



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FİLAMENT EKSTRÜZYON MAKİNELERİNDE
PID İLE SICAKLIK DENETİMİ**

Murat OFLEZER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Dr. Öğretim Üyesi Emin YILDIRIZ**

DÜZCE, 2022

**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FİLAMANT EKSTRÜZYON MAKİNELERİNDE
PID İLE SICAKLIK DENETİMİ**

Murat OFLEZER tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü FEN BİLİMLERİ Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğretim Üyesi Emin YILDIRIZ
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Emin YILDIRIZ
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 28/01/2022

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

10 Ocak 2022



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Emin YILDIRIZ' a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

10 Ocak 2022

Murat OFLEZER



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. 3 BOYUTLU YAZICILAR VE FİLAMENTLER.....	5
2.1. 3 BOYUTLU YAZICILAR.....	5
2.2. FİLAMENTLER.....	8
2.2.1. Filamentlerin Karakteristik Özellikleri.....	11
3. FİLAMENT ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	14
3.1. FİLAMENT EKSTRÜZYON MAKİNELERİ.....	15
3.2. FİLAMENT EKSTRÜZYON MAKİNELERİNİN BÖLÜMLERİ.....	17
3.3. EKSTRÜDERLERDE KULLANILAN KOMPONENETLER.....	18
3.3.1. Besleme Haznesi.....	18
3.3.2. Motor ve Sürücü.....	19
3.3.3. Kovan.....	21
3.3.4. Vida.....	22
3.3.5. Nozul.....	23
3.3.6. Redüktörler.....	24
3.3.7. Isıtıcılar.....	26
3.3.8. Soğutma Sistemi.....	27
3.3.9. Sıcaklık Ölçümü.....	28
3.3.10. Sıcaklık Kontrolcüsü.....	30
4. MATERYAL VE METOD.....	31
4.1. MATERYAL SEÇİMİ.....	32
4.1.1. Termokupl.....	33
4.1.2. Max6675.....	33
4.1.3. SSR (Solid State Relay).....	34
4.1.4. Rezistans.....	35
4.1.5. Mikrodenetleyici.....	35
4.1.6. Motor Sürücü.....	36
4.1.7. Dokunmatik Ekran.....	37
4.2. PID DENETLEYİCİ TASARIMI.....	37
4.3. YAZILIM.....	41
4.3.1. Anakart yazılımı.....	43
4.3.2. Ekran Yazılımı.....	45
4.4. MOTOR SÜRÜCÜ ALGORİTMASI.....	47
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61

KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	65



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Austin Teksas Üniversitesi'nde geliştirilen 3D yazıcı haberi.	5
Şekil 2.2. FDM teknolojisine sahip 3 boyutlu yazıcı.....	6
Şekil 2.3. Cura ile 3 boyutlu modeli dilimleme.....	7
Şekil 2.4. Filamentler.....	8
Şekil 2.5. 3 boyutlu yazıcı nozulu.....	9
Şekil 2.6. Filamentlerin karşılaştırılması [15].	10
Şekil 3.1. PlastikGranüller.	16
Şekil 3.2. Plastik ekstrüzyon makinesi.	16
Şekil 3.3. Plastik ekstrüzyon makinesi bölümleri.....	17
Şekil 3.4. Besleme haznesi.	19
Şekil 3.5. Motor.	20
Şekil 3.6. AC ve DC motorların karşılaştırılması [11].	20
Şekil 3.7. Kovan.....	21
Şekil 3.8. Ekstrüzyon vidaları.....	22
Şekil 3.9. Nozul.	23
Şekil 3.10. Ekstrüder redüktörü.	25
Şekil 3.11. Büte rulman montajlı redüktör.	25
Şekil 3.12. Seramik kelepçe rezistans.....	26
Şekil 3.13. Soğutucu montajlı ekstrüder sistemi.....	27
Şekil 3.14. Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan termokupl.....	29
Şekil 3.15. PID sıcaklık kontrol cihazı.	30
Şekil 4.1. Mini filament ekstrüzyon makinesi iç görseli.	31
Şekil 4.2. Denetim sisteminin genel şeması.	32
Şekil 4.3. K tipi termokupl.....	33
Şekil 4.4. Max6675 entegresi.	34
Şekil 4.5. SSR (Solid State Relay).....	34
Şekil 4.6. Kelepçe rezistans.	35
Şekil 4.7. Atmega2560 mikrodenetleyicisi.....	36
Şekil 4.8. VNH2SP30 motor sürücü.....	36
Şekil 4.9. Dokunmatik ekran.	37
Şekil 4.10. PID ile kapalı döngü sıcaklık kontrolü.	39
Şekil 4.11. Benzetim denemeleri.	40
Şekil 4.12. Yazılım akış diyagramı.....	42
Şekil 4.13. Visual Studio Code arayüzü.	43
Şekil 4.14. Nextion programlama editörü.....	45
Şekil 4.15. Dokunmatik ekran tasarımı.	46
Şekil 4.16. VNH2SP30 blok diyagramı [20].	48
Şekil 5.1. Mini filament ekstrüzyon makinesi [23].	49
Şekil 5.2. Makinenin ısınma aşaması.....	50
Şekil 5.3. Besleme haznesine eklenen hammadde.....	50
Şekil 5.4. Kovan temizleme işlemi.	51
Şekil 5.5. Filament çap sensörü.	52
Şekil 5.6. Mikrometre ile filament çap ölçümü.	52
Şekil 5.7. Üretilen filamentin makaraya sarılması.....	53
Şekil 5.8. 3 boyutlu yazıcı ile deneme baskısının üretilmesi.....	53
Şekil 5.9. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen baykuş figürü.	54

