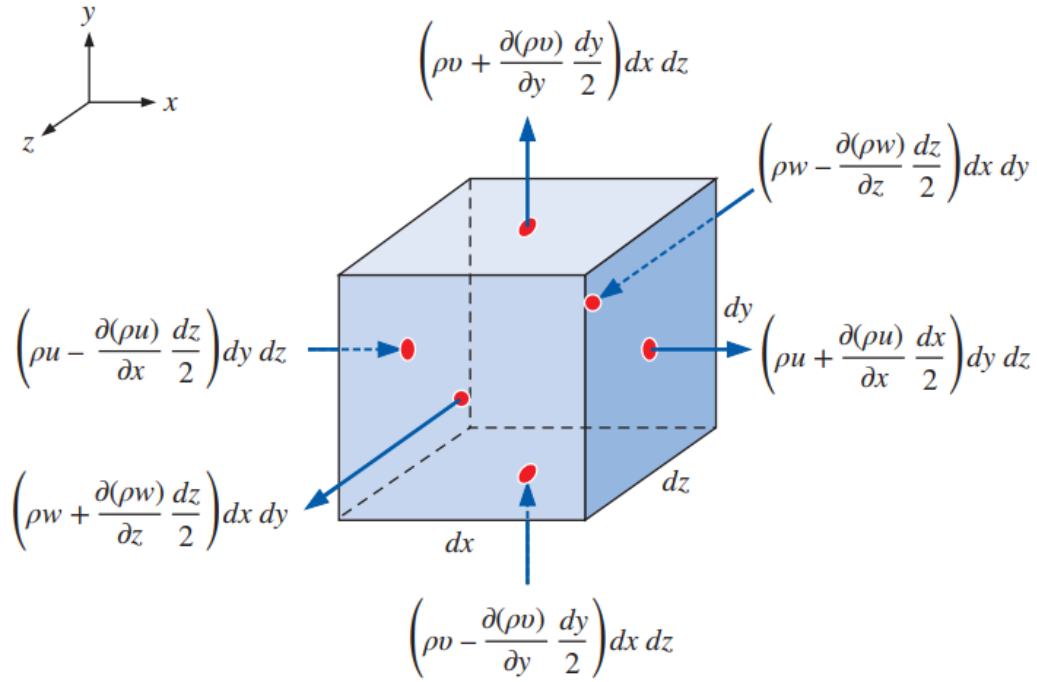
$$\int_{KH} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \Sigma_{giren} \dot{m} - \Sigma_{çıkan} \dot{m} \quad (3.8)$$

Aynı kontrol hacmi içindeki kütle değişim hızı ise Eşitlik 3.9 ile hesaplanır.

$$\int_{KH} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (3.9)$$

Kontrol hacmi olarak seçilen her bir sonlu eleman için kütle korunumu – süreklilik denklemi (Şekil 3.4):

$$\left[\begin{array}{c} \text{Kütle Değişimi} \\ \text{(Birim zamanda)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Giren Kütle} \\ \text{(Birim zamanda)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Çıkan Kütle} \\ \text{(Birim zamanda)} \end{array} \right] \quad (3.10)$$



Şekil 3.4 Kontrol hacmi üzerinde kütle giriş ve çıkışları.

Şekil 3.4'te kontrol hacmine giren ve çıkan kütle tanımlamaları görülmektedir (Cengel ve Cimbala 2008). kontrol hacmi içerisindeki kütlenin birim zamandaki net değişim hızı kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan kütlenin farkına eşittir. Dolayısıyla kontrol hacminin bütün yüzeylerinden giren ve çıkan net kütle hesaplamak için Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12 kullanılabilir.

$$\begin{aligned} \Sigma_{giren} \dot{m} \cong & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{çıkan} \dot{m} \cong & \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz + \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz \\ & + \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy \end{aligned} \quad (3.12)$$

Kontrol hacminin bütün yüzeylerinden giren ve çıkan kütleyle ait denklemler kütlenin

birim zamanda değişim hızı ve kütle korunumu denklemleri ile birlikte yeniden düzenlenirse Eşitlik 3.13 elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dy dz \quad (3.13)$$

Kontrol hacmini ifade eden $(dx \ dy \ dz)$ terimleri sadeleştirildikten sonra Kartezyen koordinatlar için kütle korunumu denklemi elde edilir (Eşitlik 3.14).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

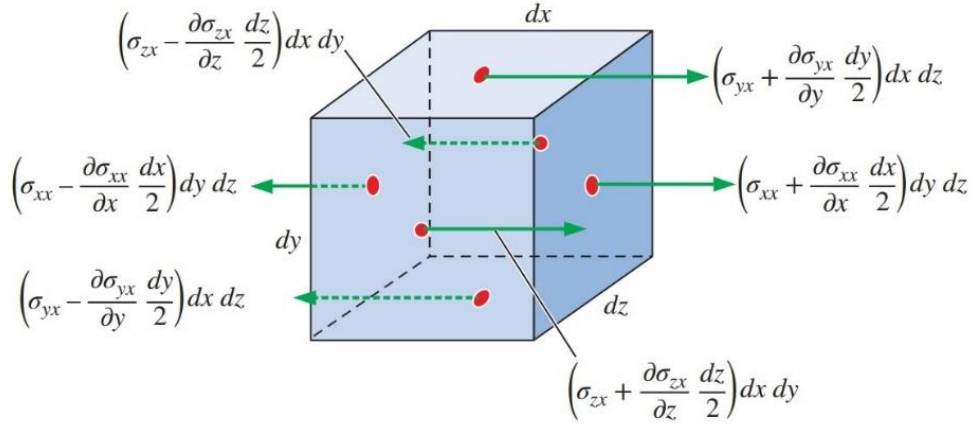
Süreklilik denklemi alternatif olarak vektörel formda ifade edilebilir (Eşitlik 3.15).

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15'te $\left(\frac{D\rho}{Dt}\right)$ terimi yoğunluğun maddesel türevini ifade eder. Eğer akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilirse denklemden yoğunluk, zaman veya konum fonksiyonu olmaz. Ekstruder analizlerinde kullanılan akışkanın sıkıştırılmaz olduğu varsayımı kabul edildiğinde $\left(\frac{D\rho}{Dt}\right) \equiv 0$ olacaktır.

Kontrol hacmine kütle kuvvetleri ve yüzey kuvvetleri olmak üzere iki türde kuvvet etki eder. Yer çekimi, manyetik alan kuvvetleri gibi kuvvetler kütle kuvvetleridir. Akışkanın viskozitesi ve basınç gibi nedeniyle oluşan kuvvetler ise yüzey kuvvetleridir. Bir kontrol hacmine etkileyen x yönündeki kuvvetler Şekil 3.5'te görülmektedir;

$$\Sigma \vec{F} = \Sigma \vec{F}_{yerçekimi} + \Sigma \vec{F}_{basınç} + \Sigma \vec{F}_{viskoz} + \Sigma \vec{F}_{diğer} \quad (3.16)$$



Şekil 3.5 Kontrol hacmine etkiyen kuvvetler.

Şekil 3.5’te kontrol hacmine etkiyen kuvvetler görülmektedir (Cengel ve Cimbala 2008). Sadece x bileşeninde kontrol hacmine etkiyen kuvvetler dikkate alındığında Eşitlik 3.17 elde edilir.

$$\Sigma \vec{F}_x = \Sigma \vec{F}_{x,kütle} + \Sigma \vec{F}_{x,yüzey} = \int_{KH} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) dV + \Sigma_{çıkan} \beta \dot{m} u - \Sigma_{giren} \beta \dot{m} u \quad (3.17)$$

Kontrol hacmi içerisinde x-momentum bileşeninin değişim hızı ve kontrol yüzeyinden x yönünde çıkan net momentum akışı Eşitlik 3.18 elde edilir.

$$\int_{KH} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) dV \cong \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) dx dy dz \quad (3.18)$$

$$\Sigma_{çıkan} \beta \dot{m} u - \Sigma_{giren} \beta \dot{m} u = \left(\frac{\partial}{\partial x} (\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w u) \right) dx dy dz \quad (3.19)$$

x- yönündeki kütle kuvveti (Eşitlik 3.20) ve yüzey kuvvetleri (Eşitlik 3.21) ile hesaplanabilir.

$$\Sigma \vec{F}_{x,kütle} = \Sigma \vec{F}_{yerçekimi} = \rho g_x dx dy dz \quad (3.20)$$

$$\Sigma \vec{F}_{x,yüzey} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{zx} \right) dx dy dz \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21 yeniden düzenlendiğinde kontrol hacmi için x yönündeki momentum

denkleminin diferansiyel formu elde edilir. Benzer işlemler y (Eşitlik 3.23) ve z (Eşitlik 3.24) yönleri için uygulandığında kontrol hacmi için momentum denklemleri elde edilir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{zx} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = \rho g_y + \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{zy} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \rho g_z + \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_{zz} \quad (3.24)$$

Bu haliyle Kartezyen koordinatlar için ifade edilen kütle korunum denklemleri vektörel olarak Eşitlik 3.25'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (3.25)$$

Bu denklem Cauchy Denklemi olarak bilinir ve hem sıkıştırılabilir akışlar için hem de sıkıştırılamaz akışlar için geçerlidir. Süreklilik ve momentum denklemlerinde bulunan bilinmeyen değişkenler denklemlerin çözümünü zorlaştırır. Bir denklem takımının matematiksel olarak çözülebilmesi için bilinmeyen değişkenlerin sayısı kadar denkleme ihtiyaç vardır. Bu aşamada Navier-Stokes denklemleri Cauchy denklemindeki gerilme tensörü bileşenlerinin hız alanı ve basınç alanı olarak ifade etmemizi sağlar.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümünde akışkanın hareketini tanımlamak için Navier-Stokes denklemleri kullanılır. En basit haliyle akışa kütle, moment ve enerji korunum yasalarının uygulanmasıdır. Navier-Stokes denklemleri; akışkan içerisindeki birim kütleye etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Böylece, Navier-Stokes denklemlerinin, verilen akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olduğu söylenebilir. Sıkıştırılabilir bir akış için Kartezyen koordinatlarda bünye denklemleri;

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.26)$$

x- yönünde momentum:

$$\begin{aligned} & \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

y- yönünde momentum:

$$\begin{aligned} & \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

z- yönünde momentum:

$$\begin{aligned} & \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Enerji denklemi:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \beta T \left(u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \Phi \quad (3.30)$$

$$\Phi = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (3.31)$$

İdeal Gaz yasası:

$$P = \rho RT \quad (3.32)$$

Eşitlik 3.30, Eşitlik 3.31 ve Eşitlik 3.2'de; R özgül ideal gaz sabiti, λ ikinci viskozite katsayısı; c_p sabit basınçta özgül ısı; k ısı iletim katsayısı; β ısıl genleşme katsayısıdır. Verilen bu eşitlikler Kartezyen koordinatlarda Newton tipi bir akışkan sürekli, sıkıştırılabilir, laminar akışa ait hareket için geçerlidir. Verilen altı eşitlikte altı bilinmeyen değişken vardır (ρ, u, v, w, T, P). Sıkıştırılabilir bir akışta akışkanın yoğunluğu sabit değildir ve denklem takımlarında değişken olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla denklemler viskoz etkileri içerir. Verilen denklemler laminar akış içindir. Türbülans içeren akışlarda denklemler, RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklem sistemi haline getirilerek bir türbülans modelini içerecek şekilde tekrar düzenlenir. Ekstruder analizlerinde türbülans modeli kullanıldığında ilgili bölümde türbülans modeline dair bilgiler sunulmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışması sırasında yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular altı ana başlıkta sunulmuştur. Çalışma kapsamında öncelikli olarak 3B yazıcılarda karşılaşılan sorunlar tespit edilmiştir. Tespit edilen sorunlar uzun süre farklı projeler için yapılan üretimler sırasında karşılaşılan sorunlardır. Tespit edilen üretim sorunları sistematik olarak sınıflandırılmıştır ve “4.1 FFF 3B Yazıcılarda Karşılaşılan Üretim Sorunları” başlığında sunulmuştur. Elde edilen bulgular üretim sorunlarının önemli bir kısmının 3B yazıcının ekstruder tasarımı ile ilgili olduğunu göstermiştir.

Ekstruder birden fazla parçadan oluşan ve her bir parçanın farklı fonksiyonlarının bulunduğu bir sistemdir. Ekstruder ısıtma modülü, soğutma modülü ve filament besleyici olmak üzere üç ana yapıdan oluşur. Isıtma modülü nozul ve ısıtıcı bloktan oluşur. Soğutma modülü ise bir fan ve soğutucudan oluşur. Her iki modül ısı bariyeri adı verilen bir yapıyla birbirine bağlanır. Ekstrüzyonun başarılı olabilmesi için nozul, ısıtıcı blok, ısı bariyeri, soğutucu ve soğutma fanının her birinin uygun tasarıma sahip olması gerekir.

Ekstruder’in öncelikli görevi filamentin eritilmesidir ve bu işlem nozul içerisinde gerçekleşir. Bu nedenle çalışmada öncelikli olarak filamentin nozul içerisindeki davranışına dair çalışmalar yapılmıştır. Filamentin nozul içerisindeki akışı ve nozul tasarımlarının optimizasyonuna dair elde edilen bulgular “4.2 Nozul üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları” başlığı altında sunulmuştur.

Nozul ısısının kontrolü ısıtıcı blok yardımıyla yapılır. Tezin “4.3 Isıtıcı blok üzerinde yapılan çalışmalar” kısmında yeni bir ısıtıcı blok tasarımı önerilmiştir. Bununla birlikte ısıtıcı blok üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörlerinin konumu optimize edilmiştir.

Isıtma modülü ve soğutma modülleri arasındaki bağlantı ısı bariyeri adı verilen parça ile sağlanır. Bu parça ekstruder’in sıcak ve soğuk kısımları arasındaki parçadır. Isı bariyeri tasarımının iyileştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar “4.4 Isı bariyeri üzerinde yapılan çalışmalar” başlığında sunulmuştur.

Ekstruder'in başarılı bir üretim yapabilmesi için filamentin soğutma modülü kısmında düşük sıcaklıklarda bulunması gerekmektedir. Çalışma kapsamında yeni bir soğutucu tasarımı önerilmiştir. Önerilen yeni tasarımla ilgili bulgular "4.5 Soğutma modülü üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları" başlığı altında sunulmuştur. Soğutma modülünün optimizasyonu sırasında yapılan simülasyonların doğrulanması için deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular "4.6 Soğutucu fanlarla yapılan deneysel çalışmalar" başlığı altında sunulmuştur.

4.1 FFF 3B Yazıcılarda Karşılaşılan Üretim Sorunları

Bu çalışmada FFF 3B yazıcılarda karşılaşılan üretim hataları tespit edilmiştir. Üretim hataları doktora çalışması süresince kullanılan ve detaylı bilgileri "3.1 Çalışmalar sırasında kullanılan 3B yazıcılar" bölümünde verilen 3B yazıcılar ile yapılan üretimler sırasında tespit edilmiştir. Ürün hatalarının sebepleri ve bu hataların giderilmesi için öneriler sistematik bir şekilde sunulmuştur. Çalışmada tespit edilen hatalar ve bu hataların giderilmesi için verilen öneriler 3B yazıcının türünden bağımsız olarak sunulmuştur. Benzer hatalar FFF 3B yazıcıların bütün türlerinde karşılaşılmaktadır. Dolayısıyla tespit edilen hatalar ve çözüm önerileri sadece çalışmada kullanılan yazıcılar için değil, bütün FFF 3B yazıcılar için geçerlidir.

FFF 3B yazıcılar ile üretilen parçaların kalitesi mekanik dayanımı, ölçüsel doğruluğu ve yüzey toleranslarıyla ilgilidir. Üretilen parçanın kalitesi dilimleyici yazılımda belirlenen parametrelere ve yazıcıda kullanılan donanımların performansına bağlıdır (Gebisa ve Lemu, 2019). FFF 3B yazıcılarda üretilen ürünlerin kalitesinin artırılabilmesi için optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi ve kullanılması önem arz etmektedir. Üretim parametreleri üretilen ürünün kalitesine doğrudan etki etmektedir. FFF 3B yazıcıda üretilen ürünlerin yüzey pürüzlülüğü ürünün kalitesini ortaya koyan önemli bir veridir (Kim vd. 2018). ABS filament kullanılarak yapılan bir çalışmada üretim sırasında dökülen her bir katmanın dökülme hızı ve katman kalınlıklarının yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etki ettiği ortaya koyulmuştur (Böğrekci vd. 2019). FFF 3B yazıcılar ile yapılan üretimlerde filamentin ergitilme sıcaklığı yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. ABS 400 filament ile 265 – 285 °C sıcaklıkta yapılan üretimlerde yüzey pürüzlülüğünün

5.83 μm olduğu bulunmuştur (Mohamed vd. 2015). Filament çapı, ekstrüzyon hızı ve üretim hızı FFF ile üretilen parçaların ölçüsel hassasiyetine ve toleranslarına doğrudan etkilemektedir. Extrüzyon hızı ve üretim hızının ürün toleranslarına etkisinin olduğu bilinmektedir (Geng vd. 2019). FFF 3B yazıcı ile yapılan üretim süreci çeşitli ısı transferi problemlerini de beraberinde getirmektedir. Nozul ve filament arasında, katmanların kendi arasında, baskı tablası ve ürün arasında, ortam ile ürün arasında sürekli bir ısı transferi söz konusudur. Üretim sürecindeki ısı transferi mekanizmalarının üretilen parçanın kalitesine önemli etkileri olabileceği bilinmektedir (Yuran ve Yavuz 2020).

Literatürde yapılan çalışmalar çoğunlukla üretilen ürünlerin yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikleri ile ilgilidir. Bununla birlikte yazıcı parametrelerinin ürüne olan etkisi üzerine yapılan çalışmalar da oldukça fazladır. Ürünlerin mekanik özellikleri ve yüzey kaliteleri önem arz etmekle beraber ürünlerin fonksiyonel özellikleri de önemlidir. FFF 3B yazıcılar ile üretim yapılırken ürünün fonksiyonel özelliklerini etkileyecek sorunlarla sık sık karşılaşmaktadır. Üretim sırasında termal etkiler nedeniyle üründe çarpılmalar ve geometrik doğruluktan sapmalar meydana gelmektedir. Benzer şekilde 3B yazıcının ekstruderı ile ilgili sorunlar nedeniyle 3B dijital model ile üretilen ürün arasında makro düzeyde farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu tür üretim problemleri düşük maliyetli yazıcılarda daha sık karşılaşılma ile beraber yüksek maliyetli profesyonel yazıcılarda da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmanın amacı üretim sorunlarına yeni bir bakış açısıyla yaklaşarak; 3B FFF yazıcılarla yapılan üretim sırasında ürünü fonksiyonel olarak kullanılamaz hale getiren sorunlar değerlendirmiştir. FFF 3B yazıcılarda üretim sırasında karşılaşılan hataların üç temel mekanizma ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bunlar termal, mekanik ve yazılım olarak kategorize edilebilir. Ürün hatalarında dair bir sınıflandırma yapılmıştır ve ürün hataları üretim örnekleriyle birlikte tanıtılmıştır. Aynı zamanda bu hataların giderilmesine yönelik yapılabilecek çalışmalara dair öneriler sunulmuştur. Karşılaşılan hataların önemli bir kısmı ekstruder'ın performansı ile ilgilidir. Tespit edilen hatalar yeni bir ekstruder tasarımı için ön verileri ve temel yaklaşımları ortaya çıkarmıştır.

3B FFF yazıcılarda üretim sırasında sık karşılaşılan 21 temel üretim sorunu tespit

edilmiştir. Bu sorunlar; ekstrüzyon sürecinde karşılaşılan sorunlar, katman üretiminde karşılaşılan sorunlar, ekstruder ve tolerans sorunları, yüzey sorunları olmak üzere 4 kategoride incelenebilir.

Çizelge 4.1 3B yazıcılarda tespit edilen üretim sorunları

Üretim Sorunu	Sorun Kaynağı		
	Ekstruder	Mekanik	Yazılım
S1: İlk katman ekstrüzyon sorunları	X	X	
S2: Fazla ekstrüzyon	X		X
S3: Yetersiz ekstrüzyon	X		X
S4: Tutarsız ekstrüzyon	X		X
S5: Ekstrüzyonun yarıda kesilmesi	X	X	
S6: Yüksek sıcaklıkta ekstrüzyon	X		X
S7: Ürün yüzeyinde taşmalar	X	X	
S8: Lif oluşumu	X		X
S9: İlk katmanda adezyon sorunu		X	
S10: Katman kaymaları		X	
S11: Katmanlar arasında ayrılmalar		X	
S12: Termal çarpılmalar		X	
S13: Ölçü hassasiyeti ve tolerans sorunları	X	X	X
S14: Küçük detayların üretim sorunları	X		
S15: Destek yapısı sorunları			X
S16: Filament aşınmaları	X		X
S17: Nozul tıkanması	X		
S18: İç yapı ve dış yüzeyde boşluklar	X		X
S19: Yüzeyde kıvrılma ve pürüzlü köşeler	X		
S20: Yüzeylerde iz oluşumu		X	
S21: Zayıf İç Yapılar			X
Toplam	14	9	10

Çalışmada tespit edilen üretim sorunları incelendiğinde ekstruder ile ilgili on dört sorun tespit edilmiştir. Yazıcının hareket mekanizmaları ve motorları gibi mekanik donanımıyla ilgili olabilecek dokuz sorun tespit edilmiştir. Dilimleyici yazılım ve bu yazılımda kullanılan parametrelerle ilgili olabilecek on sorun tespit edilmiştir. Tespit edilen bu

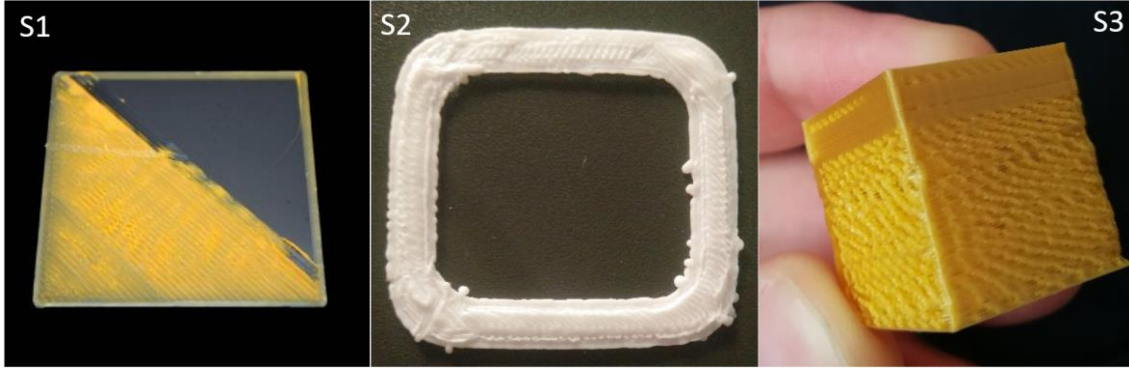
sorunların bazıları yazıcının sadece tek başına ekstruder kaynaklı veya tek başına yazılım gibi alt sistemi ile ilgilidir. Ancak bazı sorunların birden fazla alt sistemle ilgili olduğu tespit edilmiştir. Ekstruder tasarımının optimizasyonu ile 3B FFF yazıcılarda karşılaşılabilen sorunların önemli bir kısmının önüne geçmek mümkündür. Burada tespit edilen sorunlar ekstruder optimizasyonu için bir temel oluşturmaktadır.

4.1.1 Ekstrüzyon Sürecinde Karşılaşılan Sorunlar

FFF 3B yazıcılar ile üretim yapılırken ekstrüzyonun üretimin her anında çok iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Ekstrüzyon kontrolü yetersiz olduğunda ürünlerde hatalar kaçınılmaz hale gelir.

Ekstrüzyon ile ilgili üretim sorunları çoğunlukla ekstruder performansı ile ilgilidir. Ancak ekstruder'in yanı sıra yazıcının diğer donanımları ve dilimleyici yazılım parametreleri de ekstrüzyon hatalarına sebebiyet verebilir. Ekstrüzyon ile ilgili en sık karşılaşılan sekiz hata numaralandırılarak aşağıda listelenmiştir. Ekstrüzyon ile ilgili karşılaşılan bu sorunlara dair örnek görseller Resim 4.1'de verilmiştir.

- S1: İlk katman ekstrüzyon sorunları,
- S2: Fazla ekstrüzyon,
- S3: Yetersiz ekstrüzyon,
- S4: Tutarsız ekstrüzyon
- S5: Ekstrüzyonun yarıda kesilmesi
- S6: Yüksek sıcaklıkta ekstrüzyon (overheating),
- S7: Ürün yüzeyinde taşmalar
- S8: Lif oluşumu.



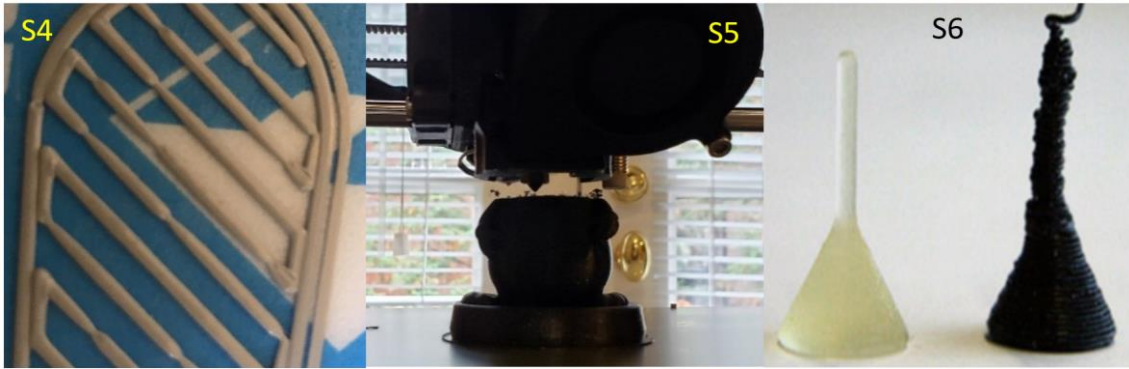
Resim 4.1 Ekstrüzyon sırasında karşılaşılan sorunlar; ilk katman ekstrüzyon sorunları (S1), fazla ekstrüzyon (S2), yetersiz ekstrüzyon (S3).

S1 olarak numaralandırılan ve Resim 4.1 S1’de görülen üretim sorunu; yazdırma işleminin başlangıcında ilk katmanların üretimi sırasında yeterli ekstrüzyon olmamasıdır. Şekilde görüldüğü gibi baskı tablasının bir kısmı için yeterli ekstrüzyon gerçekleşirken diğer kısımlarda üretim gerçekleşmemiştir. Bu sorun birkaç nedeni olabilir. Bunlardan biri filamentin nozul bölgesinde bulunmaması olabilir. Nozul sıcak durumda boşta bekletilirken içinde bulunan sıcak filament ergiyerek uçtan akma eğilimindedir. Akan filament nozul içinde bir miktar boşluk oluşmasına sebep olur. Baskı almaya başlamadan eğer ön ısıtma yapılıyorsa yine benzer durumla karşılaşılabılır. Bu durum nedeniyle nozulda bulunması gereken miktardan daha az filament kalırsa baskı başlatıldığında bu boşluk giderilene kadar ilk katmanlar oluşturulamayacaktır. Bir diğer neden nozul ve baskı tablası arasındaki mesafenin çok kısa olmasıyla ilgilidir. Eğer nozul baskı tablasının yüzeyine çok yakın ise ekstruder ile sürülen filament burada oluşan basınç nedeniyle nozuldan çıkamayacaktır. Sorunun bir diğer sebebi ise ekstruder’in tıkalı olmasıdır.

S2 ve S3 numaralı sorunlar (Resim 4.1 S2 ve Resim 4.1 S3) sırasıyla ekstruder’in yetersiz ve gereğinden fazla ekstrüzyon yaptığı durumları gösteren örneklerdir. 3B FFF yazıcılar ile yapılan üretimlerde katmanları oluşturacak malzemenin ekstrüzyon miktarı önemlidir. Dilimleme yazılımları filamentin hangi bölgeye ve hangi katmana ne kadar ekstrüzyon yapılacağına dair hesaplamaları yapar ve yazıcının donanımlarını bu parametrelere uygun olarak kontrol eder. Ancak 3B FFF yazıcılarda filamentin ekstrüzyonu ile ilgili herhangi bir geri dönüt sistemi bulunmamaktadır. Yani nozuldan çıkan filament miktarı herhangi bir donanım ile ölçülememektedir. Dilimleme yazılımları filamentin ne kadar gönderileceğine dair teorik bir hesaplama yapar ve buna göre ekstrüzyon işlemi

donanımlar tarafından gerçekleştirilir. Ancak yazılımın hesapladığı miktar ile gerçek hayattaki durum her zaman örtüşmeyebilir. Bu nedenle her ne kadar yazılımın yaptığı hesaplamalara uygun miktarda ekstrüzyon yapıldığı öngörülse de bazı durumlarda ekstruder ile alakalı sebeplerden dolayı nozuldan istenen miktarda ekstrüzyon elde edilemeyebilir. Aynı şekilde bazı durumlarda ise gerektiğinden fazla ekstrüzyon oluştuğu gözlemlenebilir.

Ekstrüzyonun yeterli olmadığı durumlarda katmanlar arasında boşlukların oluştuğu gözlenecektir. Yazılımın hesapladığı ekstrüzyon miktarı ile nozuldan çıkan ekstrüzyonun aynı miktarda olduğunu tespit edebilmek için basit modeller üzerinde çalışma yapılabilir. Örneğin 20 mm boyutlarında bir küpün dış yüzeylerinin üç katman halinde üretilmesi ekstrüzyon miktarı için iyi bir karşılaştırma yapılmasını sağlayabilir (Resim 4.1 S3). Küpün yüzeylerinde oluşan katmanlar incelendiğinde katmanlar arasında boşluklar oluşmuşsa muhtemelen ekstrüzyon miktarı ile ilgili bir tutarsızlık söz konusudur. Küpün yüzeylerindeki katmanların etrafında dışarı taşan fazla malzemeler tespit edilirse yine bu sorun da ekstrüzyon miktarı ile ilgilidir.



Resim 4.2 Ekstrüzyon sırasında karşılaşılan sorunlar, tutarsız ekstrüzyon (S4), ekstrüzyonun yarıda kesilmesi (S5), yüksek sıcaklıkta ekstrüzyon (S6).

3B FFF yazıcı ile istenen hassasiyette parçalar üretilebilmesi ideal ekstrüzyonun sağlanmasıyla mümkündür. Nozuldan çıkan plastik miktarının mutlaka tutarlı olması gerekir. Eğer ekstrüzyon parçanın farklı bölgelerinde farklı miktarlarda oluyorsa ürünün kalitesi bu durumdan mutlaka etkilenecektir. Resim 4.2 S4'te tutarsız ekstrüzyonun gerçekleştiği bir örnek görülmektedir. Bu sorunun öncelikli nedeni ekstruder'in Filament besleyici yapısı ile ilgilidir. Filament besleyicilerin birçoğunda filamentin kavranması

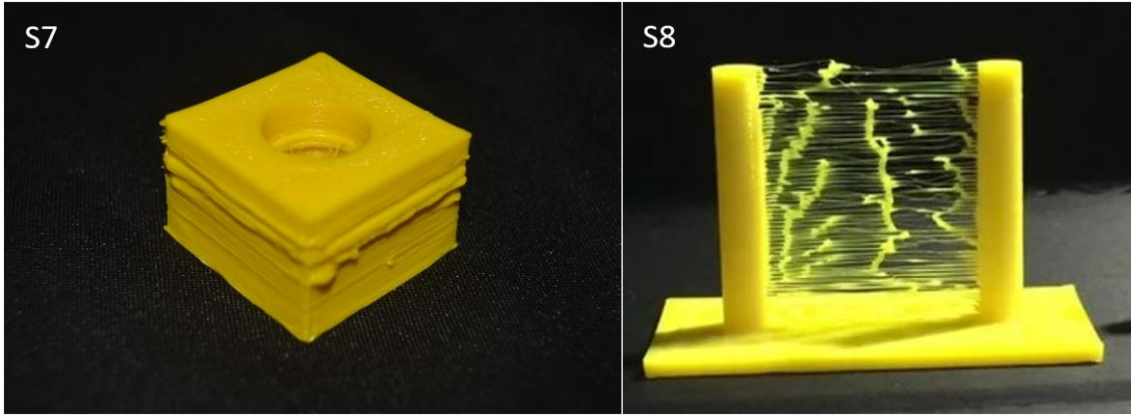
için gerekli sürtünmeyi artırıp azaltmaya yarayan bir mekanizma bulunur. Eğer filamentin sürülmesini sağlayacak yeterli sürtünme oluşmuyorsa nozula yeterli miktarda plastik iletilemeyecektir. Dolayısıyla tutarlı bir ekstrüzyon sağlanamayacaktır. Tutarlı ekstrüzyon elde edilemediğinde Filament besleyici mekanizma kontrol edilmelidir. Filament besleyici sorunsuz çalışıyorsa ekstruder'in ısıtma modülü kontrol edilmelidir. Isıtma modülündeki sıcaklık dalgalanmalarının fazla olması nozul bölgesinde yüksek basınçların oluşmasına sebep olabilir. Bu durum ekstrüzyonun tutarsız olmasına sebep olur.

3B yazıcı ile üretim yaparken ilk katmanların ekstrüzyonu sorunsuz gerçekleşmesine rağmen, ilerleyen aşamalarda ekstrüzyon aniden durabilir (Resim 4.2 S5). Üretim devam ederken hammadde olarak sürülen filament bitmediyse ekstruder'in filament besleyici yapısı kontrol edilmelidir. Eğer filament besleyici filamenti olması gerektiği gibi sürüyorsa ekstruder'in diğer yapılarının tıkanmış olabilir. 3B FFF yazıcı üzerindeki motorlar arasında en çok zorlanan motor filament besleyicide bulunan motordur. Yazdırma süresi boyunca sürekli filamenti ileri ve geri sürebilmek için yüksek hızlarda çalışırlar. Aynı zamanda bu motorlar ısıtma modülünün çok yakında bulunurlar. Isıtma modülündeki sıcaklık kontrolü sağlanamadığında bu motor gereğinden fazla ısınır. Besleyici motoru aşırı ısındığında zarar görmemesi için termal kesiciler devreye girerek sistemi daha fazla ısınmadan durdurur. Böyle bir durumda yazıcının X – Y eksenindeki hareketini sağlayan motorlar çalışmaya devam ederken, filamenti süren motorun hiç hareket etmez.

Nozuldan çıkan yarı sıvı filamentin sıcaklığı 190 – 250 °C arasında değişebilir. Katman ilk oluşturulduğu anda filament henüz sahip olduğu sıcaklığı koruyacaktır. Filament sıcaklığı yüksek olduğunda viskozitesi daha az olacaktır ve şekil değiştirmesi kolaylaşacaktır. Filament nozuldan çıktıktan sonra soğumaya başladıkça hızla katılaşıp ve katılaştığı andaki şeklini daha iyi korumaya başlar. Nozul filamenti ergitebilecek ve sonrasında kolayca akabileceği bir sıcaklıkta olmalıdır. Bunun yanı sıra filament nozuldan ayrıldıktan sonra istenen ölçülerdeki şeklini koruyacak hızda soğuyarak katılaşabilmelidir. Nozul sıcaklığı ve filamentin katılma hızı arasında ideal bir dengenin olması ürün hatalarını azaltacaktır. Eğer bu denge sağlanamazsa ürün hassasiyeti,

toleransları ve şekli ile ilgili hatalarla karşılaşmak mümkündür. Resim 4.2 S6'da açıklanan soruna bir örnek gösterilmektedir.

Fazla ısı nedeniyle üründe oluşan hataların ilk sebebi nozuldan çıkan filamentin yeterli hızda soğutulmamasıdır. Filament katmanı oluşturur oluşturmaz nozulun verdiği şekil ve konumu kaybetmeden hızla soğutulmalıdır. Bu durum ekstruder tasarımında, üretilen parçayı soğutacak bir fan eklenmesinin faydalı olabileceğini göstermektedir. 3B FFF yazıcıların üretim hızı sahip oldukları donanımların sınırları içinde kontrol edilebilmektedir. Katmanların üretim hızı artırılabilir. Eğer katmanların örülme hızı çok fazla artırılsa örülen bir katman henüz yeteri kadar katılaşmaya fırsat bulamadan üzerine yeni bir katman gelecektir. Büyük parçaların üretiminde genellikle katmanın katılaşması ile ilgili bir problem çıkmaz. Alan geniş olduğu için üretim hızı artsa bile filament katılaşacak yeterli süreyi bulacaktır. Ancak özellikle küçük parçaların üretiminde ekstruder'ın gezeceği mesafe kısılacak dolayısıyla katmanların katılaşması için daha az bir süre kalacaktır.



Resim 4.3 Ekstrüzyon sırasında karşılaşılan sorunlar; ürün yüzeyinde taşmalar (S7) ve lif oluşumları (S8).

Resim 4.3 S7'de ürün yüzeyinde taşmalar ve Resim 4.3 S8'de lif oluşumları görülmektedir. 3B baskı sırasında ekstruder baskı tablası üzerinde farklı konumlara hareket ederken boşta gezdiği anda ekstrüzyon işlemi durdurulur ve üretime devam edileceği anda tekrar başlatılır. Düzenli ekstrüzyon gerektiği durumlarda birçok ekstruder stabil çalışır ve istenen ekstrüzyonu sağlar. Ancak ekstrüzyonun durdurulup tekrar çalıştırılması sırasında bazı ekstruderlarda sapmalar oluşabilir. Özellikle ekstrüzyonun

tekrar başladığı anda gerektiğinden fazla malzemenin döküldüğü görülebilir. Bu durumda üretilen parçanın dış yüzeyinde ekstrüzyonun tekrar başladığı anda çıkıntı ve taşmalar oluşabilir.

Sık karşılaşılan sorunlardan bir diğeri de istenmeyen liflerin oluşmasıdır. İstenmeyen lifler genellikle ekstruder bir konumdan başka bir konuma hareket ederken nozuldan eriyik haldeki filamentin sızması ile oluşur. Üretim tamamlandıktan sonra üründe oluşan bu fazla liflerin temizlenmesi çok sorun oluşturmaz ancak yine de istenmeyen lif oluşumu fazla ise ürün açısından problem oluşturacaktır. Özellikle karmaşık yapıları ürünlerin üretiminde bu lifler ürün açısından istenmeyen özellik olacaktır. Bu sorun çoğunlukla geri çekme (Retraction) parametreleri ile ilgilidir. Ürünün belirli bir bölgesinin katmanları örüldükten sonra ürünün tamamlanması için ekstruder diğer bölgeye hareket eder. Hareket sırasında filament ekstruderda mevcut pozisyonunda kalırsa eriyerek akmaya devam edecektir. Ekstruder'in boştaki hareketi sırasında filament geri çekilir. Ekstruder örülecek olan katmanın olduğu bölgeye tekrar gelindiğinde filament tekrar ileri sürülür ve üretime devam edilir. Retraction ekstruder'in boştayken yaptığı bu hareket sırasında filamentin sızmasını önlemek için geri çekilmesi işlemi ifade eder. Retraction sürecinde oluşabilecek yanlış hesaplamalar ve aksaklıklar istenmeyen liflerin oluşmasına sebebiyet verebilir. Her iki üretim sorunu da ekstruder'in tasarımının iyileştirilmesi ile azaltılabilir. Ekstruder üzerindeki filament besleyici, soğutma ve ısıtma modülleri birbirleriyle uyum içinde çalıştığında ekstrüzyon daha kararlı hale gelecektir ve böylece ürün üzerinde oluşan çıkıntı ve lif oluşumu gibi hatalar azaltılabilir.

4.1.2 Katmanların Üretiminde Karşılaşılan Sorunlar

FFF 3B yazıcılar katmanların üst üste eklenmesi ile üretim yaparlar. Dolayısıyla her bir katman üretim için oldukça önemlidir. Katmanların oluşumu yazıcının Z ekseninde hareketi ve ekstruder'in uyumlu bir şekilde çalışmasıyla mümkündür. Katmanların üretimi sırasında ilk katman özellikle oldukça önemlidir. Çünkü parçanın bütünü ilk katman üzerine örülür. Benzer şekilde her bir katmanın başarılı bir şekilde örülebilmesi için kendinden önceki katmanın da doğru geometrik konumda ve kararlı bir yapıda olması gerekir.

Katmanların üretimi sırasında sık karşılaşılan dört temel sorun tespit edilmiştir. Bu sorunlar S9, S10, S11 ve S12 koduyla listelenmiştir;

- S9: İlk katmanda adezyon sorunu,
- S10: Katman kaymaları,
- S11: Katmanlar arasında ayrılmalar,
- S12: Termal çarpılmalar



Resim 4.4 Katmanların üretiminde karşılaşılan sorunlar; ilk katmanda adezyon sorunu (S9), katman kaymaları (S10).

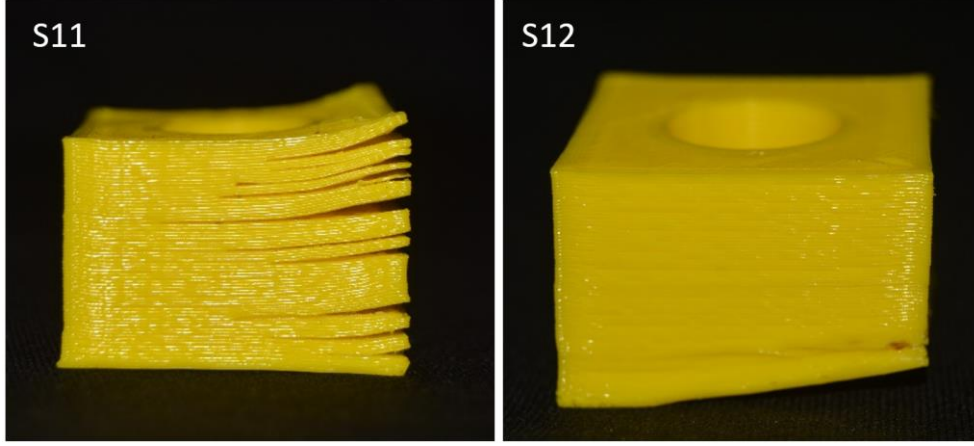
Baskı başlangıcındaki ilk katmanın yazıcının tablasına yeterli güçte yapışması oldukça önemlidir. Üretilecek olan ürünün kalan yapısı ilk katmanların üzerine yerleştirilecektir. Dolayısıyla ilk katmanların tablaya düzgün bir şekilde yapışması gerekir. Eğer ilk katmanlar tablaya yapışmıyorsa üretimin ilerleyen aşamalarında sorunlara yol açacaktır (Resim 4.4 S9).

Üretimin düzgün bir şekilde yapılabilmesi için baskı alınacak tablanın tam anlamıyla düz ve uygun seviyede olması gerekir. Eğer tabla seviyesi uygun yükseklikte değilse nozul tablaya gereğinden fazla yakın veya uzak pozisyonda bulunabilir. Her iki durum da istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Özellikle nozul ile alt tabla arasındaki mesafe gereğinden fazla ise dökülen filament alt tablaya yapışmayabilir. İlk katmanların üretimi sırasında baskı hızı yüksek seçilirse plastiğin tablaya yapışmak için yeterli süresi olmayabilir. Katmanların adezyonunda sıcaklık önemli bir etkidir. Eğer filament henüz katılaşmadan ve adezyon süreci tamamlanmadan üzerine yeni bir katman örülmeye başlanırsa katılaşmayan katmanlarda sorun ortaya çıkacaktır. Özellikle adezyonun en

önemli olduğu katman tablaya ilk örülen katmanlardır. Bu nedenle ilk katmanlar örülürken baskı hızının azaltılması ve böylece yarı sıvı haldeki filamentin oda sıcaklığına düşerek katılaşması sağlanmalıdır. 3B yazıcılar ile üretim yapılırken katmanların bozulmaya uğramadan üretilmesi için filament nozuldan çıkar çıkmaz hızla soğuması istenir. Filament sıcaklığını koruduğu sürece şekil değiştirmeye daha elverişli olacaktır. Filamenti hızlı soğutmak için ekstruder üzerinde dökülen katmanı soğutacak hava akış kanalları ve soğutucu fanlar kullanılabilir. Ekstruder üzerindeki soğutucu fanlar ve dökülen ilk katman üzerindeki etkileri optimize edilerek katmanın daha iyi yapışması sağlanabilir.

3B FFF yazıcılar açık döngü kontrol sistemi ile çalışmaktadır. Bu çeşit kontrol sistemlerinde, sistemin mevcut durumuyla alakalı herhangi bir bilgi denetleyiciye geri dönüş olarak gelmemektedir. Elektronik kontrol kartı ekstruderı belirli bir konuma göndermek için komutu verir ancak o konuma gidip gitmediğine dair bir kontrol birimi bulunmaz. Ekstruder'ı istediği konuma gitmesini engelleyecek bir engel ya da karşı bir kuvvet olmadığı sürece herhangi bir sorun oluşmaz. Ancak üretim sırasında ekstruder istenen konuma gidemediğinde yazıcının bunu tespit edemez. Dış etkenler veya donanım sorunları nedeniyle ekstruder konumu istenmeyen şekilde değiştiğinde üretilen parçada katmanlarda kaymalar meydana gelir (Resim 4.4 S10). Bu sorun baskı hızının olması gerekenden fazla seçildiği durumlarda sık karşılaşılr.

Baskı hızı ekstruder'ın filament sürme / eritme hızı, motorların performansı ve kayış sistemlerinin kararlılığına bağlıdır. Yazıcının bu alt sistemleri birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalıştığında baskı hızı artırılabilir. Ekstruder açısından değerlendirildiğinde; ekstruder'ın birim zamanda eritip dökülebildiği Filament miktarı yazıcının hareket hızını belirleyen bir niteliktir. Bununla birlikte hareketi sağlayan kayışlar zamanla dayanımlarını yitirerek esnemeye başlayabilir. Kayışlar zamanla deforme olduğunda gerginliğini kaybeder ve ekstruder'ın gitmesi gereken konumunu etkileyebilir. Kayışlar çok gergin olmamalıdır. Eğer kayışın gerginliği çok fazla ise motorların dönmesini etkileyecek kadar sürtünme oluşturabilir.



Resim 4.5 Katmanların üretiminde karşılaşılan sorunlar; ilk katmanda adezyon sorunu (S9), katman kaymaları (S10).

Her bir katmanın kalitesi bir altındaki katmanın başarılı üretimine dayanır. Tüm katmanların üretimi başarıyla tamamlandığında istenen parça üretilmiş olur. Ancak ürünün dayanıklı ve hatasız olması için her katmanın diğer katmanlarla güçlü bir şekilde adezyonu gereklidir. Eğer katmanların adezyonu yeterli değilse ürünün bazı bölgelerinde ayrılmalar meydana gelir (Resim 4.5 S11). Burada görülen üretim sorunu katman dilimleyici yazılımda belirlenen katman yüksekliği ile ilgili olabilir. Katman yüksekliği çok fazla ise parçada ayrılmalar oluşabilir. Genel bir yaklaşım olarak ideal katman kalınlığı nozul çapının %20'si kadar olmalıdır. Örneğin 0.4 mm nozul ile çalışılıyorsa 0.32 mm katman kalınlığının üzerinde çalışmak verimli olmayacaktır. Bununla birlikte katmanların daha iyi adezyonu sıcaklıkla doğrudan ilgilidir. Daha sıcak olan filament her zaman için daha iyi adezyon özellikleri gösterecektir. Dolayısıyla ekstruder'in sıcaklık performansı bu tür sorunlarda etkin rol oynar.

3B FFF yazıcılar üretimlerde ilk katmanlar baskı tablasına yeterli bir şekilde yapışmasına rağmen ilerleyen zamanlarda parçanın kıvrılmaya ve deforme olmaya başlaması görülebilir. Bu deformasyonlar bazen aşırı fazla olabilir ve hatta parçanın bir kısmı baskı tablasından ayrılabilir (Resim 4.5 S12). Parçadaki bu deformasyonların sebebi termal gerilmelerin etkisiyle plastiklerin soğudukça büzülme eğilimi olmasıdır. Örneğin 230 °C'de ABS filament ile üretilen bir parça oda sıcaklığına soğutulduğunda %1 – 2 oranında büzülecektir. Büyük parçalarda %1'lik bir büzülme bile birkaç milimetre boyut değişikliği anlamına gelir. Bu sorunların azaltılması için baskı tablasının ısıtılması, üretim

alanının kapalı ve sıcaklık kontrollü bir kabin içine alınması gibi yöntemler kullanılabilir.

4.1.3 Ekstruder ve Tolerans Sorunları

Parça boyutu ile ilgili üretim sorunları yazıcının hassasiyeti, donanım özellikleri, ekstruder tasarımı ve destek yapılar ile ilgilidir. Karşılaşılan sorunlar S13, S14, S15, S16 ve S17 koduyla listelenmiştir;

- S13: Ölçü hassasiyeti ve tolerans sorunları,
- S14: Küçük detayların üretim sorunları,
- S15: Destek yapıların neden olduğu sorunlar,
- S16: Filament aşınmaları,
- S17: Nozul tıkanması,

Resim 4.6’da ölçü tolerans hataları (S13), küçük detayların üretim sorunları (S14) ve destek yapıların sebep olduğu üretim sorunlarının (S15) örnekleri görülmektedir. Parçanın genel boyutlarının hassas ve doğru ölçüde üretilmesi yazıcının sahip olduğu donanımların hassasiyetine bağlıdır. Ekstruder performansı, üretim sırasında oluşan termal gerilmeler, filament kalitesi, hatta nozul konum kalibrasyonu ve hatta ilk katmanın üretim kalitesi gibi durumlar üretilen parçanın geometrik toleranslarına etki eder. 3B FDM yazıcılarda ilk katmanın kalitesi ürünün tamamının toleranslarını etkiler. Özellikle ilk katmanların üretiminin daha hassas yapılması gerekir.



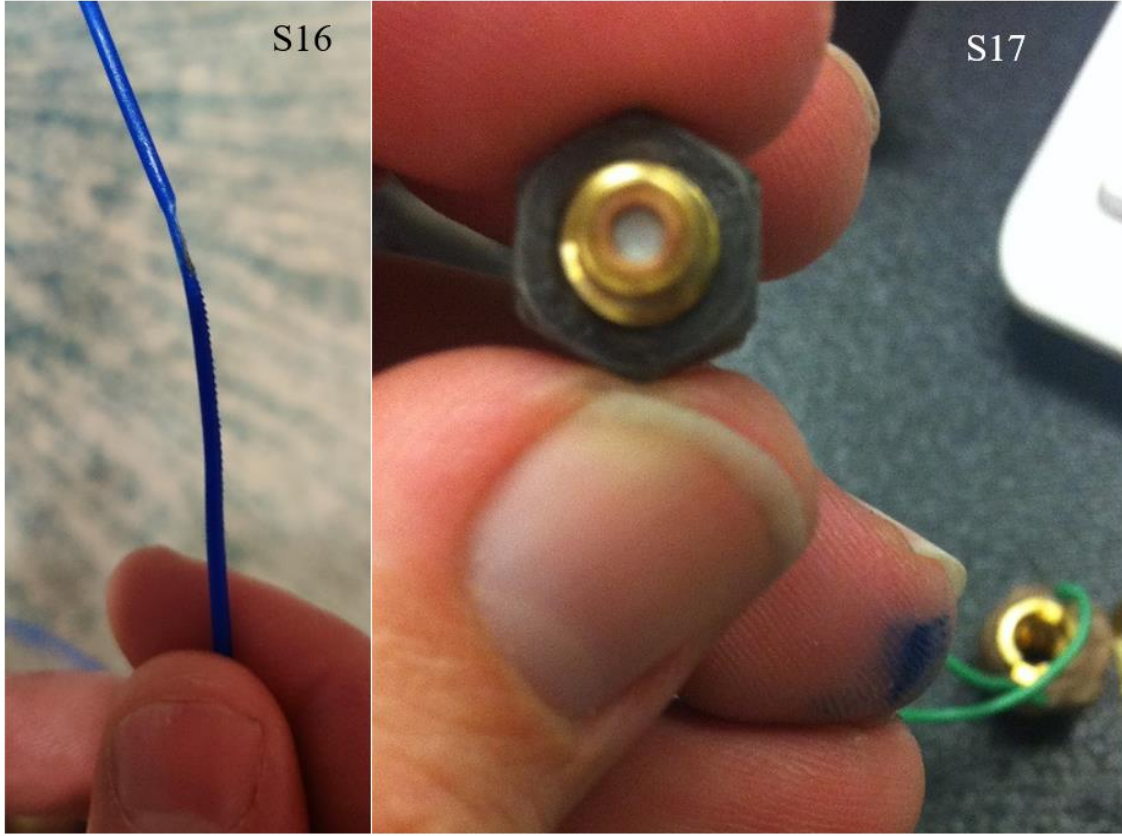
Resim 4.6 Ekstruder ve tolerans sorunları; tolerans sorunları (S13), küçük detayların üretim sorunları (S14), destek yapıların neden olduğu sorunlar (S15).

Üretilen parçaların toleransları ekstrüzyon miktarı ile doğrudan ilgilidir. Ekstruder, 3B dijital modele uygun şekilde parçanın gerekli yerlerinde, belirtilen miktarda ekstrüzyon yapmak zorundadır. Ekstruder olması gerekenden az veya çok filamenti dökerse parça ölçüleri 3B dijital modelden farklı olacaktır. Yazıcının motor ve hareket mekanizmalarındaki hassasiyet de parça toleranslarına etki eder.

3B FDM yazıcılarda çok küçük yapıların üretilmesini sağlayan sabit çapta nozullar kullanılır. 0.1 mm ile 1 mm aralığında değişen çaplarda nozullar bulunmasına rağmen birçok yazıcıda 0.4 mm çapındaki nozullar kullanılır. Ancak parça üzerinde nozul çapından daha küçük detayların üretimi zordur. Örneğin 0.4 mm çapındaki bir nozul ile 0.1 mm kalınlığında bir yapının istenen detaylarda üretilmesi neredeyse imkansızdır. Çünkü 0.4 mm çapındaki bir nozuldan 0.1 mm kalınlığında tutarlı bir ekstrüzyon sağlanması mümkün değildir. Ekstrüzyon genişliği her zaman nozul çapına eşit veya nozul çapından büyük olmalıdır. Yazıcının üretebileceği en küçük boyutlardaki detaylar nozul ile ve ekstruderin tasarımı ile ilgilidir. Parça tasarımı yapılırken 3B FDM yazıcıda kullanılan nozul çapı dikkate alınmalıdır. Eğer mümkünse tasarımda nozul çapından daha düşük kalınlıkta yapılar kullanılmamalıdır. Küçük parçaların üretimi için ekstruderda daha küçük çapta nozulların kullanılması gerekir.

3B FDM yazıcılarla yapılan üretimlerde her bir katman bir önceki katmanın üzerine örülerek üretilir. Her bir katman bir altındaki katmandan belirli bir miktar aralık bırakılarak üretilir. Katmanlar 45° kadar olan açılarda altında boşluk olacak kadar üretilir. Ancak 45° açı arttığında katmanın altında kalan boşluk nedeniyle üretilemez. Bu durumda destek yapılardan faydalanmak gerekir.

Destek yapıların üretimi ve temizlenmesi sonrasında parçanın toleranslarında sapmalar oluşabilir. Bu sorunları gidermek için birden fazla ekstruder kullanılabilir. Birden fazla ekstruder eş zamanlı olarak farklı malzemeler kullanılarak üretim yapılmasına olanak verir. Örneğin PLA filament ile birlikte suda çözünebilir PVA içerikli malzemeler destek malzemesi olarak kullanılabilir. Üretilen ana parça ve destek yapıların birbirinden farklı malzemeler ile üretilirse bu iki farklı hammadde birbirine kolay kolay yapışmayacaktır. Dolayısıyla destek nedeniyle oluşan yüzey sorunları azaltılabilir.



Resim 4.7 Ekstruder ve tolerans sorunları; filament aşınmaları (S16), nozul tıkanması (S17).

3B FFF yazıcılarda ekstruder'ın yol açtığı sorunların yanı sıra doğrudan kendisi üzerinde de sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunlardan en sık karşılaşılanlardan biri filament besleyicinin üretim sırasında filamenti aşındırması, diğeri ise ısıtma modülünde bulunan nozul veya diğeri yapıların tıkanmasıdır. Bahsedilen sebeplerle oluşan üretim sorunlarına dair örnekler Resim 4.7 S16 ve S17'de görülmektedir.

FFF 3B yazıcılarda filament besleyici yardımıyla sürülerek ısıtma modülüne iletilir. Filamentin sürülebilmesi için besleyicide gerekli sürtünmenin sağlanması gerekir. Bu sürtünme filamentin bir tahrik dişlisi ve karşısındaki bir yatak arasında sıkıştırılarak elde edilir. Filamentin ileri veya geri hareketi tahrik dişlisinin dişlerinin filamentin kavramasıyla sağlanır. Ekstruder üzerinde filamentin hareketini kontrol eden ve geri dönüt sağlayan bir sensör bulunmamaktadır. Dolayısıyla filament ilerlese de ilerlemese de tahrik dişlisi dönmeye devam eder. Filamentin ilerleyemediği durumlarda dişli filamentin aşındırmaya başlar. Böyle durumlarda filamentin dış çapında neredeyse dişlinin diş yüksekliği kadar aşınma oluşur. Filament üzerinde oluşan aşınmalar gerekli

sürtünmenin oluşmasını engelleyeceğinden ekstruder filamenti nozula doğru gönderemez.

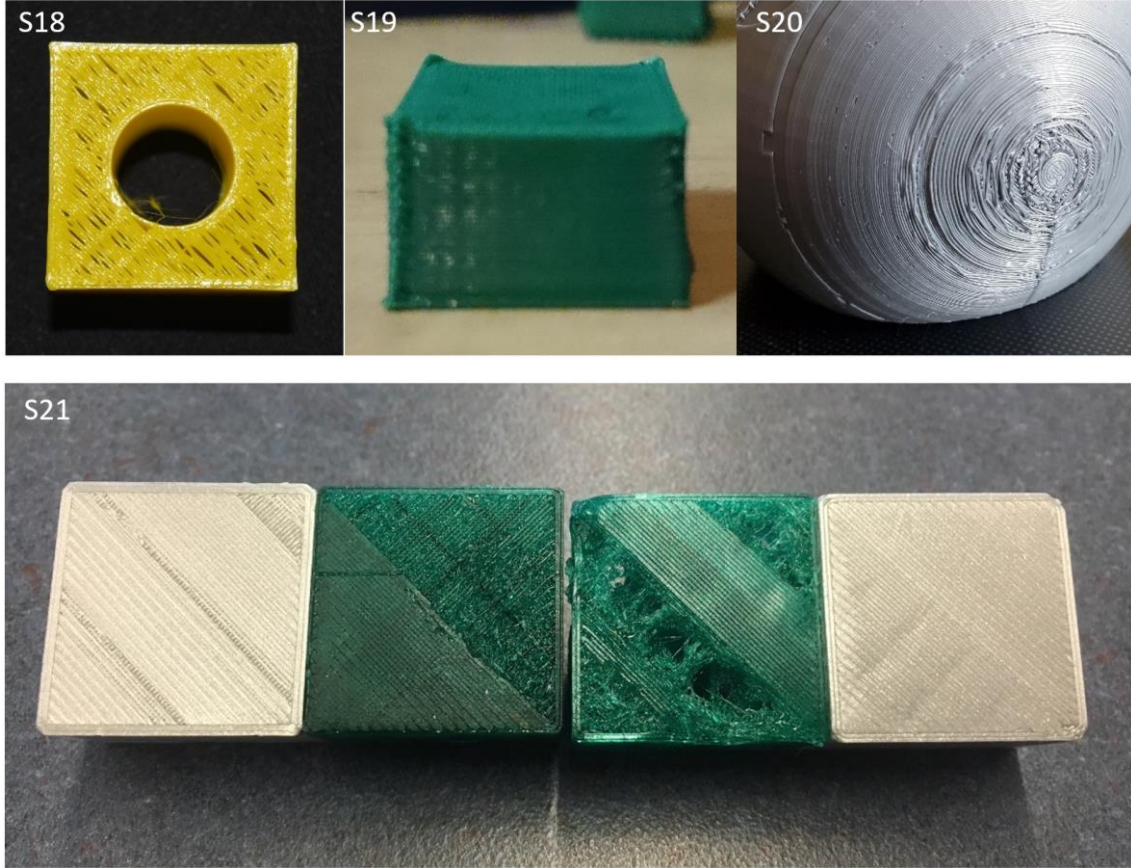
3B FFF yazıcılar ömrü boyunca binlerce metre filamentı ergitir ve 0.2, 0.4 mm kadar küçük çaplı nozullar ile üretim yaparlar. Üretim sırasında nozulların sıcaklıkları sürekli değişir. Kaçınılmaz olarak sıcaklık değişimleri ve küçük çaplar ile çalışılması nozullarda sık sık problemlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Yazıcılarda en sık karşılaşılan problemlerden biri nozulların tıkanmasıdır. Nozul tıkanmaları filamentin serbest bir şekilde akmasını engeller ve üretimin yapılamamasına neden olur.

4.1.4 Ürün Yüzeyleriyle İlgili Üretim Sorunları

3B FDM yazıcılar ile bir parça üretilirken, örülen her bir katmanın kalitesi bir altındaki katmanın yapısıyla ilişkilidir. Katmanın kalitesinin yanında ekstrüzyonu yapılan malzeme miktarı da önemlidir. Örülen katmanın dayanımı ve bu dayanımı sağlayacak ideal ekstrüzyon oranı iyi belirlenmelidir. Eğer örülen katman yeterli dayanıma sahip olmazsa parça yüzeyleri üzerinde delik ve boşlukların oluşması muhtemeldir. Bunun yanı sıra yüzeyler üzerinde çeşitli istenmeyen yapılar da oluşabilir.

Üretimler sırasında sık karşılaşılan dört farklı yüzey üretim sorunu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu sorunlara dair örnekler Resim 4.8’de görülmektedir. Ürün yüzeyleri ile ilgili karşılaşılan bu dört sorun S18, S19, S20 ve S21 koduyla listelenmiştir;

- S18: İç yapı ve dış yüzeyde boşluklar
- S19: Yüzeylerde kıvrılma ve pürüzlü köşeler
- S20: Yüzeylerde iz oluşumu
- S21: Zayıf İç Yapılar

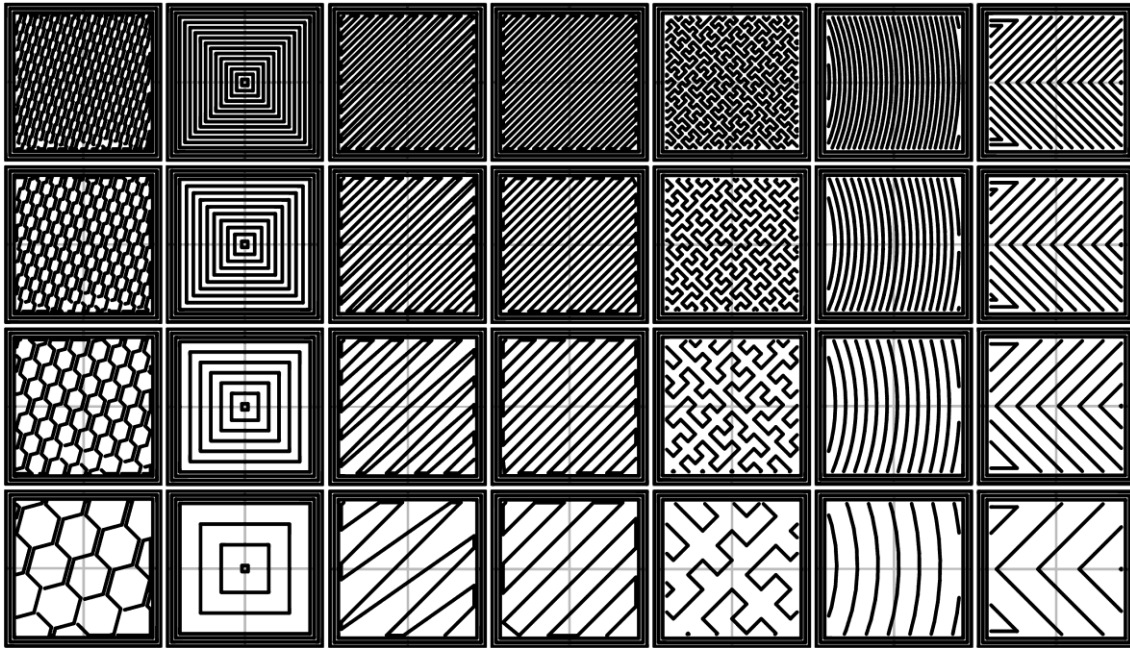


Resim 4.8 Ürün yüzeyleriyle ilgili üretim sorunları; yüzey boşlukları (S18), yüzeyde çarpılmalar (S19), yüzeyde iz oluşumları (S20), zayıf iç yapı (S21).

3B yazıcıların en büyük dezavantajlarından biri baskı sürelerinin uzun olmasıdır. Üretilen parça tam katı olarak üretilirse baskı süresi oldukça uzun sürecektir. Ancak parçanın iç yapısı boşluklu olarak üretilirse hem malzemedan hem de zamandan tasarruf edilebilir. Üretilen parçaların iç yapısının yarı boşluklu olması parçanın mekanik özelliklerinden taviz vermeden baskı süresini azaltılmasını sağlayabilir. Örneğin 20 mm boyutlarında bir küp üretilirken küpün dış yüzeylerinden içeriye doğru üretilen 5 katmanın tamamen dolu ve bu katmanlardan sonraki bölgelerin belirlenen oranda boşluklu olarak üretilir. İç yapının boşluk oranı %30 olarak ayarlanırsa dış katmanlar haricindeki bölgelerde bulunan malzeme oranı %30 plastik, geri kalanı boşluklardan oluşacaktır. Bu yöntem ile malzeme ve zamandan tasarruf edilebildiği gibi parametreler düzgün ayarlanmazsa üründe birtakım sorunlara sebebiyet verebilmektedir.

3B FDM ile üretilen parçanın her bir katmanı dış kabuk ve boşluklu olan iç yapı dolgusunun bileşimi olarak üretilir. Dış kabuğu oluşturan katman parçanın dış yüzeyinin

dayanıklı ve hassas ölçülerde olmasını sağlar. Dış kabuğun içinde kalan dolgu yapısı ise sadece dış kabuğu destekleyecek yoğunlukta üretilir. Dolayısıyla iç yapı dolgusu esasen üretim hızını artıracak şekilde tasarlanır. Dış kabuk ve iç dolgunun üretimi sırasında farklı geometrik desenler kullanılarak üretilir. Farklı geometrik desende üretilen bu iki yapının birbirine iyi bir şekilde yapışması önemlidir. İç yapı (infill) parametreleri ürünün genel mekanik özelliklerini ve mukavemetini doğrudan etkiler.



Resim 4.9 İç yapının oluşturulabildiği farklı dolgu tipleri (Karavaikin 2014).

İç yapıda problemler ile karşılaşıldığında sorunun giderilmesi için ilk olarak dolgu deseni değiştirilerek üretim tekrarlanmalıdır (Resim 4.9). Dilimleme yazılımları farklı özelliklerde dolgu deseni kullanılmasına olanak sağlar. Sık kullanılan dolgu desenleri Resim 4.9’da görülmektedir. Farklı dolgu desenleri kullanıldığında iç yapıdaki boşluk oranları da değişim gösterecektir. Bunun yanı sıra dolgu desenleri iç yapının dış kabuk ile arasındaki adezyonu da etkileyecektir. Dolayısıyla ürünün mekanik özellikleri de dolgu desenine göre değişkenlik gösterebilir.

3B FDM ile üretilen parçaların özellikle üst katmanlarında kıvrılmalar ve çarpılmalar gözleniyorsa bu problem genellikle filamentin yüksek sıcaklıkta ekstrüzyonu ile ilgilidir. Yüksek sıcaklıkta ergitilen filament yeterli hızda soğutulamıyorsa şeklini koruyamaz ve

termal gerilmeler karşısında çarpılır. Üründeki bu hatayı giderebilmek için katmanların şekil değiştirmesine fırsat vermeden hızlıca soğutulması gerekir.

3B FDM yazıcı ile üretilen parçalar yan kısımlarından incelendiğinde parçanın büyüklüğüne göre değişmekle beraber yüzlerce katmandan oluştuğu görülecektir. Yazıcı ile ilgili herhangi bir problem bulunmuyorsa katmanlar arası geçişlerin pürüzsüz olduğu görülür. Ancak bazı durumlarda katmanlar arasında problemler oluşabilir ve parçanın dış yüzeylerinde katmanların net olarak görülebildiği pürüzlü bir görünüm ortaya çıkar. Katmanlar düzgün üretilmediyse parça yüzeyinde çizgiler ve istenmeyen çıkıntılardan oluşan yüzey hataları oluşacaktır. Bu tarz yüzey hataları genellikle tekrar eden bir düzende oluşur.

3B FDM ile üretilen parçaların yüzeylerinde bazen dalgalara benzer desenlerde görülen yüzey hataları oluşabilir. Bu tip yüzey hataları genellikle yazıcıda oluşan titreşimlerle ilgilidir. Özellikle ekstruder'ın keskin köşelerin üretimi sırasında olduğu gibi ani konum değişimi gerçekleştirdiği durumlarda titreşimler artabilir.

4.2 Nozul Üzerinde Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

3B yazıcılarda filamentin en son temas ettiği parça nozuldur. Üretim süresi ve üretilen parçaların kalitesi nozul ile doğrudan alakalıdır. Nozul 3B yazıcılarda filamentin eritildiği kısımdır. Rezistansta sağlanan ısı öncelikle ısıtıcı bloğa daha sonra nozula iletilir. Böylece nozul filamenti eritecek sıcaklığa ulaştırılır. Isı iletimi söz konusu olduğundan nozul tasarımında nozul geometrisi ve malzemesi olmak üzere iki ana parametre etkin rol oynar.

Nozulun sahip olduğu tasarım ve geometrik özellikler filamentin daha kolay eritilmesini sağlar ekstrüzyon sürecini iyileştirir. Aynı zamanda nozulun üretildiği malzeme de ısı iletimini doğrudan etkiler. Nozul üretiminde ısıl iletkenliği iyi olan malzemeler tercih edilir. En sık kullanılan nozul malzemesi sahip olduğu avantajlı termal özellikler nedeniyle pirinçtir. Bunun yanında paslanmaz çelik nozullar da üretilmektedir.



Resim 4.10 Farklı çaplardaki nozullar.

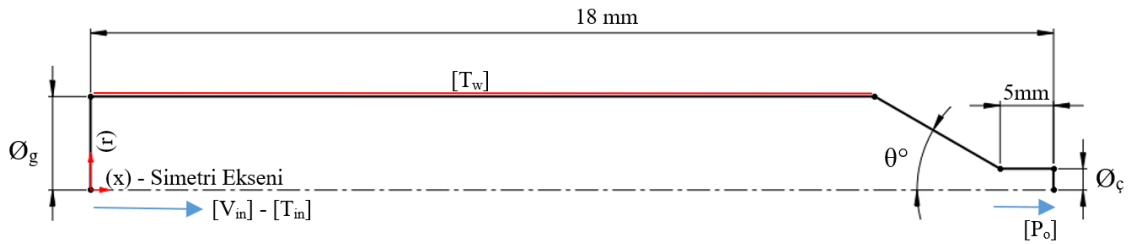
Nozulun sahip olduğu en önemli parametre nozulun geometrisi ve çıkış çapıdır. 0,2 mm ile 1 mm arasında değişen farklı çaplara sahip nozullar kullanılmaktadır (Resim 4.10). Nozul çıkış çapı ne kadar düşükse üretilen parçanın hassasiyeti o kadar iyi olur. Bununla birlikte nozul çapı ne kadar küçükse, üretilen parça üzerindeki detaylar daha rahat üretilir. Ancak nozul çapı düştükçe üretim süresi uzar ve ekstrüzyon süreci zorlaşır. Düşük çıkış çapına sahip nozullarda tıkanma sorunları daha sık görülmektedir. Isıtma modülünde bulunan nozul veya diğer yapıların tıkanması ile ilgili değerlendirmeler “4.1.3 Ekstruder ve Tolerans Sorunları” başlığında incelenmiştir.

Nozul tıkanmaları ekstrüzyon süreci, nozul tasarımı ve ekstruder’in termal davranışıyla doğrudan ilgilidir. 3B yazıcılarda kullanılan termoplastik filanetler ekstrüzyon süreci sırasında nozulda eritilir. Ancak bu malzemelerin mekanik özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişir. Filamentler nozul üzerindeki yüksek sıcaklıklarda eritmeye başladıklarında katı halde olduğundan farklı davranış sergiler. Eritilmiş haldeki filamentin nozul içerisinde yaptığı basınç, akış hızı, filamentin viskozitesi gibi parametreler ekstrüzyon sürecinin başarısını etkiler. Üretim sırasında nozulda yaşanan tıkanmalar, yetersiz veya fazla ekstrüzyon gibi sorunların birçoğu bahsedilen parametrelerle ilgilidir. Nozulun geometrik özellikleri ve çalışma parametreleri ekstrüzyonu etkiler. Özellikle nozul çıkış çapının düşük olması sistem içerisinde daha yüksek basınçların oluşmasına ve yazdırma hızının daha düşük olmasına sebep olur. Çıkış çapının daha düşük olduğu nozullarda daha çok üretim sorunu ile karşılaşmaktadır. Nozul üzerindeki sıcaklık dağılımı eriyik haldeki filamentin viskozitesini etkiler. Ekstrüzyon sürecinde filament nozulun farklı bölgelerinde farklı akışkanlık davranışı sergiler.

4.2.1 Nozul Tasarımları ve Sınır Şartları

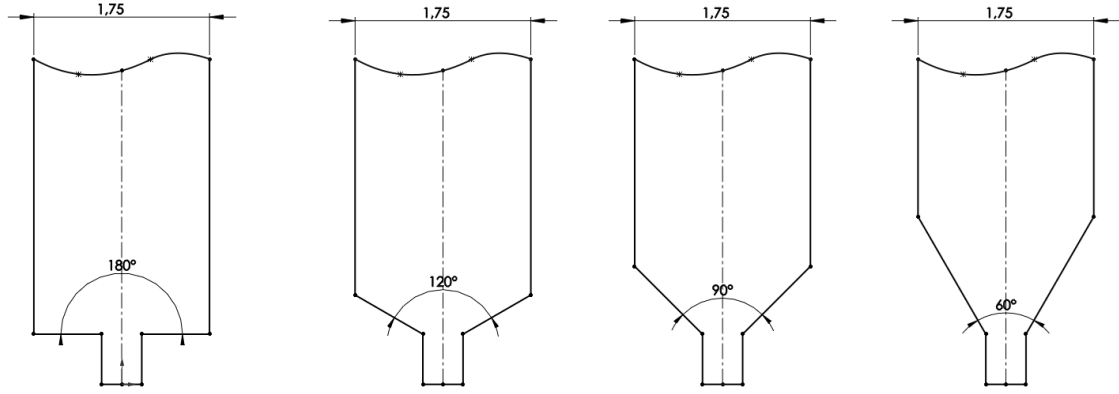
FFF 3B yazıcılarda kullanılan nozulların iç yapısında sahip olduğu tasarım ekstrüzyon performansını etkilemektedir. Nozul kullanılacak olan filamente uygun bir giriş çapında (3 mm veya 1,75 mm) silindir iç yüzeye sahiptir. Filament nozula ilk olarak bu bölgede giriş yapar. Silindir yüzeyin devamında konik bir yapı bulunur. Konik yüzey 0,2 mm ve 1 mm aralığında değişen çaplarda silindirik kılcal bir çıkışa sahiptir. Erimiş haldeki filament bu noktadan çıkış yapar.

Nozulun aksel simetrik iç yapısı Şekil 4.1’de görülmektedir. Burada \varnothing_g giriş çapını, \varnothing_c çıkış çapını, θ° nozul açısını ifade etmektedir. Nozulun toplam boyu ısıtma modülünün girişinden itibaren toplam 18 mm ve çıkış boyu 5 mm olmak üzere bütün tasarımlar için aynı ölçülerdedir. Nozule çıkış çapı için 0.4 mm, 0.6 mm ve 0.8 mm olmak üzere üç farklı parametre kullanılmıştır. Analiz sürelerinin kısaltılabilmesi için aksel simetri sınır şartı kullanılmıştır. Radyal koordinat (r) ile simetri eksenini (x) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.1 Simülasyonlarda kullanılan nozul modeli ve sınır şartları.

Nozul açılarının ekstrüzyon sürecine etkisini belirlemek için dört farklı parametre belirlenmiştir. 60° , 90° , 120° ve 180° derece nozul açlarına ($2 \cdot \theta^\circ$) sahip tasarımlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde aksel simetri sınır şartı kullanıldığı için nozul açısı (θ°) parametrik olarak sırasıyla 30° , 45° , 60° ve 90° olarak tanımlanmıştır. Belirlenen dört farklı açıya sahip Nozul geometrileri Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2 Analizlerde kullanılan farklı açılara sahip nozul modelleri.

3B yazıcılarla üretim yapılırken dilimleyici yazılımlar yardımıyla yazdırma hızı ve üretim sıcaklığı gibi parametreler belirlenebilmektedir. Yazdırma hızı filamentin nozula giriş hızını (V_{in}) belirlemektedir. Dilimleyici yazılımda belirlenen üretim sıcaklığı parametresi ise duvar sıcaklığını (T_w) belirlemektedir. Üretim sıcaklığı ya da duvar sıcaklığı kullanılan filamentin mekanik özelliklerine ve türüne bağlı olarak belirlenmektedir. PLA gibi filamentler için 190 °C gibi sıcaklıklar tercih edilebilirken, ABS veya PET gibi erime sıcaklığı daha yüksek olan filamentler için 230 °C ve hatta daha fazla sıcaklıkların kullanılması gerekebilmektedir. Çalışmada duvar sıcaklığı için 190 °C, 210 °C ve 230 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık parametresi kullanılmıştır.

Nozul ısıtıcı blok üzerindeki bir rezistans yardımıyla ısıtılır ve sıcaklık kontrolü bir termistör ile yapılır. Isıtıcı blok sıcaklığının belirlenen parametrenin altına düştüğü termistör tarafından algılandığında rezistans tekrar çalıştırılır. Bu durum nozul duvarlarında sıcaklığın dalgalanmasına neden olur. Ancak analizlerin basitleştirilmesi adına nozul duvarlarında tanımlanan sıcaklığın zamanla değişmediği ve yüzey boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Nozul iç yüzeyi ile akışkan arasında kaymama koşulu tanımlanmıştır.

Filamentin ekstruder'ın soğutma modülünde iken sıcaklığı oda sıcaklığına daha yakındır. Ancak filament nozula yaklaştıkça ısınmaya başlar. Filament ısı bariyeri bölgesine geldiğinde camsı geçiş sıcaklığına (T_g) ulaşmayacak kadar ısınmış olur. Bu durum “6.4 Isı Bariyeri Üzerinde Yapılan Çalışmalar” bölümünde yapılan çalışmalar ile tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ısı bariyeri sıcaklığının 100 – 150 °C aralığındaki

sıcaklıklara ulaşılabilirdiğini göstermiştir. Bu nedenle filamentin nozula girişi sırasındaki ilk sıcaklığı (T_{in}) değişken olarak tanımlanmıştır. 100, 125 ve 150 °C olmak üzere üç farklı giriş sıcaklığı değeri için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan değişkenlere ait bütün parametreler Çizelge 4.2’de özet olarak sunulmuştur.

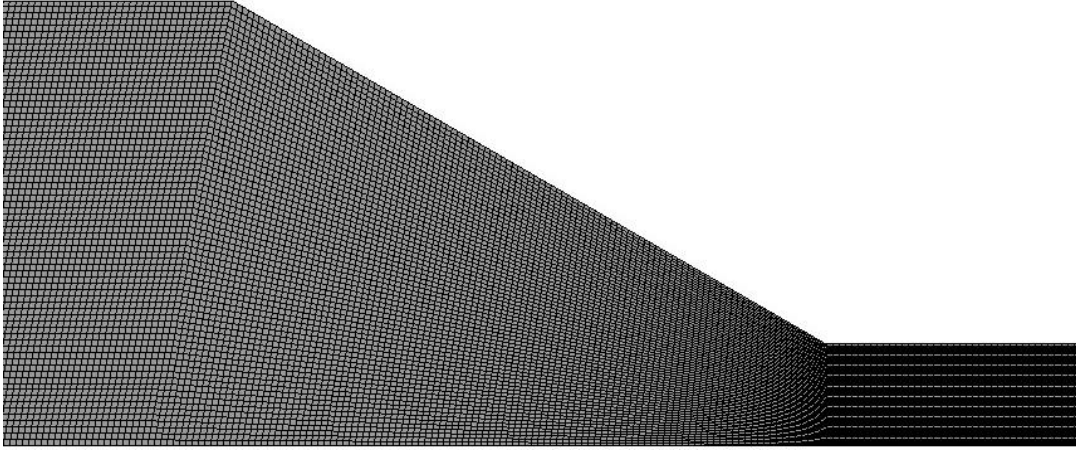
Çizelge 4.2 Analizlerde kullanılan değişkenlere ait parametreler.

Tasarım Değişkeni	Simge	Parametre	Birim
Giriş Çapı	\varnothing_g	0.875	mm
Çıkış Çapı	$\varnothing_ç$	0.2 – 0.3 – 0.4	mm
Nozul Açışı	θ°	30 – 45 – 60 – 90	derece
Duvar Sıcaklığı	T_w	190 – 210 – 230	°C
Giriş Hızı	V_{in}	1 – 3 – 6	mm/s
Giriş Sıcaklığı	T_{in}	100 – 125 – 150	°C
Çıkış Basıncı	P_o	0	Pa

4.2.2 Ağ Yapısı Optimizasyonu

Eksenel simetri sınır şartı ve iki boyutlu analizlerin tercih edilmesi modelde yapılandırılmış ağ oluşturulabilmesine, dolayısıyla ağ yapısının üç boyutlu modellere göre iyileştirilmesine imkân verir. Böylece hesaplama alanı küçültülerek simülasyon sürelerinin azaltılırken, daha kaliteli bir ağ yapısı sayesinde daha isabetli sonuçlar elde edilmesi sağlanır.

Kaliteli bir ağ yapısı elde etmek için Multi Zone ağ yöntemi kullanılmıştır. Multi Zone yöntemi ile nozul geometrisi yapılandırılmış ağ ile tanımlanmıştır. Yapılandırılmış ağda iki boyutlu kuadratik elemanlar tercih edilmiştir. Eleman boyutu 0,0125 mm olarak belirlenmiştir. Özellikle nozul çıkış bölgesi daha çok hücre ile modellenerek bu bölgenin çözünürlüğü artırılmıştır.



Şekil 4.3 Multi zone tekniği ile oluşturulan ağ yapısı.

Şekil 4.3'te 30° nozul açısına sahip model için oluşturulan bir ağ yapısı görülmektedir. Bütün modellerde aynı hücre tipi ve ağ yapılandırma teknikleri kullanılmıştır. Böylece bütün modellerin birbirine yakın özelliklerde ağ yapısına ve hücre özelliklerine sahip olması sağlanmıştır. 30° nozul açısına sahip modelin ağ yapısında toplamda 94839 hücre ve 287500 düğüm noktası bulunmaktadır. 60° nozul açısına sahip modelin ağ yapısında toplamda 96910 hücre ve 293731 düğüm noktası bulunmaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümünde ağ yapısının kalitesi analiz sonuçlarının doğruluğunu ve hesaplama süresini etkilemektedir. Ağ kalitesinin yanı sıra ağda kullanılan her bir hücrenin kalitesi de önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan modellere ait hücre kalite değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Simülasyonlarda kullanılan hücrelerin kalite değerleri.

Parametre	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 90^\circ$
Hücre Sayısı	94839	96113	96910	97792
Eleman Kalitesi	0,9972	0,9973	0,9975	0,9977
Aspect Ratio	1,0208	1,0175	1,0194	1,0187
Skewness	0,0277	0,0256	0,0257	0,0244
Ortogonal Kalite	0,9977	0,9976	0,9979	0,9981

Çizelge 4.3'te verilen kalite parametrelerinin ilgili modele ait ağ yapısında ortalama değerini göstermektedir. Eleman kalitesi her bir hücrenin kenar uzunlukları ile ilgili bir hesaplama ile bulunur ve değeri 1 ve 0 arasında değişen bir metrik sağlar. Bu değer 1'e yaklaştıkça eleman kalitesinin arttığını gösterir. Aspect Ratio her bir hücrenin eni ve boyu arasındaki oranını ifade eden bir kalite metriğidir. Bir hücrenin kenarlarının eşit uzunlukta olma durumundan ne kadar saptığını gösterir. Uzun ve ince hücrelerde yüksek bir en boy oranı oluşur. Aspect Ratio değerinin 1'e yakın olması o ağda bulunan hücrelerin en boy oranı açısından kalitesinin iyi olduğunu gösterir.

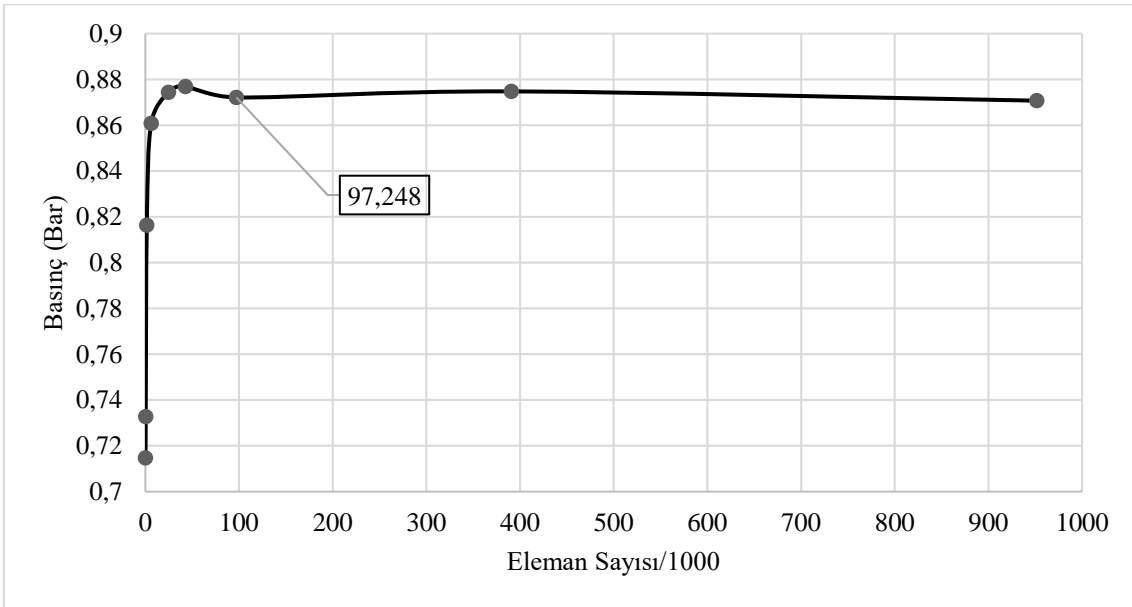
Skewness kalite ölçüğü modele ait hücrelerin çarpıklık oranını belirten bir metriktir. Skewness değeri her bir hücre için ilgili hücrenin herhangi iki kenarı arasındaki minimum ve maksimum açıları üzerinden bir hesaplama ile bulunur ve 0 – 1 arasında bir değer alır. Ağ üzerinde yüksek çarpıklığa sahip bir hücrenin bulunması hesaplamaların yakınsamamasına veya hesaplama sonuçlarının yanlış çıkmasına sebebiyet verebilir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümünde modele ait skewness değerleri 0,8 – 1,0 arasında ise çözüm yakınsamayabilir veya elde edilen sonuçların doğrulukları şüpheli olur. 0,25 – 0,50 arasında veya daha düşük değerler problemin çözümünü kolaylaştıracak ve hesaplamaların doğruluğunu artıracaktır.

Hücrelerdeki ortogonal kalite kavramı, bitişik hücrelerin kenarları arasındaki açılar ile ilgilidir. Hücrelerin yüzey normal vektörleri ve hücre merkezleri arasındaki ölçüleri bitişik diğer hücrelerle karşılaştırarak belirlenir. Ortogonalite ölçüsü 0 (kötü) ile 1 (iyi) arasında değişir.

4.2.3 Ağ Yapısından Bağımsızlık Çalışmaları

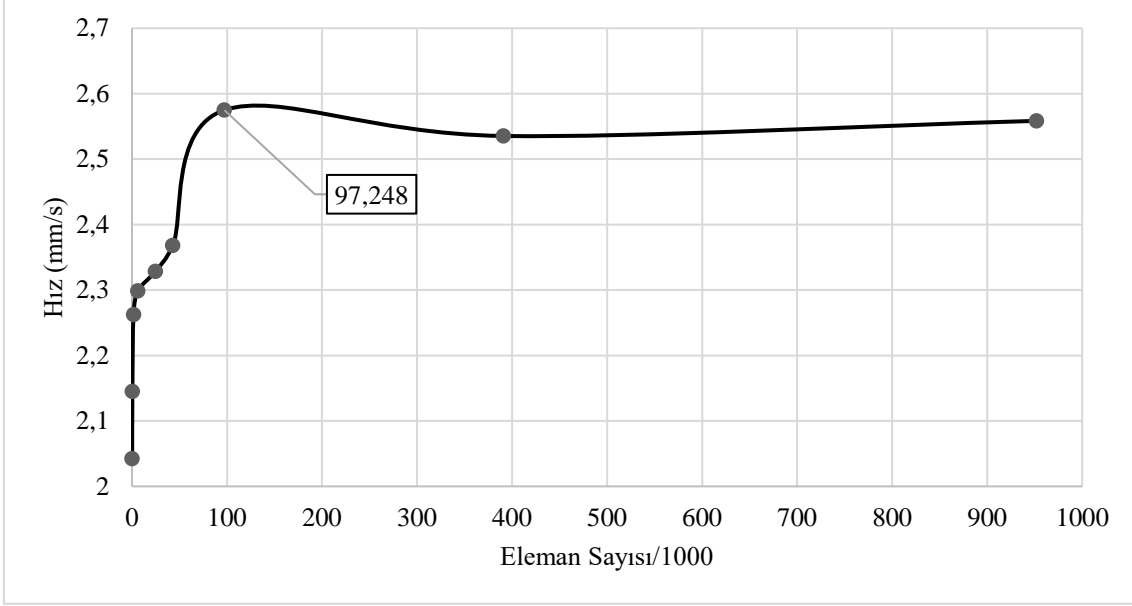
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümlerinin doğruluğu ve hassasiyeti analizde kullanılan ağ yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Analizlerde kullanılan ağın genel özellikler ve ağda kullanılan elemanların ayrı ayrı kaliteleri önem kazanır. Bu iki önemli kriterin dışında problemin ağ yapısından bağımsızlığının da test edilmesi gerekir. Yapılan çalışmada nozul modeli için ağ yapısından bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ağ yapısının çözüme etki edip etmediğini gözlemlemek için modelin çözünürlüğü minimum hücre boyutları değiştirilerek test edilmiştir. İlk yapılan analizlerde daha kaba bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Her seferinde ağ yapısı hücre boyutları iki kat kadar küçültülerek tekrarlanmıştır. Analizlerde kullanılan nozulun çıkış çapının yarısı için belirlenen ölçü (0,2 mm) modelin en küçük ölçüsünü ifade etmektedir. Bu nedenle ilk yapılan analiz için minimum hücre boyutu 0,1 mm olarak belirlenmiş ve çözünürlüğü oldukça düşük bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Sınır şartları ve malzeme modeli tanımlanarak nozulun simetri eksenini boyunca akışkanın hızı (mm/s) ve nozulun uç kısmında oluşan basınç (bar) değerleri elde edilmiştir. Hücre boyutları her seferinde yarısı kadar olmak üzere basınç ve hız değerlerindeki değişim gözlenmiştir.



Şekil 4.4 Basınç sonuçları için ağdan bağımsızlık grafiği.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de farklı eleman sayıları için sırasıyla elde edilen basınç ve hız değerleri görülmektedir. Bu grafiklerde X ekseninde eleman sayısı görülmektedir. Y eksenlerinde ise sırasıyla basınç ve hız değerleri görülmektedir. Her iki değer için ağ çözünürlüğünün iyileştirilmesine rağmen elde edilen sonuçların anlamlı olarak değişmediği ortak bir hücre boyutu (0,0125 mm) tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 Hız parametresi için ağdan bağımsızlık grafiği.

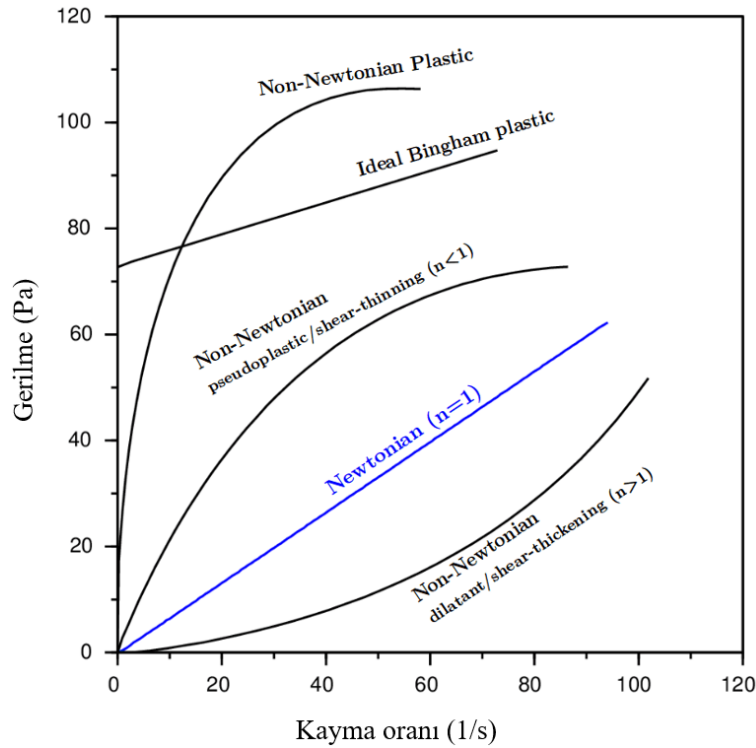
Belirlenen hücre boyutu ile oluşturulan ağ yapısı 97248 hücreden oluşmaktadır. Buna göre belirlenen hücre sayısı 97248'den daha fazla hücre ile yapılan simülasyonlarda basınç ve hız değerlerinde anlamlı bir fark elde edilememiştir. Dolayısıyla 97248'den daha fazla hücre ile oluşturulan ağ yapısı analizin sonuçlarını anlamlı olarak etkilememektedir. Bununla birlikte hücre sayısı arttıkça analizin yakınsama süresi uzamaktadır. Yaklaşık 100 bin hücre ile yapılan bir analizin sonuçlanması yaklaşık 12 dakikada tamamlanırken 1 milyon hücre ile yapılan analizler 37 dakikada tamamlanmıştır. Bu nedenle her farklı tasarımın analizi için minimum 90.000 hücreden oluşan ağ yapıları kullanılmıştır.

4.2.4 Filamentin Malzeme Modeli

İki akışkan tabakasının birbirlerine göre bağıl hareketi sırasında aralarında sürtünme kuvveti oluşur. Böyle bir durumda akışkanın yavaş hareket eden tabakaları, hızlı tabakayı yavaşlatmaya çalışır. Akışa karşı oluşan bu iç direnç viskozite (μ) olarak tanımlanır. Viskozite sıvı moleküllerinin birbirleri arasındaki çekim kuvvetinden kaynaklanır. Bazı sıvılarda çekim kuvvetleri çok daha etkiliyken bazılarında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Sürtünme etkilerinin önemli olduğu akışlar viskoz akışlar olarak adlandırılır. Su veya hava gibi akışların bazı bölgelerinde viskoz etkiler göz ardı edilebilir. Ancak

nozül içinde akmakta olan erimiş filamentin akışında viskoz etkiler önemli yer tutar.

Akışkanlar, Newton tipi ve Newton tipi olmayan akışkanlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Newton tipi akışkan, uygulanan kayma gerilmesi (τ) ile oluşan deformasyon hızı (kayma hızı, $\dot{\gamma}$) arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu akışkandır. Bu yüzden belirli bir sıcaklıkta sabit viskoziteleri vardır. Newton tipi olmayan akışkan ise uygulanan kayma gerilmesi ile kayma hızının doğrusal olarak değişmediği akışkandır. Viskozite hız gradyanından (∇) bağımsız değildir, sabit sıcaklıkta bile değişkenlik gösteren viskoziteye sahiptirler.



Şekil 4.6 Farklı akışkan tiplerinin reolojik davranışları (Cengel, Yunus A, 1998).

Akışkanların reolojik davranışları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bazı Newton tipi olmayan akışkanlar, ne kadar hızlı şekil değişimine uğrarlarsa o denli daha az viskoz duruma geldiklerinden incelen akışkanlar (Shear Thinning) veya sanki plastik (Pseudo-Plastic) akışkanlar olarak adlandırılır. Erimiş haldeki filament Newton tipi olmayan ve incelen akışkan olarak tanımlanabilecek bir akışkandır. Akışkanın viskozitesi (μ); akışkanın sıcaklığı (T_m , C°), akışkana uygulanan kuvvet (P , Pa) ve akış esnasında oluşan deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$, $1/s$) ile değişkenlik gösterir. Dolayısıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında filamentin bu şartlara uygun bir reolojik malzeme modeli ile

tanımlanması gerekmektedir.

Yapılan çalışmada filamentin viskozitesini sıcaklık ve kayma hızı ile ilişkilendirebilmek için Cross modelinden faydalanılmıştır;

$$\mu = H(T) \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (4.1)$$

Çok küçük kayma oranlarında viskozite kayma hızından bağımsız hale gelir. Bu düşük kayma oranlarında ortaya çıkan sabit viskoziteye sıfır kayma viskozitesi (η_0) denir. Denklemdaki λ ifadesi doğal zaman (natural time) olarak adlandırılır ve viskozitenin azalmaya başladığı kayma şekil değiştirme hızı değerinin tersidir. n , power law index olarak anılan terim akışkanın Newton tipi davranıştan sapma derecesini gösterir. Newton tipi akışkanlarda $n = 1$, dilatant akışkanlarda $n > 1$, sanki-plastik akışkanlarda ise $n < 1$ 'dir. $n < 1$ olduğunda akışkanın viskozitesi, düşük kayma kuvvetlerinde yükselir. Kayma kuvveti arttıkça viskozite azalır. Çünkü, katmanlar arasındaki sürtünme azalır. Bu akışkanlar erimiş filament örneğinde olduğu gibi incelen akışlar (Shear Thinning) olarak adlandırılır. $n > 1$ olduğunda akışkanın viskozitesi, düşük kayma geriliminde iç sürtünmenin artması nedeniyle düşüktür. Bu tip akışkanlar (Shear Thickening) kayma oranı arttıkça daha viskoz hale gelir. Denklemdaki, $H(T)$ ifadesi akışkanın viskozitesinin sıcaklık ile ilişkisini tanımlar.

Çalışmada filament viskozitesinin sıcaklık ile değişim ilişkisi Arrhenius kanunu ile tanımlanmıştır;

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0} \right) \right] \quad (4.2)$$

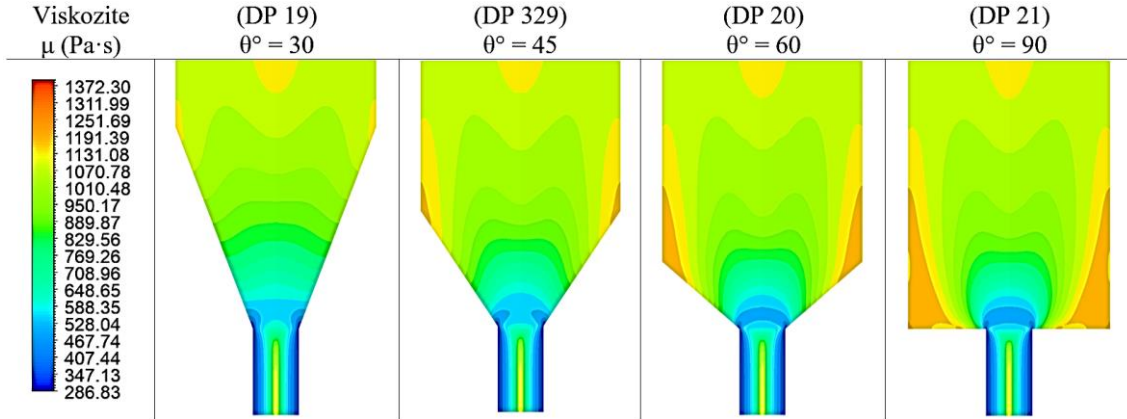
Bu denklemde α erimiş filamentin aktivasyon enerjisinin termodinamik denge sabitine oranıdır. T_α referans sıcaklığı, T_0 termodinamik olarak kabul edilen en düşük sıcaklığı ifade eder. Çalışmada filamentin viskozitesini tanımlamakta kullanılan değerler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Filament için tanımlanan malzeme modeli parametreleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk (ρ)	1050 (kg/m ³)
Öz Isı (C_p)	1080 (j/Kg·K)
Termal İletkenlik (k)	0,387 (w/m·K)
Sıfır Kayma Viskozitesi (kg/m·s)	2283 (kg/m·s)
Power Law Index (n)	0,3846
Doğal Zaman (Natural Time, λ)	0.2 s
Referans Sıcaklık (T_a)	180 °C

4.2.5 Nozul Açısı ile İlgili Bulgular

Nozulun geometrik özellikleri içerisinde oluşan akış şartlarını önemli ölçüde etkiler. Nozul geometrisini tanımlayan önemli özelliklerden biri nozul açısıdır. Erimiş filament Newton tipi olmayan bir akışkandır. Akışkanın viskozitesi kayma oranı ile değişkenlik gösterir. Nozul geometrisindeki farklı bölgeler erimiş filamentin kayma oranını değiştirir. Özellikle nozul açısı erimiş filament üzerine uygulanan kayma gerilmelerini (τ) etkiler ve bu bölgedeki deformasyon hızları (kayma hızı, γ) farklılaşır.

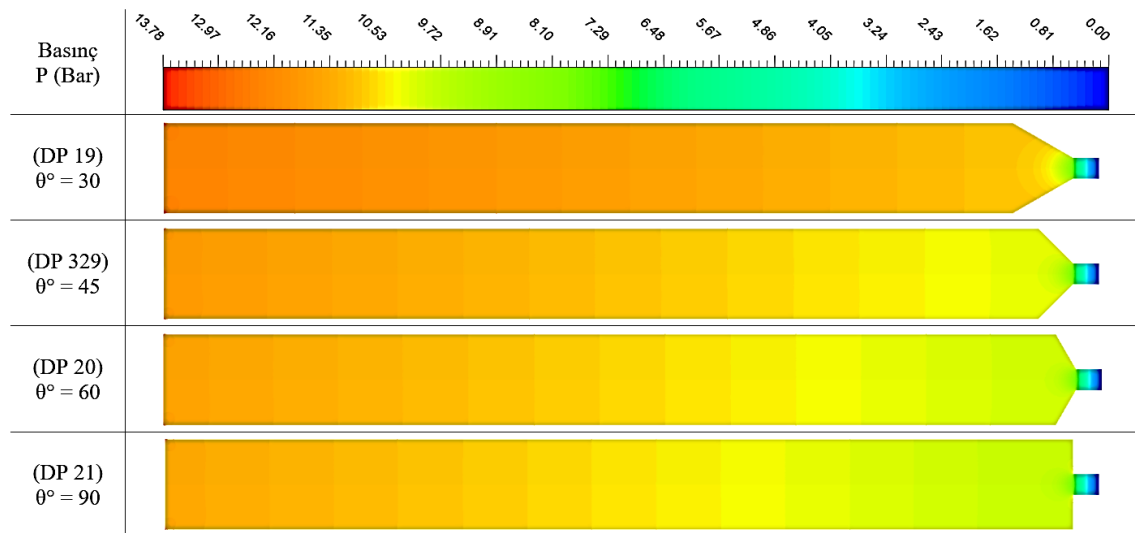


Şekil 4.7 Nozul açısının viskozite değişimine etkisi.

Şekil 4.7’de nozul içerisinde farklı nozul açılarının erimiş filamentin viskozitesine olan etkisi gösterilmiştir. Şekilde görülen her dört model için tek değişken nozul açısıdır. Bunun dışında her model için nozul çıkış çapı (\varnothing_c) 0.2 mm, nozul duvar sıcaklığı (T_w) 190 °C, filamentin giriş sıcaklığı 100 °C ve hızı (V_{in}) 1 mm/s olarak belirlenmiştir.

Nozul geometrisinin daralmaya başladığı andan itibaren bütün modellerde dinamik viskozite değerleri de değişkenlik göstermeye başlamıştır. 30° nozul açısına sahip modelde daralmanın başladığı köşe noktada dinamik viskozite yaklaşık olarak 1080 Pa·s olarak hesaplanmıştır. Nozul açısı arttıkça aynı köşe bölgelerdeki dinamik viskozite değerlerinde de artış yaşandığı görülmektedir. 45° ve 60° nozul açısına sahip modelde aynı bölgede viskozite değeri 1190 Pa·s değerine ulaşmaktadır. 90° nozul açısına sahip modelde ise 1225 Pa·s değerine kadar artmaktadır. Bu durum nozul'ın köşe bölgelerinde oluşan şekil değişiminin artması nedeniyle oluşmaktadır.

Nozul açısının artmasıyla beraber köşe bölgelerde viskozite değerlerinin artmasının yanı sıra, viskoz bölgelerin de daha geniş yer kapladığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar filamentin Newton tipi olmayan akışkan davranışı gösterdiğini kanıtlamaktadır. Nozul'ın köşe bölgelerinde akışkanın hızlı şekil değişimine uğradığı ve daha az viskoz duruma gelerek incelen (Pseudo – Plastic) akış davranışı gösterdiği görülmektedir.

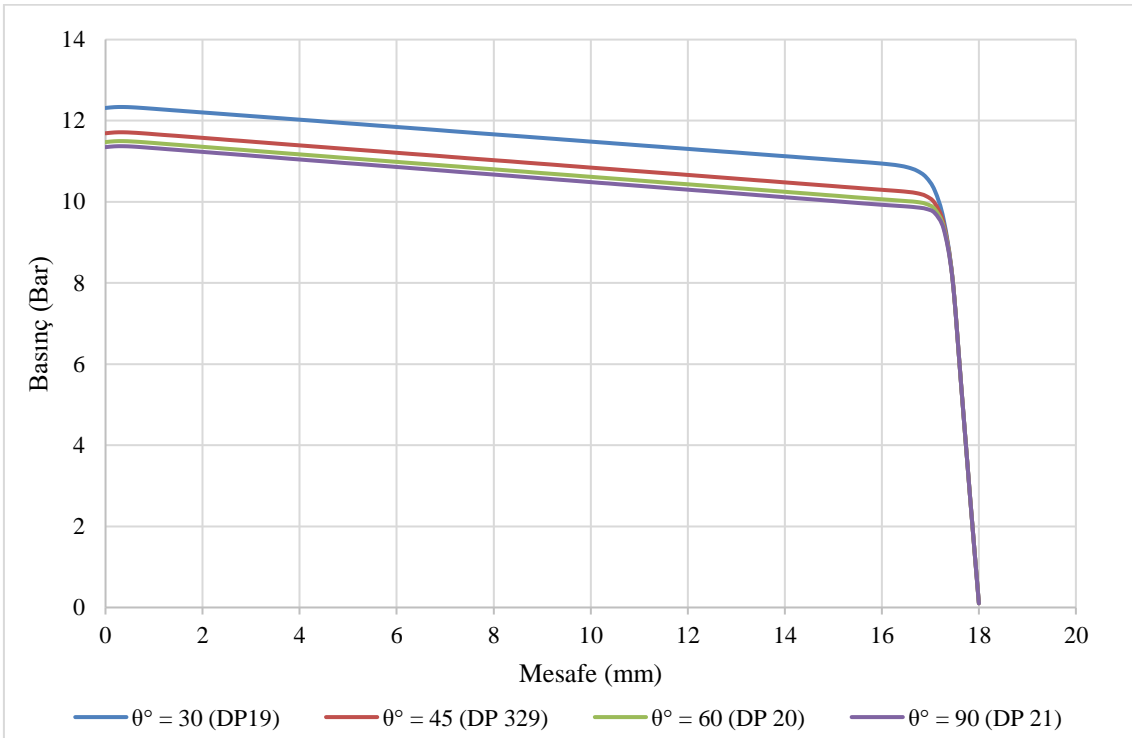


Şekil 4.8 Farklı nozul açıları için basınç dağılımları.

Analiz sonuçlarına göre dört model için elde edilen basınç dağılımları Şekil 4.8'de görülmektedir. Nozul açısı nozul içerisinde oluşan basınç değerlerini etkilemektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre en yüksek basınç 30° nozul açısına sahip modelde 13.78 Bar olarak tespit edilmiştir. 45° nozul açısına sahip modelde maksimum basınç 13.15 Bar,

60° nozul açısına sahip modelde maksimum basınç 12.95 Bar olarak hesaplanmıştır. En düşük basınç değeri 12.80 Bar ile 90° nozul açısına sahip modelde elde edilmiştir.

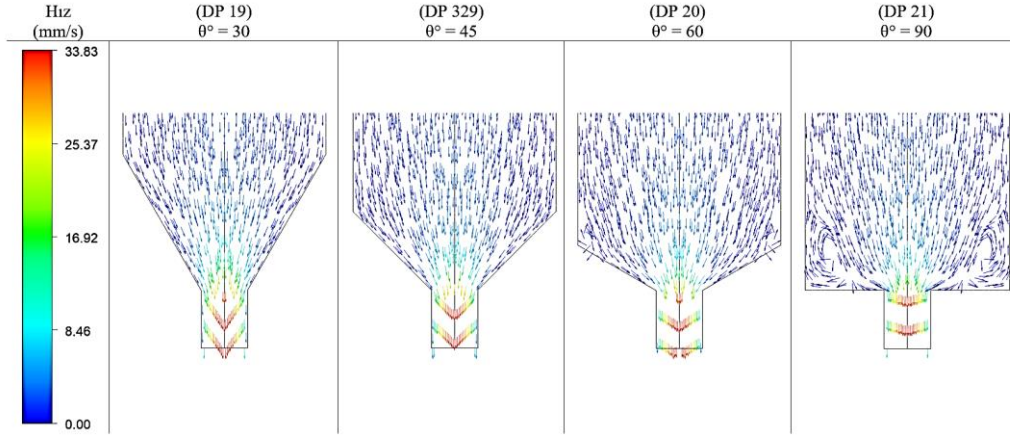
Farklı açılara sahip nozul'lar basınç grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu grafikte simetri eksenini (X) üzerinde oluşan basınç değerleri görülmektedir. X ekseninde 0 mm değeri nozul'un X ekseninde giriş bölgesini ve 18 mm olan nokta ise nozul'un çıkış bölgesini göstermektedir. Nozul açılarındaki değişime rağmen bütün tasarımların tamamında 0.5 mm boyutundaki kılcal boşluk üzerinde basınç değerleri tam olarak örtüşmektedir. Ancak nozul bölgesinde daralmaların olduğu bölgelerde basınç farklılıkları gözlemlenmektedir. Nozul açısının azalması toplam basıncı artırmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre nozul açısı düşürüldüğünde filament besleyicinin daha yüksek kuvvetler oluşturacak şekilde tasarlanması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.9 Farklı nozul açıları için elde edilen basınç değerleri.

Simülasyonlardan elde edilen hız vektörleri filamentin akışı hakkında bilgi vermektedir. Yapılan analizlerden elde edilen hız vektör grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kaymama koşulu nedeniyle nozul duvarlarına yakın bölgelerde erimiş filamentin akış hızı sıfırdır. Duvarlardan uzaklaştıkça akışkanın hızı artış göstermektedir.

Nozul içindeki akış sırasında viskoz etkiler oldukça yüksektir. Bu nedenle akış özellikle dar kanalın olduğu bölgede artış göstermiştir. Nozul çıkışındaki hız profilleri incelendiğinde en yüksek hızlar çıkış çapının orta noktasında, simetri eksenini (X) üzerinde olduğu görülmektedir. Simetri ekseninden uzaklaştıkça ve nozul duvarlarına yaklaştıkça hız değerleri sıfıra yakınsamaktadır.



Şekil 4.10 Farklı nozul açıları için elde edilen hız vektör gradyanları.

Giriş hızının (V_{in}) 1 mm/s ve çıkış çapının (\varnothing_c) 0.2 mm olduğu sınır şartlarına sahip nozul tasarımlarında çıkış hızları her bir tasarımda nozul açısından (θ°) bağımsız olarak yaklaşık olarak 33.80 mm/s olarak hesaplanmıştır. Bütün tasarımlarda çıkış hızları neredeyse eşit olmasına rağmen nozul içerisindeki hız dağılımları önemli farklar göstermektedir. Nozul açısı arttıkça özellikle daralmanın başladığı köşe bölgelerde akışın dönümlü akış olduğu ve akışın düzensizleştiği görülmektedir. Nozul açısı 30° ve 40° olan tasarımlarda akışın düzensizleştiği bu durum gerçekleşmemektedir. Akış düzensizlikleri nozul açısı 60° olan tasarımlarda az da olsa görülmektedir. En çok akış düzensizliğinin olduğu durum nozul açısının 90° olduğu tasarımlarda gerçekleşmektedir. Nozul içerisinde akışın düzeninin bozulması üretimin kalitesini doğrudan etkiler. Akış düzeninin bozulduğu bu bölgelerde üretim sonrasında erimiş filament artıklarının kalmasına sebep olur. Bu durum nozulun çok daha sık tıkanmasına sebep olacaktır.

Elde edilen bulgulara göre nozul açısı ekstruder performansına iki önemli etki göstermektedir. Tespit edilen ilk önemli etki nozul açısının azaltıldığında sistem içerisindeki toplam basıncın artmasıdır. Toplam basıncın artması istenmeyen bir

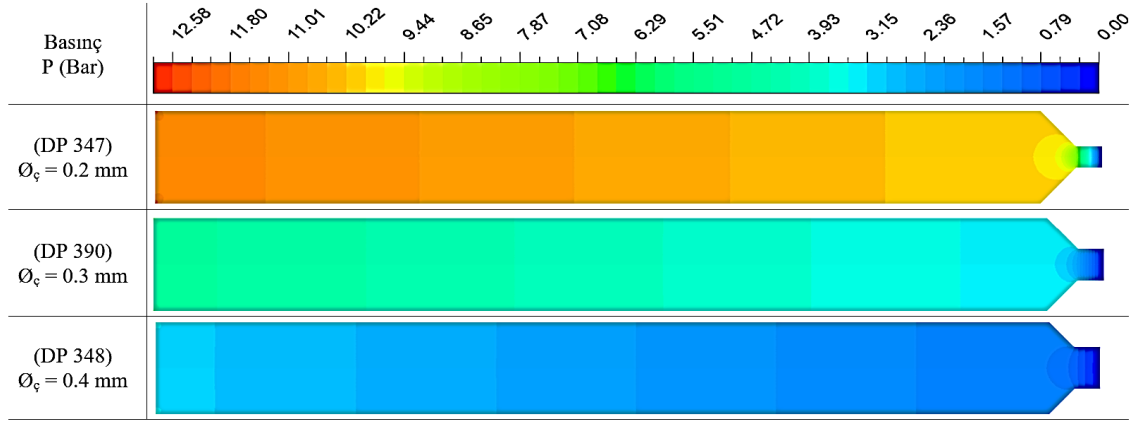
durumdur.

Toplam basıncın artması filament besleyicinin daha yüksek kuvvetlerle çalışması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte yüksek basınç filamentin nozul bölgesine sürülmesi sırasında filamentin burulmasına ve üretimin aksamasına sebep olabilmektedir. İkinci önemli etki ise nozul açısı azaltıldığında nozul içerisindeki akışın daha düzenli gerçekleştiğidir. Nozul açısı 60° ve daha yüksek olduğunda akış düzensizlikleri artmaktadır. Bu durum üretimin kalitesini düşürecek ve bunun yanında nozulun tıkanmasına sebep olabilecektir. Elde edilen sonuçlara göre PLA filamentler için kullanılacak ideal nozul açısının 45° olduğu tespit edilmiştir. Farklı hammaddelerle üretilmiş filamentlerin viskoziteleri ve akış davranışları birbirinden farklıdır. Bu nedenle farklı filamentler için farklı nozul açıları daha iyi sonuçlar verebilir.