Şekil 5.10. Besleme haznesine eklenen PLA ve renk pigmenti karışımı.	55
Şekil 5.11. GümüşGri renkte üretilmiş PLA filament.	55
Şekil 5.12. GümüşGri filament ile üretilmiş baykuş figürü.....	56
Şekil 5.13. Başka bir markaya ait gümüşGri filament ile üretilmiş baykuş figürü.....	57
Şekil 5.14. 2 farklı filament ile baskısı alınan figürlerin karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.15. Zeytin çekirdeği katkılı ABSGranüller.....	58
Şekil 5.16. Katkılı filament için ısıl değerler.....	59
Şekil 5.17. Zeytin çekirdeği katkılı filament.	60



KISALTMALAR

PLA	Polilaktik asit
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
PETG	Polietilen Tereftalat
PP	Polipropen
HIPS	High Impact PolySyrene
NYLON	Poliheksametien Adipamid
TPE	Termoplastik Elastomer
PE	Polietilen
PA	Polyamid
PC	Polikarbonat
PVA	Polivinil Alkol
TPU	Termoplastik Poliüretan
WOOD	Ahşap Katkılı Filament
PS	Polystyrene
PID	Proportional Integral Derivative
C	Santigrat
Dev/Dk	Devir / Dakika
Mm	Mili metre
SSR	Solid State Relay
Sn	Saniye
Gr	Gram

ÖZET

FİLAMENT EKSTRÜZYON MAKİNELERİNDE PID İLE SICAKLIK DENETİMİ

Murat OFLEZER

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fen Bilimleri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Emin YILDIRIZ

Ocak 2022, 64 sayfa

Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan filamentler, ekstrüzyon makinelerinde üretilirler. Filament üretiminde genel olarak sıcaklık hassasiyeti büyük bir önem taşımaktadır. Filament üretim süreci dakikalar aldığından geleneksel PID denetimi aç - kapa röle veya kontaktör ile istenilen sıcaklık hassasiyeti elde edilmesi zordur. Bu cihazların sıcaklık ölçümleri hassas olsa bile; sistemin verdiği tepki ve ısıtıcı kontrollerinin filament ekstrüzyonuna uygun olmamasından dolayı, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ hassasiyet ile çalışmaktadırlar. Bu hassasiyet, filament ekstrüzyon sistemleri için oldukça düşüktür. Bunun sonucunda oluşan ısı dalgalanmaları sırasında eriyik plastikte yanma, kırılma, düşük çap hassasiyeti gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada SSR (Solid State Relay) çıkışı olan, hassas sıcaklık ölçümü kullanan, plastiğin sıcaklığını ayarlanan değerde $\pm 1^{\circ}\text{C}$ hassasiyette tutan bir PID denetleyicisi tasarlanmıştır. Geliştirilen ekstrüzyon makinesinde yapılan deneysel sonuçlar ile istenilen sıcaklık hassasiyeti elde edilmiş ve yüksek kalitede filament üretimi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Ekstrüzyon ile üretim, Filament üretimi, PID denetleyici tasarımı, Sıcaklık denetimi