4.2.6 Nozul Çapı ile İlgili Bulgular

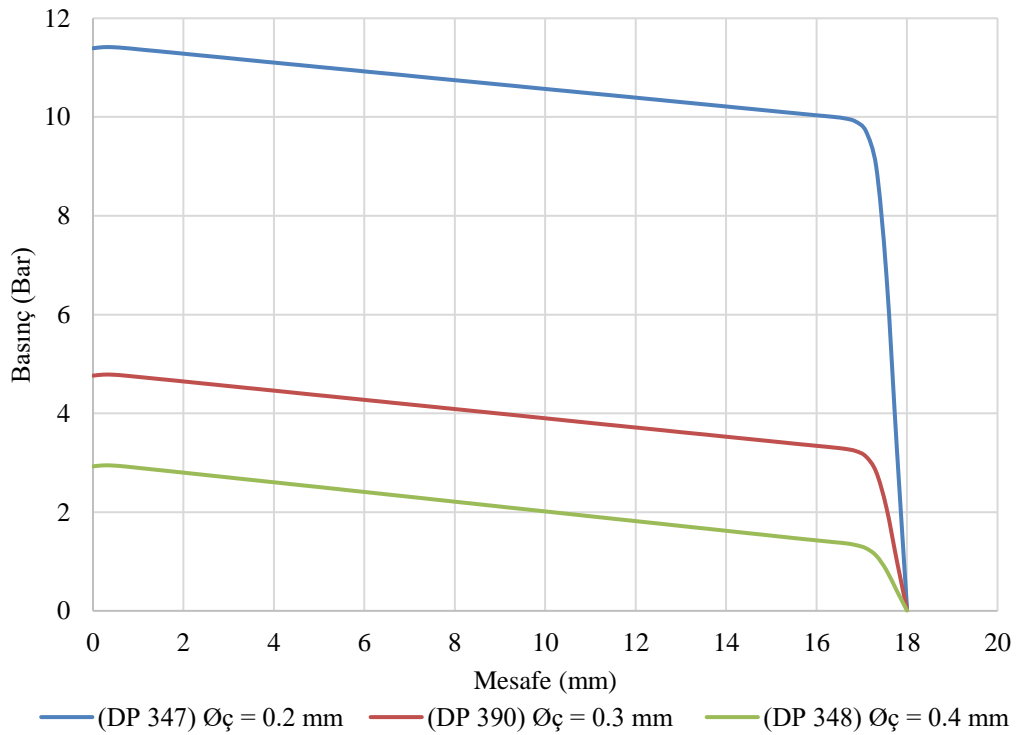
Nozul çıkış çapı (\varnothing_c) 3B FFF yazıcı ile yapılan üretimleri önemli ölçüde etkilemektedir. Nozul çapı yazıcının üretim süresini, üretimin kalitesini ve üretilen parçanın toleranslarını doğrudan etkiler. Düşük çapa sahip nozul ile üretim süresi uzarken, üretilen parçanın toleransları iyileşir. Nozul çapı, nozul içerisindeki akışın karakteristiğini de değiştirmektedir.

Nozul çapının akış üzerindeki etkilerini gözlemlemek için tek değişkenin nozul çapı olduğu bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Nozul çapı haricinde bütün modellerin geometrik özellikleri, malzeme modelleri ve sınır şartları aynıdır. Yapılan simülasyonlarda kullanılan bütün modellerde nozul açısı (θ°) 45° , filamentin giriş sıcaklığı (T_{in}) 100°C , giriş hızı (V_{in}) 1 mm/s ve nozul duvar sıcaklığı (T_w) 210°C olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu sınır şartları altında 0.2 mm (DP 347), 0.3 mm (DP 390) ve 0.4 mm (DP 348) nozul çıkış çaplarına sahip modeller üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir.



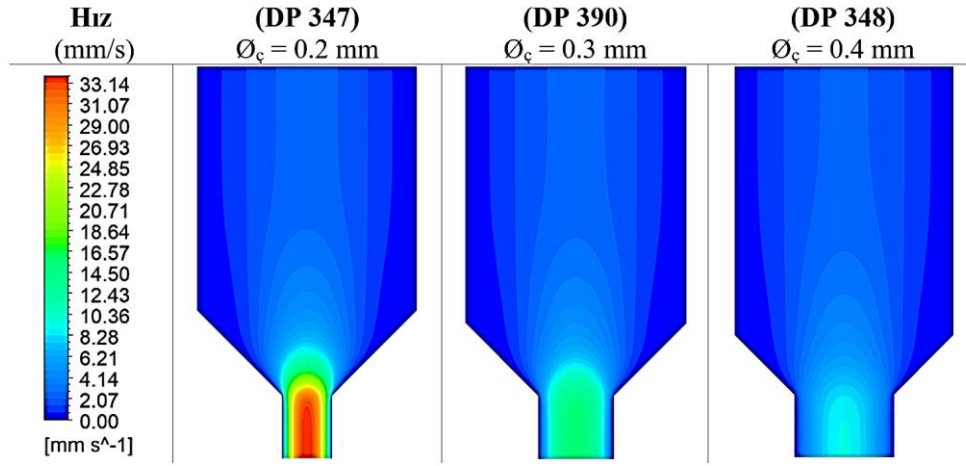
Şekil 4.11 Farklı nozul çapları için basınç dağılımları.

Şekil 4.11’de üç farklı nozul çapı için elde edilen basınç dağılımları görülmektedir. Nozul içerisindeki basınç dağılımları her üç modelde de benzer dağılıma sahiptir. En yüksek basınç değerleri filamentin nozul içine girdiği bölgelerde oluşmaktadır. Filament nozuldan çıkana kadar bu yüksek basınç bölgesi gittikçe azalmaktadır. Filament nozulun 45°’lik konik bölgesine ulaştığında basınç düşüşü gerçekleşmektedir.



Şekil 4.12 Farklı nozul çaplarında oluşan basınç değerleri.

Nozul içerisindeki akış üzerindeki basınç dağılımları benzer karakteristikte olmalarına rağmen toplam basınçtaki değişimler önemli oranda değişiklik göstermiştir. Şekil 4.12’de üç farklı çaptaki nozul için elde edilen basınç grafikleri görülmektedir. Toplam basıncın en yüksek olduğu tasarım 0.2 mm nozul çapına ait tasarımda gerçekleşmiştir. Bu tasarımda ortalama giriş basıncı 11.51 Bar olarak hesaplanmıştır. Toplam basıncın en düşük olduğu tasarım 0.4 mm nozul çapına ait tasarımda gerçekleşmiştir. Bu tasarımda ortalama giriş basıncı 3.04 Bar olarak hesaplanmıştır. Nozul çapının 0.3 mm olduğu tasarımda (DP 390) ortalama giriş basıncı 4.88 Bar’dır. Elde edilen bulgulara göre nozul çapı, nozul içerisindeki basıncı etkileyen en önemli parametredir.



Şekil 4.13 Farklı nozul çapları için elde edilen çıkış hızları.

Nozul içerisinde akan filamentin hızı ve nozul çapı arasındaki ilişki Şekil 4.13’te görülmektedir. Nozulun çıkış bölgesinde nozul çapı azaldıkça hız değerlerinin arttığı görülmektedir. Kaymama koşulu nedeniyle akışkanın hızı duvar bölgelerinde sıfıra yakın ve merkeze doğru gidildikçe artmaktadır. Çıkış çapı boyunca en yüksek ortalama hız değeri 24.38 mm/s ile 0.2 mm çapa sahip tasarımda (DP 347) gerçekleşmiştir. Nozul çapı 0.3 mm (DP 390) ve 0.4 mm (DP 348) olan tasarımların çıkış bölgesindeki ortalama hızları sırasıyla 11.01 mm/s ve 6.26 mm/s’dir.

Nozulda çıkış hızlarının mümkün olan en yüksek değerlerde olması üretim hızına katkı sağlar. Ancak toplam üretim süresi sadece nozul çıkış hızı ile ilgili değildir. Aynı boyutlarda bir üretim yapılırken düşük çaplı nozullar ile dökülen filament miktarı daha büyük çaplı nozullardan çok daha az olacaktır. Bunun yanı sıra düşük çaplı nozullar ile

daha hassas toleranslara sahip ürünlerin üretilmesi mümkündür. Nozul çıkış hızının artırılması bir anlamda nozul içerisindeki basıncın da artırılması anlamına gelmektedir. Nozul çapı düştükçe nozul içindeki basınç önemli ölçüde artmaktadır. Nozul içindeki basıncın artması filament besleyicinin filamenti daha yüksek kuvvetlerde sürebilmesini gerektirir. Dolayısıyla nozul çapı ile filament besleyici performansı birlikte değerlendirilmesi gereken bir tasarım parametresidir. Elde edilen bulgulara göre hassasiyetin önemli olmadığı parçaların üretiminde mümkün olan en büyük çıkış çapına sahip nozul tasarımlarının kullanılması avantaj sağlayacaktır.

4.2.7 Giriş Hızı ile İlgili Bulgular

3B FFF yazıcılarla üretim yapılırken dilimleyici yazılımda belirlenen parametrelerden biri yazdırma hızıdır. Dilimleyici yazılımda belirlenen yazdırma hızı parametresi, filament besleyicinin filamenti ne kadar hızlı süreceğini belirler. Burada belirlenen hız parametresi filamentin nozul içerisine girdiği hızı belirler.

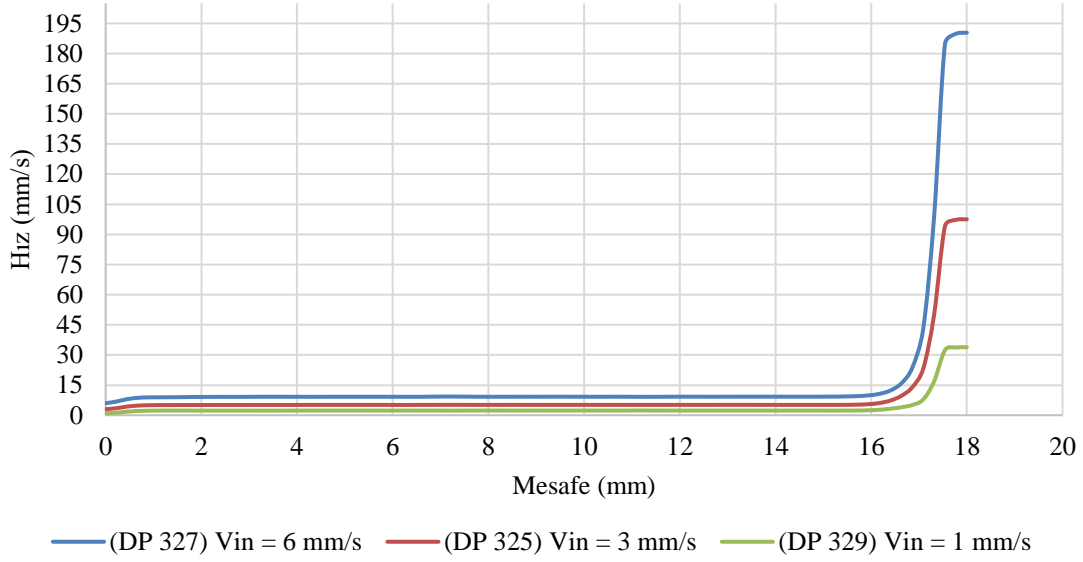
Nozul içerisindeki filamentin akış davranışının anlaşılabilmesi için akışkana etkiyen dış kuvvetlerin yanı sıra viskoz kuvvetler de dikkate alınmalıdır. Filamentin nozul içerisindeki akışı esnasında ağırlıklı olarak viskoz kuvvetler etkilidir. Akışkanın atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlere oranı Reynolds Sayısı (Re) ile tanımlanır.

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{ort} \cdot D}{\mu} \quad (4.3)$$

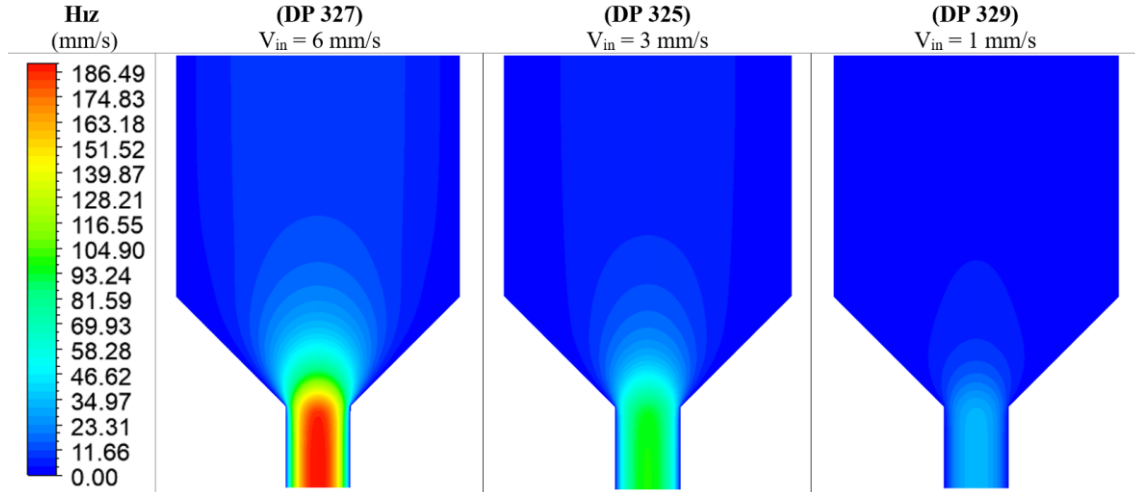
Burada V_{ort} ortalama akış hızı, D nozul çapı, μ akışkanın viskozitesi ve ρ akışkanın yoğunluğunu ifade eder. Orta ve yüksek Reynolds sayılarına sahip akışlar, akışkanlar dinamiği uygulamalarında sık karşılan problemlerdendir. Ancak nozul içerisindeki akış üzerinde viskoz kuvvetlerin etkisi çok yüksektir ve Reynolds sayısı 1'den çok düşük bir akış problemi oluşturmaktadır. Reynolds sayısının çok küçük olduğu akışlar Stokes akışı olarak adlandırılır.

Yapılan çalışmada giriş hızının etkilerini gözlemlemek için simülasyonlarda giriş hızı (V_{in}) parametresi değişken olarak belirlenmiştir. Filamentin 1 mm/s, 3 mm/s ve 6 mm/s

ile farklı giriş hızlarında akışa olan etkisi incelenmiştir. Simülasyonlarda kullanılan nozul çıkış çapı (\varnothing_c) 0.2 mm, nozul açısı (θ°) 45° , filamentin giriş sıcaklığı (T_{in}) 100°C ve duvar sıcaklığı (T_w) 190°C değerleri ile sabit tutulmuştur. Şekil 4.14'te üç farklı giriş hızı için akışkanın simetri eksenini (X) boyunca hız değişimleri görülmektedir.



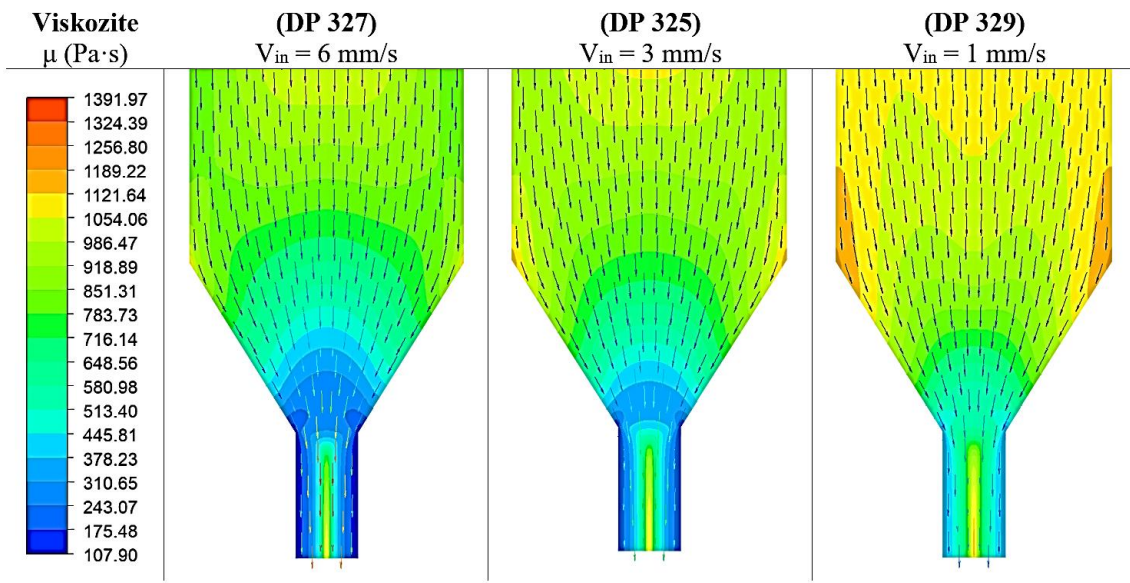
Şekil 4.14 Farklı giriş hızları için filamentin nozul içerisindeki hız değişimi.



Şekil 4.15 Farklı giriş hızları için nozul çıkışında elde edilen filament hızları.

Şekil 4.15'de nozul içerisinde filamentin akış hızlarını gösteren grafikler bulunmaktadır. Akışkanın hız grafikleri incelendiğinde filamentin giriş hızı ile çıkış hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Giriş hızları arttıkça doğal olarak çıkış hızları

da artmaktadır. Nozul içerisindeki akış hızının artırılması üretim hızının artırılmasına katkı sağlayacaktır ve yüksek giriş hızları bu anlamda en önemli etkidir. Ancak nozul giriş hızları belirlenirken ekstruder içerisinde oluşacak maksimum basınç ve akışkanın viskozitesi de dikkate alınmalıdır. Nozul'ın üst kısımlarında viskoz etkiler nedeniyle akış hızları oldukça düşüktür. Akışkan düşük çaplı kılcal çıkış bölgesine yaklaştıkça akışkanın deformasyon oranı artmakta ve filamentin Newton tipi olmayan akışkan özellikleri nedeniyle bu bölgelerde viskoz etkiler azalmaktadır. Konik bölgeye ulaşan akışkanın bu bölgede hızının arttığı görülmektedir.

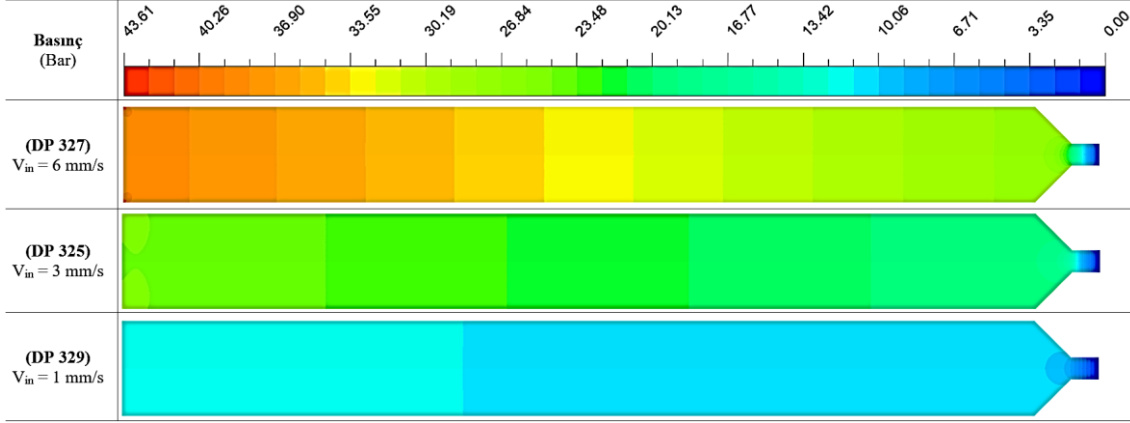


Şekil 4.16 Farklı giriş hızlarında filamentin viskozite değişimi.

Şekil 4.16'da farklı giriş hızları için nozul içerisindeki akışkanın viskozite değişimleri görülmektedir. Şekil üzerindeki renk skalasında kırmızı renge yakın bölgeler akışkanın viskozitesinin yüksek olduğu bölgeleri ve mavi bölgelerin düşük viskoziteye sahip olduğu bölgeleri göstermektedir. Her üç tasarımda da nozulun konik bölgesinden itibaren akışkanın incelmeye başladığı yani viskozitesinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte giriş hızları azaldıkça filamentin viskozitesinde artışlar gözlenmektedir. 1 mm/s giriş hızına sahip nozulda ise özellikle köşe bölgelerde akışkanın viskozitesinin oldukça arttığı görülmektedir. Bu durum köşe bölgelerde akışkanın durağan hale geldiğini göstermektedir.

Filamentin durağan hale geldiği bu gibi durumlar nozul tıkanma sorunlarına sebebiyet

verebilir. Bu durumdan kaçınmak için nozul içerisindeki her bölgede akışın hızları kontrol edilmelidir. Şekilde görülen oklar akışkan parçacıklarının hız vektörleridir. Akışkan giriş hızının 1 mm/s ile en az olduğu tasarımda (DP 329) viskozitenin arttığı bölgelerde dahil olmak üzere akışın sorunsuz devam ettiği görülmektedir.



Şekil 4.17 Aynı çaptaki nozullarda farklı giriş hızları için basınç dağılımları.

Ekstruder'in toplam basıncını etkileyen en önemli iki faktör nozulun çıkış çapı (ϕ_c) ve filamentin nozula giriş hızıdır (V_{in}). Şekil 4.17'de farklı giriş hızları için nozul'da oluşan basınç değerleri görülmektedir. Nozul üzerindeki basınç dağılımları her üç tasarımda da benzer dağılıma sahiptir. Giriş hızı arttıkça nozul içerisindeki toplam basınçta da artış görülmektedir. En yüksek basınç değeri giriş hızının 6 mm/s olduğu tasarımda (DP 327) elde edilmektedir. Bu tasarımda giriş bölgesinde ortalama basınç değeri 38.95 Bar olarak hesaplanmıştır. 3 mm/s giriş hızına sahip tasarımda (DP 325) ise giriş bölgesinde oluşan basınç 24.83 Bar olarak hesaplanmıştır. Nozul girişindeki en düşük basınç ortalaması 11.81 Bar ile 1 mm/s giriş hızına sahip olan tasarımda (DP 329) gerçekleşmiştir.

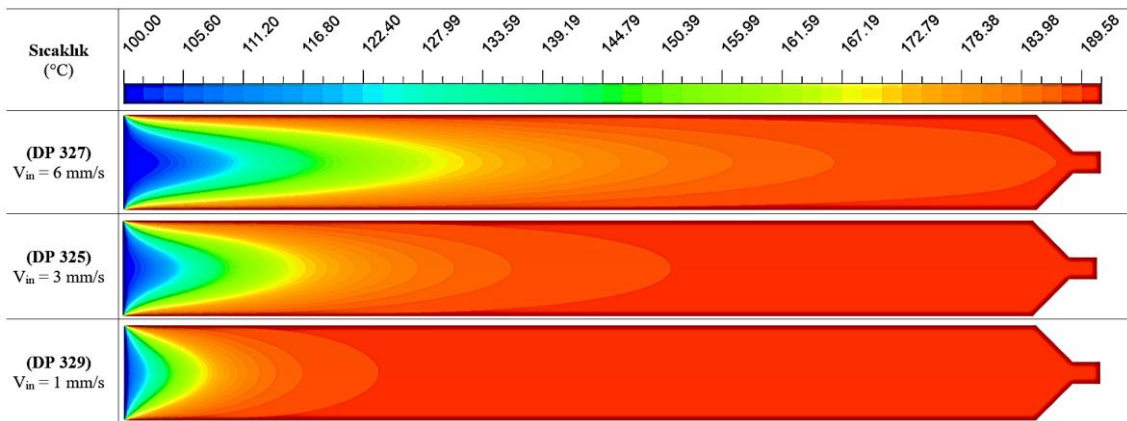
4.2.8 Giriş Sıcaklığı ile İlgili Bulgular

Nozul ekstrüzyon sürecinde filamentin eritilmesinden sorumludur. Filamentin nozul bölgesine gelene kadar katı halde kalması ve rijitliğini koruması gerekir. Filament nozul bölgesinden daha önce erimeye başlarsa, filamentin sürülmesi mümkün olmaz. Filament nozul içerisine girdiği andan itibaren ise hızla erimeli ve ekstrüzyon tamamlanana kadar

akışkan halde bulunmalıdır.

Filamentin farklı sıcaklıktaki davranışları için camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) olmak üzere iki önemli özelliği bulunur. Filament camsı geçiş sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda katı haldedir ve kuvvete karşı yeterli direnci gösterebilecek durumdadır. Ancak filamentin sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığını geçtiğinde katılığını kaybederek ne katı ne de sıvı ancak katı haline göre daha akışkan bir yapıya geçer.

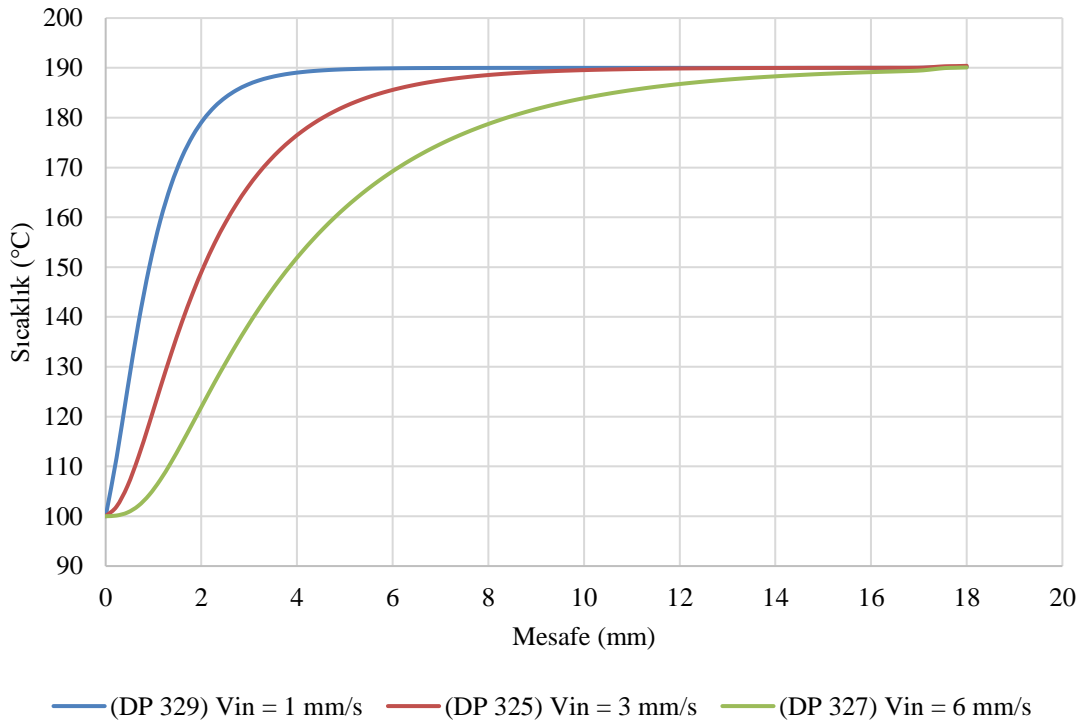
Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) arasındaki sıcaklıklar geçiş fazı olarak adlandırılır ve ekstrüzyon süreci için önemli etkilere sahiptir. Filamentin sıcaklığı artırılmaya devam edildikçe akışkanlığı artmaya devam eder. Erime sıcaklığına (T_m) ulaşıldığında ise filament tamamen sıvı forma dönüşür. Filament sıvılaştığında üretim için uygun hale gelir ve ekstrüzyonu kolaylaşır. PLA filamentler için camsı geçiş sıcaklıkları $50\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. PLA filamentler için erime sıcaklıkları ise $170\text{ }^{\circ}\text{C} - 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Nozul tasarımı için filamentin nozul'a girdiği andaki şartları ve nozul içerisindeki durumu önem kazanmaktadır. Filamentin hem nozul'a girmeden önceki şartları hem de nozul içerisindeki şartları filamentin camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı ile birlikte değerlendirilmelidir. Filamentin nozul'a girdiği andaki şartlarını filamentin giriş hızı ve filamentin girişteki sıcaklığı ile tanımlayabiliriz. Giriş hızı filamentin nozul içerisindeki sıcaklık dağılımına etki eder.



Şekil 4.18 Farklı giriş hızlarında nozul içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.18'de Filamentin 1 mm/s, 3 mm/s ve 6 mm/s ile farklı giriş hızlarında nozul

içerisindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Her üç modelde de filamentin giriş sıcaklığı (T_{in}) 100 °C olarak belirlenmiştir. Bunun dışında diğer sınır şartları sabit tutulmuştur. Simülasyonlarda kullanılan nozul çıkış çapı (\varnothing_c) 0.2 mm, nozul açısı (θ°) 45° ve duvar sıcaklığı (T_w) 190 °C'dir. Elde edilen bulgular filament sıcaklığının giriş hızından etkilendiğini göstermektedir. Filament giriş anında 100 °C sıcaklıktayken çıkış bölgesinde sıcaklığı 190 °C'ye kadar yükselmektedir. Her üç tasarımda da filamentin çıkış bölgesindeki sıcaklığı homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Giriş bölgesinde ise filamentin duvara yakın bölgeleri 190 °C olan duvar sıcaklığına yakın bir sıcaklığa sahip olmaktadır. Bununla birlikte filamentin simetri eksenine yakın bölgelerinin ise yeteri kadar ısıtılmadığı görülmektedir. Yapılan simülasyonlardan elde edilen bulgulara göre filamentin dış kısımları hızla erime sıcaklığına yaklaşırken merkezinde bu sıcaklıklara ulaşamamaktadır. Bu durum filamentin termal iletkenliği ile ilgilidir.



Şekil 4.19 Farklı giriş hızları için filamentin nozul içerisindeki sıcaklık değerleri.

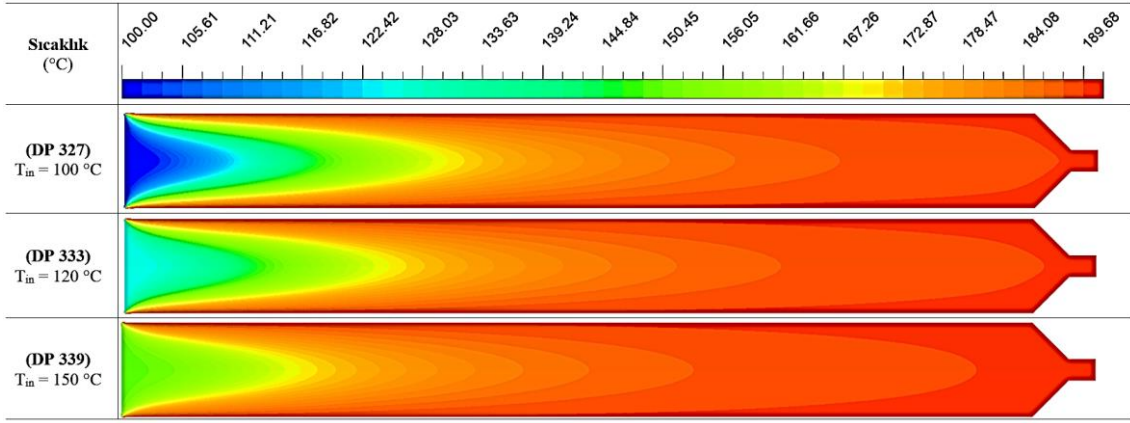
Şekil 4.19'da üç farklı giriş hızı için nozul'ın simetri eksenine (X) boyunca sıcaklık değişimi görülmektedir. Nozul'ın toplam boyu 18 mm'dir ve her üç simülasyonda da nozul'ın girişinden itibaren yaklaşık 10 mm sonrasında kadar filament sıcaklıkları 180 °C'nin

üzerine çıkmıştır. Filamentin nozula giriş sıcaklığı ekstruder'in soğutma modülünün performansına bağlıdır. Soğutma modülünde yeterli soğutma yapılırsa ısıtma modülündeki sıcaklık ekstruder'in üst bölgelerine ulaşmayacaktır. Böylece filament camsı geçiş sıcaklığına ulaşmadan nozul'un girişine kadar gelebilecektir. Yapılan simülasyonlarda filamentin nozul girişine ulaştığı anda sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığından daha yüksek olan 100 °C'ye ulaştığı kabul edilmiştir.

Filament nozul içerisine girdiği andan itibaren ne kadar çabuk erime sıcaklığına ulaşırsa ekstrüzyon o kadar başarılı olacaktır. Dolayısıyla nozul içerisinde filamenti homojen olarak en az 180 °C sıcaklığa ulaştırmak gerekir. Yapılan simülasyonlardan elde edilen bulgulara göre her üç giriş hızında da filament nozul çıkışına ulaşmadan önce erime sıcaklığına ulaşmaktadır. Ancak giriş hızları artırıldığında nozul içerisindeki sıcaklık dağılımı daha heterojen hale gelmektedir.

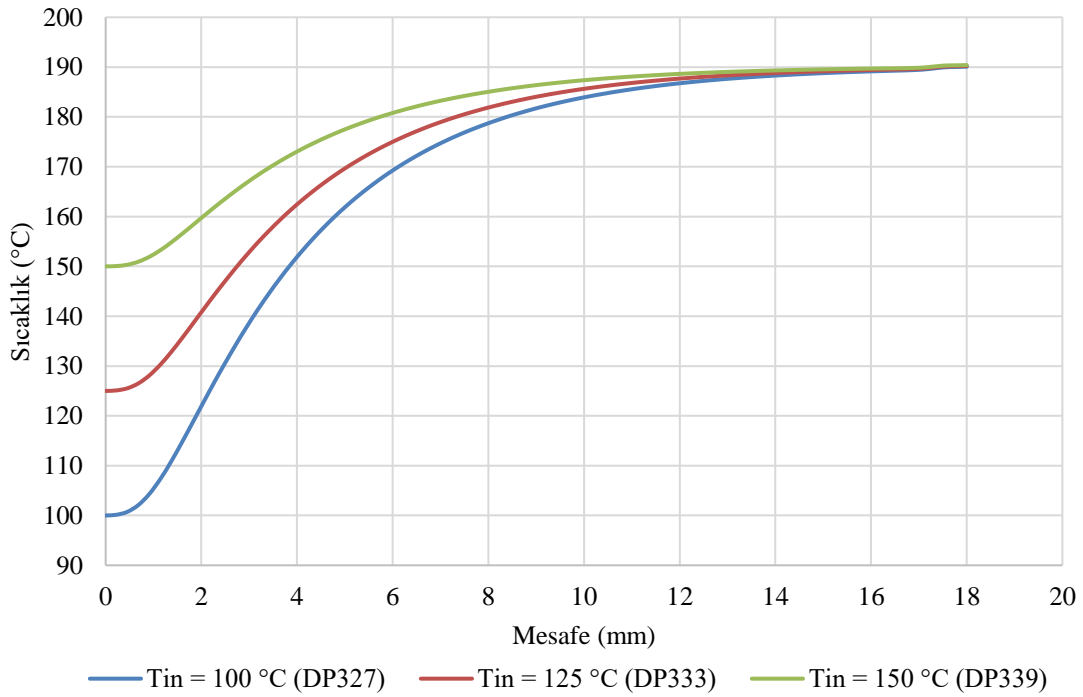
Daha yüksek hızlarda üretim yapılmak istendiğinde mevcut nozul tasarımları ve sınır şartları ile filamentin yeterli erime sıcaklığına ulaştırılamayacağı görülmüştür. Bu durumu giderecek iki çözüm yolu önerilmiştir. Bunlardan ilki filamentin giriş sıcaklığının artırılmasıdır. İkincisi nozul duvar sıcaklığının artırılmasıdır. Filamentin nozul'a giriş sıcaklığının etkilerini gözlemlemek için giriş sıcaklığının değişken olarak tanımlandığı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonların sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 4.20'de ve Şekil 4.21'de görülmektedir. Aynı tasarıma sahip nozul'larda, maksimum giriş hızı olan 6 mm/s hızında üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan nozul çıkış çapı (ϕ) 0.2 mm, nozul açısı (θ°) 45° ve duvar sıcaklığı (T_w) 190 °C'dir. Bütün tasarımlar için maksimum giriş hızı 6 mm/s olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.20 Giriş sıcaklığının, filamentin sıcaklık dağılımına etkisi.

Elde edilen bulgular giriş sıcaklığının artırılmasıyla filamentin nozul içerisinde erime sıcaklığına daha erken ulaştığını göstermiştir. Giriş sıcaklığı artırdıkça filament sıcaklığı nozul giriş bölgesine daha yakın kısımlarda erime sıcaklığına ulaşmaktadır. Giriş sıcaklığının 150 °C olduğu durumda filament nozul girişinden 6 mm sonra erime sıcaklığına ulaşmaktadır. Giriş sıcaklıkları düştükçe bu mesafe uzamaktadır. Giriş sıcaklığı 100 °C olduğunda filamentin erime sıcaklığına ulaşabilmesi için 8,5 mm ilerlemesi gerekmektedir.



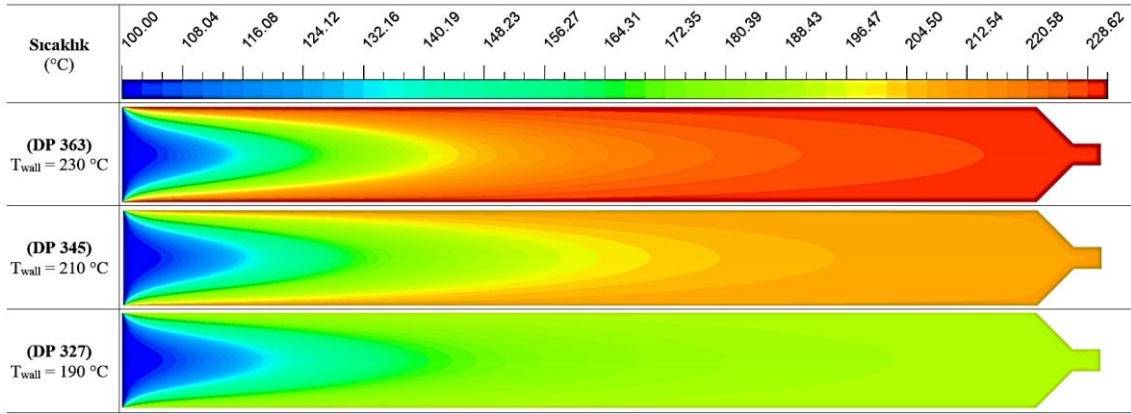
Şekil 4.21 Farklı giriş sıcaklıklarında filamentin sıcaklık değerleri.

Filamentin nozul içerisinde mümkün olan en kısa sürede erime sıcaklığına ulaşması ekstrüzyonun daha kararlı olmasına katkı sağlar. Buna rağmen filamentin giriş sıcaklığı artırıldığına ekstruder'in soğutma modülüne daha fazla ısının iletilmesi riskini de beraberinde getirmektedir. Isının soğutma modülüne yayılması filamentin sürülmesi ile ilgili problemleri de beraberinde getirecektir. Bu durumdan kaçınmak için soğutma modülünün filamentin sıcaklığını rijitliğini korumasını sağlayacak kadar verimli çalışması gerekir. Filamentin soğutma modülü içerisinde bulunan kısmının camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olan 60 °C'yi geçmemesi gerekmektedir. Dolayısıyla ideal bir ekstruder filamentin sıcaklığını 60 °C altında tutabilecek verimlilikte bir soğutma modülüne ve nozul girişinde filamentin sıcaklığını erime sıcaklığı olan 180 °C'ye en kısa sürede ulaştırabilecek bir ısıtma modülüne sahip olmalıdır. PLA gibi nispeten daha düşük erime sıcaklığına sahip filamentlerde bu şartları sağlamak daha kolay olabilir. Ancak daha yüksek erime sıcaklıklarına sahip termoplastikler için filamentin sıcaklık kontrolünün önemi artmaktadır. PLA polimerler için camsı geçiş sıcaklığı 80 °C ve erime sıcaklığı 180 °C iken, PA66 polimerleri için camsı geçiş sıcaklığı 50 °C ve erime sıcaklığı 260 °C'ye kadar ulaşmaktadır. PLA ile üretim yapılacak bir ekstruder için soğutma modülü ve ısıtma modülü arasında ulaşılması gereken sıcaklık farkı 100 °C iken PA66 filament ile üretim yapılırsa bu fark 200 °C'ye çıkmaktadır. Bazı filamentlerin camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı arasında farkın fazla olması ekstruder tasarımı için kritik öneme sahiptir.

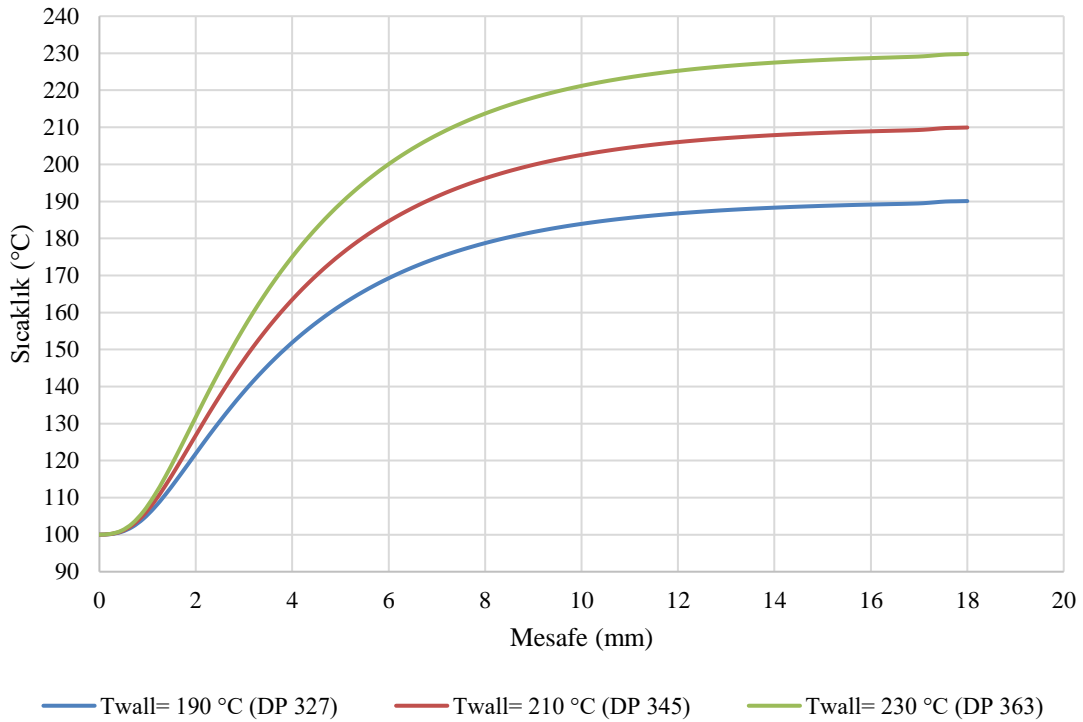
4.2.9 Duvar Sıcaklığı ile İlgili Bulgular

Nozul içerisindeki sıcaklık dağılımına filamentin giriş sıcaklığı ile birlikte duvar sıcaklığı da etki eder. Ekstruder'in soğutma modülü, ısıtma modülü ve nozul bölgelerinin istenen sıcaklıklarda tutulabilmesi için ekstruder'in genel tasarımı üzerinde değişiklik yapmak mümkündür. Nozul'da istenen yüksek sıcaklıklara çıkabilmek için daha yüksek duvar sıcaklıklarının kullanılması, nozul tasarımının değiştirilmesinden daha kolay bir çözüm yoludur. Nozul duvar sıcaklığını artırmak için ekstruder üzerinde daha büyük boyutlarda ve ısı üretim gücüne sahip termal rezistanslar kullanılabilir. Bu amaçla duvar sıcaklıklarının etkisini ortaya koymak için bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda sınır şartları filamentin en yüksek giriş hızı ve en düşük giriş

sıcaklıklarında, aynı tasarıma sahip nozul'ların performansını gösterecek şekilde planlanmıştır. Yapılan simülasyonlarda nozul çıkış çapı (Ø_c) 0.2 mm, nozul açısı (θ°) 45° , giriş sıcaklığı (T_{in}) 100°C ve giriş hızı (V_{in}) 6 mm/s ortak sınır şartı olarak belirlenmiştir. Simülasyonlardaki tek değişken 190°C (DP 327), 210°C (DP 345) ve 230°C (DP 363) olmak üzere duvar sıcaklıklarıdır (T_{wall}). Simülasyonlar sonucunda nozul içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te sunulmuştur.

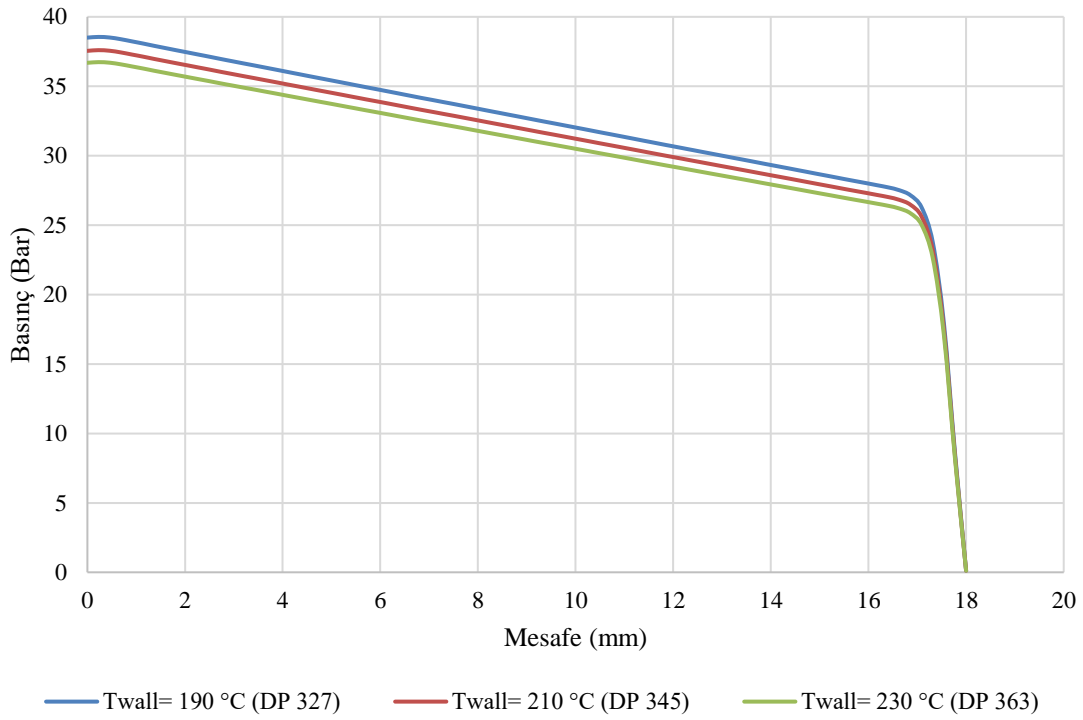


Şekil 4.22 Farklı duvar sıcaklıklarının nozul içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisi.



Şekil 4.23 Farklı duvar sıcaklıklarında filamentin nozul boyunca ulaştığı sıcaklıklar.

Elde edilen bulgular, duvar sıcaklığı artırıldığında filamentin nozul içerisinde daha erken erime sıcaklığına (T_m) ulaştığını göstermektedir. Giriş sıcaklığının 190 °C olduğu durumda filament nozul girişinden itibaren 8 mm sonra erime sıcaklığı olan 180 °C'ye ulaşmaktadır. Giriş sıcaklığının 210 °C olduğu durumda bu mesafe 5 mm'ye düşmekte ve giriş sıcaklığının 230 °C olduğu durumda ise 4 mm'ye düşmektedir. PLA filament için her üç sınır şartında da ekstrüzyon işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli sıcaklıklara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla 18 mm uzunluğundaki bir nozul PLA filamentler ile yapılacak üretimler için yeterli olacaktır. Ancak ABS, PA66 veya PETG gibi daha yüksek erime sıcaklıklarına sahip farklı filamentler için nozul uzunluğu yeterli olmayabilir. Bu durumda nozul tasarımının değiştirilerek boyutunun artırılması gerekebilir.



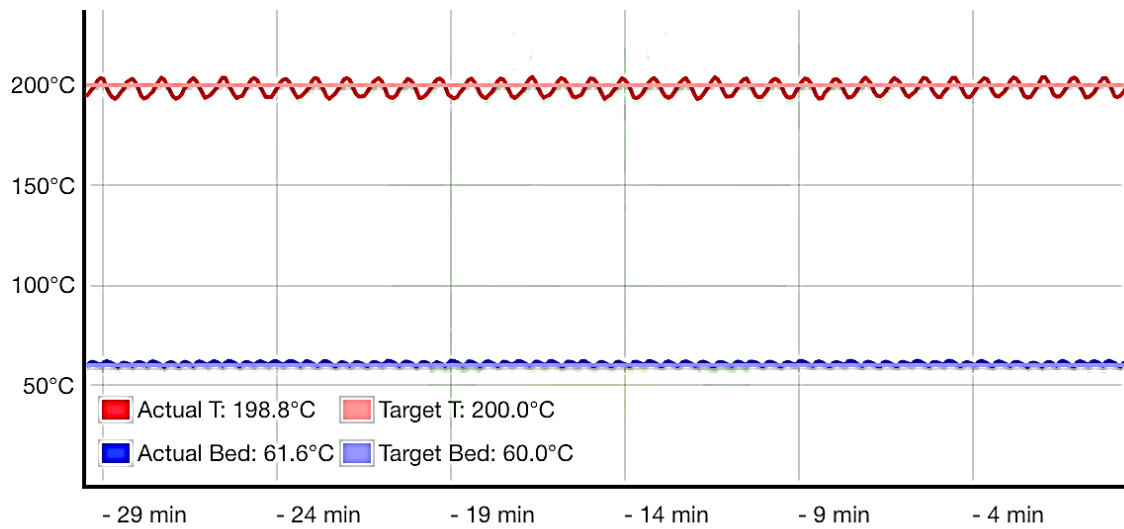
Şekil 4.24 Duvar sıcaklıklarının nozul içerisindeki basınca etkisi.

Nozul duvar sıcaklığı nozul içerisinde oluşan basınca etki göstermektedir. Şekil 4.24'te farklı duvar sıcaklıkları için elde edilen basınç grafiği görülmektedir. Nozul duvar sıcaklığı ile nozul içerisinde oluşan basınç dağılımları benzer karaktere sahiptir. Nozul duvar sıcaklığı artırıldıkça giriş bölgesinde oluşan toplam basınç düşmektedir. Duvar

sıcaklığının 230 °C ile en yüksek olduğu durumda giriş bölgesindeki ortalama basınç 36,5 Bar olmaktadır. Duvar sıcaklığı 210 °C ve 190 °C'ye düşürüldüğünde basınç değerleri de 37,5 Bar ve 38,5 Bar'a yükselmektedir. Her üç tasarımda da giriş bölgesinde elde edilen basınç değerleri farklılık gösterse de genel dağılımlar benzer özellikler sergilemektedir. Nozul içerisindeki toplam basınç göz önüne alındığında giriş bölgesindeki basınç değerleri çok büyük farklılıklar göstermemektedir. Dolayısıyla filament besleyicinin filamenti sürmek için üretmesi gereken kuvvet belirlenirken duvar sıcaklığı anlamlı bir fark oluşturmayacaktır.

4.3 Isıtıcı Blok Üzerinde Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

3B yazıcının ısıtma modülünde bulunan parçalardan biri ısıtıcı bloktur. Nozul, ısıtıcı rezistans ve ısı kontrolünü sağlayan termistör, ısıtıcı blok üzerinde bulunur. Isıtıcı blok üzerinde oluşan ısı mümkün olduğu kadar iyi bir şekilde nozul'a iletilir ve filamentin bu bölgede camsı geçiş sıcaklığına (T_g) yükseltilmesi sağlanır. Isıtıcı blok içine yerleştirilen rezistans gerekli durumlarda çalışır ve bloğun ısınmasını sağlar. Blok sıcaklığı bir sıcaklık sensörü ile sürekli kontrol edilir. Buna rağmen çoğunlukla sabit bir sıcaklığı korumak mümkün değildir. Üretim sürecinde çalışma sıcaklığı 200 °C olarak belirlenmişse blok üzerindeki sıcaklık bazı durumlarda 195 °C'ye kadar düşebilirken, bazı durumlarda 205 °C'ye kadar yükselebilir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 Dilimleyici yazılımda sıcaklık dalgalanmalarını gösteren grafik.

Isıtıcı blokta oluşan bu sıcaklık dalgalanmaları ekstrüzyonu anlık olarak etkileyebilir. Sıcaklık dalgalanmaları ne kadar az olursa ekstrüzyon o kadar stabil olur. Isıtıcı blok üzerinde oluşan sıcaklık dalgalanmaları 4 ana unsurdan etkilenir;

1. Rezistansın kapasitesi,
2. Sıcaklık sensörünün ölçüm hassasiyeti,
3. PID (Proportional Integral Derivative) denetleyicisi,
4. Isıtıcı blok tasarımı.

Ekstruder tasarımında kullanılan rezistans öncelikli olarak sistemin ulaşabileceği maksimum sıcaklığı etkiler. Düşük güçte bir rezistans ile ısıtma modülünün yüksek sıcaklıklara ulaştırılması mümkün olmayabilir. Isıtıcı blok üzerinde kullanılan rezistanslarda, genellikle krom nikel bir rezistans telinin seramik bir silindir üzerine sık aralıklarla sarılması ile üretilmektedir. Rezistansın etrafı termal iletkenliği oldukça yüksek olan magnezyum oksit ile kaplanır. Rezistans teli ve etrafındaki magnezyum oksit ile birlikte bir paslanmaz çelik muhafaza içine yerleştirilerek kullanıma hazır hale getirilir. Rezistans teli etrafında kullanılan magnezyum oksit ile rezistansın dış yüzeyinde eşit bir ısı dağılımı sağlanması amaçlanır. Rezistans yüzeyinde oluşacak ısı dalgalanmaları ısıtıcı bloğunda ısı dağılımını etkiler ve dalgalanmalara sebep olabilir.

Yapılan çalışmada kullanılan rezistansların dış yüzeyinde eşit sıcaklık sağladığı kabul edilmiştir. Rezistansın istenen çalışma sıcaklığına erişmesi için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Bazı rezistansların 200 °C'den 215 °C'ye ulaşması bir veya iki saniye kadar sürebilmektedir. Yapılan çalışmada rezistansa komut verildiğinde istenen sıcaklığa zaman kaybı yaşanmadan, komut verildiği anda ulaştığı kabul edilmiştir.

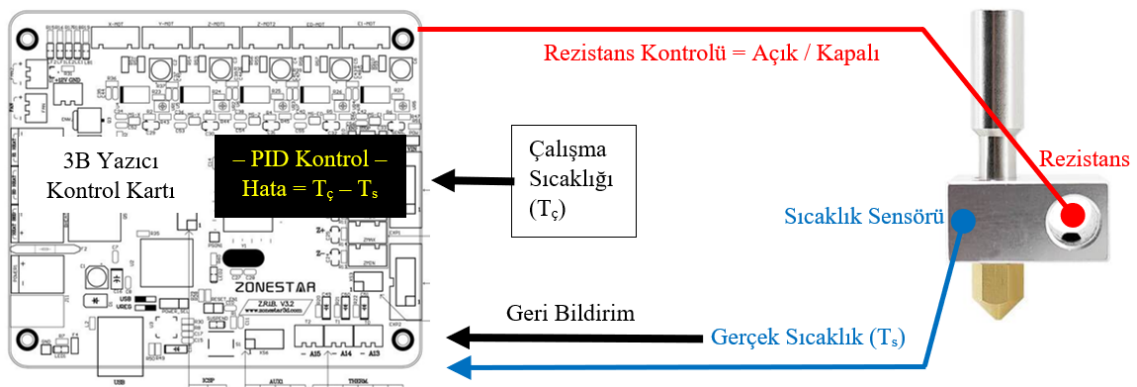
Isıtıcı bloğun sıcaklık kontrolü termistör, RTD (Resistance Temperature Detector) veya termokupl olmak üzere üç farklı sensör ile sağlanabilir. Sistemde kullanılan sıcaklık sensörü ısıtıcı blok üzerinde oluşan sıcaklık dalgalanmalarını önemli ölçüde etkiler. Isıtma modülünde kullanılacak olan sıcaklık sensörünün çalışma sıcaklığı, hassasiyeti ve tepki süresi ekstrüzyon sürecinin daha iyi kontrol edilebilmesi için önemlidir. RTD

sensörler $-260\text{ }^{\circ}\text{C} - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında, termokupl'lar $-200\text{ }^{\circ}\text{C} - 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında ve termistörler ise $-80\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında çalışmaktadır.

Mevcut sistemlerde düşük maliyeti nedeniyle genellikle termistörler kullanılmaktadır. Termistörler düşük maliyetlerinin yanı sıra yüksek hassasiyeti ve oldukça hızlı tepki süresi sunması ile 3B yazıcılar için ideal sensörlerdir. Ancak termistörlerin maksimum çalışma sıcaklığı $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarındadır ve özellikle yüksek sıcaklıklarda termistörlerin ölçüm hassasiyeti azalmaktadır. Bu nedenle ekstruder'da $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde yapılacak üretimlerde ısıtma modülünün termistörler ile sıcaklık kontrolü zorlaşmaktadır. Yüksek sıcaklıklar gerektiren üretimler için termistör yerine termokupl tercih edilebilir.

Sensör tipinin yanı sıra sensörün blok üzerindeki konumu da sıcaklık dalgalanmalarını etkilemektedir. Çalışma kapsamında farklı tipteki sensörler test edilmemiştir. Ancak ısıtıcı blok üzerine yerleştirilecek olan sensörün konumu optimize edilmiştir.

Isıtma modülündeki sıcaklık dalgalanmalarının azaltılmasının bir diğer yolu PID kontrol kullanmaktır. Ticari olarak kullanılan üst düzey 3B yazıcılarda PID kontrol kullanılmakla beraber düşük maliyetli yazıcıların birçoğunda PID kontrolü kullanılmamaktadır. Isıtma modülünde kullanılan sensörden gelen sıcaklık verisi 3B yazıcı kartında PID ile denetlenir (Şekil 4.26).



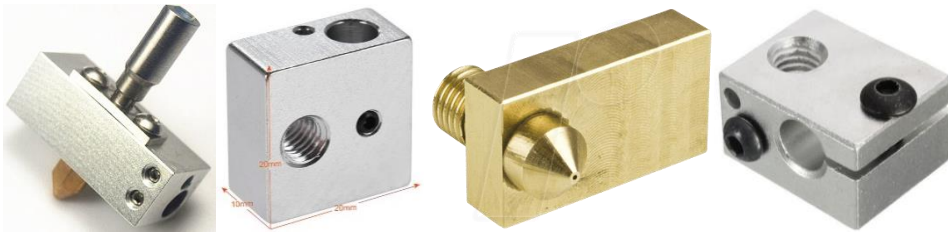
Şekil 4.26 3B yazıcılarda PID kontrol.

Isıtıcı blok üretim parametresi olarak belirlenen çalışma sıcaklığına (T_c) ulaşana kadar (örneğin PLA için ergime sıcaklığı olan $210\text{ }^{\circ}\text{C}$) rezistans çalışır. Bu esnada sıcaklık

sensörü sürekli olarak sıcaklık ölçümü yapmaya devam eder. PID denetleyici sürekli olarak, amaçlanan sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı (hata) hesaplar. Denetleyici süreç kontrol girdisini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. Sensörden okunan sıcaklık (T_s) ve çalışma sıcaklığı ($T_ç$) arasındaki hata istenen duruma geldiğinde rezistans kapatılır. Eğer hesaplanan hata değeri sonucunda sensörden okunan sıcaklık üretim sıcaklığının altına düşüyse rezistans tekrar çalıştırılarak ısıtıcı blok sıcaklığı tekrar arttırılır. Bu nedenle ısıtıcı blok üzerindeki sıcaklık her zaman dalgalanma halindedir. PID kontrolü sırasında kullanılan algoritmaya bağlı olarak kullanılan yazılımın optimize edilmesi ısıtma modülünde oluşan sıcaklık dalgalanmalarını azaltır.

4.3.1 Isıtıcı Blok Tasarımı

Isıtma modülünde oluşan sıcaklık dalgalanmalarını azaltmanın bir yolu ısıtıcı blok tasarımını iyileştirmektir. Çalışmanın bu kısmında ısıtıcı blok tasarımının sıcaklık dalgalanmalarına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmaya öncelikli olarak mevcut ısıtıcı blok tasarımlarının incelenmesiyle başlanmıştır. Mevcut tasarımlarda çoğunlukla dikdörtgen kesitli alüminyum malzemeden üretilen ısıtıcı bloklar kullanılmaktadır. Dikdörtgen kesitli geometrinin tercih edilmesindeki önemli etken üretim kolaylığıdır. Mevcut ekstruderlarda dikdörtgen kesitli ve farklı boyutlara sahip birçok ısıtıcı blok bulunmaktadır (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 Farklı ısıtıcı blok tasarımları.

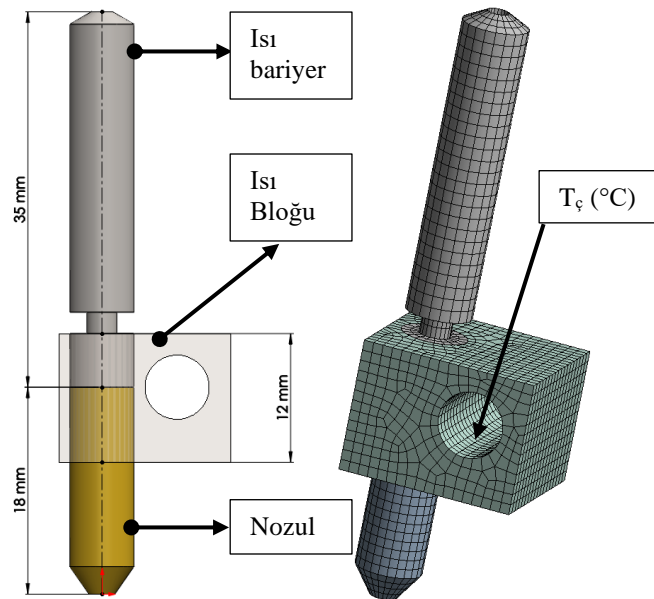
Isıtıcı bloğun nozul'a sıcaklığı iyi iletmesi için yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerin tercih edilmesi gerekir. Mevcut ekstruder tasarımlarında kolay işlenebilirliği, düşük maliyeti ve yüksek termal iletkenliği nedeniyle alüminyum ısıtıcı bloklar tercih edilmektedir.

Isıtıcı blok malzemesi olarak ağırlıklı olarak alüminyum tercih edilmekle beraber az sayıda da olsa pirinç ve bakır gibi malzemelerden üretilen ısıtıcı bloklar da bulunmaktadır. Isıtma modülü ısı bariyeri, blok ve nozul olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Her bir parçanın malzeme özellikleri Çizelge 4.5’te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 Isıtıcı blok analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri.

Parça	Malzeme	Termal İletkenlik (W / m °K)	Öz Isı (J / Kg °C)	Yoğunluk (Kg / m ³)
Isı Bloğu	Alüminyum	237,5	951	2689
Isı bariyeri	Çelik	15,1	434	7850
Nozul	Pirinç	111	162	8600

3B FFF yazıcılarda üretim sırasında ısıtıcı blokta gerçekleşen termal davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için sonlu elemanlar metodu kullanılarak zamana bağlı termal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan model ve ağ yapısı Şekil 4.28’de görülmektedir. Analiz öncesinde ağdan bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilmiş ve 27232 kuadratik elemandan oluşan bir ağ yapısı kullanılmıştır. Modelin aşırı karmaşık bir geometriye sahip olmaması nedeniyle heksahedral ağırlıklı bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Şekil 4.28’de görülen blok üzerinde ısıtıcı rezistansın yerleştirildiği yüzeye T_c ile yüzey sıcaklığı sınır şartı tanımlanmıştır.



Şekil 4.28 Mevcut ısıtıcı blok tasarımı, ağ yapısı ve zamana bağlı analizlerde sınır şartları.

Analizler toplamda ısıtma modülü üzerinde 150 saniyelik bir üretim sürecini kapsayacak şekilde zamana bağlı olarak yapılmıştır. PLA bir filament ile yapılan üretim sırasında Nozul sıcaklığı 210 °C olarak belirlenebilir. Ancak daha önce de bahsedildiği gibi belirlenen çalışma sıcaklığının 210 °C’de sabit tutulması mümkün değildir.

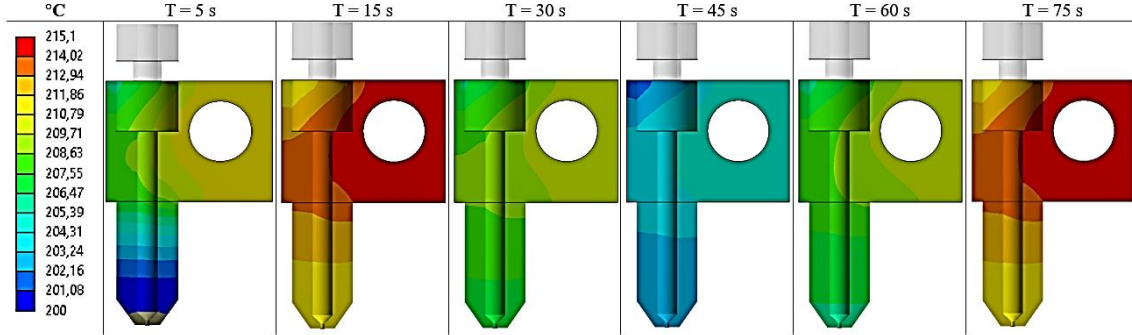
Ekstruder’in ısıtma modülü mutlaka sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalır. Sıcaklık dalgalanmalarını ifade edebilmek için 210 °C olarak belirlenen çalışma sıcaklığının ± 5 °C dalgalandığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla ısıtma modülünü sıcaklığını belirleyen rezistans çalışma sıcaklığını koruyabilmek için 215 °C’ye kadar ısınacak daha sonra sıcaklık sensörü ısıtma modülünün çalışma sıcaklığının aşıldığı belirlendiğinde rezistans kapanacak ve soğumaya başlayacaktır. Rezistans 205 °C’ye kadar soğuduğunda bu kez sensör ısıtma modülünün gereğinden çok soğuduğunu algılayacak ve rezistansın tekrar çalışmasını sağlayacaktır. Dolayısıyla yapılan analizde sıcaklık dalgalanmalarını tanımlamak amacıyla T_c sınır şartıyla belirlenen yüzeyin sıcaklığı 205 °C, 210 °C ve 215 °C olmak üzere 15 saniye aralıklarla değiştiği tanımlanmıştır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 Isıtıcı blok simülasyonlarında zamana bağlı sınır şartı parametreleri.

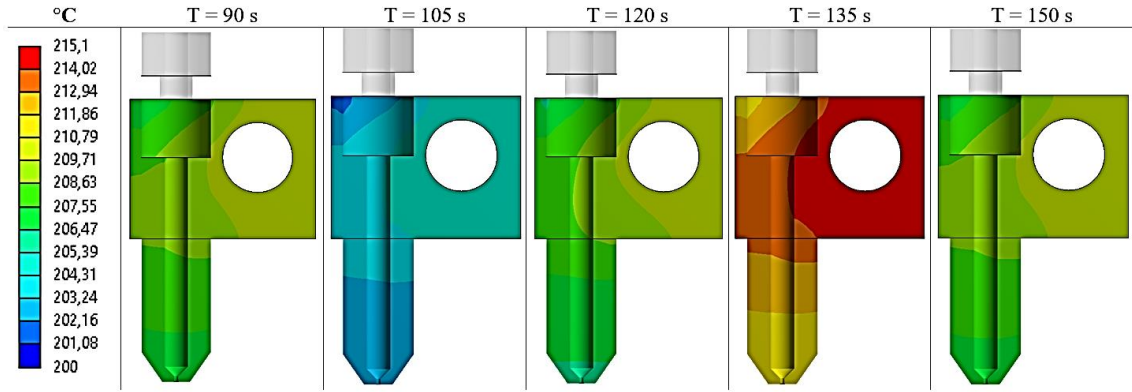
Adım	Süre (s)	T_c (°C)
0	0	210
1	15	215
2	30	210
3	45	205
4	60	210
5	75	215
6	90	210
7	105	205
8	120	210
9	135	215
10	150	210

Yapılan zamana bağlı termal analiz bulguları Şekil 4.29 ve 4.30’da görülmektedir. Modeller üzerindeki renk skalasında kırmızı renk yüksek sıcaklığı, mavi renkler ise düşük sıcaklık değerlerini göstermektedir. Isıtma modülünün farklı zamanlardaki sıcaklık

dağılımlarının daha kolay karşılaştırılabilmesi için bütün şekillerdeki renk skalalarında maksimum sıcaklık değeri 215 °C ve minimum sıcaklık değeri 200 °C'ye sabitlenmiştir.



Şekil 4.29 Mevcut tasarımda 5s ve 75s aralığında ısıtma modülü üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları.

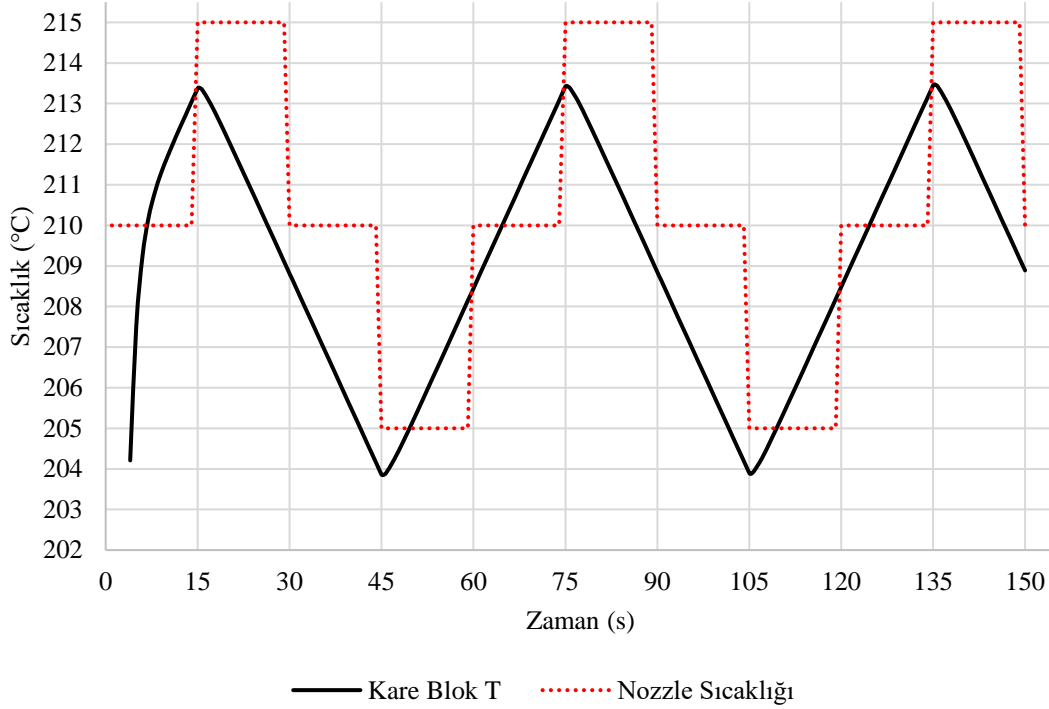


Şekil 4.30 Mevcut tasarımda 90s ve 150s aralığında ısıtma modülü üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları.

Elde edilen bulgular ısıtma modülünde gerçekleşen sıcaklık dalgalanmalarından özellikle nozul bölgesini daha çok etkilediğini göstermektedir. Rezistansın bulunduğu bölgede belirlenen çalışma sıcaklığına ulaşabildiği görülmektedir. Ancak nozul'un özellikle uç bölgelerinde hiçbir zaman belirlenen çalışma sıcaklığına ulaşamamaktadır.

Şekil 4.31'de sunulan grafikte bu durum daha net olarak görülmektedir. Grafikte ısıtıcı blok ve nozul'un ortalama sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi siyah çizgi ile görülmektedir. Kırmızı noktalı çizgi ise ilgili zamandaki belirlenen çalışma sıcaklığındaki değişimi göstermektedir. Çalışma sıcaklığının 215 °C ile maksimum olduğu anda (t = 15s) ısıtma modülünün ortalama sıcaklığı yaklaşık 2 °C daha düşük olmaktadır. Aynı anda nozul'un rezistansa en uzak olduğu uç bölgesinde ise bu sıcaklık

değeri 209 °C'ye kadar düşmektedir. Çalışma sıcaklığının en düşük değeri olan 205 °C'de iken ısıtma modülünün ortalama sıcaklığı benzer şekilde yine yaklaşık 2 °C daha düşük olmaktadır. Bu esnada ($t = 45s$) nozul'un rezistansa en uzak uç bölgesindeki sıcaklığı 200 °C'ye kadar düşmektedir.

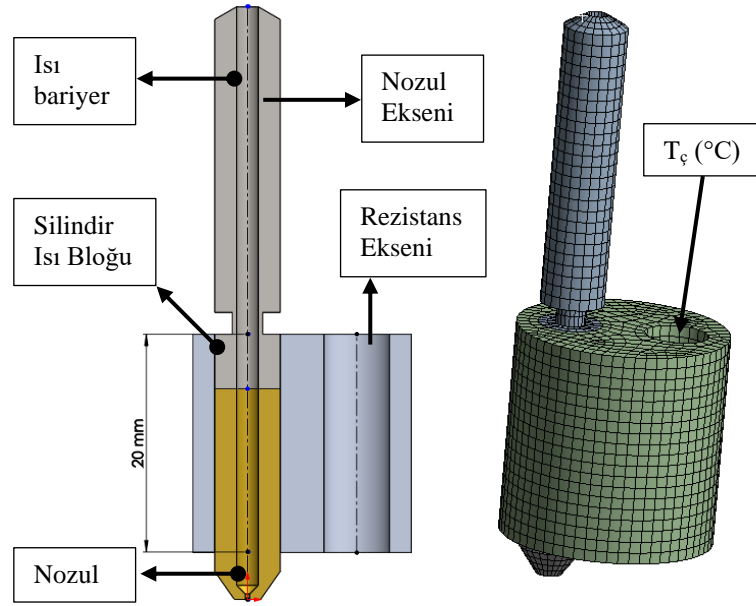


Şekil 4.31 Mevcut tasarımda ısıtıcı blokta oluşan ortalama sıcaklık grafiği.

Elde edilen bulgular ısıtıcı bloğun üzerinde oluşan ısıyı nozul'a yeteri kadar iletemediğini göstermektedir. Isıtma modülü üzerinde rezistansın bulunduğu yüzey belirlenen çalışma sıcaklığına yakın sıcaklıklara ulaşsa da ekstrüzyon sürecinin gerçekleştiği nozul'da belirlenen sıcaklıklara ulaşamamaktadır. Sıcaklıktaki dalgalanmalar da göz önünde bulundurulduğunda kararlı bir ekstrüzyon sağlanması oldukça zorlaşmaktadır. Mevcut tasarımlarda nozul'a yeteri kadar ısının iletilmemesi ve nozul bölgesinin sıcaklık dalgalanmalarından çok fazla etkilenmesi olmak üzere iki önemli sorun tespit edilmiştir.

Tespit edilen sorunların giderilebilmesi için blok tasarımının optimize edilmesi gereklidir. Hem nozul bölgesine daha iyi ısı iletimi sağlayacak hem de nozul'ın ısıtma modülünde oluşan sıcaklık dalgalanmalarından daha az etkileneceği yeni bir ısıtıcı blok tasarımı önerilmiştir (Şekil 4.32). Önerilen tasarımda mevcut tasarımlardan farklı olarak

üç önemli özellik öne çıkmaktadır. Birincisi; önerilen tasarımda ısıtıcı blok boyutları mevcut tasarımlardan daha büyüktür. İkincisi; mevcut tasarımlarda rezistansın eksenini nozul eksenine dik durumdur. Önerilen tasarımda rezistans nozul ile belirli bir mesafede paralel eksene sahiptir. Önerilen tasarımın mevcut bloklardan bir diğer farkı kare veya dikdörtgen kesit yerine silindirik bir yapıya sahip olmasıdır.

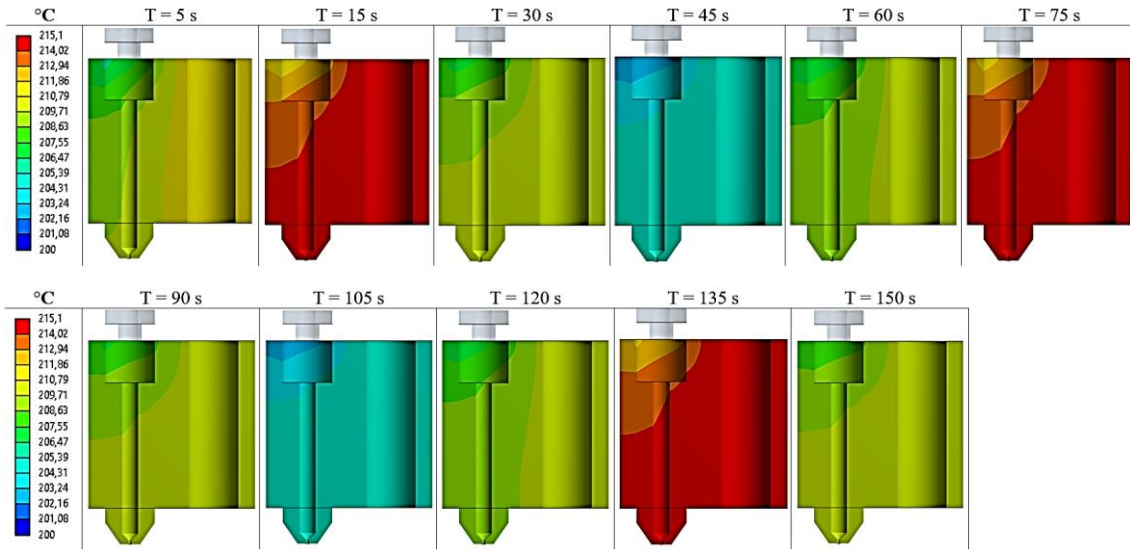


Şekil 4.32 Çalışma kapsamında önerilen ısıtma modülü tasarımı ve ağ yapısı.

Önerilen tasarım üretilmeden önce sonlu elemanlar metodu kullanılarak ısı transfer analizleriyle incelenmiştir. Şekil 4.32 'de önerilen tasarımın 122773 elemandan oluşan ağ yapısı görülmektedir. Mevcut tasarımların incelenmesi sırasında kullanılan sınır şartları ve analiz özellikleri sabit tutulmuştur. Kare kesitli ısıtıcı bloklar üzerinde yapılan analizlerde olduğu gibi yeni tasarımın analizlerinde de sıcaklık dalgalanmaları rezistansın temas ettiği yüzeyde 205 °C, 210 °C ve 215 °C olmak üzere 15 saniye aralıklarla değiştiği tanımlanmıştır (Çizelge 4.6). Önerilen tasarımda nozul'ın malzemesi pirinç, ısı bariyeri'nin malzemesi çelik ve ısıtıcı bloğun malzemesi alüminyum olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5).

Önerilen tasarımın zamana bağlı ısı transfer analiz bulguları Şekil 4.33'te sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre rezistansın nozul eksenine paralel olarak konumlandırılması ısı transferinin nozul'a daha iyi iletilmesini sağlamaktadır. Kare kesitli ısıtıcı bloкта

ekstrüzyon yüzeyi boyunca sıcaklık değişimleri oldukça fazladır. Bu durum rezistansın nozul eksenin dik olması ile ilgilidir. Filamentin ısı transfer iletimi oldukça düşüktür. Bununla birlikte erimiş filamentin dinamik viskozitesi sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Rezistansın nozul eksenin paralel olması ısıtma yüzeyini artırmakta ve böylece nozul içerisinde filamentin her bölgesinin daha homojen ısıtılmasını sağlamaktadır.

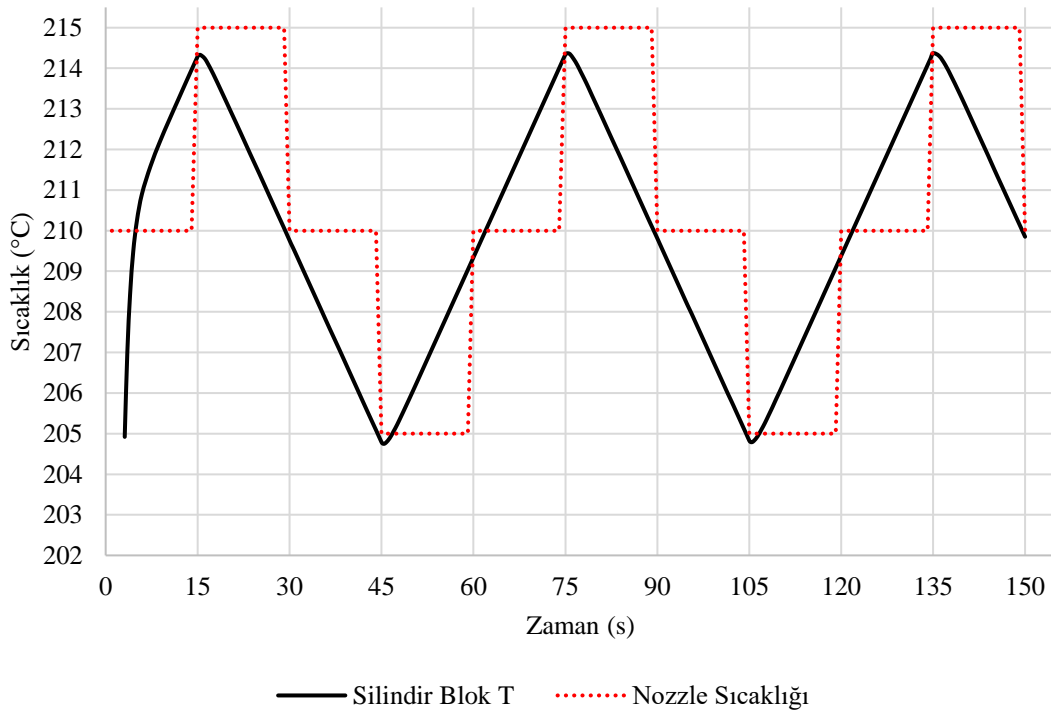


Şekil 4.33 Önerilen ısıtma modülü üzerinde zamana bağlı sıcaklık dağılımları.

Isıtıcı bloğun boyutlarının artırılması sisteme iki önemli fayda sağlamaktadır. Birincisi rezistans pozisyonunun sağladığı avantaja benzer şekilde nozul bölgesinin daha iyi ısıtılmasına katkı sağlamaktadır. İkincisi ve daha önemlisi nozul bölgesinde oluşabilecek sıcaklık dalgalanmalarını azaltmaktadır. Birim yüzeyin artması ısıtıcı bloğun ortam şartlarından daha geç etkilenecek, nozul'ın daha geç soğumasını sağlamaktadır. Bu durum Şekil 4.34'te verilen grafikte daha net görülmektedir. Grafikte silindirik ısıtıcı blok ve nozul'ın ortalama sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi siyah çizgi ile görülmektedir. Kırmızı noktalı çizgi ise ilgili zamandaki belirlenen çalışma sıcaklığındaki değişimi göstermektedir.

Çalışma sıcaklığının 215 °C ile maksimum olduğu anda ($t = 15s$) ısıtma modülünün ortalama sıcaklığı en fazla 0,5 °C düşük olmaktadır. Aynı anda nozul'ın rezistansa en uzak olduğu uç bölgesinde ise bu sıcaklık değeri sadece 1 °C azalarak 214,3 °C'ye

düşmektedir. Çalışma sıcaklığının en düşük değeri olan 205 °C’de iken ısıtma modülünün ortalama sıcaklığı benzer şekilde yine yaklaşık 1 °C daha düşük olmaktadır. Bu esnada ($t = 45s$) nozul’ın rezistansa en uzak uç bölgesindeki sıcaklığı belirlenen çalışma sıcaklığı olan 205 °C ile aynı olmaktadır. Elde edilen bulgular ısıtıcı bloğun boyutunun büyütülmesiyle nozul bölgesinin sıcaklık dalgalanmalarından daha az etkilendiğini kanıtlamaktadır. Nozul bölgesinde oluşabilecek sıcaklık dalgalanmaları önerilen tasarımla azaltılmıştır. Ancak sistemin daha kararlı çalışması ve sıcaklık dalgalanmalarının daha da azaltılması için yeni önerilen tasarımla birlikte sıcaklık ölçümlerinin için PID kontrol ile desteklenmesi fayda sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.34 Silindir ısıtıcı blok için ortalama sıcaklık değerleri.

Önerilen tasarımda ısıtıcı blok geometrisi özellikle silindir olarak seçilmiştir. Benzer avantajlar dikdörtgen kesitli bir yapı ile de sağlanabilirdi. Önerilen tasarıma yakın boyutlarda dikdörtgen kesitli bir ısıtıcı bloğun boyutları 20 X 20 X 20 mm olmaktadır. Çalışmalar kapsamında dikdörtgen kesitli bir ısıtıcı blok üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Ancak silindir bloğun sağladığı avantajlar nedeniyle dikdörtgen kesitli blok tasarımı tercih edilmemiştir. Her iki geometriye sahip bloğun da üretilebilirliği ve

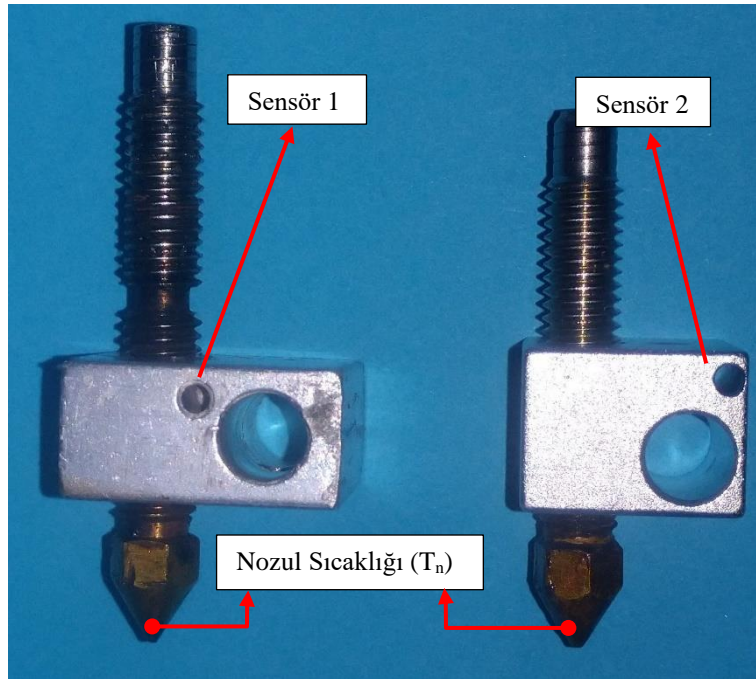
maliyetleri birbirine yakındır. Aynı boyutlarda dikdörtgen kesitli bir blok kullanıldığında bloğun ağırlığı 18,55 gr ve yüzey alanı 3040,88 mm² olmaktadır. Silindir kesitli blokta ise ağırlık yaklaşık %25 azalarak yaklaşık 13,91 gr olmakta ve yüzey alanı yaklaşık %20 azalarak 2525,84 mm² olmaktadır. Isıtıcı bloğun yüzey alanının azalması blok ısısının ortam sıcaklıklarından daha az etkilenmesini sağlamaktadır. Önerilen tasarımın bahsedilen avantajlarının yanı sıra önemli bir dezavantaja sahiptir. Isıtıcı bloğun boyutlarının artırılması ısıtma modülünün daha iyi ısıtılmasını sağlarken burada oluşan ısının soğutma modülüne daha çok yayılması riskini de beraberinde getirmektedir. Soğutma modülünün ısınması istenmeyen bir durumdur. Soğutma modülü bölgesindeki sıcaklık filamentin camsı geçiş sıcaklığına (T_g) ulaşırsa filament bu bölgede erimeye başlar ve filamentin sürülmesini imkânsız hale gelebilir. Bu risk dikkate alınarak çalışma kapsamında soğutma modülünün tasarımında daha iyi soğutma yapacak şekilde iyileştirmeler yapılmıştır. Soğutma modülü üzerinde yapılan çalışmalar “4.5 Soğutma modülü üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları” başlığı altında sunulmuştur. Mevcut ısıtıcı bloklar ve çalışma kapsamında üretilen silindir geometriye sahip ısıtıcı bloğun resimleri Şekil 4.35’te görülmektedir.



Şekil 4.35 Mevcut ısıtma modülü tasarımları ve önerilen tasarım.

4.3.2 Sensör Konumunun Sıcaklık Dalganmalarına Etkisi

Isıtıcı blok tasarımları üzerinde yapılan termal analizler sırasında blok üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörünün konumunun önemli olduğu tespit edilmiştir. Filamentin eritilmesi ve ekstrüzyon süreci nozul içerisinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla ekstrüzyon sürecinin daha iyi kontrol edilebilmesi için en ideal durum nozul içerisindeki filamentin sıcaklığının tespit edilmesidir. Ancak fiziksel şartlar nozul içerisinden ölçüm yapılmasını imkânsız kılmaktadır. Nozul içerisindeki bölgenin boyutlarının çok küçük olması nozul içerisinden sıcaklık ölçümü yapacak sensörün de boyutlarının çok küçük olmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte ölçüm sırasında nozul içerisindeki akışın da engellenmemesi gerekmektedir. Sıcaklık ölçümü nozulun içerisinden yapmak zor olmakla birlikte nozulun dışından fakat erime bölgesine oldukça yakın noktalardan sıcaklıkların çeşitli sensörler ile ölçülmesi mümkündür. Isıtıcı blok bu anlamda sensörün yerleştirilmesi için yeterli alanı sunmaktadır. Mevcut ısıtıcı blok tasarımlarında sıcaklık ölçümü için yerleştirilecek termistörler için boşluklar kullanılmaktadır (Şekil 4.36).

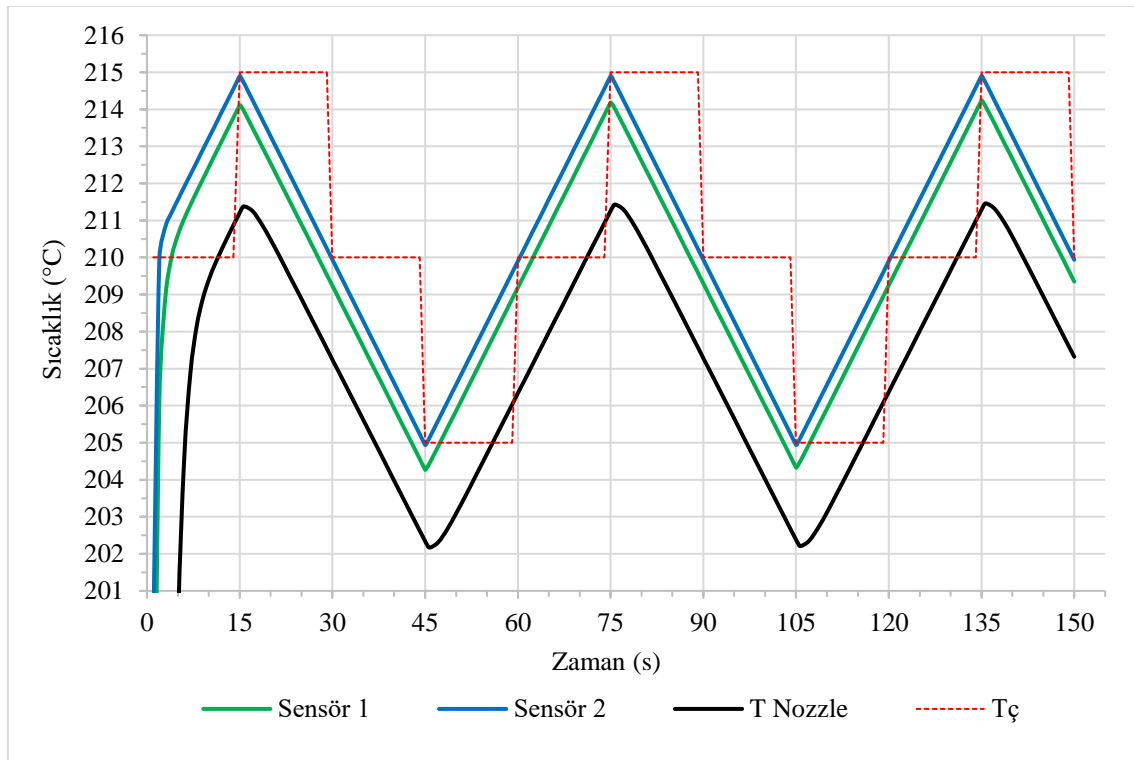


Şekil 4.36 Mevcut ısıtıcı bloklar üzerindeki sıcaklık sensörü konumları.

Isıtıcı blok üzerindeki sıcaklık sensörü eğer nozul bölgesinden uzaksa referans alınan sıcaklık doğru olmayacaktır. Şekil 4.36'da sağda görülen ısıtıcı blok üzerinde bulunan

sensör konumu (Sensör 2) nozul bölgesinden oldukça uzaktadır. Sensör bu konumdayken nozul bölgesindeki sıcaklığı değil, rezistansın temas yüzeyine yakın bölgelerin sıcaklığını ölçecektir. Aynı şekilde solda görülen ısıtıcı bloкта sensör konumu (Sensör 1) nozul bölgesine daha yakın bulunmaktadır. Solda görülen ısıtıcı bloktaki sensör filamentin nozul'a girdiği bölgeye yakın bir noktaya konumlandırılmıştır. Ancak yine de rezistans yüzeyine oldukça yakın bir bölgede bulunmaktadır.

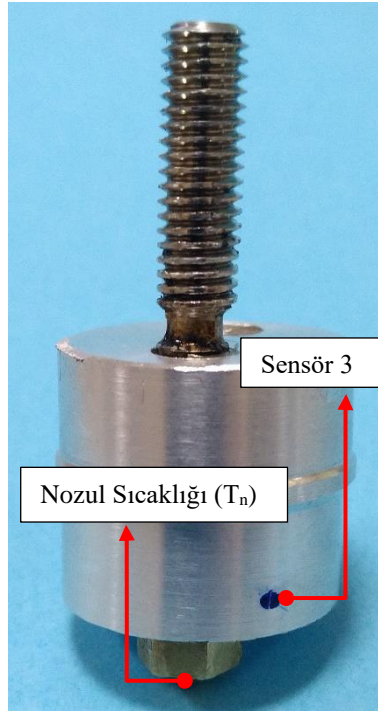
Her iki model için de yapılan zamana bağlı ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.37'de sunulmuştur. Grafikte 150 saniyelik sürede ısıtma bloğu üzerindeki farklı bölgelerin sıcaklık değişimleri görülmektedir. Yeşil çizgi Sensör 1'in bulunduğu noktadaki sıcaklığı, mavi çizgi Sensör 2'nin bulunduğu noktadaki sıcaklığı ve siyah çizgi ise nozul'un uç bölgesindeki sıcaklığı göstermektedir. Kırmızı kesik çizgi ise rezistans yüzeyi için belirlenen çalışma sıcaklığı değerleridir.



Şekil 4.37 Farklı sensör konumlarında ısıtma modülünde oluşan sıcaklık dalgalanmaları.

Grafikte görüleceği üzere Sensör 2'den okunan sıcaklık değerleri çalışma sıcaklığı olarak belirlenen sıcaklık değerleriyle birebir örtüşmektedir. Örneğin 15. saniyede belirlenen

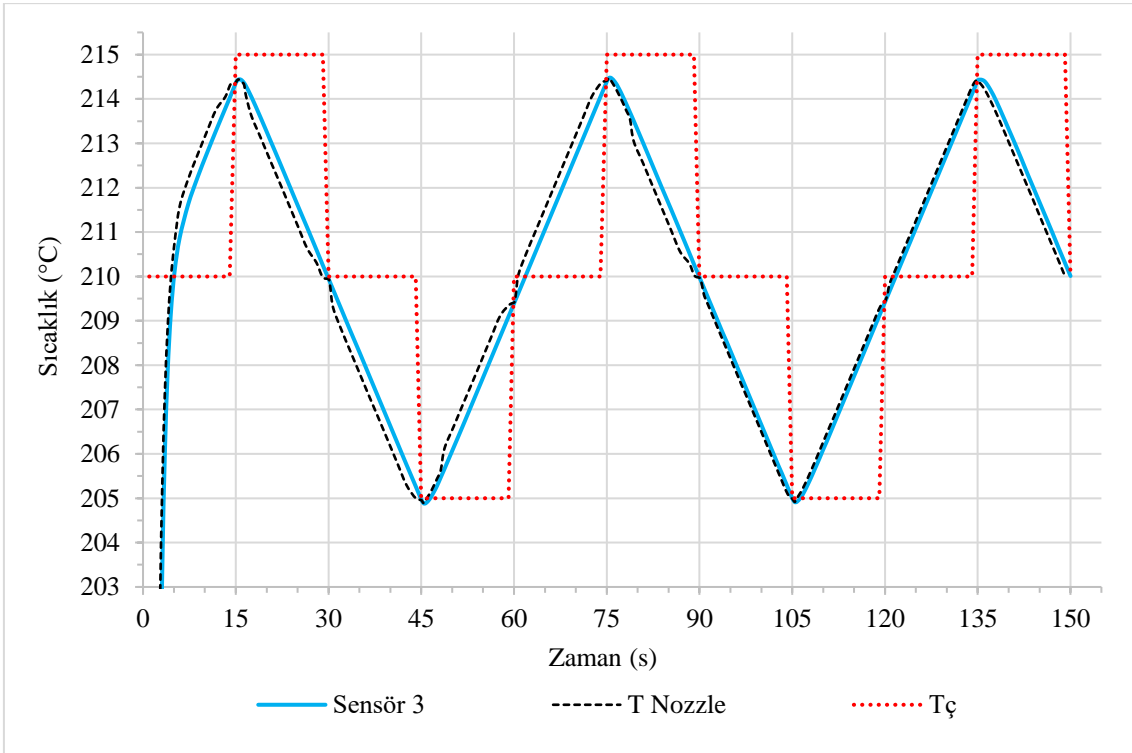
çalışma sıcaklığı 215 °C iken Sensör 2'den ölçülen sıcaklık da 215 °C olmaktadır. Ancak aynı esnada nozul sıcaklığı 211 °C'ye kadar düşmektedir. 45. saniyede ise belirlenen çalışma sıcaklığı ve Sensör 2'den ölçülen sıcaklıklar 205 °C iken nozul sıcaklığı 202 °C'ye kadar düşmektedir. Benzer davranış Sensör 1'in bulunduğu konumda da görülmektedir. Ancak Sensör 1'den ölçülen sıcaklıklar bulunduğu konum nedeniyle çalışma sıcaklığından 1 °C kadar daha düşüktür. Ancak yine de nozul'ın uç bölgesindeki sıcaklıklardan farklı değerler ölçülmektedir. Bu durum üretim sırasında çalışma sıcaklığı belirlenirken sensör konumunun da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Ölçülen sıcaklıklar ile nozul üzerinde gerçekte oluşan sıcaklıkların bu kadar farklı olması ekstrüzyonu olumsuz etkileyecektir. Sensör konumlarından kaynaklı ölçüm hatalarına ısıtma modülündeki sıcaklık dalgalanmaları eklendiğinde sorun daha da büyümektedir. Diğer yandan filamentin düşük ısı iletkenliği dikkate alınırda nozul'a en yakın bölgeden sıcaklık ölçümü yapılsa bile filamentin merkez bölgesine yeteri kadar ısı iletiminin sağlanamaması riski de bulunmaktadır. Bu durum üretim sırasında kararsız ekstrüzyona sebep olmakla beraber nozul'ın tıkanmasına da sebebiyet verebilir.



Şekil 4.38 Önerilen ısıtıcı blok tasarımı ve üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörünün konumu.

Önerilen yeni ısıtıcı blok tasarımı sensör konumu optimize edilmiştir. Şekil 4.38’de önerilen ısıtıcı blok tasarımı ve üzerinde sensör konumu (Sensör 3) görülmektedir. Kare kesitli ısıtıcı blok tasarımları için daha önce yapılan zamana bağlı ısı transferi analizleri önerilen ısıtıcı blok tasarımı için aynı şartlar ile tekrarlanmıştır.

Analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.39’da sunulmuştur. Grafikte mavi ile görülen çizgi Sensör 3 konumundan elde edilen sıcaklık değerlerini göstermektedir. Kırmızı noktalı çizgi çalışma sıcaklığını (T_c) göstermektedir. Siyah kesikli çizgi ise nozul’un uç kısmından (T_n) elde edilen sıcaklık değerlerini göstermektedir. Elde edilen bulgulara göre önerilen ısıtıcı blok tasarımı üzerinde Sensör 3 konumundan ölçülen sıcaklık değerleri ile nozul sıcaklık değerlerinin birebir örtüşmektedir. Belirlenen çalışma sıcaklığı ve ölçülen sıcaklık arasındaki fark 1°C ’den daha azdır. Dolayısıyla önerilen blok tasarımı ve sensör konumu ile üretim öncesinde belirlenen çalışma sıcaklığı ile nozul içerisindeki sıcaklık birbirine çok az bir hata payı ile yakınsamaktadır.



Şekil 4.39 Silindir bloğa sahip ısıtma modülünde zamana bağlı ortalama sıcaklık değişimi.

4.4 Isı Bariyeri Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Literatürde ekstrüzyon sürecini etkileyen nozul sıcaklığı, baskı hızı ve yönü gibi çeşitli parametrelerin ürün kalitesini ve ürünün dayanımını etkilediği kanıtlanmıştır. Ancak bu çalışmalar ekstruder'in termal davranışını açıklamaktan çok üretim parametrelerinin ürün üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Ekstruder'in termal davranışıyla ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Jerez-Mesa vd. 2016, Maria ve Piperi 2017, Peng vd. 2018, Yuran ve Yavuz 2020). Ekstruder içinde filamentin ergimesi üzerine yapılan 2D FEM çalışmaları bulunmaktadır (Heller vd. 2016, Rao 2015, Zhao ve Yang 2015, Zhao 2017). Farklı soğutucu geometrilerinin ekstruder sıcaklığına olan etkilerini inceleyen çalışmalarda Soğutma modülünün daha verimli soğutulabilmesini sağlayacak çeşitli tasarımlar incelenmiştir (Jerez-Mesa vd. 2018, Koc 2017, Kuznetsov vd. 2019b, Oubalouch vd. 2020, Rao 2015). Soğutucu üzerine bir fan yardımıyla gönderilen hava miktarı ne kadar arttırılırsa soğutma modülü daha düşük sıcaklıklarda tutulabilir.

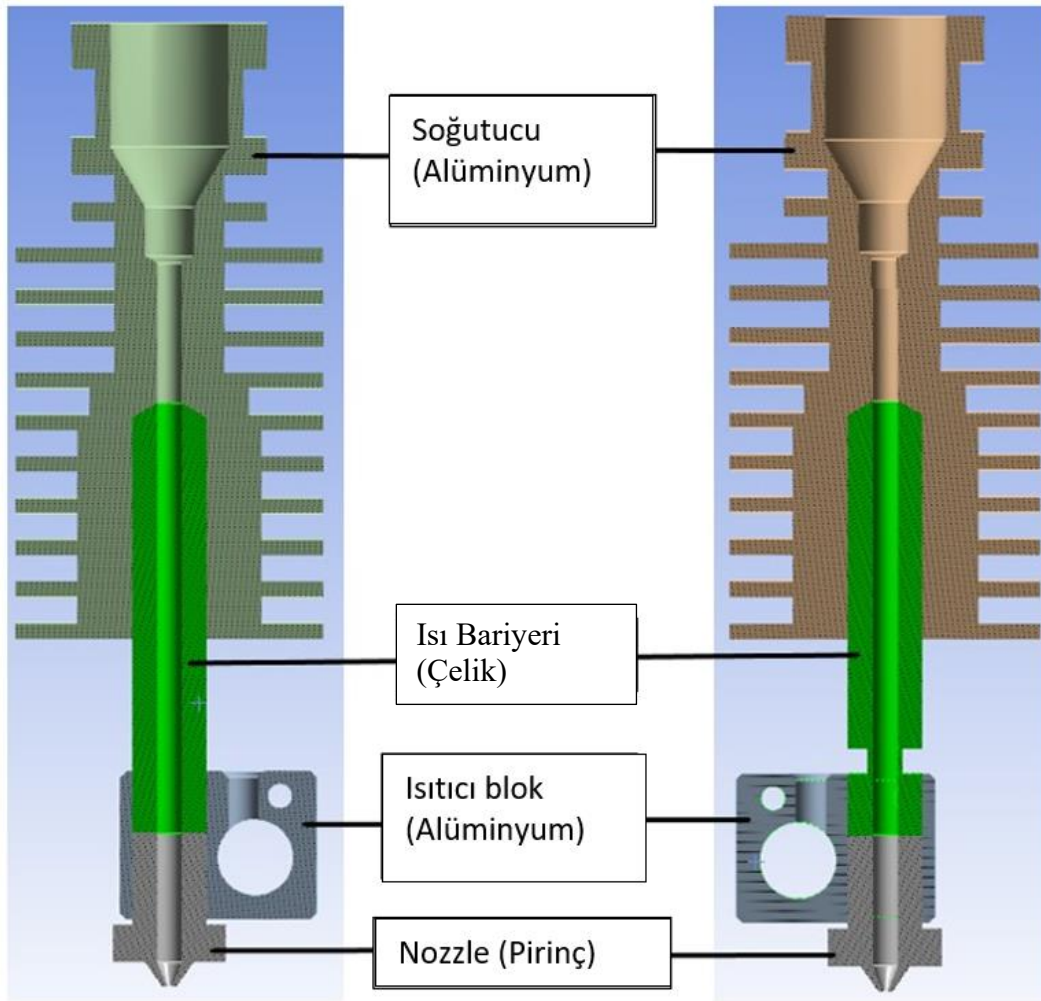
Ekstruder'in termal davranışını iyileştirmek için yapısında kullanılan malzemelerin termal özelliklerinden faydalanılır. Isıtma modülü kısmında oluşan sıcaklığın filamente daha hızlı iletilmesini sağlamak için termal iletkenlik katsayısı yüksek sayılabilecek pirinç ($h_{\text{pirinç}} = 111 \text{ W/mC}^0$) nozullar kullanılır. Benzer şekilde soğutma modülünün sahip olduğu ısıyı ortama aktararak daha iyi soğumasını sağlamak için alüminyum ($h_{\text{alüminyum}} \approx 165 \text{ W/mC}^0$) malzemeler kullanılır. Ancak Isıtma modülü ve soğutma modülü arasında mümkün olduğu kadar az ısı transferi gerçekleşmelidir. Isıtma modülündeki yüksek ısının soğutma modülüne geçmesi istenmez. Bu nedenle bu iki yapı arasında bulunan ısı bariyeri ısı transfer katsayısı diğer parçalara göre daha düşük olan paslanmaz çelik ($h_{\text{çelik}} \approx 15 \text{ W/mC}^0$) malzemedен üretilir.

Ekstruder'in termal davranışını iyileştirmek için termal iletkenlikleri farklı malzemeler, soğutucu elemanlar ve soğutucu fan ilk akla gelen çözümlerdir. Ancak bunun yanı sıra sistemi oluşturan parçaların tasarımı da termal davranışa etkilidir. Özellikle soğutma modülü ve ısıtma modülü arasındaki ısı transferi ısı bariyeri olarak adlandırılan parça üzerinden gerçekleşmektedir. Yapılan bu çalışmada ısı bariyeri tasarımının ekstruder'in termal davranışına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi

kullanılarak iki farklı ısı bariyeri tasarımının ekstruder'ın genel termal dağılımına olan etkisi gözlemlenmiştir. Bilgisayar simülasyonlarının sonuçları termal kamera görüntüleriyle doğrulanmıştır.

4.4.1 Çalışmada Kullanılan 3B Model ve Özellikleri

Ekstruder soğutucu, ısı bariyeri, ısıtıcı blok ve nozul olmak üzere dört ana parçadan oluşmaktadır. Soğutma modülünde bulunan soğutucu (Şekil 4.40) kanatlı bir yapıya sahiptir ve bu yapıya genellikle bir fan bağlıdır. Böylece zorlanmış taşınım ile daha yüksek bir ısı transferi sağlanarak soğutma modülü bölgesinin daha iyi soğutulması amaçlanır. Isı transferini arttırmak için alüminyum malzemeden üretilmiştir.



Şekil 4.40 Soğutma ve ısıtma modüllerinin bağlantısını sağlayan yapı; ısı bariyeri.

Isıtıcı blok (Şekil 4.40) ısıtma modülü kısmında bulunur ve yine ısı transferini artırmak amacıyla alüminyum malzemeden üretilmiştir. Ancak soğutucunun aksine bu parça ısıyı daha iyi ileterek ısıtma modülü bölgesinin filamentin ergime sıcaklığına yükseltilmesinden sorumludur. Isıtıcı blok içine bir ısıtıcı rezistans ve sıcaklık ölçümü için sıcaklık sensörü olarak termistör veya termal çift (Sıcaklık sensörü) yerleştirilir. Isıtıcı blok üretim parametresi olarak belirlenen sıcaklığa ulaşana kadar (örneğin PLA için ergime sıcaklığı olan 220 °C) rezistans çalışır. Bu esnada termistör sürekli olarak sıcaklık ölçümü yapmaya devam eder. Isıtıcı blok sıcaklığı istenen sıcaklığa (220 °C) geldiğinde termistörden bu veri okunur ve rezistans kapatılır. Eğer blok sıcaklığı üretim sıcaklığının altına düşüyse rezistans tekrar çalıştırılarak ısıtıcı blok sıcaklığı tekrar artırılır. Bu nedenle ısıtıcı blok sıcaklığı ve dolayısıyla nozul sıcaklığı sürekli olarak dalgalanma halindedir, çoğunlukla sabit sıcaklığı korumak mümkün değildir.

Sıcaklıkta oluşan dalgalanmalar filamentin ergimesini anlık olarak etkileyebilir. Sıcaklık dalgalanmaları ile ilgili tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar, “4.3 Isıtıcı blok üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları” başlığında incelenmiştir. Nozul (Şekil 4.40) ısıtıcı blok tarafından iletimle ısıtılan ve pirinç malzemeden üretilen bir parçadır (Çizelge 4.7). Nozul 0.1 mm ve 1 mm aralığında farklı çaplarda kullanılabilir. Çalışmada kullanılan nozul çapı 0.4 mm’dir. Isıtıcı blok (Şekil 4.40) ısıtma modülü bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların soğutma modülüne daha az iletilmesini sağlayan parçadır. Soğutucu ile birlikte ısı bariyeri, ekstruder’ın termal sıcaklık dağılımında önemli etkiye sahiptir. Isı bariyeri, ısı transferini azaltmak için termal iletkenliği daha düşük sayılabilecek paslanmaz çelik malzemeden üretilmiştir (Çizelge 4.7).

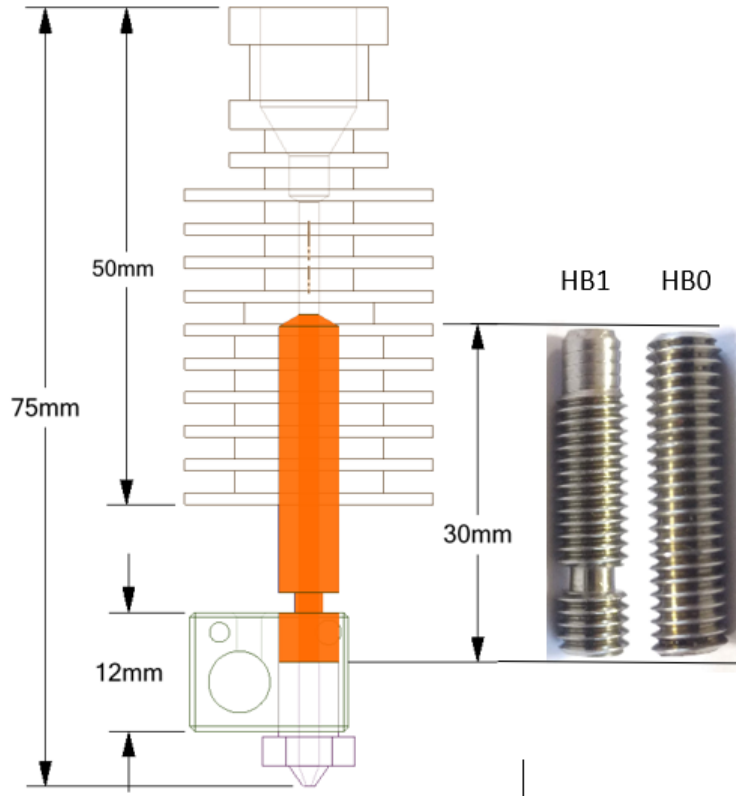
Çizelge 4.7 Isı bariyeri optimizasyonu için kullanılan malzeme özellikleri.

Parça	Malzeme	Termal İletkenlik (W/mK)
Soğutucu	Alüminyum	202
Isıtıcı Blok		
Isı Bariyeri	Paslanmaz Çelik	25,1
Nozul	Pirinç	111

4.4.2 Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları

Çalışmada kullanılan ekstruder'ın boyu 75 mm'dir ve üzerinde 50 mm uzunluğunda kanatlara sahip alüminyum bir soğutucu eklenmiştir (Şekil 4.41). 12 mm kalınlığında bir ısıtıcı blokun altında pirinç bir nozul bulunmaktadır. Isıtıcı blok 12V 40W'lık bir rezistans ile ısıtılmaktadır. Rezistansın kontrolü yine ısıtıcı blok üzerinde bulunan bir termistör yardımıyla kontrol edilmektedir.

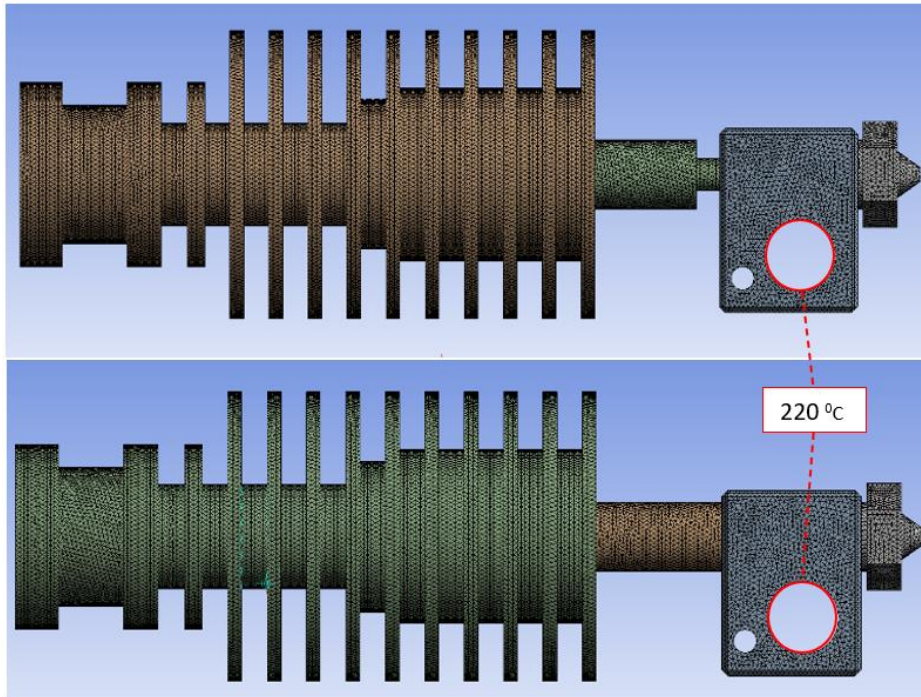
Soğutma modülünde bulunan soğutucu ve ısıtma modülünde bulunan ısıtıcı blok, çalışmanın esas konusu olan Isı bariyeri ile birbirinden ayrılmıştır. Çalışmada iki farklı Isı bariyeri tasarımı değişken olarak kullanılmıştır. Isı bariyeri dışında sistemin diğer parçaları sabit tutulmuştur. Çalışmada kullanılan her iki ısı bariyerinin de boyları 30 mm ve çapları M6x1 olmak üzere aynıdır. Aralarındaki tek fark tasarımlardan birinde (Model HB1) ısı transferini azaltmak amacıyla 2 mm'lik bir boşluk bırakılmış olmasıdır (Şekil 4.41).



Şekil 4.41 Çalışmada kullanılan ekstruder'ın boyutları, HB1 ve HB0 olarak adlandırılan iki farklı ısı bariyeri.

Isı transfer analizi için çalışmada kullanılan ekstruder 3B modelleri SolidWorks bilgisayar destekli tasarım programında hazırlanmıştır. Termal analizler ANSYS v19.2 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecini kolaylaştırmak adına soğutucu blok'un bir fan yardımıyla soğutulduğu durum göz ardı edilmiştir. Soğutucu fanların etkisi ile ilgili çalışmalar "Bölüm 4.5 Soğutma modülü üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları" başlığında sunulmuştur. Sadece sistemin kendi parçaları arasında oluşan ısı transferi dikkate alınmıştır. Soğutucu üzerine bir fan eklenmesi elbette soğutma modülü kısmının daha iyi soğutulmasını sağlayarak sistemin gelen termal davranışına olumlu katkı sağlayacaktır. Ancak çalışma kapsamında sadece ısı bariyeri tasarımlarının etkisinin daha detaylı incelenebilmesi için fan kullanılmamıştır.

Sonlu eleman ağı oluşturulurken 10-Node Quadratic Tetrahedral Thermal Solid elemanlar kullanılmıştır. Her iki model için sistemin ağ yapısı Şekil 4.42'de görülmektedir. HB1 modelinin sonlu eleman ağı; 1055691 eleman, 1611211 düğümden oluşmaktadır. HB0 modelinde ise; 1656711 eleman, 2393766 düğümden oluşmaktadır. Ağ yapısı her iki modelde de mümkün olduğu kadar birbirine yakın boyutta elemanlardan oluşturulmuştur.



Şekil 4.42 Isı bariyeri optimizasyonu için kullanılan ağ yapıları.

Yapılan analizler zamana bağılı değildir. Sistemin kararlı halde (Steady – State) olduğu kabul edilmiştir. Ekstruder’ın başlangıçta oda sıcaklığında (22 °C) olduğu kabul edilmiştir. Isıtıcı blok üzerinde rezistansın yerleştirildiği yüzeyde 220 °C’lik sıcaklık sınır şartı tanımlanmıştır (Şekil 4.42). Sistemde sadece ısı bariyeri tasarımının etkisinin daha kolay incelenebilmesi için gerçek hayatta rezistansta gerçekleşen sıcaklık dalgalanmaları dikkate alınmamıştır. Parçaların birbirleri arasındaki ısı transferinin konveksiyon ile gerçekleştiği kabul edilmiş ve sistemi oluşturan parçaların termal iletkenlikler Çizelge 4.7’de verilmiştir.