ABSTRACT

IN FILAMENT EXTRUSION MACHINES TEMPERATURE CONTROL WITH PID

Murat OFLEZER

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Science

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Dr. Emin YILDIRIZ

January 2022, 64 pages

The filaments used in 3D printers are produced in extrusion machines. In general, temperature sensitivity is of great importance in filament production. Since the filament production process takes minutes, it is difficult to achieve the desired temperature sensitivity with traditional PID control on-off relay or contactor. Even if the temperature measurements of these devices are sensitive, they work with a sensitivity of $\pm 5^{\circ}\text{C}$, since the response of the system and the heater controls are not suitable for filament extrusion. This sensitivity is quite low for filament extrusion systems. As a result of this, problems such as burning, brittleness, low diameter sensitivity occur in the molten plastic during temperature fluctuations. In this study, a PID controller with SSR (Solid State Relay) output, using sensitive temperature measurement, keeping the temperature of the plastic at the adjusted value $\pm 1^{\circ}\text{C}$ was designed. With the experimental results made in the developed extrusion machine, the desired temperature sensitivity was achieved and high-quality filament production was realized.

Keywords: Extrusion production, Filament extrusion, PID controller design, Temperature control

1. GİRİŞ

Günümüzde eğitimden tekstile, sağlıktan inşaata kadar hemen hemen tüm sektörlerde 3B yazıcılar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat sistemleri içerisinde yer alan 3 boyutlu yazıcılar; bilgisayar ortamında modellenmiş katı model çizimlerini, fiziksel nesnelere dönüştüren makinelerdir [1]. Geleneksel imalat yöntemlerine göre; daha hızlı üretim yapılabilmesi, plastiğe şekil vermek için kalıp gereksinimi duymaması ve 3D modellerin üretiminde enjeksiyon sistemlerine göre daha detaylı olması 3 boyutlu yazıcıları günümüzde daha popüler kılmıştır [2].

3B yazıcıların ortaya çıktığı dönemlerde genel olarak prototip geliştirmek için kullanılmaktaydı. Fakat günümüzde artık, son ürün olarak 3 boyutlu yazıcıların çıktıları kullanılmaktadır. Özellikle son 10 yılda moda ve tekstil sektörlerinde dünyada ünlü moda tasarımcıları 3B boyutlu yazıcıları kullanarak ürün tasarımı yapmakta ve bu ürünleri prototip yerine son ürün olarak da kullanmaktadır [33], [34].

3B yazıcılar kullandıkları teknoloji ve malzemeye göre farklı kategorilere ayrılırlar [1]. Eklemeli imalat yöntemleri içerisinde yer alan 3 boyutlu yazıcılar, kompleks şekilleri ve enjeksiyonda yüksek üretim maliyeti gerektiren nesnelere üretmek için büyük avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda kişiselleştirilebilir üretim ile standart üretimin yanında kişiye özel üretime de öncülük etmektedir. 3 boyutlu üretimde Selective Lazer Sintering (SLS), Laminated Object Manufacturing (LOM), Fused Deposition Modeling (FDM) ve Stereolithography (SLA) teknolojilerinin kullanıldığı 3 boyutlu yazıcılar bulunmaktadır [26], [27], [28].

Bunlardan polimer türlerini kullanarak malzeme ekstrüzyonu işlemleri ile yazım yapan 3B yazıcılar günümüzde en yaygın kullanılanlarıdır. Bu 3B yazıcılara FDM teknolojisi denilmektedir. FDM teknolojisine sahip 3B yazıcılar; filament haline dönüşmüş olan polimerin sıcak nozuldan geçerek eriyik hale gelmesi ve 3D çizimin yatay katmanındaki g koduna göre hareket etmesi ile çalışmaktadır [3].