4.4.3 Deneysel Çalışmalar ve Termal Kamera Özellikleri

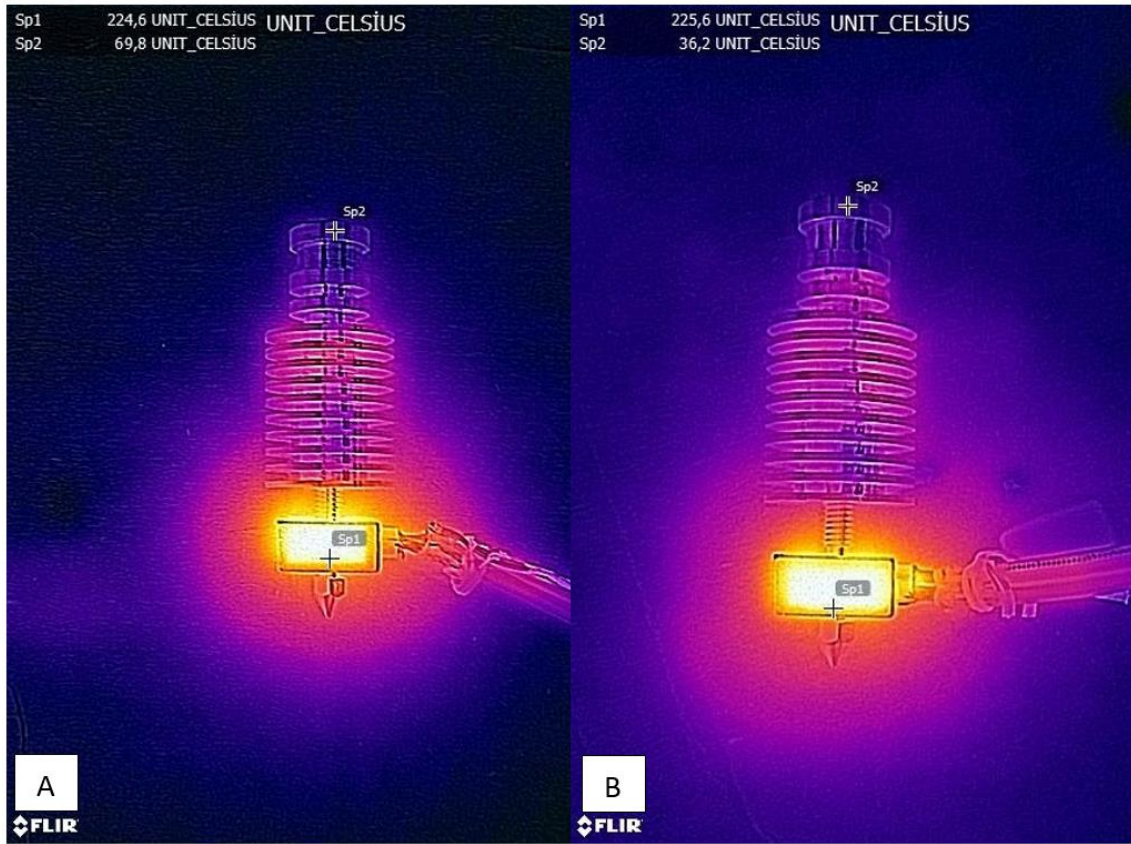
Simülasyonların doğruluğunun değerlendirilmesi için deneysel olarak sistemin termal kamera görüntüleri kaydedilmiştir. Deneysel çalışmalar her iki model için de aynı şartlarda yapılmıştır. Ekstruder nozul, ısıtıcı blok, Isı bariyeri ve soğutucu parçalarının montajı yapılmıştır. Ekstruderlar normal şartlarda soğutucu fan ile birlikte kullanılmaktadır. Böylece ısıtma modülü bölgesinde oluşan sıcaklığın soğutma modülü kısmına geçişi azaltılmaktadır. Ancak bu çalışmada sadece ısıtma modülü üzerinde bulunan ısı bariyeri yapısının etkisi araştırıldığı için soğutucu kullanılmamıştır. Her iki ekstruder’ın ısıtıcı blokları üzerine özdeş rezistanslar yerleştirilmiştir. Rezistans oda sıcaklığından, 220 °C’ ye kadar ısıtılmıştır. Daha sonra sistemin termal görüntüleri FLIR Lepton® termal kamerayla kaydedilmiştir. Kullanılan termal kamera -20 °C ve 400 °C aralığında ± 4 °C hassasiyet ile görüntüler kaydedebilmektedir. Termal kameraya ait özellikler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Çalışmada kullanılan termal kameranın özellikleri.

Özellik	Aralık
Effective Frame Rate	8.7 Hz
Pixel Size	12 μ m
Thermal Sensitivity	<50 mK (0.050° C)
Optimum Temperature Range	-10 °C to +80 °C
FOV – Diagonal	71°
FOV – Horizontal	57° (nominal)

4.4.4 Analiz Sonuçları ve Termal Kamera Görüntüleri

Termal kamera görüntüleri incelendiğinde rezistansta üretilen ısı öncelikli olarak ısıtıcı bloğun sıcaklığını 220 °C'nin üzerine çıkarmıştır. Isı daha sonra ısı bariyeri üzerinden ekstruder'in soğutma modülü bölgesine yayılmıştır. Şekil 4.43 A'da HB 0 geometrisine sahip ısı bariyerine ait sistemin termal görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.43 B'de ise HB 1 geometrisine sahip ısı bariyerine ait sistemin termal görüntüleri bulunmaktadır.



Şekil 4.43 HB0 ısı bariyeri (a) ve HB1 ısı bariyerine ait termal kamera görüntüleri (b).

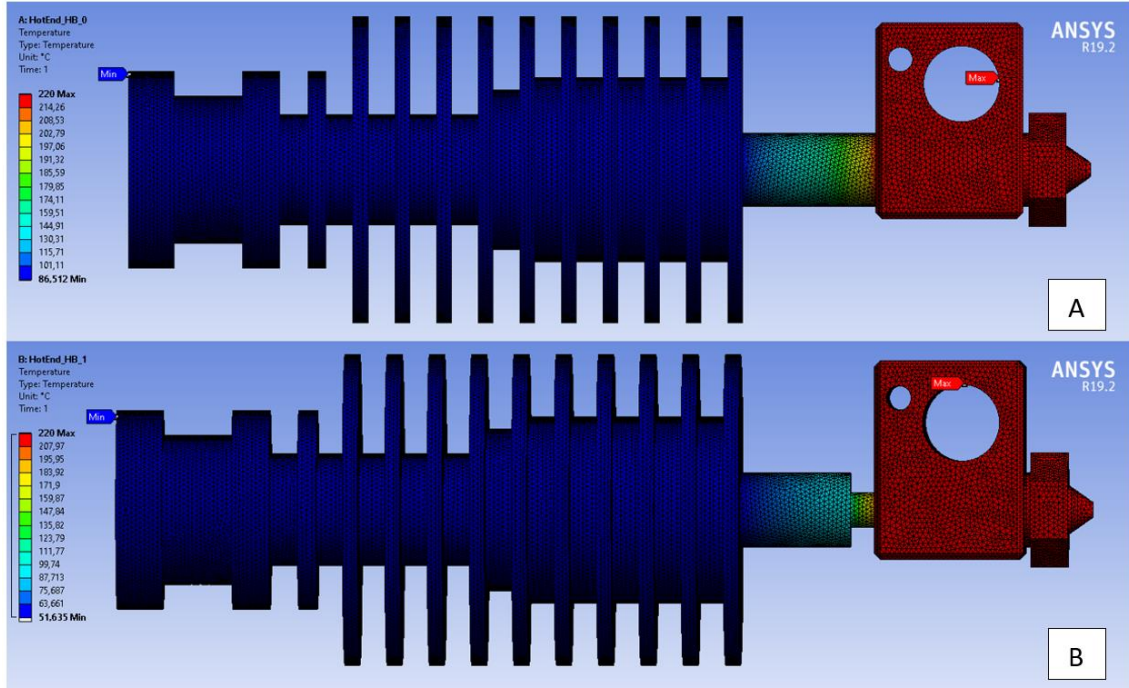
HB 1 modelinde ısı bariyeri üzerinde 2 mm boyutunda kademeli bir boşluk bulunmaktadır. Termal görüntüler incelendiğinde 2 mm'lik boşluk bulunan ısı bariyeri modelinin ısı transferini azalttığı görülmektedir. Boşluk bulunmayan ısı bariyeri tasarımında maksimum sıcaklığın ısıtıcı blok üzerinde 224,6 °C olduğu görülmektedir. Aynı modelde minimum sıcaklık 69,8 °C ile soğutucunun en son kısmında görülmüştür. Isı bariyeri üzerinde 2 mm boşluk bulunan tasarımda ise maksimum sıcaklık benzer şekilde 225,6 °C ısıtıcı blok üzerinde gözlemlenmiştir. Minimum sıcaklık aynı bölgede

görülmekle beraber diğer tasarımdan farklı olarak minimum sıcaklığın 36,2 °C olduğu görülmektedir. 2 mm boşluğa sahip model sistemin soğutulmasına 33,6 °C'lik bir katkı sağlamıştır.

Termal analizlerde sistemin kararlı halde (Steady – State) olduğu kabul edilmiştir. Analizler zamana bağlı değildir. Ekstruder'ın başlangıçta oda sıcaklığında (22 °C) olduğu kabul edilmiştir. Isıtıcı blok üzerinde rezistansın yerleştirildiği yüzeyde 220 °C'lik sıcaklık sınır şartı tanımlanmıştır. Her iki ısı bariyeri tasarımı için de maksimum ve minimum sıcaklıklar aynı bölgelerde gözlemlenmiştir.

Minimum sıcaklıklar değerlendirildiğinde termal kamera görüntüleri ile sonlu eleman analizi sonuçları arasında oldukça küçük bir fark görülmektedir. HB0 modeline ait termal görüntülerde minimum sıcaklık 69,8 °C iken aynı modele ait bilgisayar simülasyonunda minimum sıcaklık 86,5 °C olarak elde edilmiştir. HB 0 modelinde deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçları arasında 16,7 °C fark görülmektedir. HB 1 modelinde ise termal görüntülerde minimum sıcaklık 36,2 °C iken aynı modele ait bilgisayar simülasyonunda minimum sıcaklık 51,6 °C olarak elde edilmiştir.

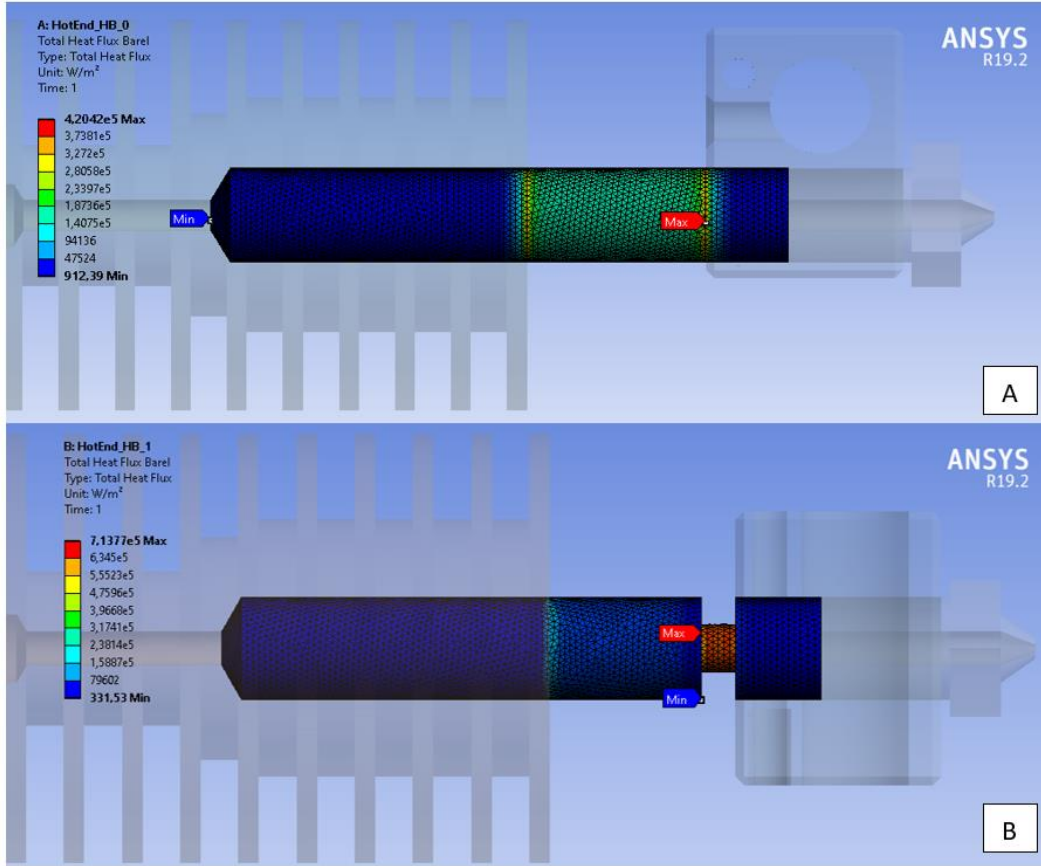
HB 1 modelinde deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçları arasında 15,4 °C fark görülmektedir. Bu farklılık ısı teması ile ilgilidir. Temas halindeki katı cisimler arasında ısı sıcak gövdeden soğuk gövdeye doğru akar. Isı transferi hesaplamalarında katı cisimler arasındaki temas yüzeyinin mükemmel şekilde temas ettikleri kabul edilir. Ancak gerçek hayatta temas ara yüzeyinde bir direnç oluşur. Buna rağmen her iki modelin genel sıcaklık dağılımları dikkate alındığında sonlu elemanlar analiz sonuçları termal görüntülerle örtüşmektedir. HB 0 ve HB 1 modellerinin analizlerinden elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 4.44'te görülmektedir.



Şekil 4.44 HB 0 modeli (a) ve HB 1 modeli için sıcaklık dağılımı (b) simülasyon sonuçları.

Her iki modelin minimum sıcaklıkları karşılaştırıldığında HB 1 modelindeki minimum sıcaklık HB 0 modelinden 34,87 °C daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum Isı bariyeri geometrisinin ekstruder'ın sıcaklık dağılımı üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Isı bariyeri üzerinde bulunan boşluklu yapı ısı transferini azaltmaktadır. Dolayısıyla soğutma modülü kısmının daha iyi soğutulabilmesi açısından istenen bir durumdur.

Isı transferi doğrultusuna dik birim alan başına ısı transfer hızı, ısı akısı olarak adlandırılır. Farklı Isı bariyeri geometrilerini karşılaştırmak için her iki model için ısı akıları incelenebilir. Şekil 4.45'de HB 0 ve HB 1 modellerinde kullanılan Isı bariyeri parçası üzerinde oluşan ısı akısına ait sonuçlar görülmektedir. Isı akımını artırmak için en basit yöntem ısı transfer yüzeyini artırmaktır. Bu durumun tam tersi istendiğinde ise yüzey alanının azaltılması gerekir. HB 0 modelinde ısı akısı Isı bariyeri yüzeyi boyunca devam etmektedir. Ancak HB 1 modelinde görüleceği üzere dar kesit alan nedeniyle ısı akısı diğer modele göre daha düşük kalmıştır.



Şekil 4.45 HB 0 modeli için ısı bariyeri üzerinde oluşan ısı akısı (a) ve HB 1 modeli için ısı bariyeri üzerinde oluşan ısı akısı dağılımı (b).

Ekstruder'in termal davranışını iyileştirmek için öncelikle kullanılan malzemelerin termal özelliklerinden faydalanılır. Isıtma modülü kısmında oluşan sıcaklığın filamentte daha hızlı iletilmesini sağlamak için termal iletkenlik katsayısı yüksek sayılabilecek pirinç ($h_{\text{pirinç}} = 111 \text{ W / mK}$) nozul'lar kullanılır. Benzer şekilde soğutma modülünün sahip olduğu ısıyı dış ortama aktararak daha iyi soğumasını sağlamak için alüminyum ($h_{\text{aluminum}} \approx 165 \text{ W / mK}$) malzemeler kullanılır. Ancak ısıtma modülü ve soğutma modülü arasında mümkün olduğu kadar az ısı transferi gerçekleşmelidir. Isıtma modülünde oluşan yüksek ısının soğutma modülüne geçmesi istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle bu iki yapı arasında bulunan Isı bariyeri ısı transfer katsayısı diğer parçalara göre daha düşük olan paslanmaz çelik ($h_{\text{çelik}} \approx 15 \text{ W / mK}$) malzemeden üretilir.

Ekstruder'in termal davranışını iyileştirmek için termal iletkenlikleri farklı malzemeler, soğutucu elemanlar ve soğutucu fan ilk akla gelen çözümlerdir. Ancak bunun yanı sıra sistemi oluşturan parçaların tasarımı ve geometrileri de termal davranışa etkilidir. Yapılan

çalışmada soğutma modülü ve ısıtma modülü arasındaki ısı transferi Isı bariyeri olarak adlandırılan parça üzerinden gerçekleştiği görülmüştür. Dolayısıyla Isı bariyeri geometrisi ekstruder'in termal davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan termal analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir

4.5 Soğutma Modülü Üzerinde Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

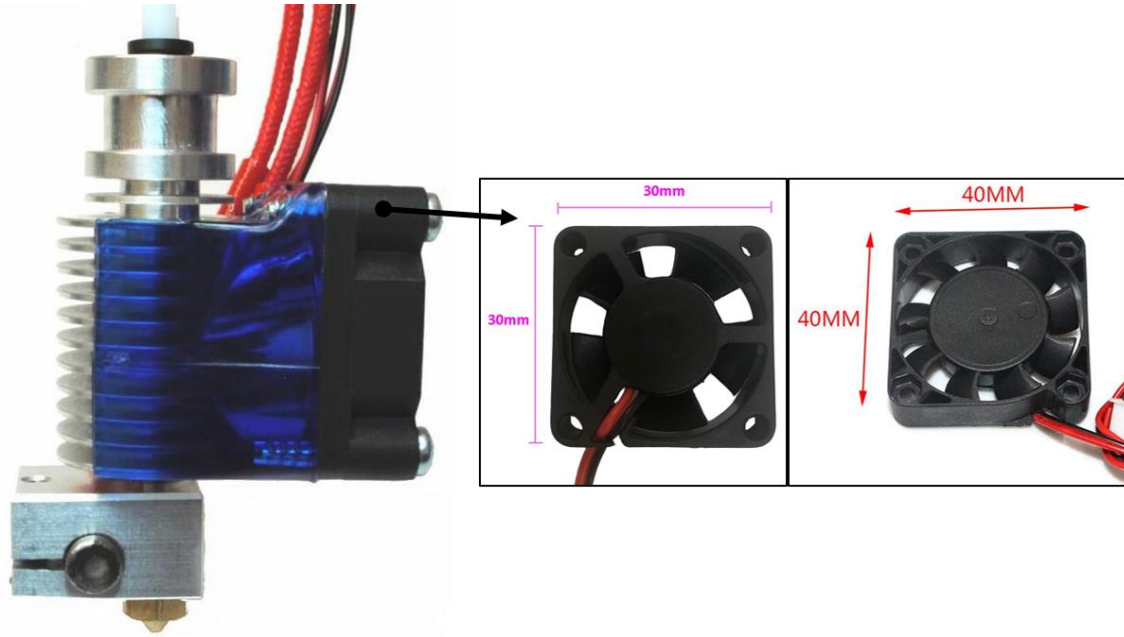
3B yazıcılarda ekstruder filament besleyici, ısıtma modülü ve soğutma modülü olmak üzere üç ana parçadan oluşur. Soğutma modülünün ana görevi ekstruder'in ısıtma modülünde oluşan ısının filament besleyici kısmına geçmesini engellemektir. Aynı zamanda filamentin erime sıcaklığına sadece ısıtma modülü içinde iken erişmesini sağlar. Filamentin ısıtma modülü haricindeki diğer bölgelerdeki sıcaklığı filamentin camsı geçiş sıcaklığına (T_g) yaklaşmamalıdır. Filamentin sıcaklığı ısıtma modülü haricinde ekstruder'in herhangi bir bölgesinde oda sıcaklığından ne kadar fazla olursa filamentin sürülmesi zorlaşır. Dolayısıyla üretim sırasında ekstrüzyonun dengesizleşmesine ve hatta ekstruder'in görevini yerine getirememesine neden olur.

Filamentin ekstrüzyon sırasında sahip olması gereken ideal sıcaklık değerleri; ısıtma modülü bölgesinde filamentin erime sıcaklığında olması ve bunun haricindeki diğer bölgelerde oda sıcaklığında bulunmasıdır. Ancak ısıtma modülünde üretilen ısı mutlaka sistem üzerinde diğer bölgelere yayılacaktır. Isıtma modülü haricindeki bölgelerde filamentin ulaşabileceği maksimum sıcaklık değeri filamentin camsı geçiş sıcaklığıdır. Filament sıcaklığının istenen seviyelerde tutulabilmesi için soğutma modülünün tasarımı önem kazanır. Soğutma modülü iki ana parçadan oluşur. Soğutma modülü üzerinde kanatlı bir yapıya sahip ısı iletkenliği yüksek malzemeden üretilmiş bir soğutucu bulunur (Şekil 4.46). Soğutucu üzerine bir fan yerleştirilir. Fan ve kanatçıklar sayesinde arttırılmış yüzey alanı ile bu bölgede zorlanmış taşınım gerçekleşir. Böylece daha yüksek bir ısı transferi sağlanarak soğutma modülü bölgesinin daha iyi soğutulması amaçlanır.



Şekil 4.46 Soğutma modülünde kullanılan farklı soğutucu tasarımları.

Soğutucu üzerine ısı transferini artırmak için çeşitli boyutlarda fanlar eklenmektedir (Şekil 4.47). Soğutma modülünün boyutları nedeniyle sistem üzerinde kullanılacak en büyük fan boyutu 40x40 mm boyutlarındadır. Bunun yanı sıra 30x30 mm boyutlarında fanlarda kullanılmaktadır. Fan boyutunun artırılması soğutucu kanatları üzerinden birim zamanda geçen hava miktarını artırmaktadır. Böylece sistemin daha iyi soğutulmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte fan boyutunun büyütülmesi ekstruder üzerindeki ağırlığı artırmaktadır.



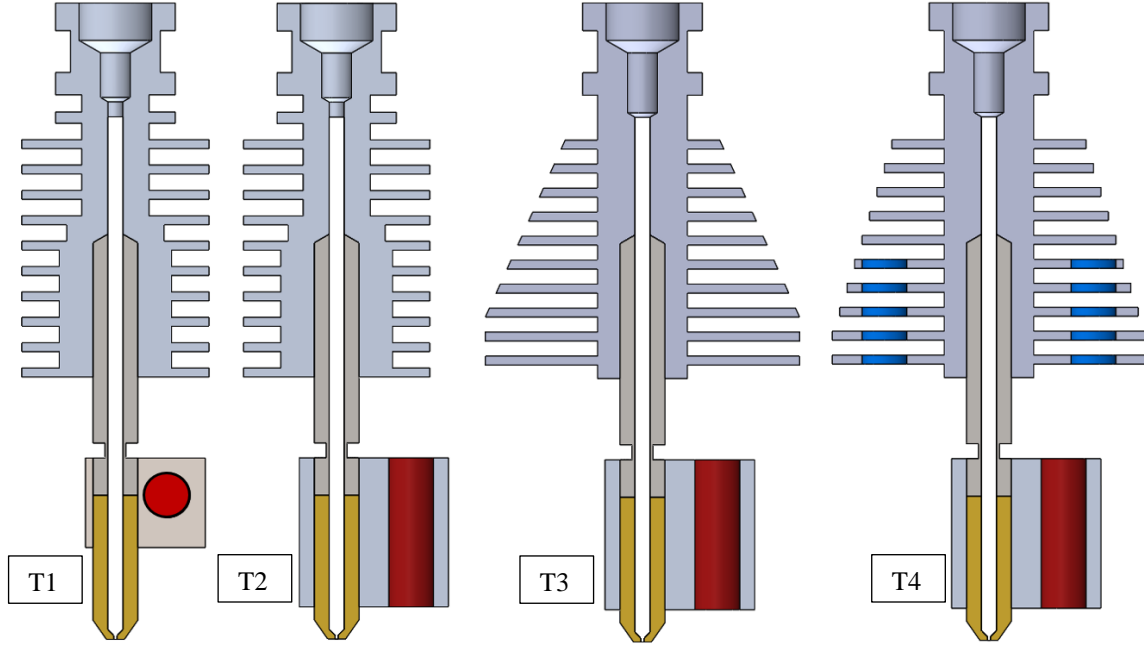
Şekil 4.47 Soğutma modülünde kullanılan fanların konumu ve boyutları.

Ekstruderda kullanılan soğutucular genellikle dairesel kesite sahip, ısıl iletkenliği yüksek malzemelerden üretilmektedir. Soğutucuların dairesel şekilli ve kanatlı yapıya sahip tasarımı üretim kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. Mevcut ekstruder tasarımlarında genel olarak kabul görmüş fan boyutları 30 mm ve 40 mm'dir. Kullanılan fanlar yazıcının elektronik kartlarıyla uyumlu olmak üzere 12V DC veya 24V DC akım ile çalışmaktadır. Yapılan bu çalışmada ekstruder'ın soğutma modülünün iyileştirilmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikli olarak ekstruderlarda en sık kullanılan soğutucu tasarımları ve üzerlerinde kullanılan fanlar incelenmiştir. Mevcut sistemler üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar ile sistemin özellikleri tespit edilmiştir. Sonraki aşamada çalışma kapsamında tasarlanan ısıtıcı blok ile birlikte mevcut soğutma modüllerinin performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular çalışma kapsamında üretilen yeni ısıtıcı blok ile birlikte mevcut soğutma modüllerinin yeterli performansta çalışmadığını göstermiştir. Elde edilen bulgulardan yola çıkılarak yeni bir soğutucu tasarımı yapılmıştır.

4.5.1 Soğutma Modülü Tasarımları

Çalışma kapsamında dört farklı ekstruder tasarımı üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Üzerinde çalışmalar yapılan farklı ekstruder tasarımları Şekil 4.48'de verilmiştir. Her bir tasarım için sırasıyla T1, T2, T3 ve T4 isimleri verilmiştir.

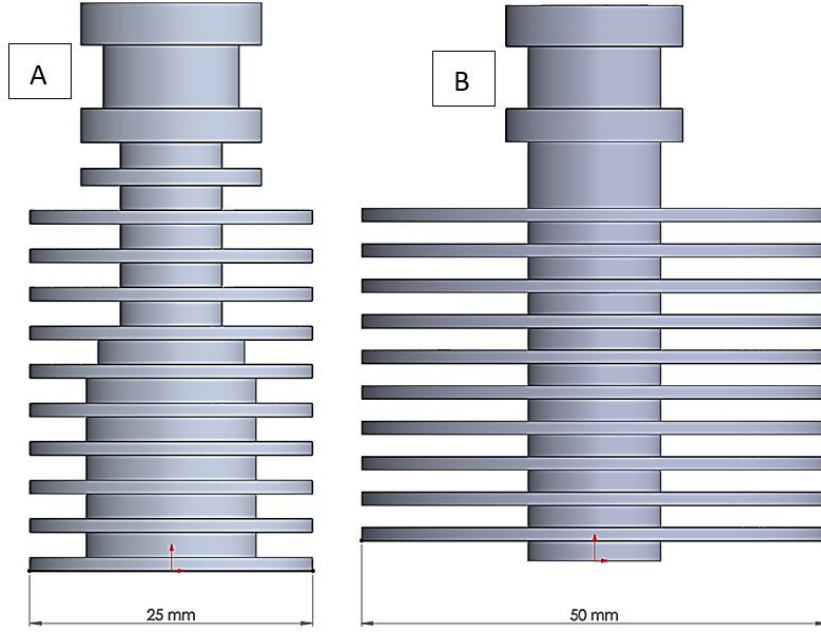
Şekil 4.48'de T1, T2, T3 ve T4 isimli ekstruder tasarımlarının aksel simetri düzleminden alınan kesit görüntüleri bulunmaktadır. Şekilde nozullar sarı ve ekstruder içindeki filament beyaz renkle gösterilmiştir. Tasarımlarda kullanılan nozullar pirinç malzemedendir ve aynı geometrik özelliklere sahiptir. Nozul tasarımları Bölüm 4.2.'de elde edilen bulgular doğrultusunda seçilmiştir. Her bir nozul 0.2 mm çıkış çapına ve 45° nozul açısına sahiptir. Şekilde kırmızı ile gösterilen bölgeler ısıtıcı rezistansın blok üzerinde yerleştirildiği konumu ifade etmektedir.



Şekil 4.48 Çalışmalarda kullanılan dört farklı ekstruder tasarımı.

Şekil 4.48’de en solda görülen T1 isimli ekstruder tasarımı mevcut 3B yazıcılarda en sık kullanılan tasarımdır. Mevcut yazıcılarda sık kullanılan bu tasarımda ısıtıcı blok kare kesitlidir. Diğer tasarımlarda ise Bölüm 4.3’te elde edilen bulgular doğrultusunda yeni tasarlanan daha büyük boyutlardaki silindirik ısıtıcı blok kullanılmıştır. Isıtma modülü ve soğutma modülü arasında ısı transferini azaltma amacıyla çelik malzemeden üretilmiş ısı bariyeri bulunmaktadır. Her bir tasarımda, Bölüm 4.4’te elde edilen bulgular doğrultusunda üzerinde 2 mm kesit daralması bulunan ısı bariyeri tasarımı tercih edilmiştir.

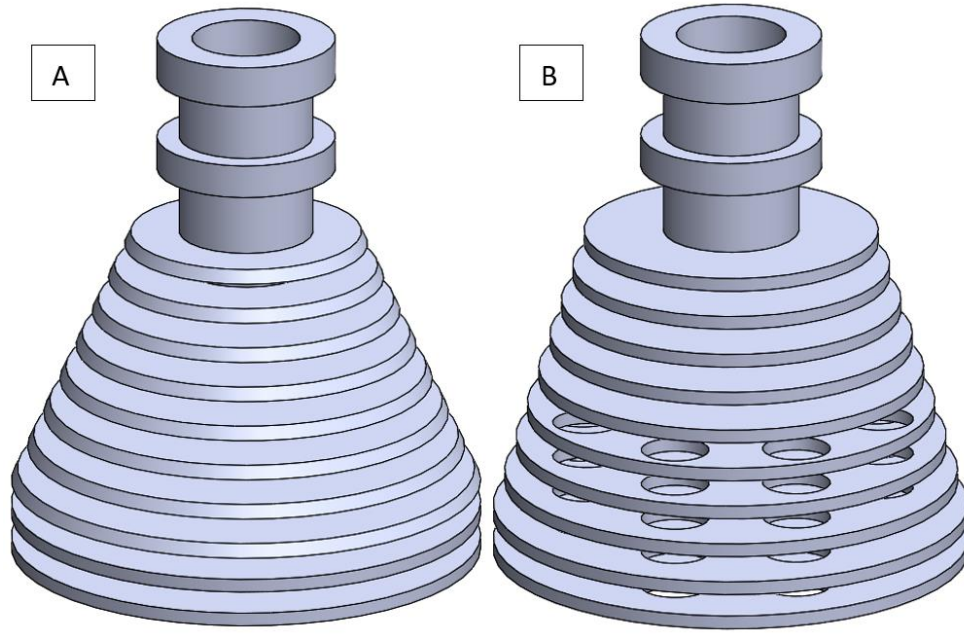
Yapılan çalışmalarda ilk olarak soğutma modülünde herhangi bir değişiklik yapılmadan mevcut ekstruder tasarımlarında kullanılan kare kesitli ısıtıcı blok yerine yeni tasarlanan ısıtıcı blok kullanılması planlanmıştır. Ancak önerilen ısıtıcı blok tasarımı ile mevcut soğutma modülleri beklenen soğutma performansını sağlayamamıştır. Bu nedenle daha geniş kanat yapısına sahip yeni soğutucu bir tasarımı önerilmiştir.



Şekil 4.49 T1 tasarımında kullanılan soğutucu ve kanat uzunluğu artırılmış soğutucu tasarımı.

Şekil 4.49 A’da mevcut tasarımlarda kullanılan soğutucu, Şekil 4.49 B’de ise ilk önerilen yeni soğutucu tasarımı görülmektedir. Mevcut soğutucu tasarımlarında kanat genişliği 25 mm’dir. Daha küçük kanat genişliğine sahip bazı soğutucular da bulunmaktadır ancak kanat genişliğinin daha küçük olması yeterli soğutma sağlanamaması riskini de beraberinde getirmektedir. Yeni önerilen tasarımda ilk olarak kanat genişliği iki katına çıkarılarak 50 mm olarak belirlenmiştir. Ancak önerilen tasarım soğutucunun boyutlarının ve dolayısıyla ağırlığının da artmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte kanat genişliği arttıkça soğutucunun üretimi de zorlaşmaktadır.

Tespit edilen bu sorunları gideren iki yeni soğutucu tasarımı önerilmiştir. Önerilen tasarımlar Şekil 4.50’de görülmektedir. Bu tasarımlarda kanat genişliği 42 mm’ye kadar düşürülmüştür. Soğutucu üzerindeki kanat genişliğinin en büyük çapa sahip olduğu bölge ısıtma modülüne en yakın olan bölgedir. Kanat genişliği ısıtma modülünden uzaklaştıkça azalmaktadır. Şekil 4.50 B’de ise soğutucu üzerindeki kanatların üzerine delikler açılmıştır. Böylece hem havanın temas ettiği yüzey alanı genişletilerek daha iyi ısı transferi sağlanmış hem de soğutucunun toplam ağırlığı azaltılmıştır.



Şekil 4.50 T3 (a) ve T4 (b) tasarımları ile önerilen yeni soğutucular.

4.5.2 Soğutma Modülü Simülasyonları, Ağ Yapısı ve Sınır Şartları

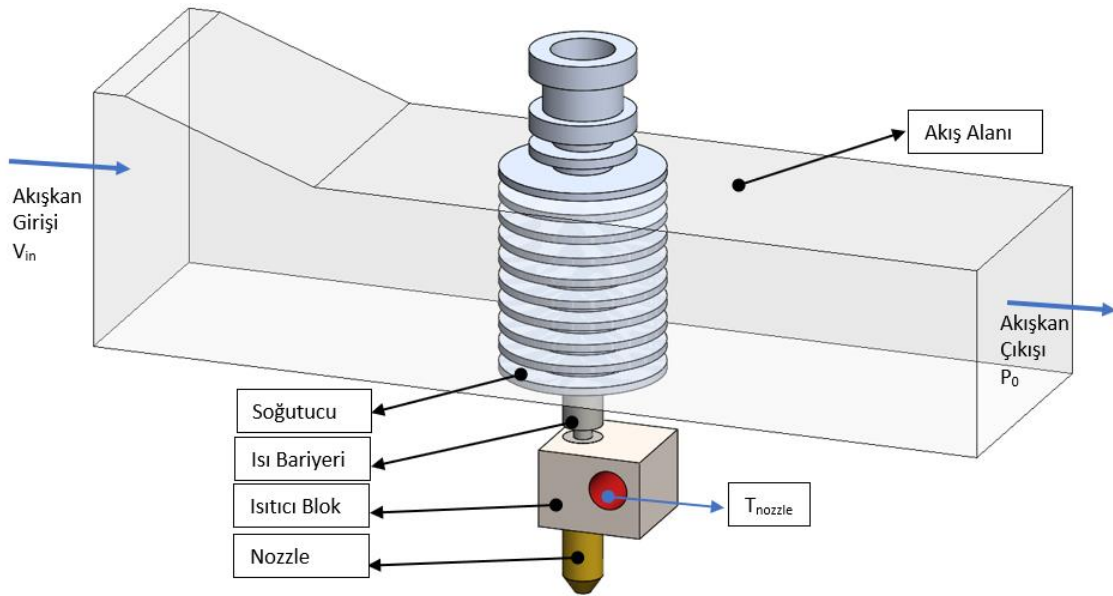
Çalışmada mevcut tasarımlarda kullanılan soğutma modülü ve yeni önerilen tasarımların termal performanslarının belirlenmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Bütün tasarımlarda benzer ağ yapıları, aynı malzeme türleri ve aynı sınır şartları kullanılmıştır. Çizelge 4.9’da ekstruder parçalarında kullanılan malzemelerin özellikleri bulunmaktadır. Soğutucu ve ısıtıcı blok tasarımlarında alüminyum malzeme kullanılmıştır. Isı bariyeri çelik ve nozul için pirinç malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 4.9 Soğutma modülü simülasyonlarında kullanılan malzeme özellikleri.

Parça	Malzeme	Yoğunluk (ρ) (Kg/m ³)	Özgül Isı (c_p) (j / (kg K))	Isıl İletkenlik (k) (W/mK)
Soğutucu	Alüminyum	2730	893	202
Isıtıcı Blok				
Isı bariyeri	Çelik	7960	502	25,2
Nozul	Pirinç	8470	377	111

Yapılan simülasyonlarda kullanılan sınır şartları probleme uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 4.51’de simülasyonlarda kullanılan sınır şartları gösterilmiştir. Şekilde kare ısıtma bloğuna ait model görülmektedir. Farklı tasarımların birbiriyle karşılaştırılabilmesi

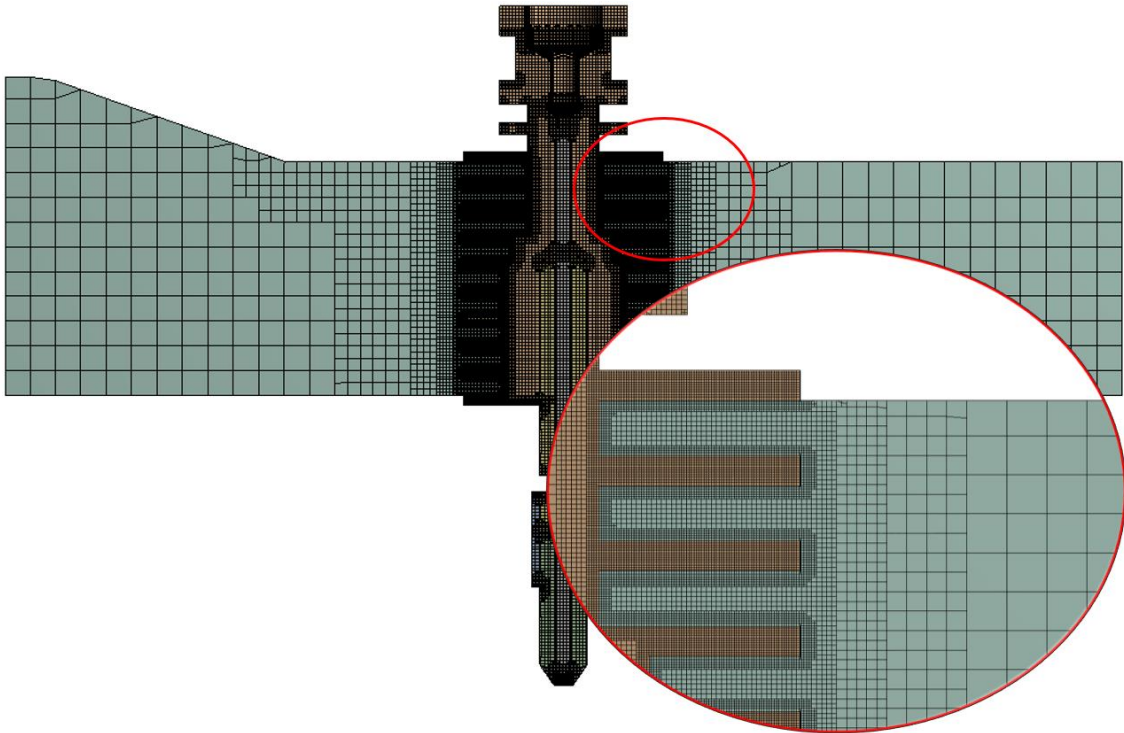
amacıyla benzer yaklaşım ve sınır şartları diğer modeller için de aynı şekilde kullanılmıştır. Hazırlanan modelde bir ekstruderda bulunan bütün elemanlar katı olarak uygun malzeme özellikleriyle modellenmiştir. Bunun yanı sıra soğutma modülü üzerine fan ile yönlendirilen hava akışkan alanı ile tanımlanmıştır. Soğutma modülü üzerinde 40x40 mm'lik fan kullanılmıştır. Akış alanında havanın giriş hızını (V_{in}) kullanılan fan belirlemektedir. Giriş hızı sınır şartı giriş yüzeyine dik olacak şekilde sadece x yönünde tanımlanmıştır. Akışkanın sistemden çıktığı bölgeye açık hava basıncı (P_0) sınır şartı tanımlanmıştır. Giriş yüzeyi ve çıkış yüzeyi haricinde, akış alanının etrafındaki diğer bütün yüzeyler adyabatik duvar olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla akışkan alanının dış yüzeylerinde herhangi bir ısı veya kütle kaybının gerçekleşmediği kabul edilmiştir. Isıtıcı blok üzerinde rezistansın temas yüzeyine sıcaklık sınır şartı (T_{nozzle}) tanımlanmıştır. Simülasyonlarda ortam sıcaklığı 25 °C olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.51 Soğutma modülü simülasyonlarında model ve sınır şartları.

Simülasyonlarda giriş hızı (V_{in}) ve blok üzerinde bulunan rezistans yüzeyindeki sıcaklık değeri (T_{nozzle}) değişken olarak belirlenmiştir. Kullanılan fanın teknik verilerinden elde edilen değerlere göre giriş hızı (V_{in}) için 0,5 m/s, 1 m/s ve 1,5 m/s olmak üzere üç farklı giriş hızı için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Isıtıcı blok yüzeyindeki sıcaklık değerleri (T_{nozzle}) 190 °C, 210 °C, 230 °C olmak üzere üç farklı değer için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Akışkanlar dinamiği simülasyonlarında kullanılacak modelin hücre yapısı, analizin doğruluğunu önemli derecede etkilemektedir. Simülasyonda kullanılacak hücre yapısının hem genel olarak uygun seçilmesi hem de her bir hücrenin kalitesinin iyi olması gerekmektedir. Simülasyonlar için oluşturulan modellerin ağ yapısı Cut – Cell Kartezyen metodu kullanılarak oluşturulmuştur. Soğutucu üzerindeki kanatçıklar ve akış alanı arasındaki karmaşık geometrinin ağ yapısını tanımlamak için Cut – Cell metodu istenen sonucu sağlamıştır. Bu yöntem ile akışkan ile kanatçıklar arasındaki duvarın çözünürlüğü modelin genel boyutlarından bağımsız olarak daha hassas bir şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 4.52 Modelin Cut – Cell yöntemi ile oluşturulan ağ yapısı.

Simülasyonlarda bu yöntem ile oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.52’de görülmektedir. Simülasyonlarda elde edilmek istenen veriler soğutucunun performansı ile ilgilidir. Soğutucu üzerinde ısı transferinin gerçekleştiği bölge kanatçıklardır. Bu nedenle ağ yapısı özellikle kanatçıkların olduğu bölgede çok daha düşük çözünürlükte oluşturulmuştur. Her bir kanatçık 1.2 mm kalınlığında ve kanatçıklar arasındaki boşluk 2 mm’dir. Her bir kanatçık kalınlığı boyunca en az 10 hücre ile ifade edilmiştir. Kanatçıklar arasındaki boşluklar ise en az 20 hücreden oluşacak şekilde modellenmiştir. Aynı zamanda akışkanın soğutucu yüzeyine teması sırasında oluşacak ısı transferini gözlemleyebilmek için katı

yüzeyle yaklaşıldıkça hücre yapısının çözünürlüğü artırılmıştır. Simülasyonlardaki hesaplama süresini kısaltmak adına modelin diğer bölgelerindeki hücre yapısının çözünürlüğü soğutucu etrafındaki hücre yapısına göre daha büyüktür.

Soğutma modülünün simülasyonlarından önce bütün modeller üzerinde ağdan bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uygun ağ hücre sayısının tespit edilebilmesi için Cut – Cell yöntemi ile sırasıyla 60.000, 180.000, 600.000, 750.000, 1.000.000, 1.500.000 ve 2.000.000 hücreye sahip ağ yapılarıyla ön simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Farklı hücre sayılarına sahip çözüm ağlarını karşılaştırmak amacıyla soğutucu üzerinde oluşan minimum sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışma bütün tasarımlar için tekrarlanmıştır. T1 ve T2 tasarımlarında 800.000 ve daha fazla hücreye sahip ağ yapılarında soğutucunun minimum sıcaklıklarının birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. T3 tasarımında 1.000.000 ve daha fazla hücre sayısına sahip ağ yapılarında soğutucunun minimum sıcaklığı yakın çıkmıştır. Benzer sonuçlar T4 tasarımında 1.200.000 ve daha fazla hücre sayılarında sağlanabilmiştir. T1 ve T2 tasarımlarında soğutucu kanatlarının diğer tasarımlara göre küçük olması ağ yapısındaki hücre sayısının da daha olmasına olanak vermiştir. T4 tasarımında ise soğutucu kanatlarının üzerinde bulunan delikler ağ yapısındaki hücre sayısının artmasına sebep olmuştur. Simülasyonların doğruluğunu ağ yapısındaki hücre sayısının yanı sıra her bir elemanın kalitesi de etkiler. Bütün tasarımlar için ortalama eleman kalitesi değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Simülasyonlarda kullanılan tasarımların ortalama eleman kaliteleri.

Parametre	T1	T2	T3	T4
Eleman Kalitesi	0,9696	0,9692	0,9595	0,9412
Aspect Ratio	1,2251	1,2286	1,3381	1,4312
Skewness	0,0464	0,0472	0,0628	0,0722
Ortogonal Kalite	0,9570	0,9566	0,9449	0,9321

Yapılan simülasyonlar zamana bağlı olarak değişmemektedir. Akışın kararlı halde (Steady – State) olduğu kabul edilmiştir. Problemin çözümünde Kayma Gerilmesi Taşınım (SST) $k - \omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. $k - \omega$ türbülans modelinde reynolds

ortalama Navier-Stokes denklemlerine ek olarak, türbülans kinetik enerjisi (k) ve özgül yutulma (ω) için iki adet transport denklemi de çözülmektedir. SST $k - \omega$ türbülans modeli ile Navier-Stokes denklemleri içine transport denklemleri eklenerek çözülür (Eşitlik 4.4 ve 4.5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \overline{G_k} - Y_k + S_k \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5’de SST $k - \omega$ türbülans transport denklemlerinde $\overline{G_k}$ türbülans kinetik enerji üretimini ifade eder. Denklemlerdeki G_ω terimi özgül yutulma üretimi, Γ_k terimi türbülans kinetik enerjisinin difüzyon etkisini, Γ_ω terimi ise özgül yutulmanın difüzyon etkisini ifade eder. Navier – Stokes denklemlerin çözümü için basınca bağlı çözüm algoritmalarından faydalanılır. Fleunt yazılımı, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), SIMPLEC (SIMPLE-Consistent), PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) ve Coupled gibi çeşitli ayrık çözücü algoritmaları kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Yapılan çalışmada Coupled (Birleşik) algoritması kullanılmıştır. Coupled çözüm algoritmasında akış denklemleri hücre düğüm noktalarında oluşturulan lineer denklem sistemlerinin çözülmesi amaçlanır. Yazılım Navier – Stokes denklemlerini iteratif olarak çözmektedir.

Problemin çözümünün doğru ve geçerli olabilmesi için Navier – Stokes denklemlerinde kullanılan terimlerin belirli bir iterasyonda gerekli kriterleri sağlayarak yakınsaması gerekmektedir. Bununla birlikte problemin çözümü için tanımlanan diğer yakınsama koşullarının da sağlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmada akışkanın x , y ve z yönündeki hız değerleri, enerji, süreklilik denklemi, türbülans terimleri için her bir iterasyondaki artık değerleri izlenmiştir. Problemin çözümünde artık değerlerin yakınsama kriteri en az 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Sadece türbülans modelindeki artık değerler için yakınsama kriteri daha düşük seçilerek 10^{-3} olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra çalışmanın odak noktası olan soğutucunun ortalama sıcaklık değeri ve minimum

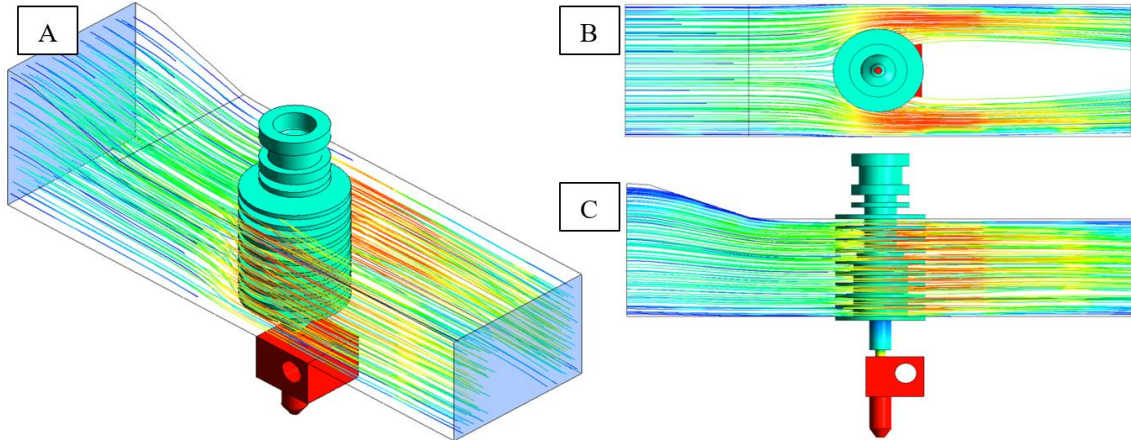
sıcaklık değerleri yakınsama koşulu olarak tanımlanmıştır. Çözüm sırasında soğutucunun hesaplanan ortalama sıcaklık değeri ve minimum sıcaklık değeri arka arkaya 50 iterasyon boyunca değişmediği gözlemlenirse çözümün yakınsadığı kabul edilmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında elde edilen çözümler iterasyon sayısına bağlı olarak değişebilmektedir. Çalışmada simülasyonlar 3000 iterasyonda çözdürülmüştür. Bütün simülasyonlarda gözlenen artık değerler 3000 iterasyona ulaşmadan önce yakınsamıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar iterasyondan bağımsızdır. Simülasyonların sonunda çözümü doğrulamak için enerjinin korunumu, momentum korunumu ve süreklilik denklemlerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir.

4.5.3 T1 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

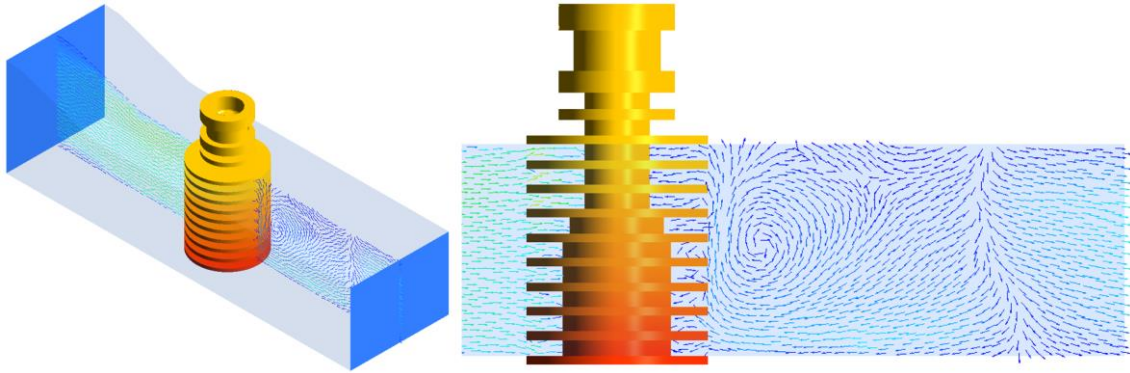
T1 olarak adlandırılan ekstruder tasarımı mevcut 3B yazıcılarda en sık kullanılan tasarımdır. Mevcut yazıcılarda sık kullanılan bu tasarımda ısıtıcı blok kare kesitlidir. Ekstruder'in soğutma modülünün optimizasyon çalışmaları için öncelikle mevcut yazıcılarda en sık kullanılan ekstruder tasarımının (T1) soğutma modülü üzerinde incelemeler yapılarak özellikleri ve çalışma sınırları belirlenmiştir. Bu kapsamda T1 tasarımının soğutma modülünün 190 °C, 210 °C ve 230 °C nozul sıcaklıklarında (T_{nozzle}), 0,5 m/s, 1 m/s ve 1,5 m/s fan hızlarında termal davranışı incelenmiştir.

Şekil 4.53 A'da T1 tasarımının 1,5 m/s giriş hızı için akım çizgileri izometrik görünüşten, Şekil 4.53 B'de ise üst görünüşten ve Şekil 4.53C'de ise ön görünüşten görülmektedir. Akım çizgilerinin renkleri akışkanın hızının yavaş olduğu bölgelerde mavi renkte, akışkan hızının arttığı bölgelerde kırmızı renk ile ifade edilmiştir.



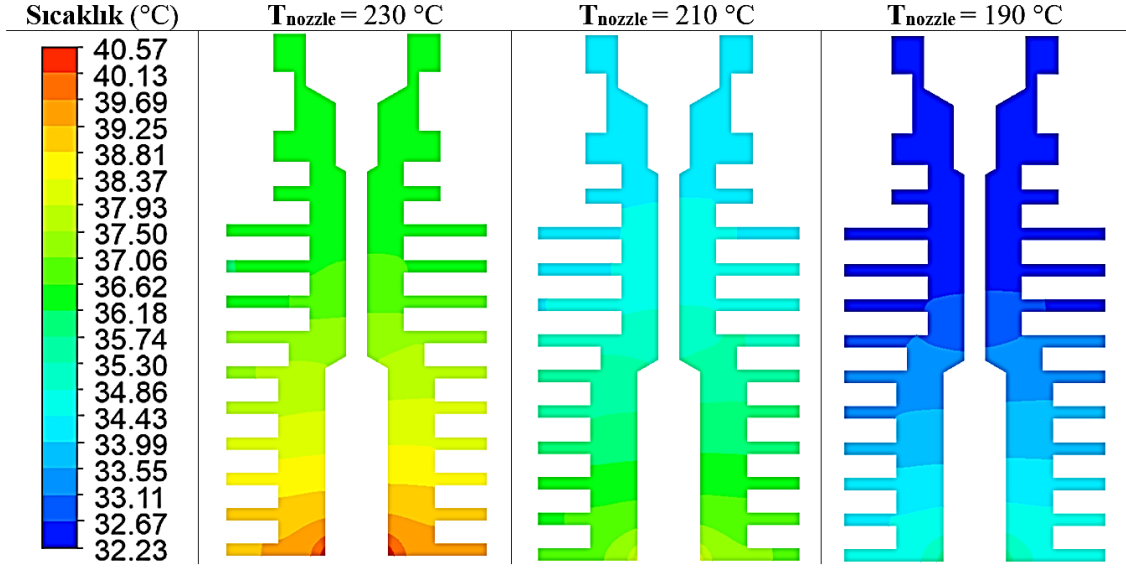
Şekil 4.53 T1 Tasarımı için 1,5 mm/s giriş hızında akım çizgileri.

Akışkan maksimum hızlara geometrinin daraldığı ve kanatların arasından geçtiği esnada ulaşmaktadır. Akışkan hızının minimum olduğu bölgeler duvara temas ettiği bölgelerde gözlemlenmektedir. Soğutucu gövdesi akışı böldüğü için arka bölgelerde akım çizgilerinin kesintiye uğrayarak akış ayrılma bölgesi oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.54 Soğutucunun merkez düzlemindeki hız vektörleri.

Akış ayrılma bölgesi, soğutucunun tam merkezini kesen bir düzlem üzerinde vektör çizimlerinde daha net görülmektedir (Şekil 4.54). Vektör çizimlerinde akış ayrılma bölgesinde dolanımlı girdapların olduğu görülmektedir. Oluşan girdaplar soğutucunun arka yüzündeki kanatçıkların arasına akışkanın tekrar girmesine sebep olmaktadır. Akışkanın bu davranışı 0,5 m/s ve 1 m/s hızlar giriş hızları için de benzer sonuçlar vermiştir.

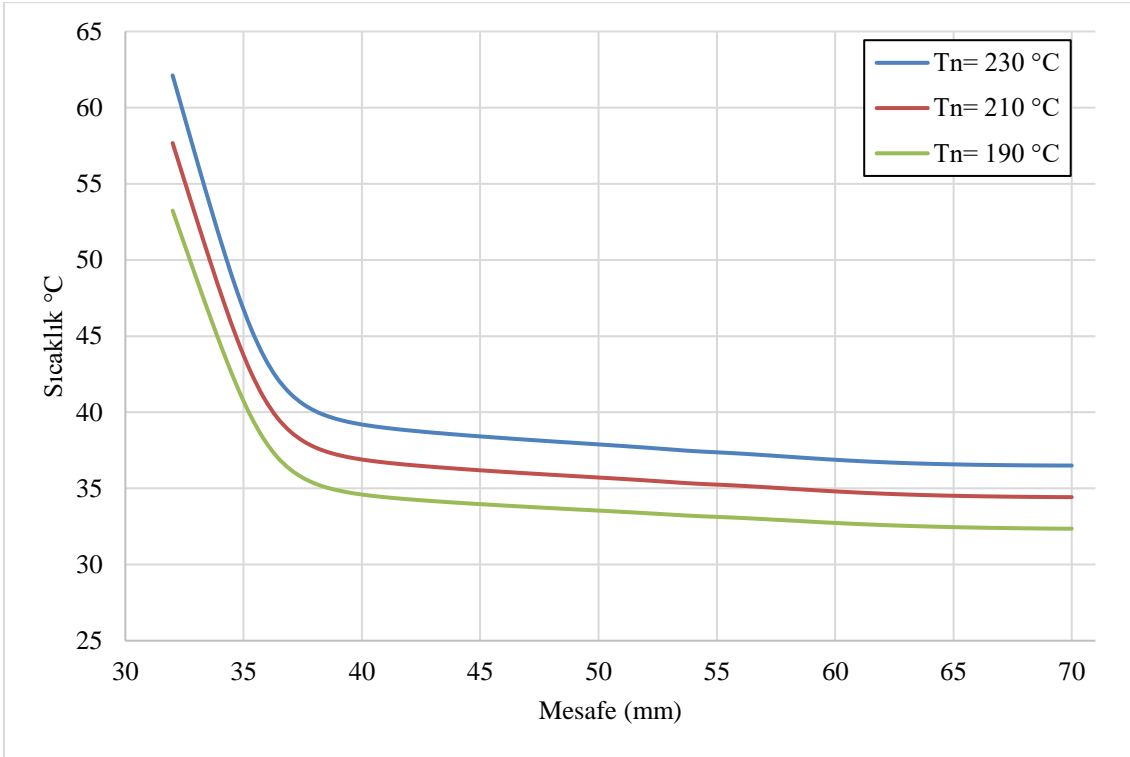


Şekil 4.55 T1 tasarımında fanın 1,5 m/s hızı için soğutucudaki sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.55’de kare ısıtıcı bloğa sahip tasarımda (T1) fanın maksimum hızında ($V_{in} = 1,5$ m/s) farklı nozul sıcaklıkları için soğutucu üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları görülmektedir. Soğutucunun üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı T_{nozzle} sınır şartına bağlı olarak değişim göstermektedir. Soğutucunun alt kanatçıklarının olduğu bölge ısı transferinin en sık gerçekleştiği bölge olduğu görülmektedir. Bu bölge hem ısıtma modülü tarafından iletilen sıcaklıklara maruz kalmaktadır hem de akışkanın kanatçıkları soğutmaya çalıştığı bölgedir. Soğutucunun alt kısmındaki kanatçıkların yapısı soğutma işleminin ilk gerçekleştiği bölgelerdir.

Nozul sıcaklığı 230 °C olarak belirlendiğinde soğutucunun en alt kısmındaki bölgedeki sıcaklık değerleri 40 °C’nin üzerine çıkmaktadır. Nozul sıcaklığı 210 °C ve 190 °C olarak belirlendiğinde soğutucunun alt kısmındaki maksimum sıcaklıklar sırasıyla 38 °C ve 35 °C’nin üzerine çıkmaktadır. Soğutucunun en soğuk bölgesi olan üst kısmındaki sıcaklık değerleri, 230 °C, 210 °C ve 190 °C sınır şartları için sırasıyla 37 °C, 35 °C ve 33 °C olmaktadır. Üretimler sırasında filamentin sıcaklık kontrolü üretimin başarılı olabilmesi için önem arz eder. Soğutucu üzerinde oluşan dağılımı filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıklarını doğrudan etkilemektedir.

Filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklık değerleri Şekil 4.56’da görülmektedir. Grafikte fanın maksimum hızı olan 1,5 m/s hız için filamentin soğutucu içindeki sıcaklık değerleri verilmiştir.

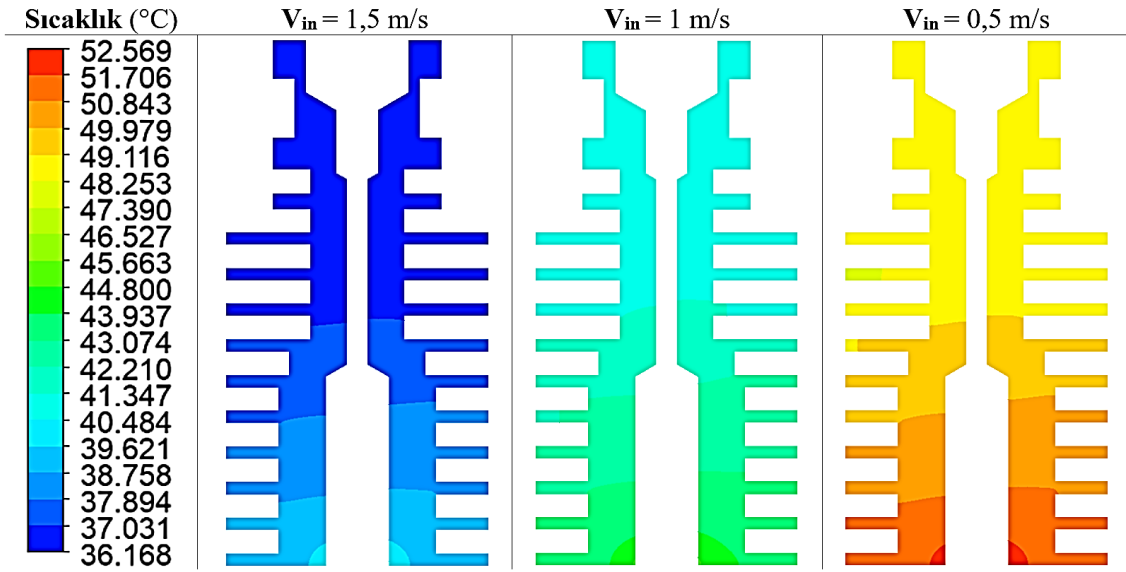


Şekil 4.56 T1 tasarımı için 1,5 m/s fan hızında filamentin soğutucu içindeki sıcaklık değerleri.

Grafikten görüleceği üzere nozul sıcaklığı sınır şartı 190 °C olarak belirlendiğinde filamentin soğutucunun başladığı bölgedeki sıcaklığı 55 °C'ye yaklaşmaktadır. Nozul sıcaklığı sınır şartı 210 °C olarak belirlendiğinde filament sıcaklığı 60 °C'ye yaklaşmaktadır. Nozul sıcaklığı artırılarak 230 °C'ye çıkarıldığında ise filamentin sıcaklığı 60 °C'yi geçmektedir. Elde edilen bulgular mevcut ekstruder tasarımı sırasında filamentin soğutma modülü kısmında camsı geçiş sıcaklığı olan 50 – 60 °C aralığında olduğunu göstermektedir. Farklı markalardaki PLA filamentler için camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) 50 – 70 °C arasında değişmektedir. (Örneğin Zortrax Z-PLA Pro marka filamentin camsı geçiş sıcaklığı 48,6 °C'dir.) Mevcut ekstruder ile PLA filament kullanılarak yapılacak üretimlerde bu durum filamentin soğutucu bölgesinde eriyerek, filamentin sürülmesini zorlaştırma riski oluşturmaktadır. PLA filamentler sahip oldukları camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı gibi termal özellikler nedeniyle üretimi en kolay filamentlerden biridir. Mevcut ekstruder tasarımı üretimi kolay sayılabilecek filamentlerle bile üretim yaparken sorunlar oluşturma potansiyeline sahiptir. Mevcut ekstruder tasarımı ile erime sıcaklığı daha yüksek olmasına rağmen camsı geçiş sıcaklığı

daha düşük filamentlerle üretim yapılması mümkün görülmemektedir. Özellikle yüksek performanslı termoplastik filamentlerle veya düşük maliyetli naylon filamentlerin mevcut ekstruder ile üretimi oldukça zor olacaktır. (Örneğin DSM Novamid® ID 1030-CF10 Nylon 6/66 filamentin camsı geçiş sıcaklığı 39 °C ve erime sıcaklığı 210 °C'dir. Benzer şekilde bazı PA filamentlerin erime sıcaklıkları 250 °C'nin üzerine çıkarken, camsı geçiş sıcaklıkları 35 °C'ye kadar düşebilmektedir.)

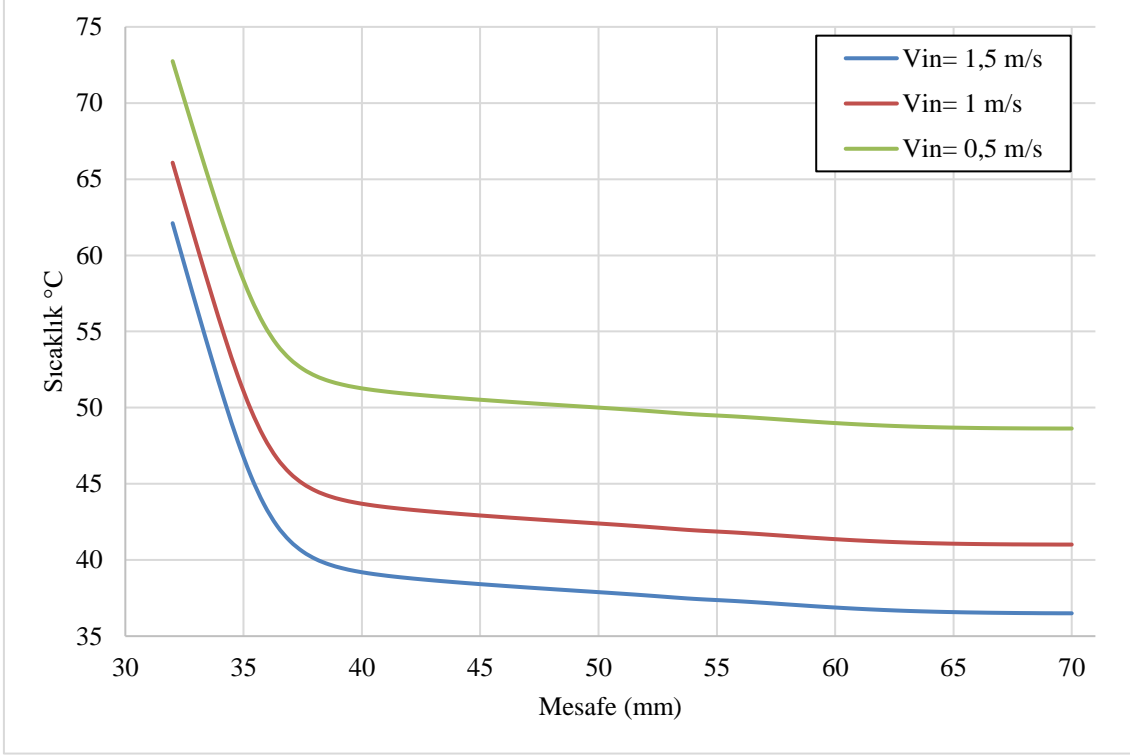
Mevcut ekstruder tasarımında fan hızının 1,5 m/s ile maksimum hızlarda çalıştığında soğutucunun yeterli soğutma performansı gösteremediği tespit edilmiştir. Daha düşük fan hızlarında mevcut ekstruder'in termal performansı daha da kötüleşmektedir. Şekil 4.57'de daha düşük fan hızlarında ekstruder'in soğutucusu üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.57 T1 tasarımında 230 °C sınır şartı için farklı fan hızlarında soğutucudaki sıcaklık dağılımları.

230 °C nozul sıcaklığında farklı fan hızlarında soğutucu üzerindeki sıcaklık dağılımı birbirine benzer davranış sergilemektedir. Ancak 0,5 m/s fan hızında soğutucu üzerindeki maksimum sıcaklıklar 50 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Soğutucunun alt kısmındaki kanatçıklar üst kısımlardaki kanatçıklara göre çok daha fazla ısınmaktadır. Elde edilen bulgular soğutucunun ilk dört kanatçığının soğutma performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Soğutucunun farklı fan hızlarındaki sıcaklık dağılımları

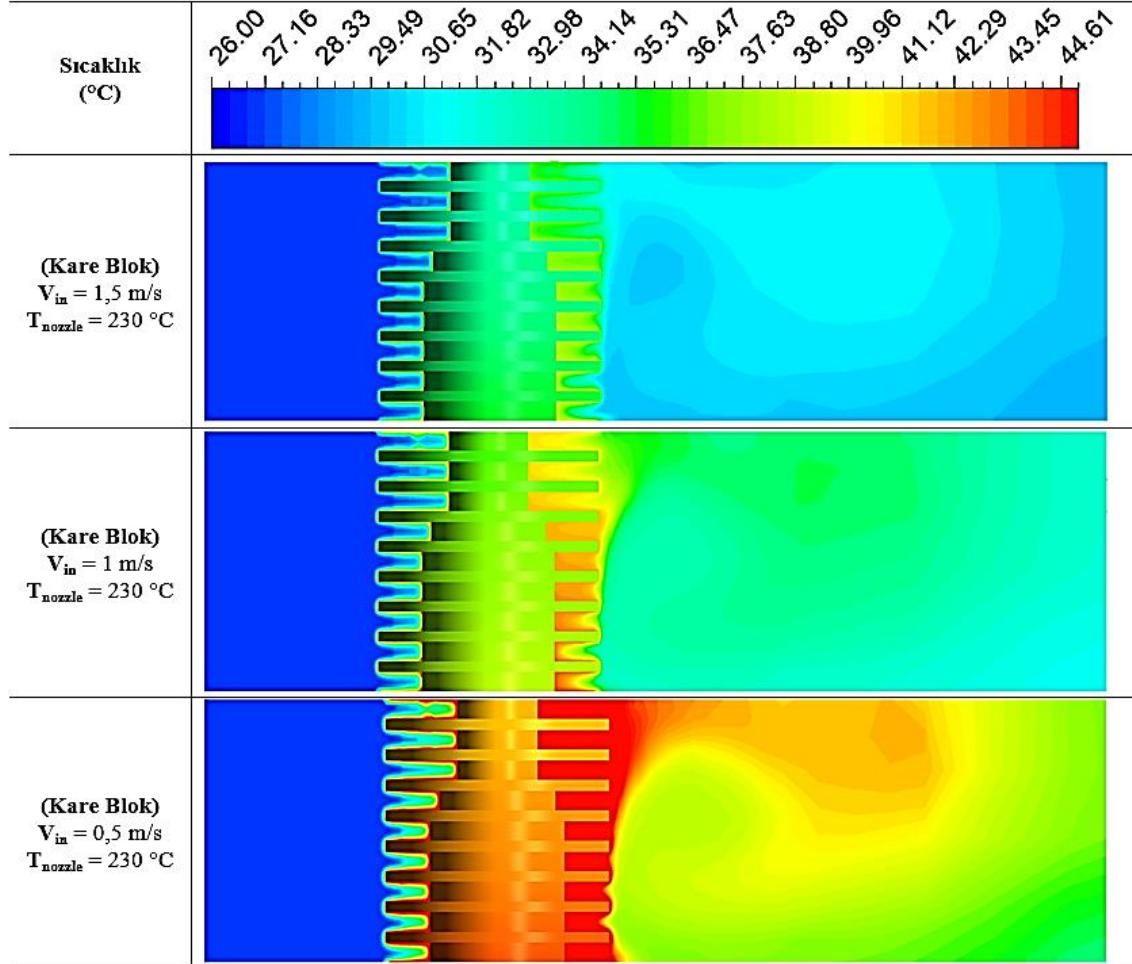
filamentin sıcaklığına da etki etmektedir. Farklı fan hızları için 230 °C sınır şartında filamentin sıcaklık değişimleri Şekil 4.58’de verilmiştir.



Şekil 4.58 Farklı fan hızlarında 230 °C sınır şartı için filament sıcaklıkları.

Şekil 4.58’de görüldüğü üzere fan sıcaklığı 0,5 m/s hıza düştüğünde filamentin soğutucu girişindeki sıcaklığı 70 °C’nin üzerine çıkmaktadır. Soğutucunun üst kısımlarında ise filament sıcaklığı 50 °C’ye yaklaşmaktadır. Her üç fan hızında filamentin soğutucunun alt kısımlarındaki sıcaklığı 60 °C’nin üzerindedir. Bu sıcaklık değerleri birçok filament için camsı geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklardır. Mevcut ekstruder tasarımının soğutucusu bazı PLA ve ABS filamentlerle yapılacak üretimler için gerekli olan sınır değerlerdeki çalışma sıcaklıklarını sağlamaktadır. Ancak elde edilen sıcaklık değerleri neredeyse limit değerlerindedir. Üretim sırasında oluşacak sıcaklık dalgalanmaları soğutucunun sıcaklık dağılımını ve soğutucu içerisindeki filamentin sıcaklıklarını da etkileyecektir. Bu durum ekstrüzyon sırasında tutarsızlıklara ve bir süre sonra nozul tıkanmalarına neden olmaktadır. Aynı zamanda bu durum üretim sırasında herhangi bir nedenle fanın kısa süreliğine çalışmaması veya hızının azalması durumunda üretimin olumsuz etkileneceğini göstermektedir. Mevcut ekstruder üzerinde yapılan simülasyonlar

bu ekstruder tasarımı ile daha yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip filamentlerle üretim yapılabilmesinin zor olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.59 Kare ısıtıcı blok tasarıma sahip modelde farklı fan hızlarında akışkan sıcaklıklarının değişimi.

Şekil 4.59’da mevcut ekstruder tasarımı için 230 °C nozul sıcaklığında farklı fan hızlarında yapılan simülasyonlardan elde edilen akışkanın farklı bölgelerdeki sıcaklıkları görülmektedir. Şekildeki sıcaklık verileri soğutucunun merkezinden geçen bir düzlem üzerinde görüntülenmiştir. Şekilde soğutucunun sol tarafında fanın farklı hızlarda yönlendirdiği akışkanın soğutucunun yüzeyine 26 °C sıcaklıkla ulaştığı görülmektedir. Akışkanın soğutucu yüzeyine temas ettiği bölgelerde ısınarak çıkış bölgesinden ayrıldığı görülmektedir. Bu bölgede fan hızları azaldıkça soğutucu yüzeyinden daha yavaş geçen hava daha çok ısınmaktadır. Fan hızının 0,5 m/s olduğu durumda akışkanın soğutucudan ayrıldığı üst bölgelerdeki sıcaklığının alt bölgelere daha fazla olduğu görülmektedir. Bu

durum akış ayrılma bölgesinde oluşan girdaplardan kaynaklanmaktadır. Soğutucu sıcaklığının en yüksek olduğu alt kısımlarda bulunan kanatçıklar soğutma performansını doğrudan etkilemektedir. Şekilden görüleceği üzere ilk dört kanatçık arasında akışkanın diğer bölgelere göre çok daha fazla ısındığı görülmektedir. Elde edilen bulgular soğutucunun alt kısımdaki ilk dört kanatçığının soğutma performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

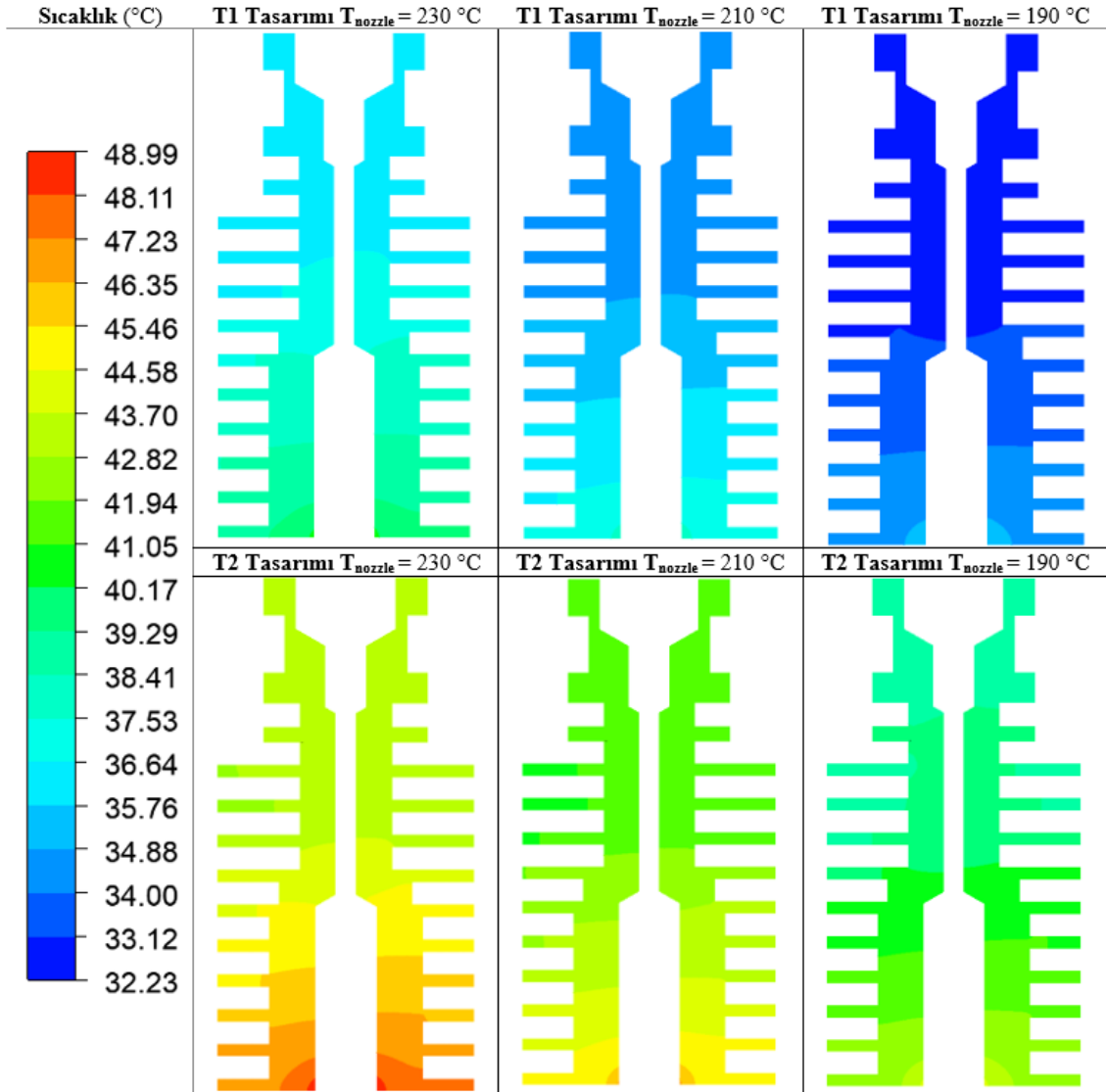
Mevcut ekstruder tasarımının simülasyonlarından elde edilen bulgular bu tasarımın yüksek çalışma sıcaklığına sahip filamentlerin üretimi için uygun olmadığını göstermiştir. Mevcut tasarımın soğutucu performansı PLA gibi daha düşük çalışma sıcaklığına sahip filamentler için ancak yeterlidir. Hatta düşük çalışma sıcaklıklarına sahip filamentlerle yapılacak olan üretimlerde sorunlar oluşturabilecek eksikler tespit edilmiştir.

4.5.4 T2 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

T2 ekstruder modelinde T1 tasarımından farklı olarak mevcut ekstruderlarda kullanılan ısıtıcı blok tasarımı yerine bu çalışmada önerilen yeni ısıtıcı blok tasarımı bulunmaktadır. Önerilen yeni ısıtıcı blok tasarımının özellikleri ve avantajları Bölüm 4.3'te detaylı olarak sunulmuştur. T1 tasarımında kare kesitli bir ısıtıcı bulunurken T2 tasarımında silindirik kesitli ve daha büyük boyutlarda bir ısıtıcı blok bulunmaktadır. T2 tasarımı ile mevcut ekstruderlarda kullanılan soğutucuların soğutma performanslarının değerlendirilebilmesi için T1 tasarımında kullanılan soğutucular kullanılmış ve sadece kare kesitli ısıtıcı blok yerine yeni tasarlanan silindirik kesitli ısıtıcı blok kullanılmıştır. T2 tasarımı için yapılan simülasyonlarda kullanılan malzemelerin özellikleri, sınır şartı parametreleri, analiz özellikleri, alınan kabuller ve türbülans modelleri Bölüm 4.5.2'de sunulmuştur.

Şekil 4.60'da silindirik ısıtıcı bloğa sahip T2 tasarımında fanın maksimum hızında ($V_{in} = 1,5 \text{ m/s}$) farklı nozul sıcaklıkları için soğutucu üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları görülmektedir. Farklı ısıtıcı blok tasarımlarının soğutucu üzerindeki sıcaklık dağılımlarına etkisini daha iyi gözlemlenebilmesi için Şekil 4.60'da üst kısımda T1 tasarımının analizlerinden elde edilen sonuçlar ve alt kısımda aynı sınır şartlarında T2

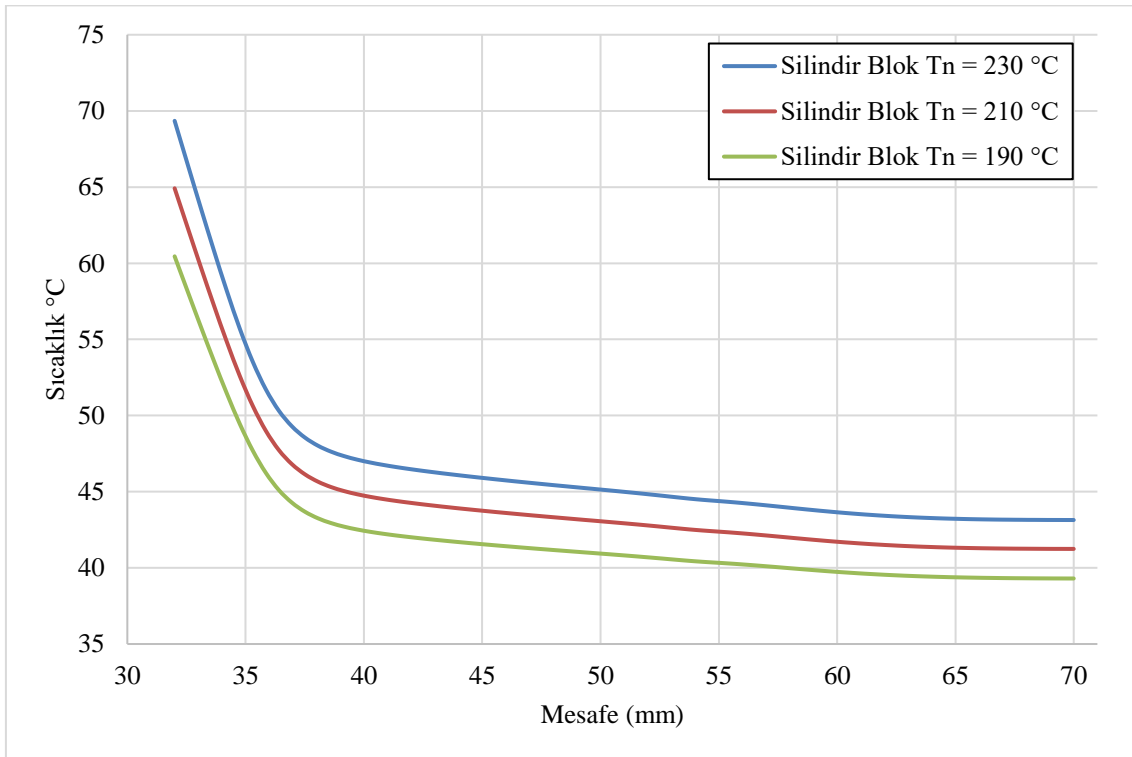
tasarımının analizlerinden elde edilen sonuçlar bir arada görülmektedir.



Şekil 4.60 T1 ve T2 tasarımı için fanın 1,5 m/s hızı için farklı nozul sıcaklıklarında soğutucudaki sıcaklık dağılımları.

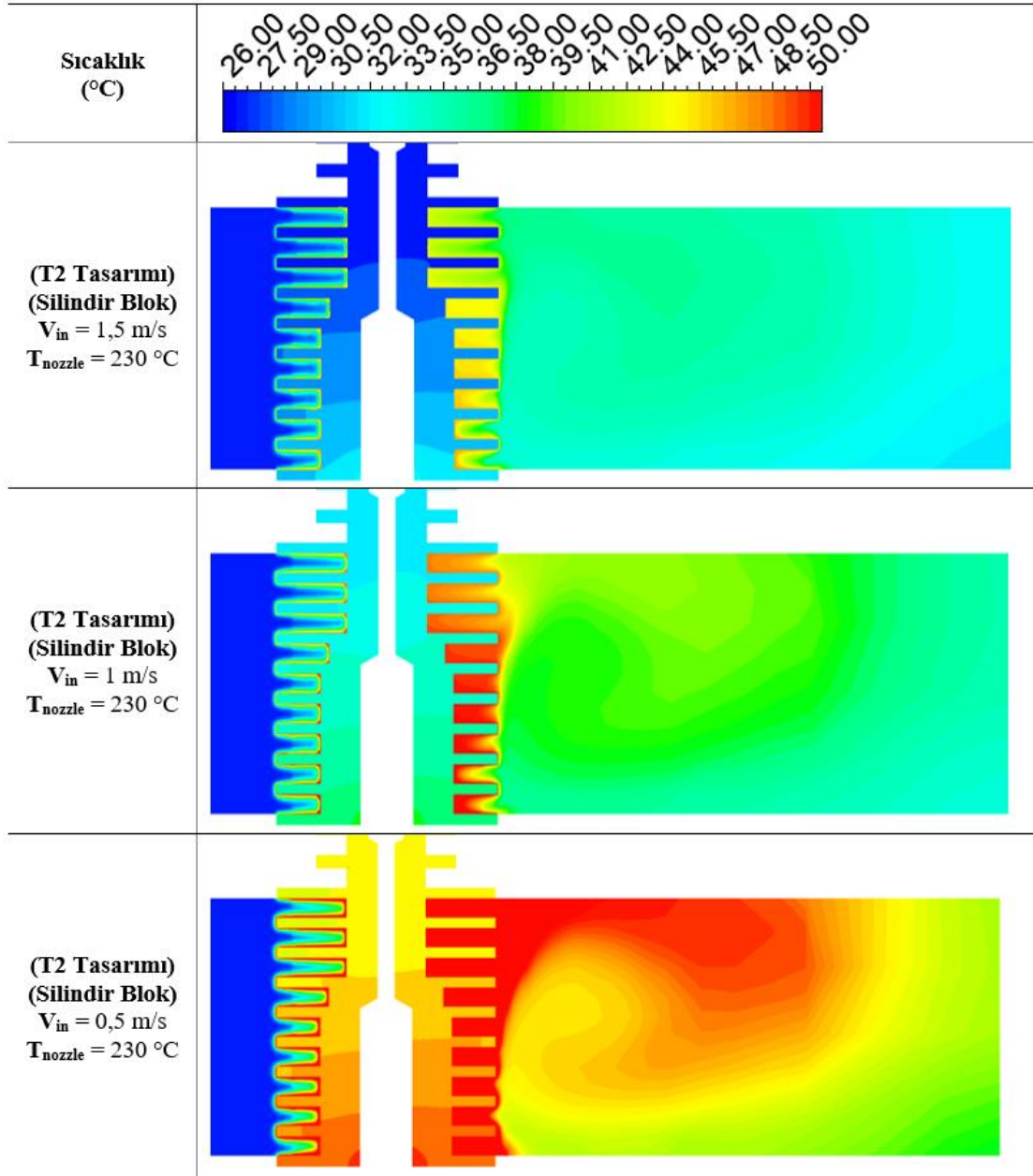
Şekil 4.60’da her bir tasarıma ait sıcaklık değerleri kendi içinde mavi ve kırmızı arasında renk skalasına sahiptir. T1 tasarımları için minimum sıcaklık değeri (32,23 °C) mavi ve maksimum sıcaklık değeri (40,57 °C) kırmızı ile gösterilmektedir. T2 tasarımlarında ise kırmızı renklerle ifade edilen maksimum sıcaklık değeri 48,99 °C ve mavi renk ile ifade edilen minimum sıcaklık değeri 38,85 °C’dir. Aynı soğutucular kullanıldığında her iki tasarım için soğutucularda oluşan sıcaklık dağılımları benzer karaktere sahiptir. Ancak kare bloğa sahip tasarım ile silindir bloğa sahip tasarım arasında en önemli fark

soğutucularda oluşan minimum ve maksimum sıcaklıklardır. 230 °C nozul sıcaklığında kare bloğa sahip tasarımda soğutucunun maksimum sıcaklığı 40 °C civarındayken silindirik bloğa sahip tasarımdaki maksimum sıcaklık 50 °C'ye yaklaşmaktadır. Elde edilen bulgular kare yerine silindirik blok kullanıldığında soğutucunun daha yüksek sıcaklıklara ulaştığını göstermektedir. Bu durum filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklığını etkilemektedir.



Şekil 4.61 T2 tasarımında 1,5 m/s fan hızında farklı giriş hızları için filament sıcaklık değerleri.

Şekil 4.61'de silindirik bloğa sahip T2 tasarımda filamentin soğutucu içindeki sıcaklık değerleri görülmektedir. Nozul sıcaklığının 190 °C ile en düşük olduğu sınır şartında bile soğutucunun alt kısmında filamentin sıcaklığı 60 °C'ye kadar yükselebilmektedir. Nozul sıcaklığının 230 °C'ye çıkarıldığı durumda ise filamentin sıcaklığı 70 °C'ye kadar yükselmektedir. Analizlerden elde edilen sonuçlar mevcut ekstruderlarda kullanılan soğutucuların silindirik ısıtıcı blokla birlikte kullanıldığında bu ekstruderların yüksek nozul sıcaklıklarında üretim sorunlarına yol açabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte bu tasarımda kullanılan fanların performansı da önem kazanmaktadır.

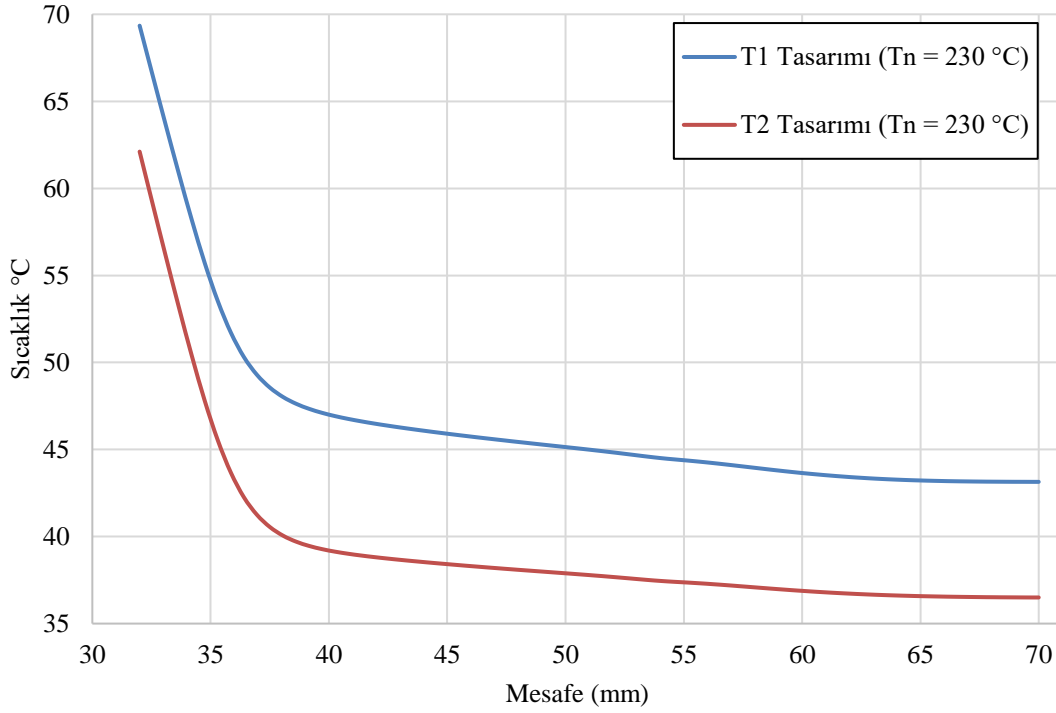


Şekil 4.62 T2 tasarımında 230 °C için farklı fan hızlarında akışkanın sıcaklık dağılımları.

T2 tasarımında fan hızları düşürüldüğünde soğutucunun performansı çok daha kötüleşmektedir. Şekil 4.62’de 230 °C nozul sınır şartı için 0,5 m/s, 1 m/s ve 1,5 m/s fan hızları için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Soğutucunun üst bölgelerinde fan hızları düştükçe sıcaklıklar artmaktadır. 0,5 m/s fan hızında soğutucunun üst kısmı 58,75 °C sıcaklığa kadar yükselirken, 1,5 m/s fan hızlarında aynı noktadaki sıcaklık 43,12 °C olmaktadır. Fan hızları düşürüldüğünde akışkan soğutucu tarafından daha çok ısıtılmaktadır. 1,5 m/s fan hızında akışkanın çıkış sıcaklığı 32 °C civarında olurken 0,5

m/s fan hızlarında akışkanın çıkış sıcaklığı 40 °C'ye kadar yükselebilmektedir.

1,5 m/s fan hızında ve 230 °C nozul sıcaklığında kare ısıtıcı blok (T₁ Tasarımı) ve silindirik ısıtıcı blok (T₂ Tasarımı) kullanıldığında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları Şekil 4.63'te sunulmuştur.



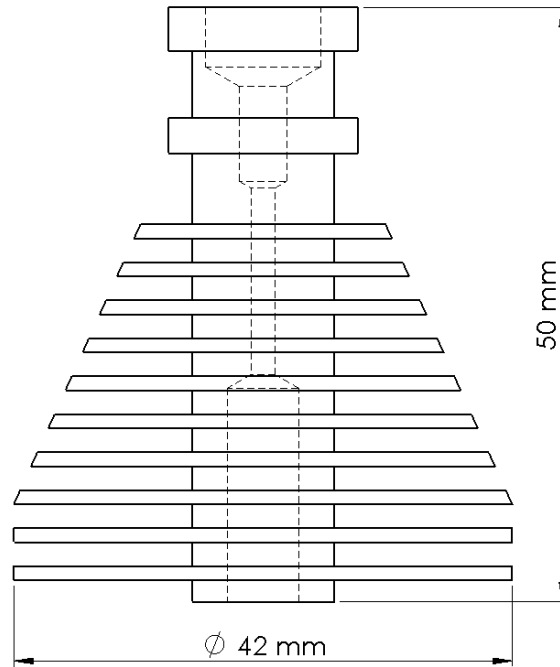
Şekil 4.63 T₁ ve T₂ tasarımlarında 1,5 m/s fan hızı için filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları.

Şekil 4.63'te görüldüğü üzere T2 tasarımında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklığı T1 tasarımına göre yaklaşık 10 °C kadar daha fazladır. Bununla birlikte soğutucunun alt kısımlarında filamentin sıcaklık değeri camsı geçiş sıcaklık değerlerinin çok üstüne çıkmaktadır. Bu durum filament besleyicinin filamenti sürmesi için olumsuz bir durum oluşturmaktadır. Daha büyük boyutlarda ısıtıcı blok kullanılması soğutucu tasarımının da iyileştirilmesini gerektirmektedir.

4.5.5 T3 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

T1 ve T2 tasarımları ile yapılan analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda T3 tasarımında soğutucu tasarımı optimize edilmiştir. T1 ve T2 tasarımlarının analizlerinde

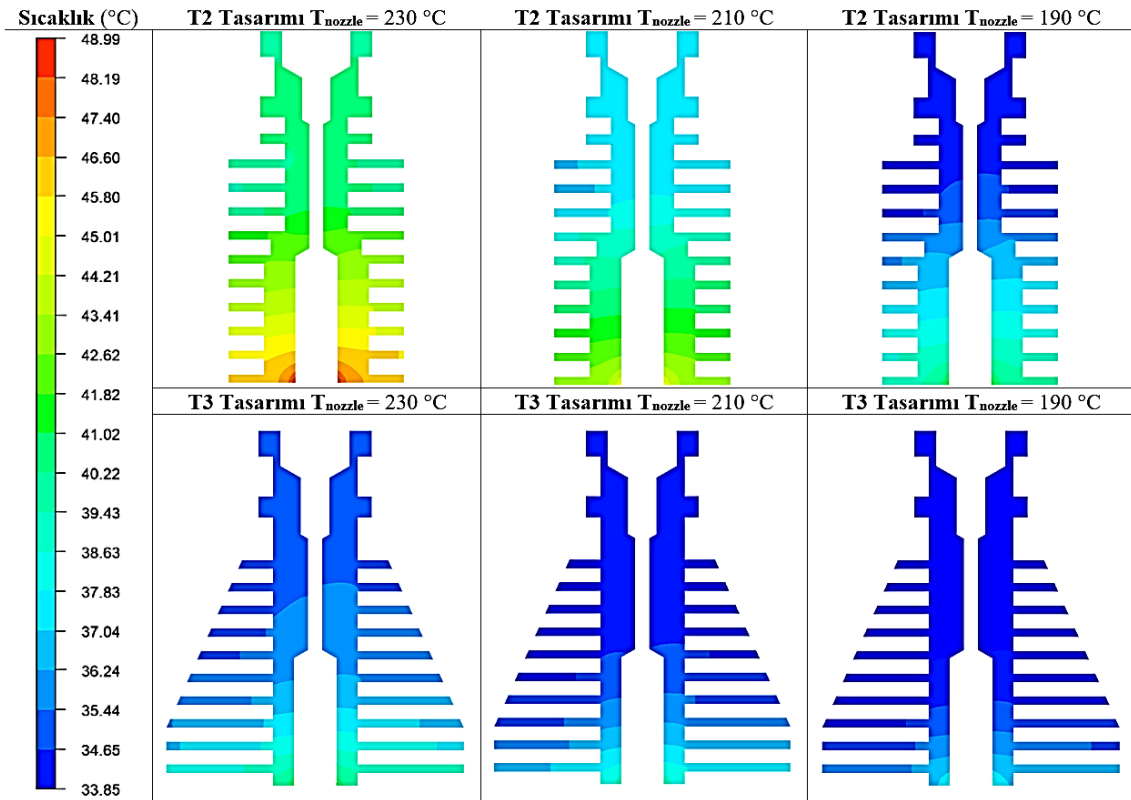
soğutucunun ilk dört kanatçığının soğutma performansına etkisinin diğer kanatçıklara göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte soğutucunun ısıtma modülünden daha uzakta olan kanatçıkları ilk dört kanatçığa göre soğutma performansına daha az etki etmektedir. Elde edilen bulgular doğrultusunda T3 tasarımında soğutucunun alt kısmındaki kanatçıkların çapları büyütülmüştür. Soğutucunun ilk dört kanatçığının çapları büyük olmasına rağmen diğer kanatçıklar mevcut soğutucuların kanat çaplarından daha küçük tasarlanmıştır. Böylece soğutucun mevcut tasarımlarda kullanılan soğutucularla yaklaşık boyutlarda ancak soğutma performansı daha iyi olacak bir tasarım önerilmiştir. Önerilen yeni soğutucu tasarımının ölçüleri Şekil 4.64’te sunulmuştur.



Şekil 4.64 Optimize edilmiş soğutucu tasarımı.

Önerilen yeni soğutucu tasarımı silindir ısıtıcı blok ile birlikte kullanılmıştır. Yeni soğutucu tasarımının silindir ısıtıcı blok ile kullanıldığı bu model T3 tasarımı olarak adlandırılmıştır. T3 tasarımında soğutucunun performansının belirlenmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan malzemelerin özellikleri, sınır şartı parametreleri, analiz özellikleri, alınan kabuller ve türbülans modelleri Bölüm 4.5.2’de sunulmuştur.

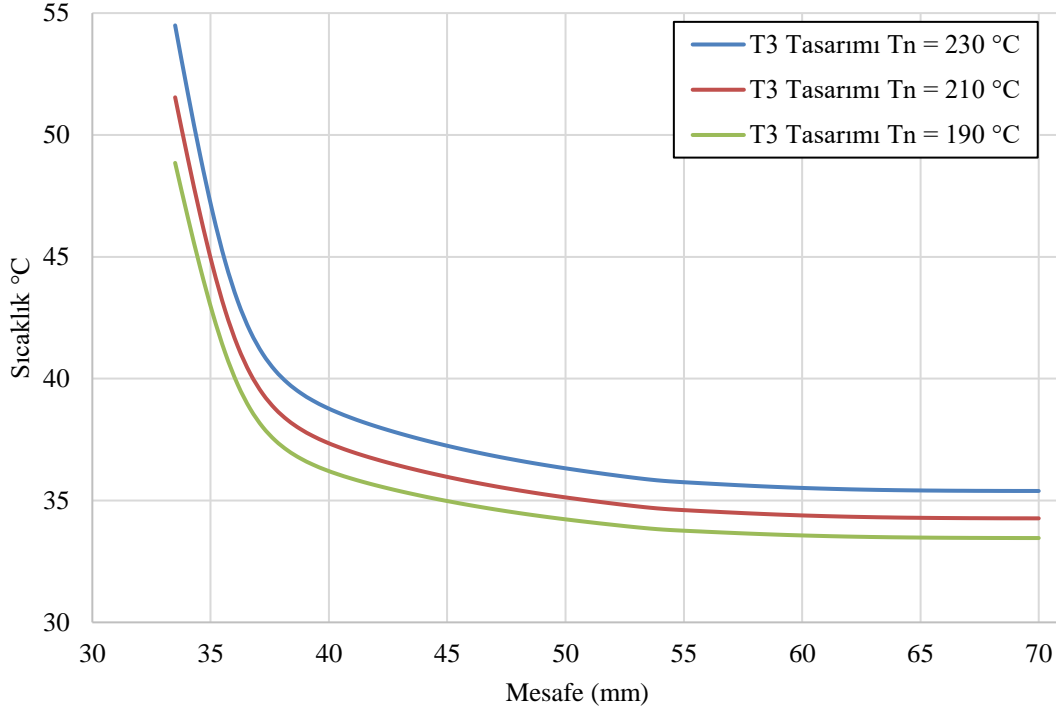
Optimize edilen soğutucu tasarımının (T3 Tasarımı) soğutma performansı ile mevcut ekstruder tasarımlarında (T2 tasarımı) kullanılan soğutucuların performansının karşılaştırılabilmesi için fanın maksimum hızı 1,5 m/s ile sabit tutularak, nozul sıcaklığının 190 °C, 210 °C ve 230 °C olmak üzere değiştiği üç farklı durum için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. T2 ve T3 tasarımlarının sabit fan hızında farklı nozul sıcaklıklarında gerçekleştirilen simülasyonlarından elde edilen soğutucuların sıcaklık dağılımları Şekil 4.65'te sunulmuştur.



Şekil 4.65 T2 ve T3 tasarımlarında kullanılan soğutucuların farklı sıcaklıklarda 1,5 m/s fan hızında sıcaklık dağılımı.

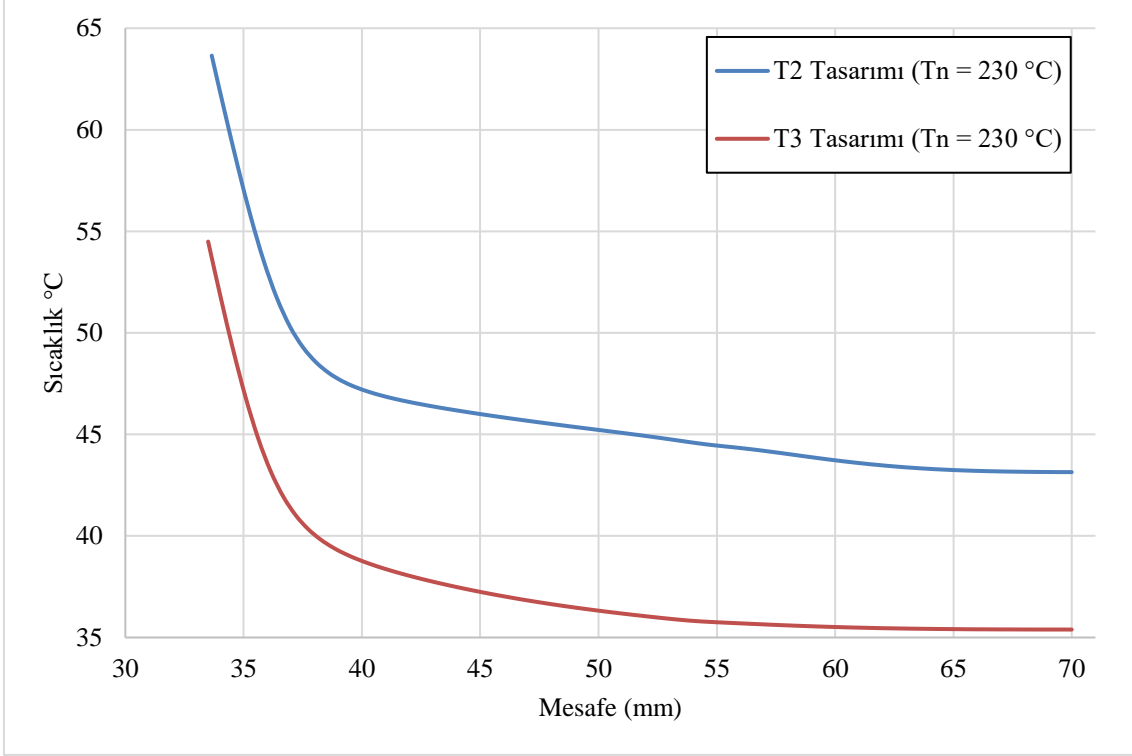
Elde edilen bulgular önerilen yeni soğutucu tasarımının soğutma performansının T2 tasarımına göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Nozul sıcaklığı sınır şartı 230 °C tanımlandığında soğutucunun ısıtma modülünden en uzak olan üst bölgedeki sıcaklıklar T2 tasarımında 45 °C'ye kadar çıkarken, T3 tasarımında 35 °C civarında bulunmaktadır. T3 tasarımında önerilen yeni soğutucu, mevcut ekstruderlardaki soğutuculara göre sistemi yaklaşık 10 °C civarında daha fazla soğutmaktadır. Nozul sıcaklıklarının 210 °C ve 190 °C olarak belirlendiği durumlarda da önerilen soğutucunun

daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Yeni önerilen soğutucu tasarımı, ısıtma modülünde oluşan ısının üst bölgelere transferini azaltmaktadır. Böylece filamentin soğutma modülü içerisindeki sıcaklığını da düşük tutulmasını sağlamaktadır.



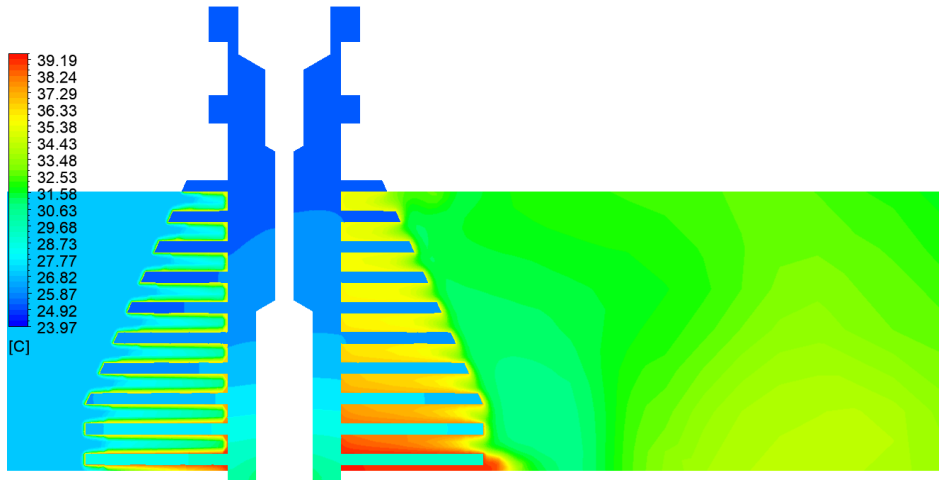
Şekil 4.66 T3 tasarımı için farklı sıcaklıklarda filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları.

T3 tasarımı için farklı nozul sıcaklıklarında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları Şekil 4.66'da görülmektedir. Elde edilen bulgulara göre nozul'ın 230 °C ile en yüksek olduğu sıcaklıkta filament soğutucu içerisinde en fazla 55 °C kadar sıcaklığa ulaşmaktadır. Soğutucunun üst kısımlarında ise filament sıcaklığı 35 °C'ye kadar düşmektedir. Nozul sıcaklığının 190 °C ve 210 °C olduğu sıcaklıklarda da benzer durum geçerlidir. Her iki sıcaklıkta da filament soğutucu içerisinde camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bulunmaktadır. Önerilen yeni soğutucu tasarımı, ısıtma modülünde üretilen ısıyı soğutma modülüne T1 ve T2 tasarımlarında bulunan soğutuculardan daha az iletmektedir.



Şekil 4.67 T2 ve T3 tasarımlarında, 230 °C nozul sınır şartında, soğutucu içerisindeki filamentin sıcaklıkları.

T2 ve T3 tasarımlarının karşılaştırması Şekil 4.67’de daha net görülmektedir. T3 tasarımı ile filament soğutucu içerisinde T2 tasarımından yaklaşık 10 °C daha düşük sıcaklıkta bulunmaktadır. T2 tasarımında bulunan soğutucu filamentin sıcaklığını 44 °C’ye kadar düşürebilirken, T3 tasarımında bulunan soğutucu 35 °C’ye kadar düşürebilmektedir. Dolayısıyla T3 tasarımında önerilen soğutucu ile ekstrüzyon süreci daha iyi kontrol edilebilmektedir.



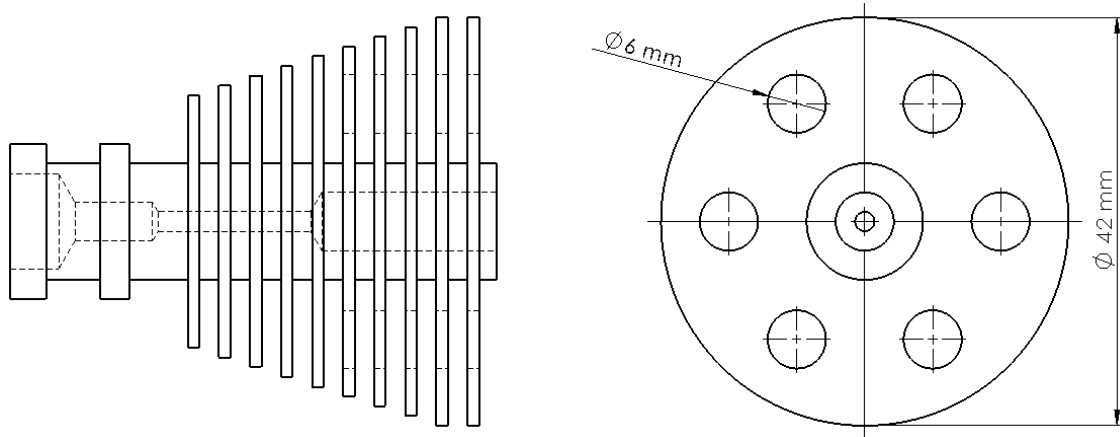
Şekil 4.68 T3 tasarımında akışkanın kanatçıklar arasından geçerken ısınması.

Şekil 4.68’de T3 tasarımında 230 °C nozul sıcaklığında akışkanın soğutucunun kanatları arasından geçerken ısındığı görülmektedir. Akışkanın özellikle alttaki kanatçıklar arasından geçerken ısınması, bu bölgede akışkanın kanatçıklarla arasında oluşan ısı transferinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Önerilen tasarımın soğutma performansının diğer tasarımlardan daha iyi olmasının sebebi soğutucunun ısıtma modülüne yakın bölgedeki kanatçık yapısıyla ilgilidir. Soğutucunun ilk dört kanatçığının daha büyük yüzey alanına sahip olması soğutma performansını iyileştirmektedir.

4.5.6 T4 Tasarımının Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

T4 tasarımında T3 tasarımında olduğu gibi silindirik ısıtıcı blok kullanılmıştır. Bu tasarımda T3 tasarımından farklı bir soğutucu yapısı geliştirilmiştir. T4 tasarımında geliştirilen soğutucunun genel boyutları T3 tasarımıyla aynıdır ancak üzerinde yüzey alanını genişletecek değişiklikler yapılmıştır. T4 tasarımında kullanılan soğutucunun boyutları Şekil 4.69’da görülmektedir.

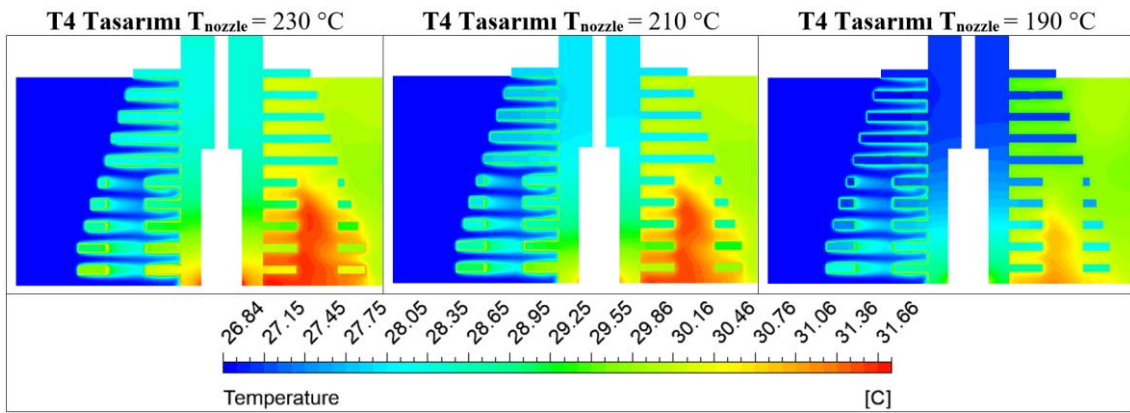


Şekil 4.69 T4 tasarımıyla önerilen yeni soğutucu modeli.

T4 tasarımında soğutucunun ilk beş kanatçığının yüzeyine 6 mm çapında altı adet delik açılmıştır. Açılan bu delikler ilk beş kanatçık üzerindeki yüzey alanını genişletmektedir. Akışkanın temas ettiği yüzey alanının artması bu bölgede ısı transferinin daha çok olmasını sağlamıştır. Aynı zamanda eklenen delikler ekstruder’ın genel ağırlığını

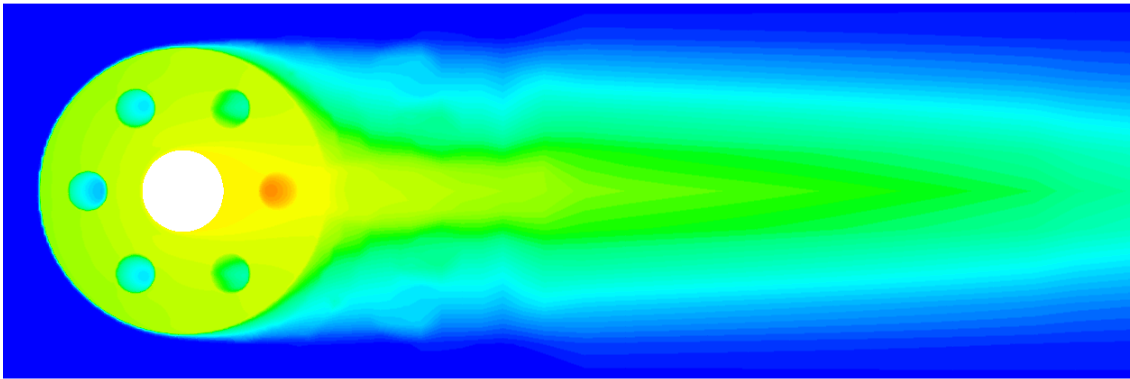
azaltmaktadır. Mevcut ekstruderlarda kullanılan soğutucuların ağırlığı 28,05 gram ve T3 tasarımında kullanılan soğutucunun ağırlığı 44,08 gram iken T4 tasarımında geliştirilen soğutucunun ağırlığı 36,12 gramdır.

Önerilen yeni soğutucunun soğutma performansının belirlenmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan malzemelerin özellikleri, sınır şartı parametreleri, analiz özellikleri, alınan kabuller ve türbülans modelleri Bölüm 4.5.2’de sunulmuştur.