Filamentler, Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Butadin Stiren (ABS), naylon, reçine ve sağlamlığı arttırmak için bu malzemelere çeşitli katkı malzemeleri ekleyerek elde edilen farklı kompozit malzemeler ile üretilebilmektedirler [4], [25].

Bu malzemeler arasında çoğunlukla PLA ve ABS polimerleri tercih edilmektedir. Bu malzemelerin geri dönüşüm kabiliyetlerinin yüksek olması ve kolayca temin edilebilmesi, bu ürünlerin popülerliğinin artmasına neden olmuştur [3], [25].

PLA plastik türü ABS türüne göre daha fazla yüzey sertliğine sahiptir. Kırılabilirliği çok daha yüksektir ve sert bir malzemedir. PLA bükülmelerde, ABS plastik türüne göre daha çabuk kırılır. PLA filament türünden üretilen nesnelere üzerine yüzey işlemi yapılabilir, zımparalanabilir ve boyanabilir. Şeker kamışı ve mısır nişastası gibi doğal maddelerden üretilmediği için bitkisel bir plastik türüdür ve doğada kolaylıkla ayrışabilir [29], [30], [31].

Günümüzde kompozit malzemelerden filament üretimi hızla yükselmektedir. Kompozit malzemeler uzay, uçak, otomotiv, deniz malzemeleri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan hammadde türüne göre tek bir malzeme üzerinden sağlamlık, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına dayanıklılık, darbe dayanımı gibi özelliklerinin hepsi beklenmektedir. Bu istenen özelliklerin tek bir malzemede bulmak çok zordur. Kompozit malzemeler bu istenen özelliklerin hepsini bir arada barındırabilmektedir [35], [36], [37].

Kompozit filament karışımlarında, son yıllarda yaygın olarak karbon fiber katkıli filamentler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Karbon fiber katkıli filament ile 3 boyutlu yazıcılardan alınan baskılarda sağlamlık değeri, katkısiz PLA veya ABS filament türüne göre 3 kat daha fazladır. Bu tür kompozit filamentlerde en yaygın olarak Akrilo Nitril Bütadien Stiren (ABS), Poli Laktik Asit (PLA) amorf termoplastikler kullanılmaktadır [38], [39], [40].

Son zamanlarda elyaf katkıli filamentler de karbon fiber katkıli filamentler gibi araştırma konusu olmuştur. Bunun üzerine farklı çalışmalar yapılmıştır. Zhong ve arkadaşları [41], Ning ve arkadaşları [42] ve Tekinalp ve arkadaşları [43]'te elyaf katkıli ABS kompozit filamentler üzerine çalışmalar yapmışlardır. 3 boyutlu yazıcılar ile üretilebilirlik ve mekanik performanslarını incelemişlerdir.

3 boyutlu yazıcılar için filament üretiminde Polipropilen (PP) polimer türü de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit filament üretiminde de PP yaygın olarak kullanılmaktadır. Gray IV ve arkadaşları [44], [45] katkıli filament üretimi için termotropik sıvı kristal polimer (TLCP) lifleriyle PP telleri geliştirmişlerdir ve FDM tipi 3 boyutlu yazıcılarda baskı numuneleri almışlardır.

3 boyutlu ürün baskısının kaliteli ve hızlı olarak gerçekleşebilmesi için kullanılan filamentin de hassas bir üretimden geçmiş olması gerekir. İyi bir filament esnek, kırılabilirliği düşük, yüksek çap hassasiyeti (± 0.05 mm), camsı geçiş sıcaklığı ekstrüzyon sırasında bozulmamış ve filament rulosu boyunca polimerin eşit bir şekilde erimesi gibi kalite unsurunu yüksek oranda etkileyen özelliklerine sahip olması beklenir [5], [32]. Filament üretiminde, sıcaklık hassasiyeti, nozul çapı ve motor hız kontrolü büyük önem taşımaktadır.