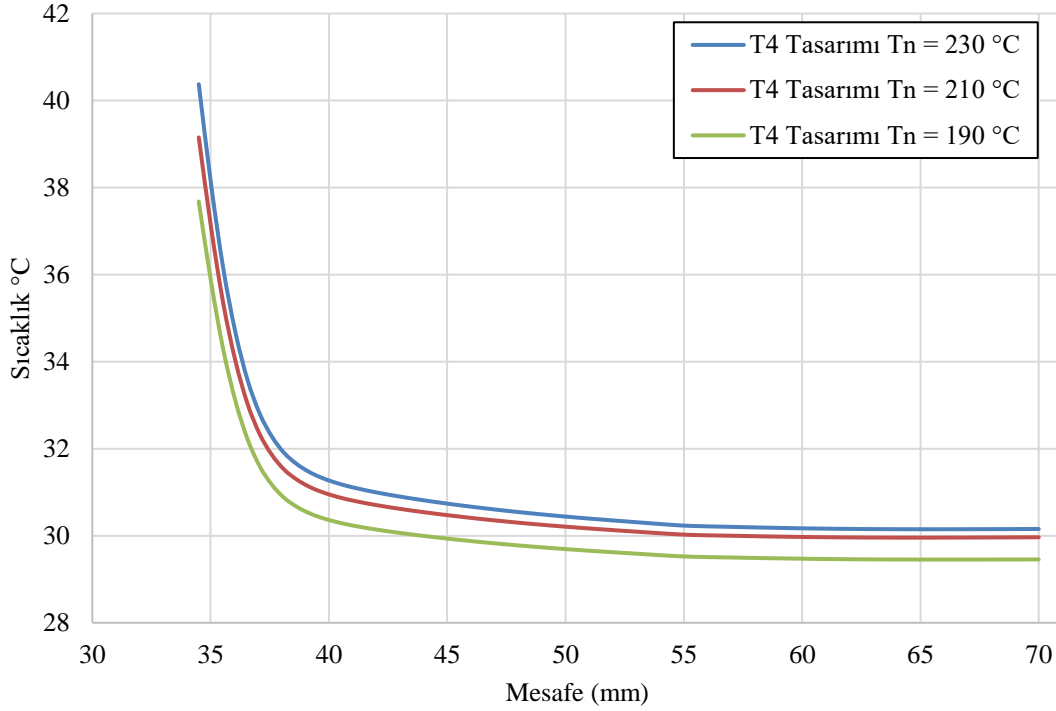
Şekil 4.70 T4 tasarımının 1,5 m/s fan hızında farklı sıcaklıklarda sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.70’te T4 tasarımının hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarından elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şeklin alt kısmında bulunan renk skalası akışkanın sıcaklığını ifade etmektedir. T4 tasarımında soğutucu üzerine eklenen delikler akışkanın bu bölgede daha çok ısınmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.71 T4 tasarımında ilk kanatçık etrafında akışkan sıcaklığı.

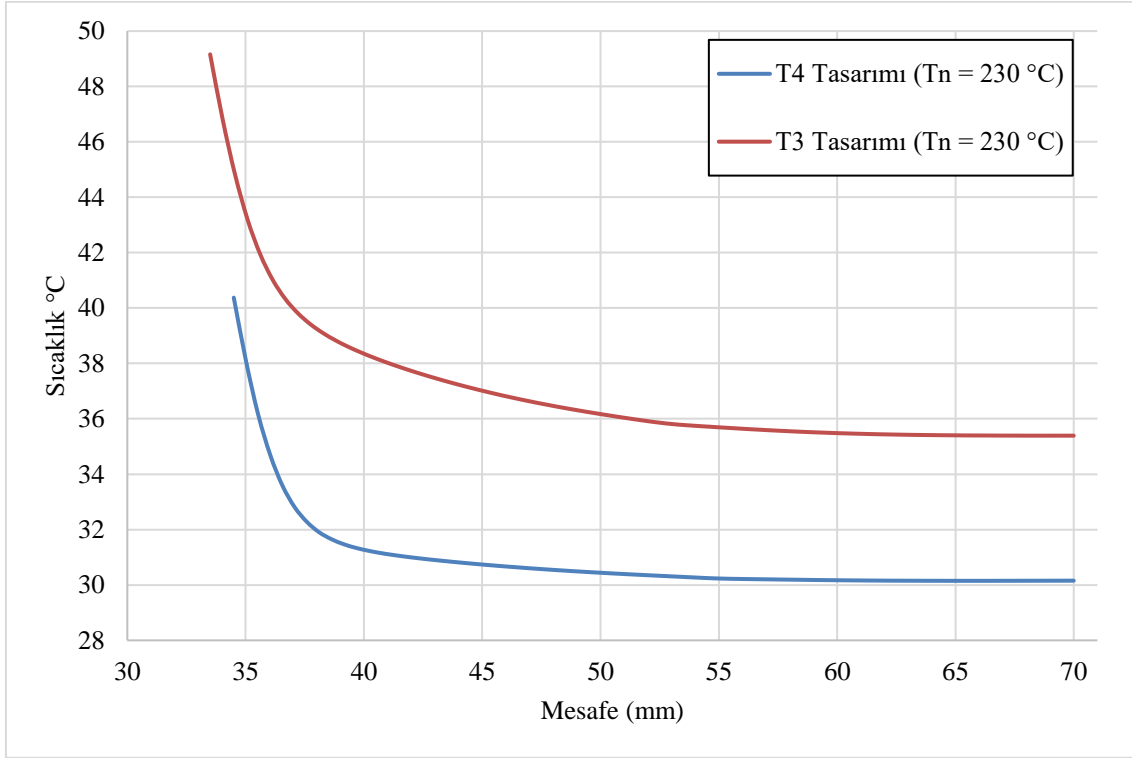
Delikli yapıların akışkanın sıcaklığına olan etkisi üst görünüşten daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.71’de soğutucunun ilk kanatçığının üzerindeki bir düzlemde akışkanın sıcaklığı görülmektedir. Delikli yapıların bulunduğu bölgede yüzey alanının genişlemesi ile birlikte akışkan daha çok ısınmaktadır. Dolayısıyla delikli yapı soğutucunun daha çok soğutulmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.72 T4 tasarımı için 1,5 m/s fan hızında filamentin soğutucu içindeki sıcaklık dağılımı.

Soğutucunun sahip olduğu soğutma performansı filamentin sıcaklığını doğrudan etkilemektedir. T4 tasarımında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları Şekil 4.72’de görülmektedir. T4 tasarımı ile 1,5 m/s fan hızında 230 °C nozul sıcaklığında soğutucunun giriş bölgesinde filamentin sıcaklığı 41 °C’ye kadar düşürülmüştür. Filament sıcaklığı soğutucunun en üst kısımlarında 30 °C’ye kadar düşmektedir. ABS gibi nispeten daha yüksek erime sıcaklıklarına sahip filamentler için T4 tasarımında önerilen soğutucu yeterli soğutmayı sağlayacaktır. Nozul sıcaklığı sınır şartının 190 °C olduğu durumda filamentin soğutucu içerisindeki en yüksek sıcaklığı 38 °C olmaktadır. T4 tasarımı ile sağlanan bu sıcaklık değeri PLA gibi düşük sıcaklıklarda eriyen filamentlerle yapılacak üretimlerde filamentin genel sıcaklık dağılımının oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

Nozul sıcaklığının 210 °C olduğu durumda filament sıcaklığı en fazla 39 °C'ye kadar çıkmaktadır. Elde edilen bulgulara göre daha önce simülasyonları yapılan T1, T2 ve T3 tasarımlarına göre en düşük filament sıcaklığı T4 tasarımı ile sağlanmıştır.



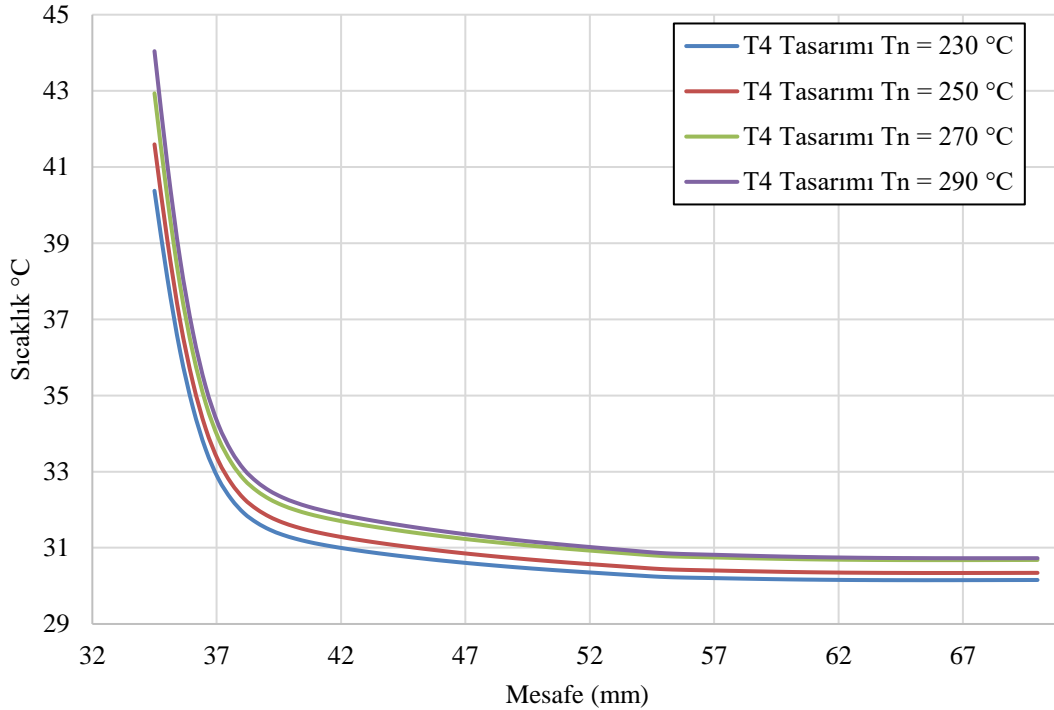
Şekil 4.73 T4 ve T3 tasarımlarının 230 °C nozul sıcaklığında filament sıcaklıklarının karşılaştırılması.

T4 tasarımının soğutma performansını T3 tasarımı ile karşılaştırılabilmesi için Şekil 4.73'te sunulan grafik incelenebilir. Şekil 4.73'te görüldüğü üzere T4 tasarımında önerilen soğutucu ile filamentin sıcaklığı yaklaşık olarak 10 °C kadar düşürülmüştür. T3 tasarımında soğutucunun giriş bölgesindeki (34 mm) sıcaklığı neredeyse 50 °C kadar olurken T4 tasarımında aynı noktadaki filamentin sıcaklığı 40 °C'ye kadar düşürülmüştür.

3B yazıcılarda PLA ve ABS gibi filamentler sık kullanılmaktadır. Bu filamentlerin erime sıcaklıkları markalarına göre değişmekle beraber 180 °C ile 230 °C arasında değişmektedir. Elde edilen bulgular T4 tasarımında kullanılan soğutucu ile 3B yazıcılarda sık kullanılan bu filamentler ile rahatlıkla üretim yapılabileceği tespit edilmiştir. Aynı zamanda önerilen tasarım ile filamentin soğutucu bölgesinde daha düşük sıcaklıklarda

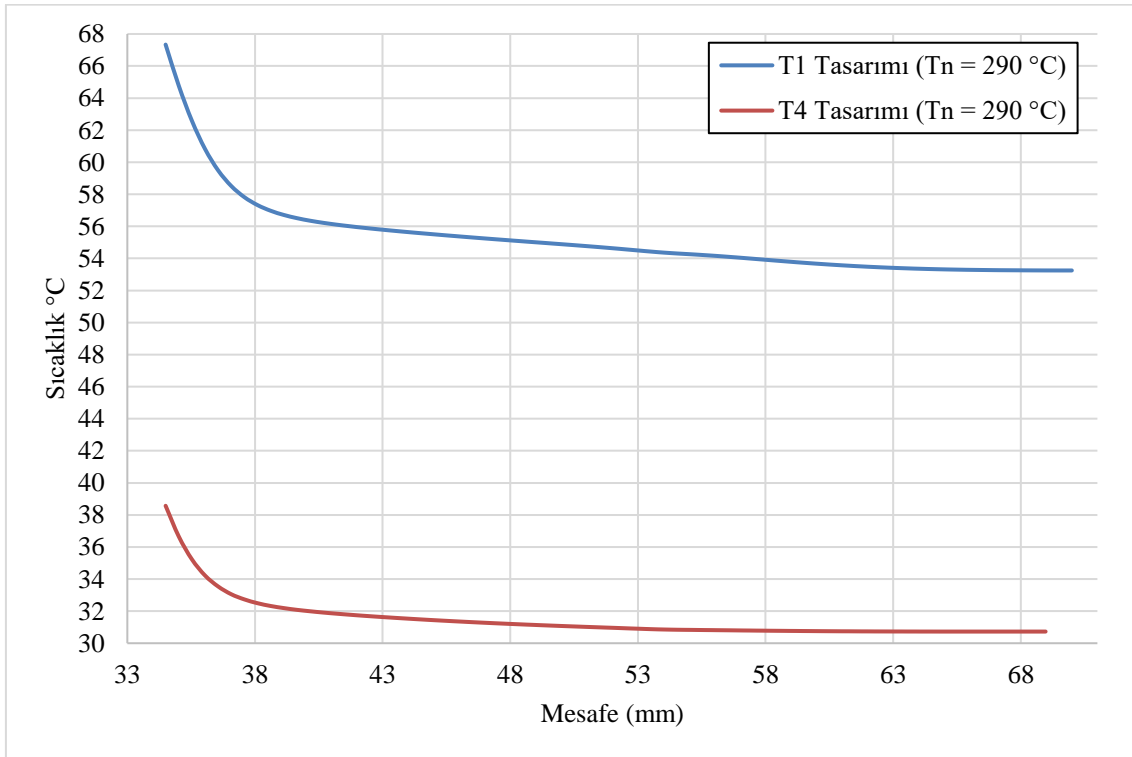
tutulması ile nozul tıkanması gibi sık yaşanan üretim sorunlarının da önüne geçilebilecektir.

Yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre T4 tasarımı ile mevcut ekstruderlara göre filamentin sıcaklık kontrolü daha iyi sağlanmaktadır. T4 tasarımında ısıtıcı blok mevcut ekstruderlara göre daha büyük boyuttadır. Böylece nozul bölgesinde hem daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilmesi hem de nozul'ın sıcaklık dalgalanmalarından daha az etkilenmesi sağlanmıştır. Soğutma modülünde ise optimize edilen soğutucu tasarımı ile ısıtma modülünde oluşan yüksek sıcaklıkların ekstruder'ın üst kısma iletimi azaltılmıştır. Elde edilen bulgular T4 tasarımının mevcut ekstruderların çalışma sıcaklıklarında daha iyi performansta çalışabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte T4 tasarımı ile mevcut ekstruderlarla üretim yapmanın daha zor olduğu yüksek sıcaklık filamentleri de kullanılabilir. Önerilen tasarımın daha yüksek sıcaklıklardaki performansının tespit edilebilmesi için nozul sıcaklıkları artırılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları tekrarlanmıştır. Yapılan simülasyonlarda nozul sıcaklığı sınır şartı (T_{nozzle}) 250 °C, 270 °C ve 290 °C'ye kadar çıkarılmıştır.



Şekil 4.74 T4 tasarımı için 1,5 m/s fan hızı için farklı nozul sıcaklıklarında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları.

Şekil 4.74'te fanın maksimum hızı olan 1,5 m/s için 230 °C, 250 °C, 270 °C ve 290 °C nozul sıcaklıklarında filamentin soğutucu içerisindeki sıcaklıkları görülmektedir. Nozul sıcaklığı 290 °C'ye ayarlandığında filamentin soğutucu girişindeki sıcaklığı 45 °C'nin altında kalmaktadır. Bu sıcaklık değeri birçok filamentin camsı geçiş sıcaklığından düşüktür. Elde edilen bulgulara göre T4 tasarımında önerilen ekstruder ile erime sıcaklığı 300 °C'ye kadar yüksek olan ve camsı geçiş sıcaklığı 50 °C'ye kadar düşük olan filamentler ile üretim yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.75 T1 ve T4 tasarımlarında 290 °C sınır şartı için soğutucu içerisindeki filament sıcaklıklarının karşılaştırması.

Şekil 4.75'te mevcut ekstruderlar (T1 Tasarımı) ile çalışma kapsamında önerilen (T4 Tasarımı) ekstruder tasarımının 1,5 m/s fan hızında 290 °C nozul sıcaklığında elde edilen simülasyon sonuçları görülmektedir. T1 tasarımında filamentin soğutucunun alt kısmındaki sıcaklık değerleri neredeyse 70 °C'ye kadar çıkarken, T2 tasarımında filamentin aynı noktadaki sıcaklık değeri 40 °C'nin altında kalmaktadır. Bu durum mevcut ekstruder ile 290 °C nozul sıcaklıklarında üretim yapılamayacağı anlamına gelmemektedir. Ancak çok yüksek ihtimalle bu sıcaklıklarda yapılan üretimlerde önemli ekstruzyon sorunları yaşanacaktır. Mevcut ekstruder ile 290 °C gibi yüksek sıcaklıklarda

yapılacak üretimlerde Bölüm 4.1’de tespit edilen sorunlarla karşılaşılması muhtemeldir. Filament sıcaklığının soğutma modülündeki sıcaklığının yüksek olması nozul tıkanması, üretimin yarıda kesilmesi ve tutarsız ekstrüzyon sorunlarıyla karşılaşılmasına neden olabilir. Önerilen yeni ekstruder tasarımında ise hem ısıtma modülü hem de soğutma modülü optimize edilmiştir. Böylece önerilen ekstruder yüksek sıcaklıklarda daha kararlı çalışabilecektir.

4.6 Soğutucu Fanlarla Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tez çalışmasının bu kısmında farklı boyutlardaki fanların ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımını deneysel olarak ortaya koymak amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanı sıra yapılan deneysel çalışmalarda daha önceki bölümlerde bulguları sunulan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz sonuçları doğrulanmıştır.

Çalışmada mevcut yazıcılarda en sık kullanılan ve tez çalışmasında T1 tasarımı olarak bahsedilen ekstruder üzerine altı adet sıcaklık sensörü yerleştirilmiş ve sıcaklık verileri bir data logger ile kaydedilmiştir. Otuz dakikalık bir üretim süreci göz önüne alınmıştır. Üretim sürecinin başladığı andan itibaren ekstruder’ın oda sıcaklığına kadar düştüğü ana kadar sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Ekstruder üzerinde iki farklı boyutta fan kullanılarak ayrı ayrı deneyler tekrarlanmıştır. Böylece fan boyutlarına göre ekstruder üzerindeki farklı bölgelerin sıcaklıkları tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde kullanılan parametreler Çizelge 4.11’de görülmektedir.

Çizelge 4.11 Fan ile ilgili deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler.

Süre	Isıtıcı	Fan	Durum
0. Dakika	Kapalı	Kapalı	-
1. Dakika	Açık- 230 °C	Kapalı	-
8. Dakika	Açık- 230 °C	Açık	0,01 A 8 V
12. Dakika	Açık- 230 °C	Açık	0,03 A 16 V
15. Dakika	Açık- 230 °C	Açık	0,04 A 20 V
18. Dakika	Açık- 230 °C	Açık	0,05 A 24 V
21. Dakika	Kapalı	Açık	0,05 A 24 V
32. Dakika	Kapalı	Kapalı	-

Yapılan çalışmada yazıcının toplamda 32 dakika çalıştığı bir üretim süreci göz önüne alınmıştır. Yazıcının üretime başlamadan önce ısınma süreci, üretim süreci ve üretim tamamlandıktan sonra yazıcının tekrar üretime hazır hale gelmesi için soğuması esnasında ekstruder'dan sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. 3B yazıcılar ile üretime başlamadan önce ekstruder'ın çalışma sıcaklığına ulaşması beklenir. Çalışma sıcaklığı kullanılan filamentin özelliklerine göre belirlenir. Filament üreticileri kendi filamentleri için optimum üretim sıcaklığını kullanıcılarına sunarlar. PLA filamentler için üretim sıcaklığı genellikle 200 – 230 °C aralığındadır. ABS filamentler için bu aralık biraz daha yüksektir.

Yapılan deneysel çalışmalarda üretim sıcaklığı 230 °C olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla başlangıçta oda sıcaklığında bulunan ekstruder öncelikle 230 °C sıcaklığa kadar yükseltilecek üretim bu sıcaklığa ulaştıktan sonra başlayacaktır. Daha sonra üretim gerçekleştirilecek ve ekstruder tekrar oda sıcaklığına kadar soğuyacaktır. Deneyler 32 dakikalık bir üretim için planlanmıştır. Deneylere 22 °C oda sıcaklığında başlanmıştır. İlk 8 dakikada fanlar çalıştırılmamıştır. Başlangıçta ekstruder sıcaklığı 230 °C olarak ayarlanmıştır. 8. Dakikada fan en düşük hızı verecek şekilde 8 Volt'da çalıştırılmıştır. Sırasıyla 12, 15 ve 18. Dakikalarda fan hızı 16, 20 ve 24 Volt olarak ayarlanarak artırılmıştır. 21. Dakikada ise ekstruder ısıtıcısı kapatılmış ve fan maksimum güçte açık halde bırakılmıştır. Bu şartlar altında ekstruder sıcaklığı tekrar oda sıcaklığına düşene kadar deney devam ettirilmiştir. Çalışmada kullanılan data logger'ın teknik özellikleri Çizelge 4.12'de verilmiştir.

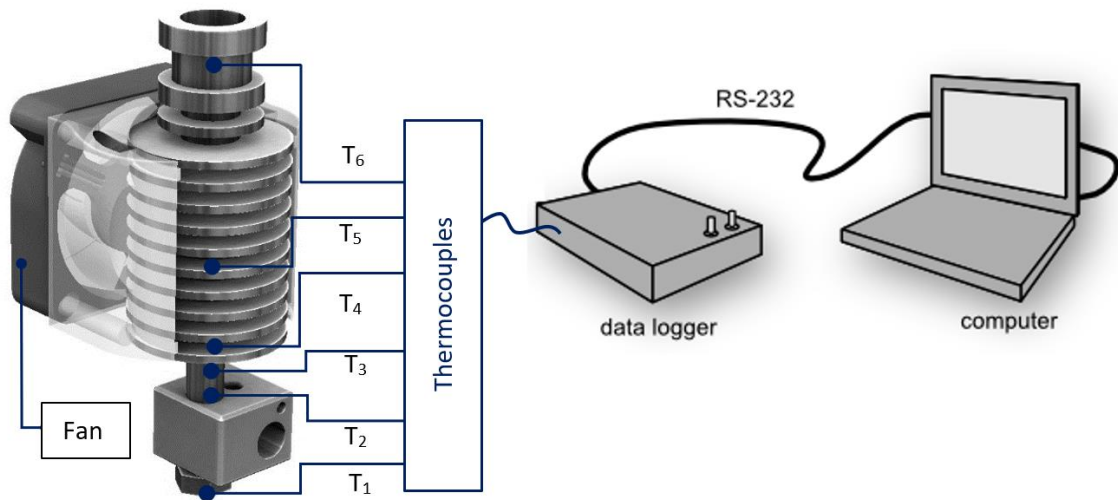
Çizelge 4.12 Deneysel çalışmalarda kullanılan data logger'ın özellikleri.

Özellik	Değer
Farklı giriş kanallarının sayısı	80
Ohms çözünürlük	100 $\mu\Omega$
Tarama Oranı (bellek)	180/s
Tarama Oranı (veriyolu)	145/s
K Tipi Sıcaklık sensörü (-200 ~ +1372°C)	0.001 °C

4.6.2 Deneş Düzeneği ve Sıcaklık Sensörü Konumları

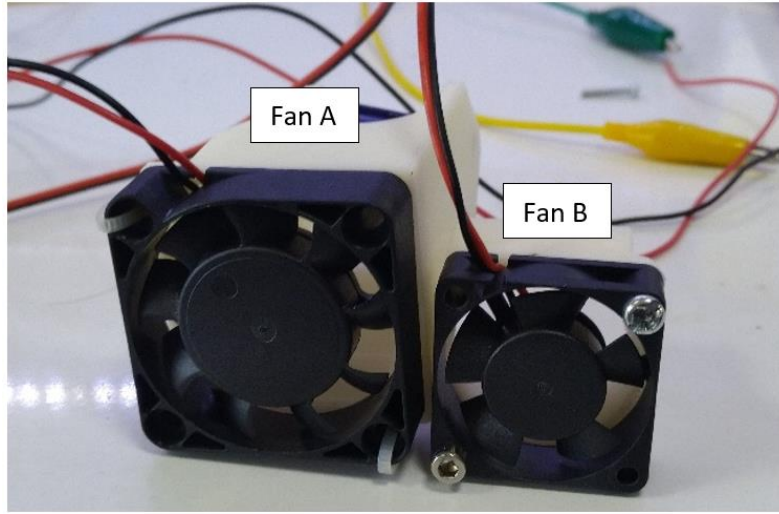
Deneşsel çalışmada açık kaynak 3B yazıcıya ait bir ekstruder kullanılmıştır. Deneş düzeneği Şekil 4.76'da görülmektedir. Ekstruder üzerinde altı farklı noktaya sıcaklık sensörleri yerleştirilerek sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık sensörlerinden alınan veriler datalogger yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Datalogger seçilmiş verileri belirli bir süre boyunca, belirli aralıkla kaydeden cihazlardır. Data logger'dan alınan sıcaklık verileri eşzamanlı olarak RS – 232 bağlantısıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Ekstruder üzerine altı adet K tipi sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir ve her birinden eş zamanlı olarak sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık sensörü pozisyonları Şekil 4.76'da görülmektedir. T1 nozul'ın çıkış kısmına yerleştirilmiştir. Filament ekstruder'dan ayrıldığı son bölgedeki sıcaklık lmleri T1 ile adlandırılan sıcaklık sensörü yardımıyla ölçülmüştür. T2 isimli sıcaklık sensörü ise ısıtma modülü ve soğutma modülü arasındaki bölgeden ölçüm almaktadır. Bu iki bölge arasında ısı geçişinin en az olması gereken bölgedir. T3, T4 ve T5 sıcaklık sensörleri soğutucu üzerine yerleştirilmiştir. Bu sıcaklık sensörlerinin yerleştirildiği bölge fanın etkisiyle doğrudan zorlanmış ısı transferine maruz kalan bölgedir. T6 ise ekstruder'ın en üst kısmına yani sıcaklığın en az olması gereken bölgeye yerleştirilmiştir.



Şekil 4.76 Deneşler sırasında kullanılan sıcaklık sensörlerinin konumları.

Çalışmada iki farklı fan kullanılmıştır. Kullanılan fanlar Resim 4.11’de görülmektedir. Fanların ekstruder’a yerleştirilebilmesi için gerekli parçalar yine 3B yazıcı ile üretilmiştir. Soğutucu üzerine iki farklı fan yerleştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Fanlar ayrı bir güç kaynağı kullanılarak 3B yazıcı kontrol kartından bağımsız olarak beslenmiştir. Böylece fanların istenen çalışma hızlarında kullanılabilmesi sağlanmıştır. Fanların boyutları farklıdır. Dolayısıyla ekstruder üzerindeki soğutma karakteristikleri de farklı olacaktır. Her iki fan aynı ekstruder üzerinde aynı çalışma şartları altında test edilmiştir.



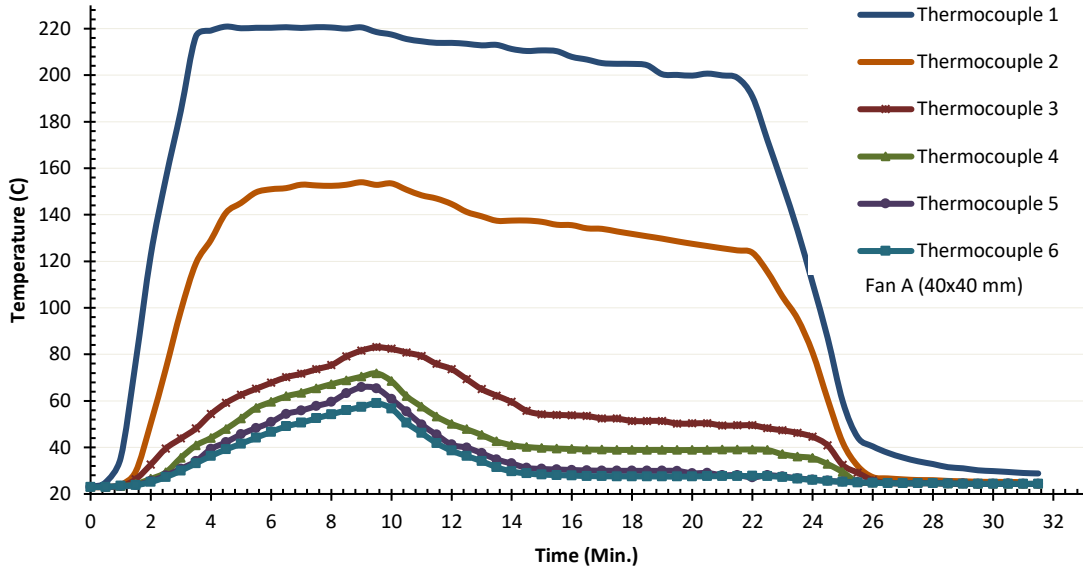
Resim 4.11 Deneylerde kullanılan 40 ve 30 mm boyutundaki fanlar.

Fan A 40 x 40 mm şase boyutlarına sahiptir. Fan B ise 30 x 30 mm boyutlarındadır. Fan A 25 gr. ağırlığında iken Fan B 8 gr. ağırlığındadır. 40 mm boyutuna olan fan (Fan A) tez çalışmasının 4.5 Bölümünde “Soğutma modülü üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları” başlığında detayları verilen simülasyonlarda kullanılan fan ile aynıdır. Her iki fan da 10 mm kalınlıktadır. Fanların boyutlarının farklı olması zorlanmış taşınımınla gerçekleşen ısı transfer mekanizmasını etkileyecektir. Dolayısıyla ekstruder’ın soğutulma sürecini doğrudan etkileyecektir.

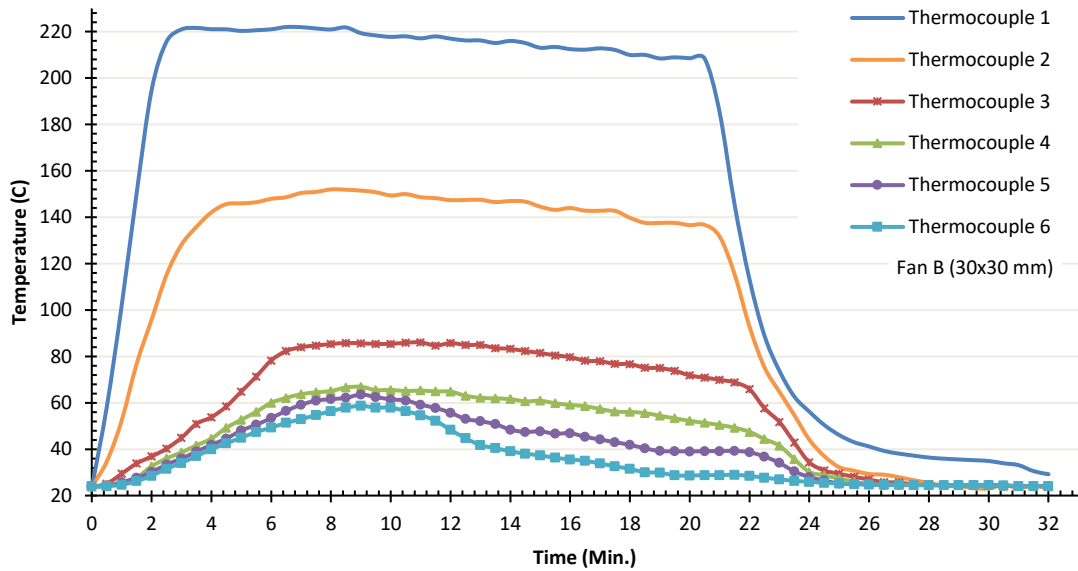
4.6.3 Soğutucu Fan Deneyle Bulguları

Çalışmada yapılan deneylerin başlangıç sıcaklığı oda sıcaklığında (22 °C) başlanmıştır. İlk 8 dakikada fanlar çalıştırılmamıştır. Başlangıçta ekstruder sıcaklığı 220 C olarak ayarlanmıştır. 8. Dakikada fan en düşük hızı verecek şekilde 8 Volt’da çalıştırılmıştır.

Sırasıyla 12, 15 ve 18. Dakikalarda fan hızı 16, 20 ve 24 Volt olarak ayarlanarak artırılmıştır. 21. Dakikada ise ekstruder ısıtıcısı kapatılmış ve fan maksimum güçte açık halde bırakılmıştır. Bu şartlar altında ekstruder sıcaklığı tekrar oda sıcaklığına düşene kadar deney devam ettirilmiştir. Fan A için deneylerden elde edilen sıcaklık değişim grafiği Şekil 4.77’de, Fan B için elde edilen sıcaklık değişim grafiği ise Şekil 4.78’de görülmektedir.



Şekil 4.77 40 mm fan ile yapılan deneylerde elde edilen sıcaklık değerleri.



Şekil 4.78 30 mm fan ile yapılan deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri.

Deneylelerden elde edilen bulgulara göre; PLA filament için ergime sıcaklığı olan 220 °C'ye yaklaşık 3 dakika içinde ulaşılmaktadır. 220 °C'lik sıcaklık ısıtma modülü bölgesinde oluşmaktadır (Sıcaklık sensörü 1). Isıtma modülü ve soğutma modülü arasında kalan geçiş bölgesi sıcaklığının 150 – 155 °C'ye kadar çıktığı ölçülmüştür (Sıcaklık sensörü 2). Soğutucu üzerindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde; ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklıklar gittikçe düşmektedir. Soğutucuya yakın olan Sıcaklık sensörü 3'ün yerleştirildiği konumda sıcaklığın 90 °C kadar ulaştığı görülmüştür. Soğutucunun üzerinde fanların etkin olduğu bölgelerde (T4, T5 ve T6 Sıcaklık sensörleri) ölçülen sıcaklık değerleri, 4.5.3 Bölümünde “T1 Tasarımının analizlerinden elde edilen bulgular” başlığında sunulan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarının sonuçlarıyla yakındır. Elde edilen bulgular simülasyonlarda elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla örtüştüğünü göstermektedir.

Her iki fan ile yapılan deneylerin 21. Dakikasında ısıtıcı rezistanslar kapatılmış ve fanlar en yüksek performansında (1,5 m/s) çalıştırılmaya devam edilmiştir. Bu aşamada büyük fan ile yapılan deneylerde bütün sensörlerde 5 dakikadan daha kısa bir sürede 40 °C'nin altında sıcaklıklar elde edilmiştir. Küçük fan ile yapılan deneylerde ise bu süre 6 dakikanın üzerindedir.

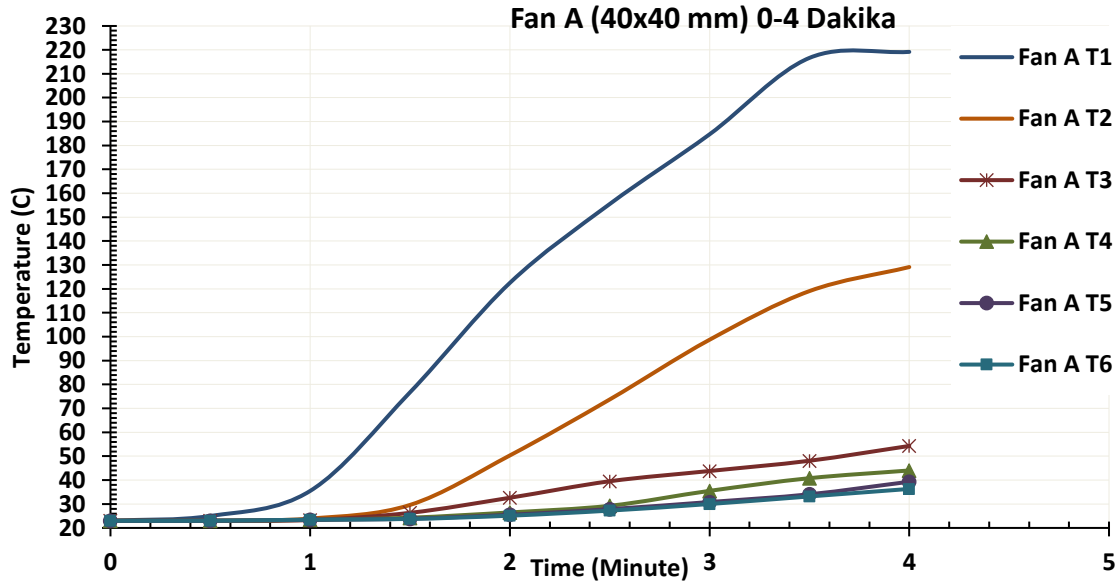
Şekil 4.77 ve Şekil 4.78'de sunulan grafiklerin X eksenleri deney süresini göstermektedir. Deneyler yaklaşık olarak 32 dakikada tamamlanmıştır. Y eksenlerinde ise sıcaklık değerleri görülmektedir. Elde edilen sonuçlar iki ana başlık olarak değerlendirilebilir. Bunlardan biri genel olarak ekstruder üzerindeki sıcaklık dağılımı üzerinedir. Her iki fan ile yapılan deneylerde de bu sonuçlar ortak trendlere sahiptir.

Farklı fan deneylerinden elde edilen bulgulara göre; A ve B fanlarının kullanıldığı durumların her ikisinde de 8. dakikada fan en düşük voltajda çalıştırılmaya başlanmıştır. Bu andan itibaren her iki durumda da Sıcaklık sensörü 1'den ölçülen sıcaklıklar azalmaya başlamıştır. Deneyin 8-12 dakikaları arasında T1 ölçümüne göre 40 mm fan ile yapılan deneylerde nozul sıcaklığı 230 °C olarak belirlenmesine rağmen nozul sıcaklığının ancak 220 °C'ye kadar ısıtılabilirdiği tespit edilmiştir. 30 mm fan ile yapılan deneylerde ise T1 ölçümünde ise sıcaklıklar sadece 5 °C civarında bir düşüş olduğunu göstermektedir. 8.

Dakikadan sonra her iki fan için de Sıcaklık sensörü 2'den ölçülen sıcaklıklar azalmaya başlamıştır ancak 40 mm fan ile yapılan testlerde Sıcaklık sensörü 2'nin bulunduğu pozisyondaki sıcaklık düşüşü küçük fanınkindene göre daha fazladır.

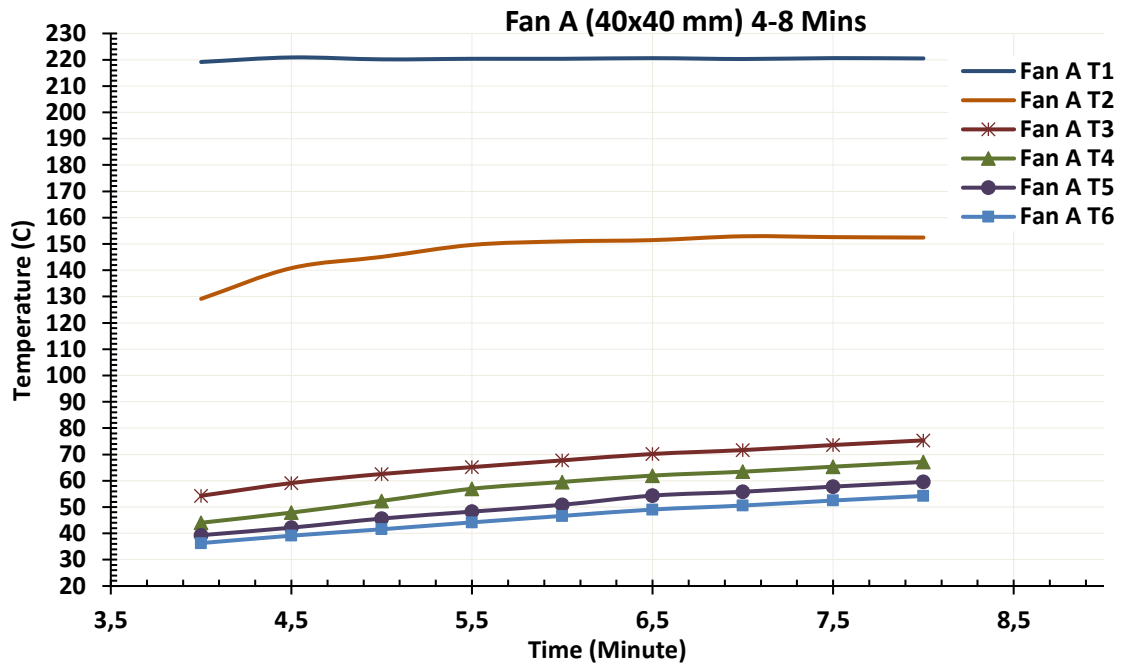
Deneilerin 8-12 dakikaları arasında 40 mm fan için sıcaklık düşüşü 155 °C'den 145 °C'ye kadar düşmüştür. 30 mm fan ile yapılan deneylerde ise 8 – 12 dakikalar için T2 sıcaklık değerleri 150 °C'den 147 °C'ye kadar düşmüştür. Deneilerin 12, 15 ve 18. dakikalarında fanların voltajlar değerleri (sırasıyla; 16V, 20V, 24V) arttırılmıştır, dolayısıyla her müdahalede fanların devir sayısı (RPM) arttırılmıştır. Bu durumda her iki deneyde ve bütün Sıcaklık sensörlerinde ölçülen sıcaklık değerlerinde azalma görülmüştür. Büyük fan ile yapılan deneylerde genel olarak T1 ve T2 değerlerindeki düşüş küçük fan üzerinde aynı bölgeden alınan değerlerden daha fazla olmuştur. Fan boyutu T3, T4, T5 ve T6 bölgelerindeki sıcaklıkların da düşmesine neden olmakla beraber sıcaklık düşüşleri her iki deney içinde benzer trendi izlemiştir.

Elde edilen bulgulara göre 30 mm boyutundaki fan (Fan B) ile yapılan üretimlerde soğutma modülünde yeterli soğutma performansının sağlanamadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla T1 adıyla anılan ekstruder tasarımında 40 mm (Fan A) boyutundaki fanın kullanılması daha uygundur.



Şekil 4.79 40 mm fan için nozulun ısınma süresince farklı noktalardan ölçülen sıcaklık değerleri.

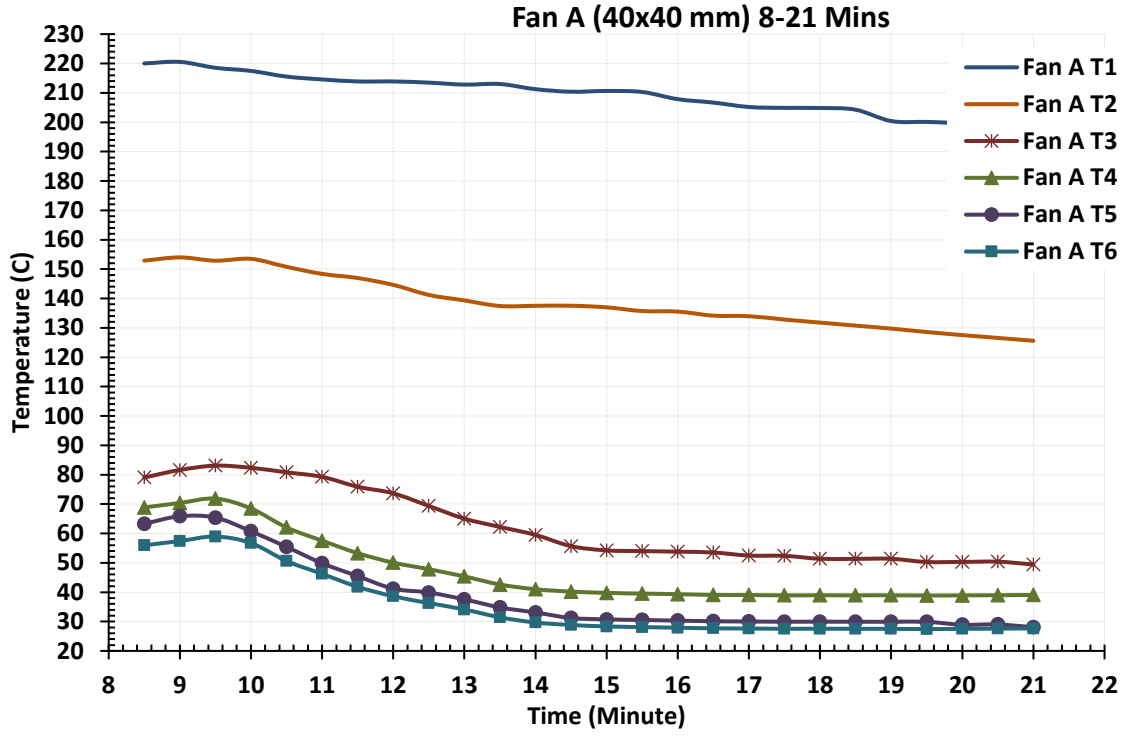
Şekil 4.79’da ekstruder’ın ısınma süresince altı farklı sıcaklık sensöründen elde edilen sıcaklık değerleri görülmektedir. Ekstruder’ın ısıtma modülünün 230 °C olarak belirlenen çalışma sıcaklığına ulaşması yaklaşık 3 dakika kadar sürmektedir. Bu esnada ısıtma modülü filamentin erime sıcaklığına ulaştırıldığında ekstruder’ın diğer bölgelerinde sıcaklık değerleri filamentin camsı geçiş sıcaklığına ulaşmamaktadır. Ancak üretim devam ettikçe diğer bölgeler de ısınmaktadır. Bu durum Şekil 4.80’de sunulan grafikte daha net görülebilmektedir.



Şekil 4.80 Deneylerin 4 – 8 dakikalıkları arasında elde edilen sıcaklık değerleri.

Şekil 4.80’de görüldüğü üzere 230 °C çalışma sıcaklığında üretim başladıktan yaklaşık beş dakika sonra soğutucu bölgesindeki sıcaklık değerleri filamentin camsı geçiş sıcaklığına yaklaşmaktadır. Deneylerden elde edilen bulgular tez çalışmasının daha önce ayrıntılarıyla sunulan analizlerle benzer sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

Şekil 4.81’de deneylerin 8 ve 21 dakikalıkları arasında elde edilen sıcaklık grafiği görülmektedir. Deneylerde soğutma modülü üzerinde bulunan fanın hızı sekizinci dakikadan itibaren artırılmaktadır. Fan hızı artırıldığında buna paralel olarak bütün sensörlerden elde edilen sıcaklıklarda düşüş olduğu gözlemlenmektedir. Ancak yine de T1 tasarımına sahip ekstruder’da fan maksimum hızda çalıştırılırsa bile bazı bölgelerde filament sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığının üstünde olma riski bulunmaktadır.

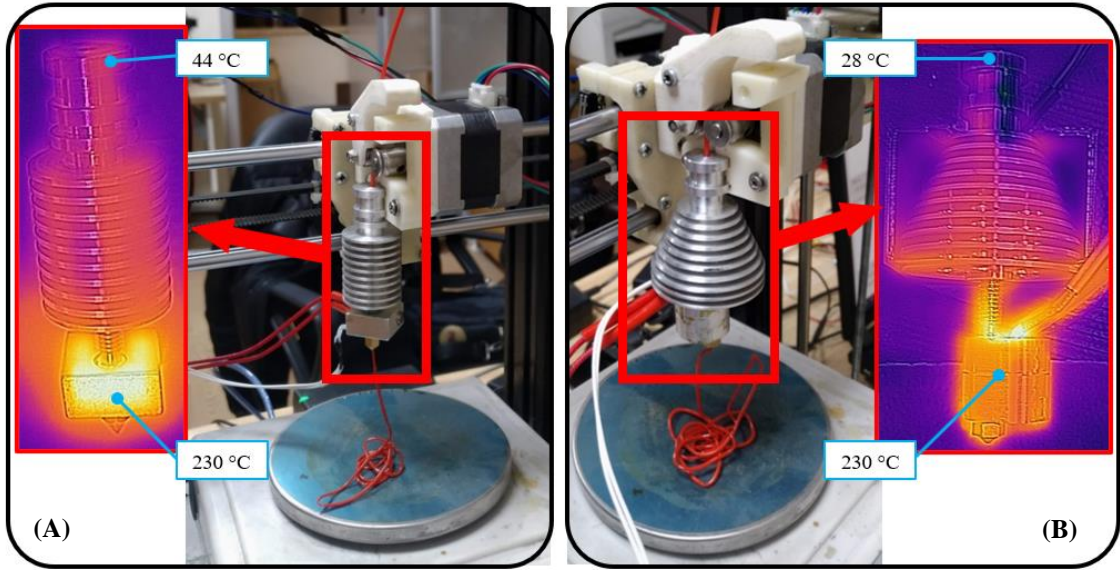


Şekil 4.81 Deneylein 8 – 21 dakikalari arasında elde edilen sıcaklık değeri.

Deneylein 21. Dakikasinda ısıtma modülü üzerinde bulunan rezistans kapatılmıştır. Ancak fanlar çalıştırılmaya devam edilmiştir. Bu şartlar altında ekstruder sıcaklığı yaklaşık 10 dakika içinde tamamen oda sıcaklığına kadar düşmüştür. Bu aşamadan sonra ekstruder ikinci bir üretim için hazır hale gelmiştir.

4.7 Ekstruder Karakterizasyonu ve Performans Karşılaştırmaları

Tez çalışmasının bu kısmında geleneksel bir ekstruder ile çalışma kapsamında üretilen ekstruder'ın karşılaştırmaları ve deneysel verilerine yer verilmiştir. Yapılan çalışmada ekstruder performanslarının karşılaştırılabilmesi için aynı üç boyutlu yazıcı üzerinde sadece ekstruderlar değiştirilerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bütün deneylelerde aynı filament besleyici kullanılmıştır. Ekstruderların sıcaklık dağılımları termal kamera ile görüntülenmiştir. Termal görüntüler FLIR Lepton® termal kamerayla elde edilmiştir. Kullanılan termal kamera -20 °C ve 400 °C aralığında ± 4 °C hassasiyet ile görüntüler kaydedebilmektedir. Ekstruderların termal kamera görüntüleri ve deney düzeneği Resim 4.12'de görülmektedir. Termal kamera görüntüleri; 230 °C giriş sıcaklığında elde edilmiştir.



Resim 4.12 Geleneksel bir ekstruder (a) ve yeni tasarlanan ekstruder'a (b) ait termal kamera görüntüleri.

Resim 4.12'de verilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde klasik ekstruder tasarımında soğutucunun üst bölgesindeki sıcaklık 44 °C'ye kadar çıkabilmektedir (Resim 4.12 A). Çalışma kapsamında geliştirilen ekstruder'da ise aynı bölgedeki sıcaklık 28 °C olmaktadır (Resim 4.12 B). Termal görüntülerden elde edilen bulgular çalışmanın daha önceki bölümlerinde verilen sonlu elemanlar simülasyonlarından elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir.

Ekstruder'in performansı birim zamanda eritebildiği filament miktarı ile ilgilidir. Her iki ekstruder'ın birim zamanda erittiği filamentin tespit edilebilmesi için yapılan deneylerde aynı filament besleyici kullanılmıştır. Üretim sırasında ekstruder üretilecek parçanın katmanlarına göre sürekli hareket halindedir. Bu durum eritilen filament miktarının tespitini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle deneylerde ekstruder aynı konumda sabit tutulmuştur. Üretim sırasında ekstruder yazıcının z ekseninde baskı tablasından yüksek bir konumda sabit durumdayken, filament besleyiciye belirli miktarlarda filament sürmesi sağlanmıştır.

Ekstruder'in performansı filamentin akış hızı (Q_F) ve filament kuvveti (F_F) ile tanımlanabilir. Filamentin akış hızı (Q_F) filament besleyicinin filament sürme hızı ile ilgilidir ve aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$Q_F = V_F A \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'da Q_F filamentin nozuldan çıktığı andaki hacimsel akış hızını (mm^3/s), V_F (mm/s) filamentin filament besleyici tarafından sürülen hızını ifade eder. A (mm^2) filamentin kesit alanını ifade etmektedir. 3B FFF yazıcılarda 1,75 mm ve 3 mm çapında filamentler kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan filamentin çapı 1,75 mm'dir.

Deneysel çalışmalarda filamentin akış hızı (Q_F) belirlenirken (Denklem 4.6), filament besleyicinin belirli bir hızda ve miktarda filament sürebilmesi için G kodlarından faydalanılmıştır. Filament hızı (V_F) G1 E50 F60 koduyla tanımlanabilir (Denklem 4.6). Filament besleyiciye gönderilen bu kod besleyici step motorunun filamentini 50 milimetre hareket ettirmesini (E50) ve filamentin 60 mm/dakika hızda (F60) ilerletilmesini sağlar. Dolayısıyla bu kod sayesinde filament hızı 1 mm/s olacaktır. Aynı kod üzerinde F60 değeri yerine F120 kullanıldığında ise filament hızı 2 mm/s olacaktır. Filament hızı iki katına çıkarıldığında ekstruder'ın aynı süre içerisinde iki kat daha filamenti eritebilmesi gerekir. Dolayısıyla ekstruder'ın sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için birim zamanda daha çok filament eritebilmesi gerekir. Bunun için ısıtma modülünün filamentini eritebilecek kadar ısıyı istenen sürede filamentte aktarabilmesi gerekir. Filament hızı artırıldığında buna paralel olarak ısıtma modülünün sıcaklığının yüksek tutulması bir çözüm olarak görülebilir. Ancak çalışmanın önceki bölümlerinde ortaya koyulduğu üzere; ısıtma modülünün sıcaklığının artırılması soğutma modülünün de sıcaklığının artmasına sebep olur. Soğutma modülünde sıcaklığın yüksek olması filamentin sürülmesi ve nozul tıkanması ile ilgili sorunları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu noktada ekstruder'ın ısıtma modülü ve soğutma modülü arasında bir denge sağlanmalıdır. Yapılan deneylerde her iki ekstruder tasarımı için farklı filament hızlarında ekstruderların filamentini eritme performansları incelenmiştir. İlk aşamada filament hızı 1 mm/s olarak belirlenmiştir. Ekstruder'ın bu hızda filamentini eritip eritemediği kontrol edilmiştir. Filament hızları her seferinde 1 mm/s artırılarak deneyler devam ettirilmiştir.

Filamentin farklı hızlarda sürülmesi sırasında nozul içerisindeki basınç değerleri değişiklik göstermektedir. Daha önceki bölümlerde ortaya koyulduğu üzere giriş hızı ile

$$F_F = F_{GF} - F_R - F_{BP} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7’de F_{GF} dişlinin filament ile teması esnasında oluşan kuvveti, F_R rulman ve filament arasında oluşan sürtünme kuvvetini, F_{BP} ise nozul içerisinde oluşan basınçtan kaynaklanan tepki basınç kuvvetini ifade eder. Burada F_{GF} ve F_R kuvvetleri birbirleriyle zıt yöndedir ve bu iki kuvvetin sonucunda filament nozula doğru sürülür. Filamentin sürülebilmesi için bu iki kuvvetin toplamı F_{BP} kuvvetinden büyük olmalıdır. F_{GF} kuvveti motorun torkuyla ilgilidir ve denklem 4.8 ile hesaplanabilir;

$$F_{GF} = \tau_{extr} r_{dişli} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8’de T_{extr} step motorun ürettiği torku, $r_{dişli}$ ise filamentle temas eden dişlinin yarı çapını ifade eder. Filament ile rulman arasında oluşan F_R kuvveti ise denklem 4.9 ile hesaplanabilir;

$$F_R = \mu_R N_R \quad (4.9)$$

Denklem 4.9’da μ_R filament ve rulman arasındaki sürtünme katsayısını, N_R ise rulmanın filamentte dik yönde uyguladığı kuvveti ifade eder. Filament besleyicide kullanılan step motorların sahip olduğu tork sistemin hızını ve ekstruder’in performansını etkilemektedir (Denklem 4.8). Step motorların üretebildiği tork (τ_{extr}) en basit haliyle akım ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Akım artırıldığında motorun torku da artmaktadır. Akım ile tork değerlerini eşleştirebilmek için denklem 4.10 kullanılır;

$$\tau_{extr} = \text{Tor}k_A \left(\frac{I_C}{I_A} \right) \quad (4.10)$$

Denklem 4.10’da $\text{Tor}k_A$ step motorun anma torkunu ifade eder. I_A ise step motorun anma akımını ifade eder. Step motorun anma torku ve anma akımı değerleri üreticisinden temin edilen teknik dokümanlarından tespit edilir. I_C ise belirlenen çalışma akımını ifade eder. Dolayısıyla bu denklem basit haliyle step motora verilen farklı akım değerlerinde üreteceği tahmini torku yaklaşık olarak verecektir. Üç boyutlu yazıcıların birçoğunda

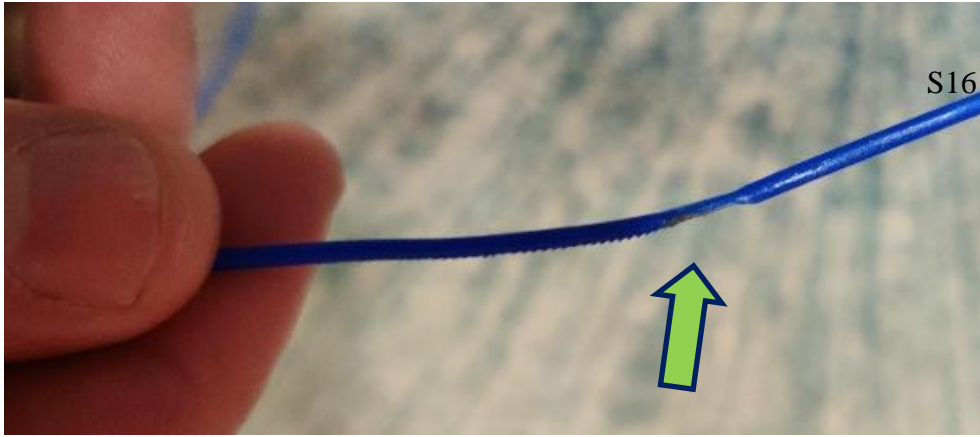
filament besleyicilerde kullanılan step motorların çalışma akımı değerleri (I_C) Firmware yazılımları aracılığıyla kontrol edilebilmektedir. Yapılan deneylerde filament besleyicinin step motoru için farklı akım değerleri değişken olarak belirlenmiştir. Böylece farklı tork değerlerinde sistemin performansı deneysel olarak ortaya koyulmuştur.

Yapılan çalışmada filament hızı (V_F) ve ekstruder çalışma akımı (I_C) değişken olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak filament kuvveti F_F ve filament akış hızı Q_F deneysel olarak ortaya koyulmuştur. Deneylerde filament hızı (V_F) G1 E50 F60 koduyla tanımlanmıştır (Denklem 4.6). Filament besleyiciye gönderilen bu kod besleyici step motorunun filamentini 50 milimetre hareket ettirmesini (E50) ve filamentin 60 mm/dakika hızda (F60) ilerletilmesini sağlar. Dolayısıyla bu kod sayesinde filament hızı 1 mm/s olacaktır. Filament hızı her seferinde 1 mm/s artırılarak deneyler tekrarlanmıştır (Çizelge 4.13). Filament besleyicinin step motorunun çalışma akımı değerleri (I_C) değişken olarak tanımlanmıştır (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13 Ekstruder performans değerlendirme deney parametreleri.

G Kodu	G1 E50 F60	G1 E50 F120	G1 E50 F180	G1 E50 F240	G1 E50 F300	G1 E50 F360	G1 E50 F420	Başarılı Hız	Akış Hızı (mm ³ /s)	Motor Torku (Newton)
	Filament Hızı (V_F) (mm/s)									
Motor Akımı (I_C)	1	2	3	4	5	6	7			
0,110	0	0						0,0	0,0	0
0,221		1	0					2,0	4,8	22
0,331			1	0				3,0	7,2	33
0,442			1	0				3,0	7,2	44
0,552				1	0			4,0	9,6	56
0,663				1	0			4,0	9,6	67
0,773				1	0	0		4,0	9,6	78
0,884					1	0		5,0	12,0	89
0,994					1	0		5,0	12,0	100

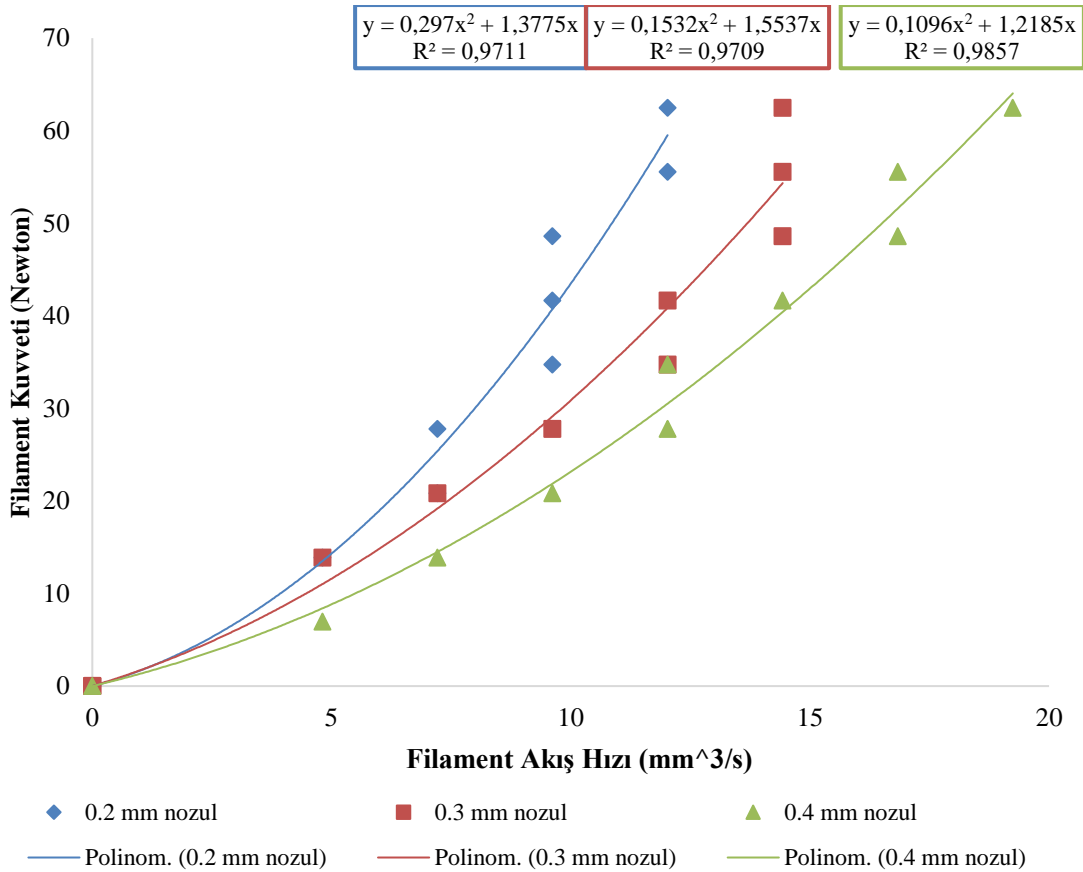
Çizelge 4.13 deneyler sırasında kullanılan parametreleri ve elde edilen sonuçları örnek olarak göstermektedir. Çizelgede üst satır kullanılan G Kodlarını göstermektedir. Yazıcıya ilgili G Kodu gönderildiğinde elde edilen filament hızları bir alt satırda listelenmiştir. Çizelgenin sol sütununda 3B yazıcıya her bir deney sırasında tanımlanan motor akımları (A) görülmektedir. Çizelgede sıfır değeri alan kırmızı hücreler bu deneyde filament besleyicinin filamentini yeteri kadar süremediği ve ekstrüzyonun gerçekleşmediği anlamına gelmektedir. Örneğin filament besleyicinin step motor çalışma akımı 0,110 A olduğunda ve filament hızı 1 mm/s olduğunda filament sürülememiştir ve ekstrüzyon gerçekleşmemiştir. Motor çalışma akımı 0,331 A olarak belirlendiğinde filament hızı 1 mm/s olarak belirlendiğinde ekstrüzyon sorunsuz olarak gerçekleşmiştir. Aynı akım değerinde filament hızı 2 mm/s'ye çıkarıldığında yine ekstrüzyon işlemi başarıyla gerçekleşmiştir. Ancak filament hızı 3 mm/s'ye çıkarıldığında filament besleyici filamentini sürmekte zorlanmıştır.



Resim 4.14 Filament besleyicinin filamentini aşındırması.

Besleyicinin filamentini süremediği durumlar çizelge 4.13'te kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Örneğin motor torkunun ayarlanabildiği maksimum çalışma akımı olan 0,994 A için filament besleyicinin filamentini sürebildiği en yüksek hız 5 mm/s olmuştur. Aynı akım değerinde hız 6 mm/s'ye çıkarıldığında filament sürülememiştir. 6 mm/s filament hızında nozulda oluşan basınç (F_{BP}), filament besleyicinin ürettiği net basınçtan ($F_{GF} - F_R$) daha yüksek olmaktadır. Bu durumda filament besleyici oluşan yüksek basınçtan dolayı filamentini başarılı olarak sürememekte ve aşındırmaktadır (Resim 4.14).

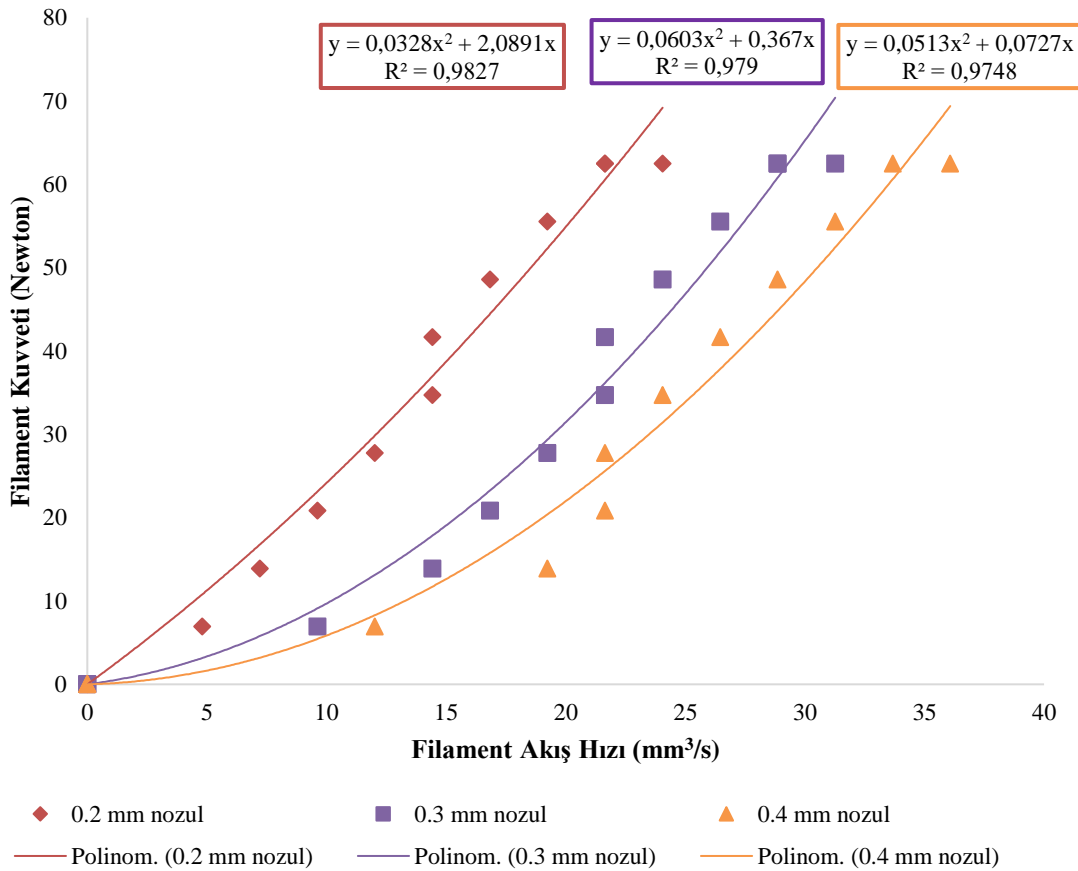
Ekstrüzyonun başarıyla gerçekleştiği deneyler Çizelge 4.13'te yeşil renk ile görülmektedir. Filament hızının en yüksek olduğu ve ekstrüzyonun başarılı olduğu hız değerleri çizelgedeki ilgili hücrede "1" değeri ile ifade edilmiştir. Çizelgedeki hücrelerde "0" değerleri ekstrüzyonun başarısız olduğu durumları göstermektedir. Deneyler sırasında ekstruder'in ekstrüzyonu başarıyla gerçekleştirebildiği maksimum filament hızları başarılı hız sütununda listelenmiştir. İlgili filament hızında elde edilen akış hızları belirlenmiştir. Aynı deneyler çalışmada kullanılan her bir ekstruder için aynı şartlar altında tekrarlanmıştır. Böylece farklı ekstruderlerin ekstrüzyon performansları ortaya koyulmuştur ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.82 T1 tasarımına sahip ekstruder'in farklı çaplardaki nozullar için akış performansı.

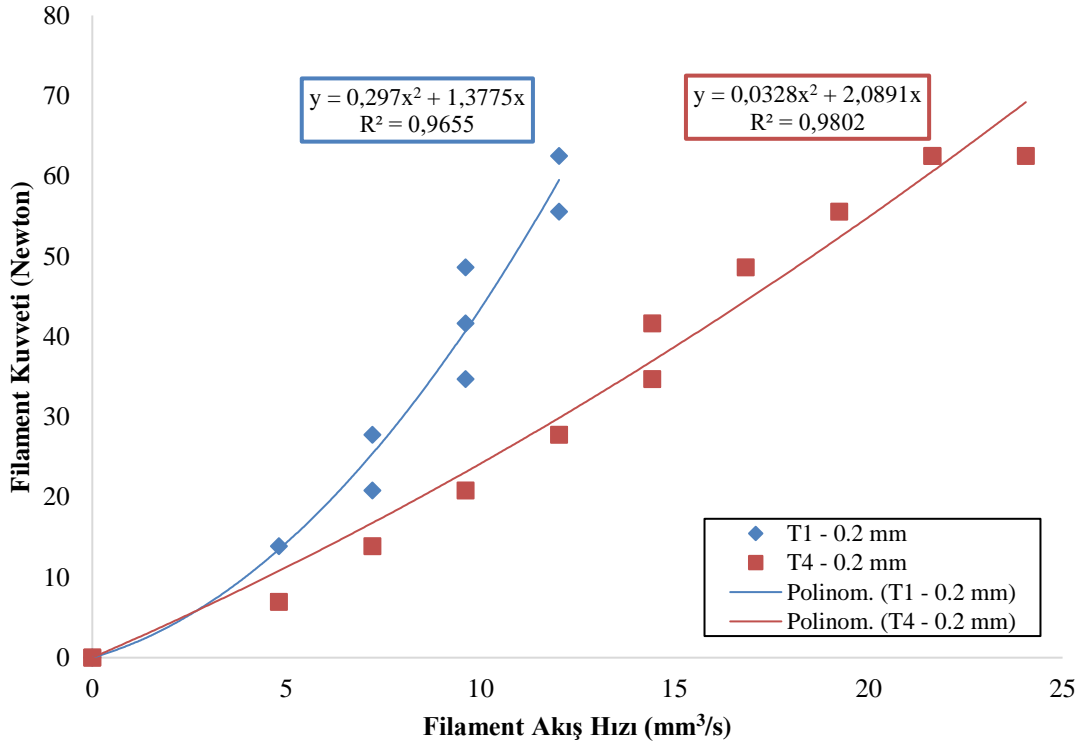
Şekil 4.82'de T1 tasarımına sahip ekstruder'in 0.2 mm, 0.3 mm ve 0.4 mm nozullar için farklı motor torklarında filament akış hızı performans grafiği görülmektedir. Elde edilen bulgulara göre nozul çapı arttıkça ekstruderde daha yüksek akış hızları elde edilmektedir. T1 tasarımı için deneysel olarak elde edilen veriler daha önceki bölümlerde detayları

verilen bilgisayar simülasyon sonuçlarıyla örtüşmektedir. Deney sonuçları nozul çapı arttıkça nozul içerisinde oluşan basıncın düştüğünü ve akış hızının arttığını göstermiştir. T1 tasarımına sahip ekstruderda motor çalışma akımı 0,100 A olduğunda her üç nozul ile ekstrüzyon gerçekleşmemiştir. Ekstrüzyonun gerçekleşmediği filament besleyicinin filamentini sürmeye zorlarken aşındırdığı tespit edilmiştir. Yaşanan bu durum nozul tıkanmalarına, üretimin tamamlanamamasına ve başarısız ekstrüzyon sorunlarına yol açmaktadır.

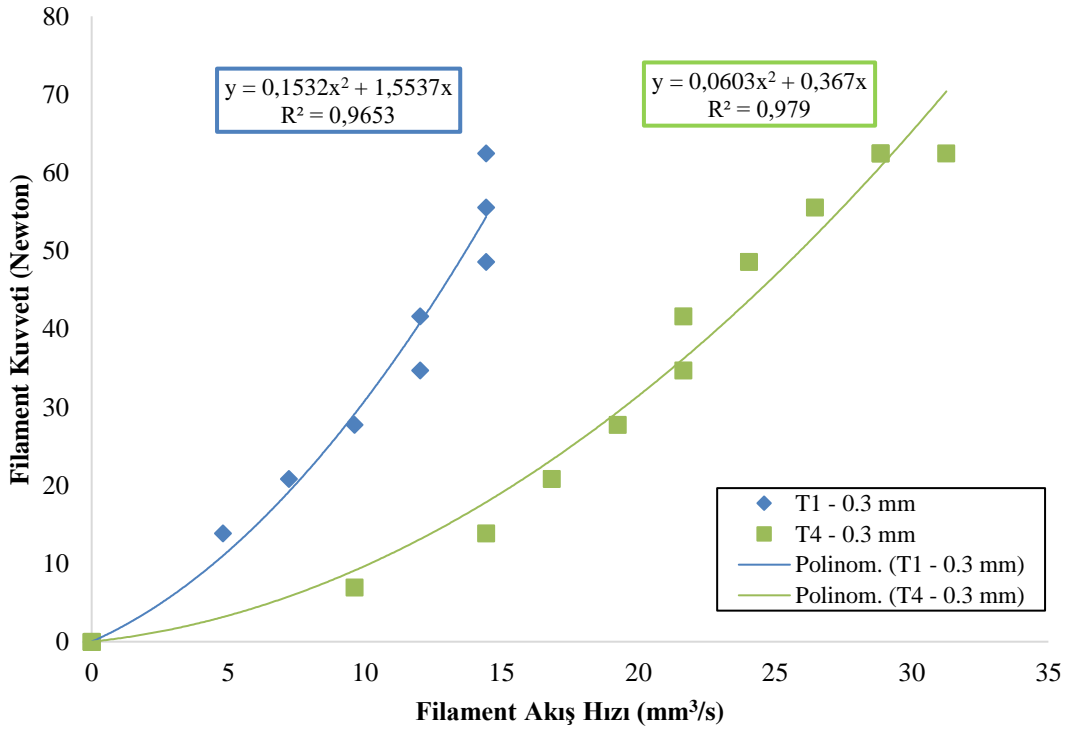


Şekil 4.83 Çalışma kapsamında geliştirilen ekstruder'ın farklı çaplardaki nozullar için akış performansı.

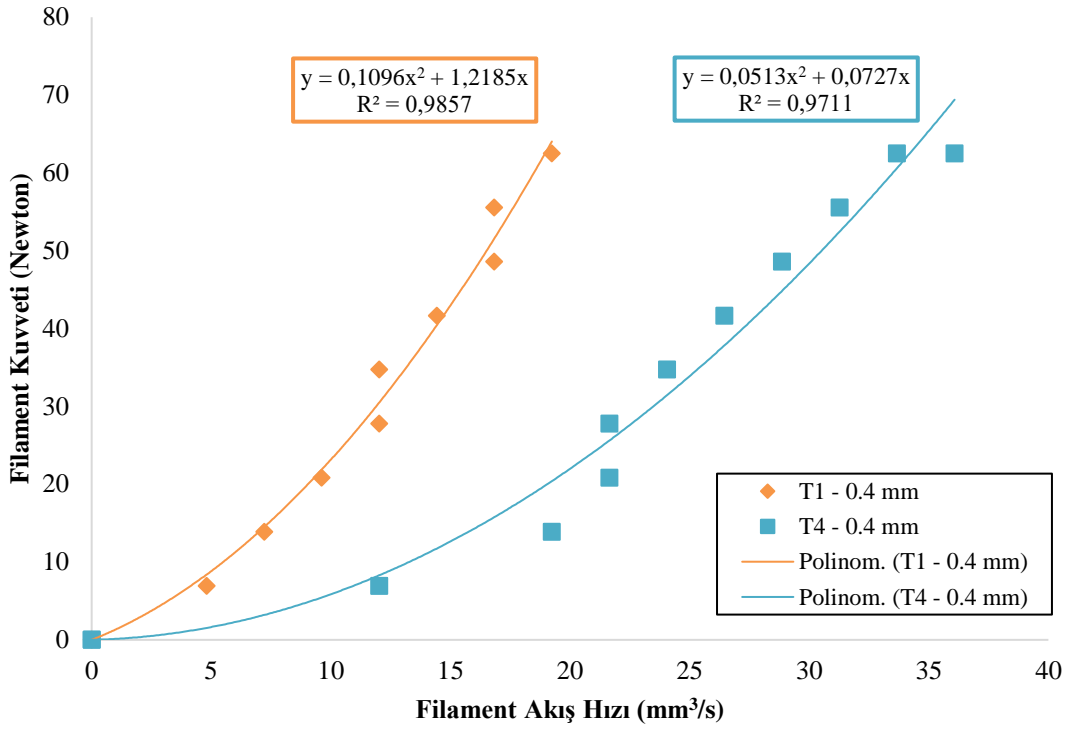
Aynı deneyler çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen ekstruder üzerinde tekrarlanmıştır. Geliştirilen ekstruder (T4 Tasarımı) ile yapılan deneylerden elde edilen bulgular Şekil 4.83'te görülmektedir. Deney sonuçlarına göre ekstruderda kullanılan nozul çapı arttıkça filamentin akış hızı da artmaktadır.



Şekil 4.84 Nozul çapı 0.2 mm için T1 ve T4 ekstruder tasarımlarında filament akış hızları.



Şekil 4.85 Nozul çapı 0.3 mm için T1 ve T4 ekstruder tasarımlarında filament akış hızları.



Şekil 4.86 Nozul çapı 0.4 mm için T1 ve T4 ekstruder tasarımlarında filament akış hızları.

Her iki ekstruder'ın performanslarının daha iyi karşılaştırılabilmesi 0.2 mm nozul çapı için elde edilen deney sonuçları Şekil 4.84'te, 0.3 mm nozul çapı için elde edilen deney sonuçları Şekil 4.85'te ve 0.4 mm nozul çapı için elde edilen deney sonuçları Şekil 4.86'da görülmektedir. Elde edilen bulgular her üç nozul çapı için de T4 tasarımında, T1 tasarımından daha yüksek filament akış hızları edilebildiğini göstermiştir.

T1 tasarımına sahip ekstruderda elde edilebilen maksimum filament akış hızı 0.4 mm nozul çapında filament besleyici motorunun maksimum torka sahip olduğu durumda 19,24 mm³/s olmuştur (Şekil 4.86). Çalışma kapsamında geliştirilen ekstruderda ise aynı şartlarda en yüksek filament akış hızı 36,10 mm³/s olarak elde edilmiştir (Şekil 4.86). Elde edilen bulgular çalışma kapsamında önerilen yeni ekstruder tasarımının (T4 Tasarımı) ekstrüzyon kapasitesinin mevcut ekstruder'dan (T1 Tasarımı) daha çok olduğunu göstermektedir. Yeni ekstruder ile birim zamanda daha çok filament eritilebilmektedir. Dolayısıyla önerilen ekstruder ile daha yüksek üretim hızları elde edilebilir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Endüstri 4.0'la birlikte anılan en önemli üretim aracı 3B Yazıcılardır. 3B yazıcılar sahip oldukları potansiyel nedeniyle Endüstri 4.0 için hayati öneme sahiptir. 3B yazıcılar geleneksel üretim araçlarının aksine hammaddenin katmanlar halinde üst üste eklenerek üretim yapılması prensibini kullanır. 3B yazıcılar ile ilgili temel tanımlar ve sınıflandırmalar American Society of Testing and Materials (ASTM) tarafından yapılmıştır (ISO/ASTM 2015). Her biri farklı teknoloji kullanan ve aralarında çok küçük farklılıklar bulunan yirmiden fazla farklı yazıcı türü vardır. Farklı yazıcı teknolojilerinin incelendiği, özelliklerinin karşılaştırıldığı kapsamlı bir derleme yapılmıştır (Yuran ve Yavuz 2021). 3B yazıcı teknolojilerinin arasında malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion) prensibini kullanan 3B yazıcılar en sık kullanılan 3B yazıcı türüdür.

Çalışmanın ilk aşamasında malzeme ekstrüzyonu ile üretim yapan 3B yazıcılar ile yapılan üretimlerde karşılaşılan üretim sorunları tespit edilmiştir. Üretim sorunlarının tespiti sırasında dört adet düşük maliyetli ve dört adet ticari olmak üzere sekiz farklı yazıcı kullanılmıştır. Üretimler sırasında yazıcıların tamamında karşılaşılan toplam yirmi bir farklı üretim sorunu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular üretim sorunlarının önemli bir kısmının 3B yazıcıların ekstruder olarak adlandırılan sistemi ile ilgili olduğu görülmüştür.

Çalışmada 3B yazıcılarda kullanılan ekstruder sistemleri incelenmiş ve üretim sorunlarına neden olabilecek tasarım değişkenleri belirlenmiştir. 3B yazıcının ekstruder'ı ısıtma modülü, soğutma modülü ve filament besleyici olmak üzere üç ana yapıdan oluşmaktadır. Üretim hatalarının azaltılması için bu üç yapının birbiriyle uyumlu çalışması gerekmektedir. Ekstrüzyon süreci nozul içerisinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla ekstrüzyon sırasında filamentin nozul içerisindeki davranışı önem kazanmaktadır (Alic ve Zitko 2017, Heller vd. 2016, Nienhaus vd. 2019, Sukindar vd. 2016, Yardimci vd. 1997). Bu nedenle öncelikli olarak filamentin nozul içerisindeki akış davranışının tespiti üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra sırasıyla ısıtıcı blok ve soğutucu tasarımları üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

3B yazıcılarda bulunan ekstruderların optimizasyonu için öncelikle nozul içerisinde

gerçekleşen ekstrüzyon süreci incelenmiştir. Filament normal şartlarda katı halde bulunurken nozul içerisinde eritildiğinde newton tipi olmayan bir akışkan hale gelmektedir. Yapılan çalışmada filamentin davranışının tespit edilmesi amacıyla nozul içerisindeki newton tipi olmayan akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında nozul'ın temel tasarım parametreleri olan nozul çapı (0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm), nozul açısı (60°, 90°, 120°, 180°) ve nozul sıcaklığı (190 °C, 210 °C, 230 °C) değişken olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte filamentin nozul'a giriş hızı (1 mm/s, 3 mm/s, 6 mm/s) ve filamentin nozul'a giriş sıcaklığı (100 °C, 125 °C, 150 °C) değişken olarak tanımlanmıştır.

Filament nozul içerisinde eridiğinde ve sıvı hale geldiğinde Newton tipi olmayan akış özellikleri göstermektedir. Sahip olduğu malzeme özellikleri nedeniyle filament nozul içerisinde incelen akış (Shear Thining) davranışındadır (Djellali vd. 2015). Dolayısıyla filamentin malzeme özellikleri filamentin sıcaklığı ve kayma gerilmeleri ile değişmektedir. Filamentin bu özelliği dikkate alınarak, filamentin malzeme özellikleri Cross malzeme modeli ile tanımlanmıştır (Cross 1979). Analizlerden elde edilen bulgular filamentin nozul içerisindeki akış davranışının ekstruder tasarımını doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Elde edilen bulgulara göre nozul açısının 90°'den daha fazla olduğu durumlarda nozul içerisindeki akışın düzensizleştiği tespit edilmiştir. 120° ve daha fazla nozul açısına sahip nozullarda özellikle köşe bölgelerde filamentin akışkanlığının azaldığı tespit edilmiştir. Filamentin nozul içerisinde akışkanlığını kaybetmesi; nozul tıkanması, düzensiz ekstrüzyon ve benzeri bir dizi üretim sorununun oluşmasına öncülük edebilir.

Farklı nozul çapları ile yapılan analizlerde nozul çapı azaltıldığında sistemde oluşan toplam basıncın arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla ekstrüzyonun kararlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için filament besleyicinin nozul içerisindeki basıncı karşılayacak kadar bir kuvvet üretebilmesi gerekir.

Nozul sıcaklığının filamentin istenen sürede eritilebilmesi için önemli olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığı mutlaka filamentin özelliklerine uygun olarak belirlenmelidir.

Olması gerekenden daha düşük sıcaklıklarda filament düzenli olarak eritemeyecektir. Özellikle filamenti sahip olduğu düşük ısı iletim özellikleri sıcaklık kontrolünü daha önemli hale getirmektedir (Duty vd. 2018). Elde edilen bulgular filamenti nozul duvarına yakın bölgelerde istenen sıcaklığa ulaşabilirken, filamenti merkezinde yeterli sıcaklıklara ulaşamaması gibi bir sorun oluşabileceği tespit edilmiştir. Özellikle düşük nozul sıcaklıklarında filamenti homojen bir şekilde eritemediği tespit edilmiştir. Filamenti giriş hızı da bu duruma etki etmektedir.

Filamenti giriş hızının artırılması üretim sürelerini önemli ölçüde kısaltabilir. Ancak bunu sağlayabilmek için ısıtma modülünde birim zamanda eritilecek filament miktarının artırılması gerekir. Nozul içerisinde birim zamanda daha çok filament eritebilmek için nozul sıcaklığının filament hızına paralel olarak artırılması ilk akla gelen çözümdür. Ancak nozul sıcaklığının artırılması beraberinde soğutma modülünün de aşırı ısınması riskini de beraberinde getirmektedir. Yapılan çalışmada bu problemi gidermek için nozul sıcaklığını artırmak yerine, nozul içerisindeki sıcaklık dağılımının daha homojen dağıtılmasını sağlayacak yeni bir ısıtıcı blok tasarımı önerilmiştir.

Filamenti ısıtma modülünde istenen sıcaklıklara ulaştırılabilmesi için bir rezistans ve ısıtıcı blok sıcaklığının kontrolü için sıcaklık sensörü kullanılmaktadır. Isıtma modülünün sıcaklık ölçümü ısıtıcı blok üzerinden yapılmaktadır. Ekstrüzyonun daha iyi kontrolü için sıcaklık ölçümlerinin üretim esnasında gerçek zamanlı olarak filament üzerinden alınması gerekir. Filament sıcaklığının doğrudan ölçümü yakın zamanda bazı laboratuvar çalışmalarında deneysel olarak uygulanmıştır (Anderegg vd. 2019, Moretti vd. 2021). Ancak önerilen yöntemler pratik değildir ve üretim sırasında doğrudan kullanıma henüz uygun değildir. Sıcaklık ölçümünün nozul içerisindeki filament üzerinden doğrudan alınamaması ekstrüzyon sürecinin sıcaklık kontrolünün dolaylı olarak yapılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte sistemin tasarımı ve yazılım özellikleri nedeniyle ısıtma modülünün sıcaklığı sabit tutulamamaktadır. Isıtıcı blok sıcaklığı periyodik olarak dalgalanma eğilimindedir. Nozul içerisindeki filamenti sıcaklığının daha homojen hale getirilebilmesi ve sıcaklık dalgalanmalarının azaltılabilmesi için yeni bir ısıtıcı blok tasarımı önerilmiştir. Önerilen yeni tasarım ile mevcut yazıcılarda kullanılan ısıtıcı bloklar karşılaştırılmıştır. Önerilen ısıtıcı blok tasarımı nozul bölgesinde filamenti

istenen sıcaklıklara homojen bir şekilde ulaşmasını sağlamıştır. Bununla birlikte önerilen sistem filamentin sıcaklık dalgalanmalarından daha az etkilenmesini sağlamıştır.

Isıtma modülünün sıcaklık kontrolü ise termistör veya termal çift gibi sensörlerle yapılmaktadır. Çalışmalar sırasında sensör konumlarının ısıtma modülü üzerindeki sıcaklık dağılımını etkilediği tespit edilmiştir. Mevcut ekstruderlarda ısıtıcı blok üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörleri ısıtıcı blok üzerinde rastgele konumlara yerleştirilmektedir. Bazı tasarımlarda sensör nozula daha yakın bir konumda bulunurken, bazı tasarımlarda rezistansın olduğu bölgeye daha yakın bulunmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık ölçümünün farklı konumlardan alınması ısıtma modülünün sıcaklık kontrolünün de farklılaşmasına neden olmaktadır. Sensör konumu nedeniyle bazı tasarımlarda filamentin nozul içerisindeki sıcaklığı dilimleyici yazılımda ayarlanan sıcaklıktan sapmalara sebep olmaktadır. Yapılan çalışmada ısıtıcı blok tasarımının yanında, blok üzerine yerleştirilecek olan sensörlerin konumu da optimize edilmiştir.

Ekstruder'in sorunsuz çalışması için filament sıcaklığının ısıtma modülü haricindeki diğer bölgelerde camsı geçiş sıcaklığından düşük olması gerekmektedir. Filamentin sıcaklığına ısıtma modülü ve soğutma modülü arasındaki ısı bariyeri adı verilen parçanın tasarımı etki etmektedir. Isı bariyerinin tasarımı üzerinde yapılan iyileştirmeler ile ısıtma modülü ve soğutma modülleri arasındaki ısı iletimi azaltılmıştır (Yuran ve Yavuz 2020).

İdeal ekstruder tasarımında filament sıcaklığının ısıtma modülü içerisindeyken tam olarak filamentin erime sıcaklığında olması ve filamentin soğutma modülü içerisindeki sıcaklığının ise oda sıcaklığında bulunması beklenir. Dolayısıyla üretim sırasında ideal bir ekstruder tasarımında ısıtma modülü 200 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda bulunurken, soğutma modülünün 20 °C olması beklenir. Bu durumu sağlayabilmek için soğutma modülü üzerinde bir soğutucu ve soğutma fanı kullanılır. Soğutma modülünde kullanılan soğutucu ve soğutma fanı, filamentin sıcaklık kontrolü için önemlidir. Çalışmada mevcut ekstruderlarda kullanılan soğutucu ve soğutma fanları üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonların yardımıyla mevcut ekstruder tasarımının soğutma performansı

belirlenmiştir. Analizlerde fan hızı (0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s) ve nozul sıcaklığı (190 °C, 210 °C, 230 °C) değişken olarak tanımlanmıştır. Farklı fan hızları ve nozul sıcaklıklarında soğutma modülünün sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Sistemdeki akışın kararlı halde (Steady – State) olduğu kabul edilmiştir. Literatürde yapılan benzer bir çalışmada akışın laminar olduğu kabul edilmiştir (Mesa vd. 2018). Ancak problem incelendiğinde laminar akış kabulünün sonuçların doğruluğunu olumsuz olarak etkileyecektir. Bu nedenle problemin çözümünde Kayma Gerilmesi Taşınım (SST) $k - \omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları deneysel olarak kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Simülasyonlardan elde edilen bilgiler doğrultusunda yeni bir soğutucu tasarımı önerilmiştir. Önerilen tasarım ile filamentin soğutma modülü içerisindeki sıcaklığı mevcut ekstruder tasarımlarından 20 °C kadar daha düşük olması sağlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Abilgazyev A, Kulzhan T, Raissov N, Ali M H, Match W L K, Mir-Nasiri N, 2015, Design And Development Of Multi-Nozzle Extrusion System For 3D Printer, 2015 International Conference on Informatics Electronics & Vision, 15 – 18 June, Japan, 1–5.
- Ali M H, Mir-Nasiri N, Ko W L, 2016, Multi-Nozzle Extrusion System For 3D Printer and Its Control Mechanism, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86, 999–1010.
- Anderegg D A, Bryant H A, Ruffin D C, Skrip S M, Fallon J J, Gilmer E L, Bortner M J, 2019, In-Situ Monitoring of Polymer Flow Temperature and Pressure in Extrusion Based Additive Manufacturing, Additive Manufacturing, 26, 76–83.
- Atwood C, Griffith M, Harwell L, Schlienger E, Ensz M, Smugeresky J, Reckaway D, 1998, Laser engineered net shaping (LENSTM): A Tool For Direct Fabrication of Metal Parts, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Laser Institute of America, E1 – E7.
- Bae C J, Diggs A B, Ramachandran A, 2018, Quantification And Certification Of Additive Manufacturing Materials And Processes, Butterworth Heinemann, 213p, Oxford.
- Bagheri A, Jin J, 2019, Photopolymerization in 3D Printing, Applied Polymer Materials, 14, 593-611.
- Baumann F, Roller D, 2017, Additive Manufacturing Cloud-Based 3D Printing and Associated Services – Overview, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 12, 15–16.
- Beaman J J, Deckard C R, 1990, Selective Laser Sintering With Assisted Powder Handling, Patent No: 4.938.816, US Patent and Trademark Office, Washington.
- Bellini A, Gucerì S, Bertoldi M, 2004, Liquefier Dynamics in Fused Deposition, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126, 237–246.
- Bögrekci İ, Demircioğlu P, Sucuoğlu H S, Turhanlar O, 2019, The Effect of The Infill Type and Density on the Hardness of 3D Printed Parts, International Journal of 3D

- Printing Technologies And Digital Industry, 3, 212–219.
- C Iancu, D Iancu, A Stancioiu, 2010, From CAD Model To 3D Print Via “STL” File Format, *Fiabilitate Durability*, 1, 73–80.
- Cengel Y, Boles M A, Kanoğlu M, 2011, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw – Hill, p. 445, New York.
- Cengel Y, Cimbala J, 2008, *Essentials of Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, McGraw – Hill, 266-287, New York.
- Cheng B, Price S, Lydon J, Cooper K, Chou K, 2014, On Process Temperature in Powder – Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 6, 136.
- Cross M M, 1979, Relation Between Viscoelasticity And Shear-Thinning Behaviour In Liquids, *Rheologica Acta*, 18, 609–614.
- Crump S S, 1989, Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects, Patent No: 5,121,329, US Patent and Trademark Office, Washington.
- Culot G, Nassimbeni G, Orzes G, Sartor M, 2020, Behind The Definition Of Industry 4.0: Analysis And Open Questions, *International Journal of Production Economics*, 226, id 107617.
- Dabiri S, Schmid S, Tryggvason G, 2014, Fully Resolved Numerical Simulations Of Fused Deposition Modeling, *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, id 45813.
- Dave H K, Rajpurohit S R, Patadiya N H, Dave S J, Sharma K S, Thambad S S, Sheth K V, 2019, Compressive Strength of PLA Based Scaffolds: Effect of Layer Height, Infill Density and Print Speed, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 11, 21–27.
- Dilberoglu U M, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M, 2017, The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0, *Procedia Manufacturing*, 11, 545–554.
- Ding S, Zou B, Wang P, Ding H, 2019, Effects Of Nozzle Temperature And Building Orientation On Mechanical Properties And Microstructure Of PEEK and PEI Printed

- by 3D-FDM, *Polymer Testing*, 78, 105948.
- Djellali S, Sadoun T, Haddaoui N, Bergeret A, 2015, Viscosity And Viscoelasticity Measurements Of Low Density Polyethylene/Poly(Lactic Acid) Blends, *Polymer Bulletin*, 72, 1177–1195.
- Dougherty D, 2012, The Maker Movement, *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, 7, 11–14.
- Duda T, Raghavan L V, 2016, 3D Metal Printing Technology, *IFAC – PapersOnLine*, 49, 103–110.
- Duty C, Ajinjeru C, Kishore V, Compton B, Hmeidat N, Chen X, Kunc V, 2018, What Makes A Material Printable? A Viscoelastic Model For Extrusion – Based 3D Printing of Polymers, *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 526–537.
- Ege B, 2014, 4. Endüstri Devrimi Kapıda mı?, *Bilim ve Teknik*, 558, 26–29.
- Friel R J, 2015, Power Ultrasonics For Additive Manufacturing And Consolidating Of Materials, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, 1, 313 – 335.
- Gardner J M, Stelter C J, Yashin E A, Siochi E J, 2018, High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low – Cost , Open – Source Hardware, *NASA/TM*, 219 – 344.
- Garrell M G, Shih A J, Lara-Curzio E, Scattergood R O, 2003, Finite – Element Analysis Of Stress Concentration in ASTM D638 Tension Specimens, *Journal of Testing and Evaluation*, 31, 52–57.
- Gebhardt A, 2011, Understanding Additive Manufacturing, *Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik, München*.
- Gebisa A W, Lemu H G, 2019, Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile Property of ULTEM 9085, *Procedia Manufacturing*, 30, 331–338.
- Geng P, Zhao J, Wu W, Ye W, Wang Y, Wang S, Zhang S, 2019, Effects of Extrusion Speed And Printing Speed On The 3D Printing Stability Of Extruded PEEK Filament, *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 266–273.
- Gibson I, Rosen D, Stucker B, 2014, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 17,

Switzerland.

- Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M, 2021, Binder Jetting, Additive Manufacturing Technologies, 1, 237–252.
- Gonzalez J A, Mireles J, Lin Y, Wicker R B, 2016, Characterization Of Ceramic Components Fabricated Using Binder Jetting Additive Manufacturing Technology, Ceramics International, 42, 10559–10564.
- Han S, Xiao Y, Qi T, Li Z, Zeng Q, 2017, Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer Nozzle for Color Mixing, Advances in Materials Science and Engineering, 1, 1–12.
- He Y, Wildman R D, Tuck C J, Christie S D R, Edmondson S, 2016, An Investigation of the Behavior of Solvent Based Polycaprolactone Ink for Material Jetting, Scientific Reports, 6, 1–10.
- Heller B P, Smith D E, Jack D A, 2016, Effects Of Extrudate Swell And Nozzle Geometry On Fiber Orientation in Fused Filament Fabrication Nozzle Flow, Additive Manufacturing, 12, 252–264.
- Hofmeister W, Wert M, Smugeresky J, Philliber J A, Griffith M, Ensz M, 1999, Investigating Solidification with the Laser-Engineered Net Shaping (LENSTM) Process, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 51, 1–6.
- Hull C W, Spence S T, Albert D J, Smalley D R, Harlow R A, Stinebaugh P, Remba D Z, 1993, Method and Apparatus for Production of High Resolution Three-Dimensional Objects By Stereolithography, U.S. Patent No. 5,184,307.1, U.S. Patent and Trademark Office, Washington DC.
- ISO/ASTM 52900, 2015, Additive manufacturing - General principles – Terminology, International Standard, ASTM, Philadelphia.
- Jerez M R, Gomez-Gras G, Travieso-Rodriguez J A, Garcia-Plana V, 2018, A Comparative Study Of The Thermal Behavior Of Three Different 3D Printer Liquefiers, Mechatronics, 56, 297–305.
- Jerez M R, Travieso-Rodriguez J A, Corbella X, Busqué R, Gomez-Gras G, 2016, Finite Element Analysis Of The Thermal Behavior Of A RepRap 3D Printer Liquefier,

- Mechatronics, 36, 119–126.
- Jones R, Haufe P, Sells E, Iravani P, Olliver V, Palmer C, Bowyer A, 2011, Reprap - The Replicating Rapid Prototyper, *Robotica*, 29, 177–191.
- Joshi S C, Sheikh A A, 2015, 3D Printing in Aerospace and its Long – Term Sustainability, *Virtual and Physical Prototyping*, 10, 175–185.
- Junk S, Kuen C, 2016, Review of Open Source and Freeware CAD Systems for Use with 3D – Printing, *Procedia CIRP*, 50, 430–435.
- Kablan A, 2020, Dark Factories from an Industry 4.0 Perspective: Its Effects on Cost Accounting and Managerial Accounting, *Contributions to Management Science*, 1, 503–518.
- Kaseem M, Ko Y G, 2017, Melt Flow Behavior and Processability of Polylactic Acid/Polystyrene (PLA/PS) Polymer Blends, *Journal of Polymers and the Environment*, 25, 994–998.
- Katz A, Sankaran V, 2011, Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes, *Journal of Computational Physics*, 230, 7670–7686.
- Kazmer D, 2017, Three-Dimensional Printing of Plastics Applied Plastics Engineering Processing Materials and Applications A Volume in Plastics Design Library, Elsevier, 759p, Amsterdam.
- Kiendl J, Gao C, 2020, Controlling Toughness and Strength of FDM 3D–Printed PLA Components Through the Raster Layup, *Composites Part B: Engineering*, 180, id 107562.
- Kim H, Zhao Y, Zhao L, 2016, Process – Level Modeling and Simulation for HP’s Multi Jet Fusion 3D Printing Technology, 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems, 12 April, Vienna, 1– 4.
- Kim M K, Lee I H, Kim, H C, 2018, Effect of Fabrication Parameters on Surface Roughness of FDM Parts, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19, 137–142.
- Koc E, 2017, Investigation of Heat Sink Geometry Effect on Cooling Performance for a FDM 3D Printer Liquefier, *International Conference on Energy and Thermal*

- Engineering, 25-28 April, Istanbul, 569–573.
- Kruth J P, Leu M C, Nakagawa T, 1998, Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, CIRP Annals, Manufacturing Technology, 47, 525–540.
- Kuznetsov V E, Tavitov A G, Urzhumtsev O D, Mikhailin M V, Moiseev A I 2019a, Hardware Factors Influencing Strength of Parts Obtained by Fused Filament Fabrication, Polymers, 11, 1870.
- Kuznetsov V E, Tavitov A G, Urzhumtsev O D, Mikhailin M V, Moiseev A I, 2019b, Hardware Factors Influencing Strength of Parts Obtained by Fused Filament Fabrication, Polymers, 11, 1897.
- Lalegani D M, Mohd A, 2020, The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process, Polymers, 12, 2792.
- Lasi H, Fettke P, Kemper H G, Feld T, Hoffmann M, 2014, Industry 4.0, Business and Information Systems Engineering, 6, 239–242.
- Laureto J, Pearce J, 2017, Open Source Multi-Head 3D Printer for Polymer–Metal Composite Component, Manufacturing Technologies, 5, 36.
- Lim C W J, Le K Q, Lu Q, Wong C H, 2016, An Overview of 3-D Printing in Manufacturing, Aerospace, and Automotive Industries, IEEE Potentials, 35, 18–22.
- Liu Y, Xu X, 2017, Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 139, 1–8.
- Manda V R, Kampurath V, Msrk C, 2018, 3D Printing and Its Effect on Outsourcing: A Study of the Indian Aircraft Industry, Journal of Aerospace Technology and Management, 10.
- Maria L, Piperi E, 2017, Extruder Head Thermal Analysis For An Open – Source 3D Printer, International Conference on Progress in Digital and Physical Manufacturing, 2 – 4 October, Portugal, 1 – 8.
- Martin A A, Calta N P, Khairallah S A, Wang J, Depond P J, Fong A Y, Matthews M, 2019, Dynamics of Pore Formation During Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing, Nature Communications, 10, 1–10.

- Mavri M, 2015, Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology, *Knowledge and Process Management*, 22, 141–147.
- Mohamed O A, Masood S H, Bhowmik J L, 2015, Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters: A Review of Current Research and Future Prospects, *Advances in Manufacturing*, 3, 42–53.
- Moore S, Armstrong P, McDonald T, Yampolskiy M, 2016, Vulnerability Analysis of Desktop 3D Printer Software, *Resilience Week Proceedings*, 16 – 18 August, Illinois, 46–51.
- Moretti M, Rossi A, Senin N, 2021, In-process Simulation of the Extrusion to Support Optimisation and Real – Time Monitoring in Fused Filament Fabrication, *Additive Manufacturing*, 38, 101817.
- N'Dri N, Mindt H W, Shula B, Megahed M, Peralta A, Kantzos P, Neumann J, 2015, DMLS Process Modelling and Validation, *TMS 2015 144th Annual Meeting & Exhibition*, 15 – 19 March, Orlando, 389–396.
- Narang R, Chhabra D, 2017, Analysis of Process Parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) Technique, *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering IJFRCSCCE*, 41–48.
- Nienhaus V, Smith K, Spiehl D, Dörsam E, 2019, Investigations on Nozzle Geometry in Fused Filament Fabrication, *Additive Manufacturing*, 28, 711–718.
- Nikitakos N, Dagkinis I, Papachristos D, Georgantis G, Kostidi E, 2020, Economics in 3D Printing, *3D Printing: Applications in Medicine and Surgery*, 85–95.
- Novakova-Marcincinova L, Novak-Marcincin J, 2012, Applications of Rapid Prototyping Fused Deposition Modeling Materials, *23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 1, 57–60.
- Oettmeier K, Hofmann E, 2016, Impact of Additive Manufacturing Technology Adoption On Supply Chain Management Processes And Components, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27, 944–968.
- Oh W J, Lee W J, Kim M S, Jeon J B, Shim D S, 2019, Repairing Additive – Manufactured 316L Stainless Steel Using Direct Energy Deposition, *Optics and*

- Laser Technology, 117, 6–17.
- Oh Y, Bharambe V, Mummareddy B, Martin J, McKnight J, Abraham M A, Adams J J, 2019, Microwave Dielectric Properties of Zirconia Fabricated Using NanoParticle Jetting™ Additive Manufacturing, 27, 586–594.
- Ouballouch A, El Alaiji R, Sallaou M, Bouayad A, Lasri L, 2020, Finite Element Modeling of an Optimized Liquefier Design for 3D Printing of CFRTPCs by Thermal Simulation, Advances in Intelligent Systems and Computing, 1104, 337–346.
- Pagac M, Hajnys J, Ma Q P, Jancar L, Jansa J, Stefek P, Mesicek J, 2021, A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, Polymers, 13, 598 – 618.
- Peng F, Vogt B D, Cakmak M, 2018, Complex Flow and Temperature History During Melt Extrusion in Material Extrusion Additive Manufacturing, Additive Manufacturing, 22, 197–206.
- Ramanath H S, Chua C K, Leong K F, Shah K D, 2008, Melt Flow Behaviour Of Poly – ϵ – Caprolactone in Fused Deposition Modelling, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 19, 2541–2550.
- Rao P S, Rao D V S, 2015, Design and Analysis of Hot Runner Nozzle Using FEM, International Journal of Mechanical and Industrial Technology, 3, 228–241.
- Saari M, Galla M, Cox B, Krueger P, Cohen A, Richer E, 2015, Additive manufacturing of Soft and Composite Parts From Thermoplastic Elastomers, Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, 949–958.
- Sabat L, Kundu C K, 2021, History of Finite Element Method: A Review, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, 75, 395–404.
- Safka J, Ackermann M, Seidl M, Vele F, Machacek J, Behalek L, Truxova V, 2020, Mechanical Properties of Two Types of Lattice Structures Fabricated With the Use Of HP Multijet Fusion Technology, MM Science Journal, 4074–4079.
- Salonitis K, 2014, Design for Additive Manufacturing Based on Axiomatic Design, The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87, 989 – 996.
- Samykan M, Selvamani S K, Kadirgama K, Ngui W K, Kanagaraj G, Sudhakar K, 2019, Mechanical property of FDM printed ABS: Influence Of Printing Parameters, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102, 2779–2796.
- Scopigno R, Cignoni P, Pietroni N, Callieri M, Dellepiane M, 2017, Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey, Computer Graphics Forum, 36, 6–21.
- Seifi M, Dahar M, Aman R, Harrysson O, Beuth J, Lewandowski J, 2015, Evaluation of Orientation Dependence of Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation Behavior of As-Deposited ARCAM EBM Ti-6Al-4V, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 67, 597–607.
- Shaour B, Abuabiah M, Abdel-Fattah S, Juaidi A, Abdallah R, Abuzaina W, Cos P, 2021, Gaining a Better Understanding of the Extrusion Process in Fused Filament Fabrication 3D printing: A Review, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 114, 1279–1291.
- Shewbridge R, Hurst A, Kane S K, 2014, Everyday Making: Identifying Future Uses For 3D Printing in the Home, Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques, 815–824.
- Simonelli M, Aboulkhair N, Rasa M, East M, Tuck C, Wildman R, Hague R, 2019, Towards Digital Metal Additive Manufacturing Via High-Temperature Drop-On-Demand Jetting, Additive Manufacturing, 30, 100930.
- Singh D, Singh R, Boparai K S, 2018, Development and Surface Improvement of FDM Pattern Based Investment Casting Of Biomedical Implants: A State of Art Review, Journal of Manufacturing Processes, 31, 80–95.
- Singh S, Singh G, Prakash C, Ramakrishna S, 2020, Current Status and Future Directions of Fused Filament Fabrication, Journal of Manufacturing Processes, 55, 288–306.
- Šljivic M, Pavlovic A, Krašnik M, Ilić J, 2019, Comparing the Accuracy of 3D Slicer Software in Printed Enduse Parts, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 659, 12082.
- Soares J B, Finamor J, Silva F P, Roldo L, Cândido L H, 2018, Analysis of the Influence

- of Polylactic Acid (PLA) Colour on FDM 3D Printing Temperature and Part Finishing, *Rapid Prototyping Journal*, 24, 1305–1316.
- Stanciulescu S, Schulze S, Wasowski A, 2015, Forked and Integrated Variants in an Open-Source Firmware Project, *IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution*, 151–160.
- Stanko M A, 2020, Building an Understanding of How Winning Products Emerge When Open and Proprietary Products Coexist: Evidence From the RepRap Community, *Creativity and Innovation Management*, 29, 398–412.
- Sukindar N A, Ariffin M K A, Hang B T, Jaafar C N A, Ismail M I S, 2016, Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing, *Jurnal Teknologi*, 78, 7–15.
- Tan H, 2016, Three-dimensional Simulation of Micrometer-Sized Droplet Impact and Penetration into the Powder Bed, *Chemical Engineering Science*, 153, 93–107.
- Tasch D, Schagerl M, Wazel B, Wallner G, 2019, Impact Behavior and Fractography of Additively Manufactured Polymers: Laser Sintering, Multijet Fusion, and Hot Lithography, *Additive Manufacturing*, 29, 100816.
- Wai M L, Gibson I, 2000, Colour Rapid Prototyping Based on SLS process, *Solid Freeform Fabrication Symp*, Austin, Texas, US.
- Wang L, Wang Z, Zijian L R J, 2007, Influence of Process Parameters on Part Shrinkage in SLS, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33, 498–504.
- Wickramasinghe S, Do T, Tran P, 2020, FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A review on Mechanical Properties, Defects and Treatments, *Polymers*, 12, 1–42.
- Wohlers T, Gornet T, 2012, History of Additive Manufacturing Introduction of Non-SL Systems Introduction of Low-Cost 3D Printers, *Wohlers Report*, 24, 118.
- Yardimci M A, Hattori T, Gucer S I, Danforth S C, 1997a, Thermal Analysis of Fused Deposition, *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 689–698.
- Yuran A F, Yavuz I, 2021, Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması,

Mühendis ve Makina, 62, 580-606.

Yuran A F, Yavuz I, 2020, Effect of Heat Break Geometry on the Thermal Performance of A 3D Printer Extruder, International Journal of Scientific and Technological Research, 6, 41–50.

Yuran A F, Asaroğlu H, Çakmak S, 2020, Salgın Döneminde 3B Yazıcılar ile Yüz Koruyucu Üretimi Üzerine Değerlendirmeler, International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry, 4, 204–215.

Zagidullin R, Mitroshkina T, Dmitriev A, 2021, Quality Function Deployment and Design Risk Analysis for the Selection and Improvement of FDM 3D Printer, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 6, 6212.

Žarko J, Vladić G, Pál M, Dedijer S, 2017, Influence of Printing Speed on Production of Embossing Tools Using FDM 3D Printing Technology, Journal of Graphic Engineering and Design, 8, 19–27.

Zhao C, Yang G, 2015, Numerical Simulation of a New Nozzle Based on the Principle of FDM Forming Performance, International Journal of Control and Automation, 8, 163–170.

Zhao J, 2017, Design of 3D Metal FDM Printing Nozzle Based on Melt Forming, Chemical Engineering Transactions, 59, 73–78.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet Fatih YURAN

Doğum Yeri ve Tarihi: AFYONKARAHİSAR – 22.10.1983

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon / e-posta): +905417824982 / fatihyuran@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Gazi Anadolu Meslek Lisesi (1997 – 2001)

Lisans : Mersin Üniversitesi, Makine Eğitimi Böl., (2003–2009)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2010 – 2013)

Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2015 – 2022)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Afyon Kocatepe Üniversitesi (2010 – Devam Ediyor)

Yayınları (SCI ve diğer) :

Yuran A F, Yavuz I, 2021, Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması, Mühendis ve Makina, 62, 580-606.

Simsir E, Yavuz I, **Yuran A F**, 2021, Car Phone Holder Design and Manufacturing with Three-Dimensional Printer Technology, International Symp. On Automotive Science And Technology, 8-10 September, Ankara.

Simsir E, Yavuz I, **Yuran A F**, Deveci O C, 2021, Production of Roof Rack Holders Used in Automobiles with Three Dimensional Printer, International Symp. On Automotive Science And Technology, 8-10 September, Ankara.

Yavuz İ, Erçek E, **Yuran A F**, 2021, Safety Hammer Design For Transportation Vehicles And Production With 3D Printer. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 5, 46-49.

Yuran A F, Yavuz I, Fidan U, 2020, Pandemi Durumda 3D Yazıcıların Etkin Kullanımı, Arslantaş A (Ed.), Medikal İnovatif Teknolojiler (Vol 1, pp. 98–116), Eskişehir

Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.

Yuran A F, Kaga S, Fidan U, 2020, Pandemi Döneminde Pratik Yöntemlerle Geliştirilen Siperliklerin Koruyucu Özellikleri, Arslantaş A (Ed.), Medikal İnovatif Teknolojiler (Vol 1, pp. 120–131), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.

Yuran A F, Asaroğlu H, Çakmak S, 2020, Evaluations On Face Shield Production With 3D Printers In The Epidemic Period, International Journal of 3D Printing Technologies And Digital Industry, 4, 204–215.

Yuran A F, Yavuz I, 2020, Effect of Heat Break Geometry on the Thermal Performance of A 3D Printer Extruder, International Journal of Scientific and Technological Research, 6, 41–50.

Boyacı M G, Fidan U, **Yuran A F**, Yıldızhan S, Kaya F, Kimsesiz O, Aslan A, 2020, Augmented Reality Supported Cervical Transpedicular Fixation on 3D-Printed Vertebrae Model: An Experimental Education Study. Turkish Neurosurgery, 30, 937-943.

Yuran A F, Asaroğlu H, Başdemir M, Çakmak S, 2020, Hastaya Özgü Gözenekli Alçı Tasarımı ve 3D Yazıcı ile Üretimi, 2nd International Congress of Updates in Biomedical Engineering, İzmir.

Yuran A F, Sac A, Inat G, Ozmen M, 2020, Görme Engelliler için 3 Boyutlu Braille Metin Baskısı, 2nd International Congress of Updates in Biomedical Engineering, İzmir.

Boyacı M G, Fidan U, **Yuran A F**, Yıldızhan S, Kaya F, Kimsesiz O, Aslan A, 2019, Augmented Reality Supported Cervical Transpedicular Fixation on 3D-printed Vertebrae Model: An Experimental Education Study, 7th International Congress Biotechnologies for Spinal Surgery (BIOSPINE 2019), 3 – 5 April, Italy.

Yavuz I, **Yuran A F**, 2019, Makine Mühendisliği Eğitiminde 3B Yazıcılar ile Yardımcı Materyal Tasarımı ve Uygulaması, 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Dijital Industry, Antalya.

Yavuz I, **Yuran A F**, Yıldırım A, 2019, Gözenekli Yapıların 3B Yazıcılarla Hassas Üretiminin Araştırılması, 4th International Cong. on 3D Printing (Additive Man.)

- Tech. And Digital Industry, Antalya.
- Yavuz I, **Yuran A F**, 2018, Polymer Foam Desing and Manufacturing with 3D Printer, ICELIS – 2018, International Congress On Engineering And Life Science, Kastamonu.
- Yuran A F**, Çakır M E, 2018, Pelvix Kemiği Kırığının Modellenmesi ve FDM 3B Yazıcı İle Üretiminin Gerçekleştirilmesi, 3rd International Congress On 3d Printing Tech. And Digital Industry 2018, Antalya.
- Yavuz I, **Yuran A F**, Yıldırım A, 2018, Engelliler İçin Araç Aparat Tasarımı ve FDM 3B Yazıcı Uygulaması, 3rd International Congress On 3d Printing Tech. And Digital Industry 2018, Antalya.
- Yavuz I, **Yuran A F**, Çakır M E, 2017, Product Faults Encountered In Fused Deposition Modelling And Suggested Solutions, 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ.
- Akçal M E, Baybura T, Fidan U, **Yuran A F**, 2016, Düşük Maliyetli Yarı Otomatik Yersel Lazer Tarama Sisteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Istanbul.
- Tasgetirn S, Özmen S N, Özkan N, **Yuran A F**, 2015, Cooperation Between Health and Engineering Fields in Biomedical Research Areas, Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO), pp. 1-4.
- Verim O, Taşgetiren S, Er M S, Timur M, **Yuran A F**, 2013, Anatomical Comparison and Evaluation of Human Proximal Femurs Modeling via Different Devices and FEM Analysis. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 9, 19 – 24.
- Verim O, Taşgetiren S, Er M S, Ozdemir V, **Yuran A F**, 2013, Anatomical Evaluation and Stress Distribution of Intact Canine Femur, The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 9, 103 – 108.
- Yuran A F**, Taşgetirn S, 2010, Doğadan Esinlenerek Tasarım, Electronic Journal of BioTechnology, 1, 23 – 30.