Filamentler, filament ekstrüzyon makineleri ile üretilmektedirler. Filament ekstrüzyon makineleri genel olarak mil-kovan takımı, rulman kutusu, redüktör, motor, bağlantı elemanları, rezistanslar, besleme haznesi, nozul (çıkış ucu), PID denetleyici ve termistörlerden oluşmaktadır. Filament ekstrüzyon makinesi ile filament üretiminde, kullanılan hammadde türüne göre kovan iç sıcaklığının ve vida hızının hassas şekilde denetlenmesi gerekir [5]. Düşük iç sıcaklıkta polimerin tam erimemesi sonucu taneciklenme, renk dalgalanması, kırılabilir filament üretimi gibi sorunlar yaşanırken, yüksek iç sıcaklıkta polimerin kovan içinde yanması, polimerin bağ yapısının bozulması ve filamentte kırılabilirliğin artması gözlemlenebilir. Bu nedenle kovan iç sıcaklığının hassas şekilde denetlenmesi gerekir.

Günümüzde ekstrüzyon makinelerinde, denetim gereken her sistem için ortak elektronik bileşenler ile tasarlanmış ve standart yazılımlardan oluşan PID denetleyicileri kullanılmaktadır [10]. Genel olarak PID denetleyiciler; pistonlu basınç denetiminden, motor hız kontrolüne sıcaklık ölçmeye kadar çok fazla endüstriyel süreci desteklemek için tasarlanmışlardır [11], [12], [13]. Aynı zamanda bu PID denetleyicilerin tek bir termokupl girişi ve röle çıkışı vardır. Bu da çok noktadan ısıtıcı ekstrüzyon makinelerinde birden fazla PID denetleyicisinin kullanılmasını gerektirir. Kullanılan bu PID denetleyiciler filament ekstrüzyon proseslerinde yetersiz kalmaktadır. Bunun nedeni sıcaklık ölçüm hassasiyetlerinin $\pm 3^{\circ}\text{C}$ olması ve kovan üzerinde ayarlanan sıcaklık değerini $\pm 5^{\circ}\text{C}$ aralığında tutmalarıdır [10]. Bu hassasiyet değerleri de filament üretimi için düşük kalmaktadır. Bunun sonucunda da filamentte kırılabilirlik, yanma, taneciklenme gibi olumsuz durumlar ortaya çıkmaktadır ve 3 boyutlu yazıcılarda üretim sırasında kaliteyi düşüren unsurların başında gelmektedir.

Bu tezin konusu olan “filament ekstrüzyon makinelerinde PID ile sıcaklık denetimi” çalışması, filament ekstrüzyon makinelerinde kullanılan PID denetleyicilerin alternatifi olarak yüksek termokupl ölçüm hassasiyeti ile çalışabilen ve kovan sıcaklığını $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle tutan bir sistem tasarımı üzerinedir. Bu sistem, 4 adet termokupl girişi, 4 adet SSR çıkışını, motor sürücü ve harici motor sürücü çıkışlarını ve dokunmatik üzerinden sistemin basit bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Tasarlanan sistemin sıcaklık kontrolünün $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle yapılması için PID algoritması üzerine inşa edilmiştir. 4 adet sıcaklık giriş ve 4 adet kontrol çıkışı olduğu için aynı anda 4 adet PID algoritması çalışmaktadır. Ekran üzerinden de hem hazır sıcaklık profilleri üzerinden hem de elle sıcaklık girişi menüsü sayesinde kolay bir şekilde kontrol işlemi yapılabilmektedir.

Bu tezde geliştirilen sistemin denemeleri, 2 bölgeli ısıtmaya sahip mini bir filament ekstrüzyon makinesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Günümüzde 3 boyutlu yazıcılarda sıkça tercih edilen bir filament türü olarak PLA filamentler üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Tezin içeriğinden bahsetmek gerekirse; 2. bölümde 3 boyutlu yazıcıların kullanım alanlarından, üretim proseslerinden ve tasarlanan nesnelerin gcode formatına dönüştürülmesinden bahsedilmiştir. Aynı zamanda 3 boyutlu yazıcıların hammaddesi olan filamentlerde ve filamentlerin karşılaştırılmalarından bahsedilmiştir. 3. bölümde filament üretim teknikleri üzerinden durulmuştur. Filament üretiminde kullanılan filament ekstrüzyon makinesinin bölümlerinden bahsedilmiştir. 4. bölüm de materyal metod başlığı altında ise sistemin geliştirilmesinde uygulanan adımlardan bahsedilmiştir. Sistem çalışma mantığı ve komponentler hakkında bilgiler verilmiştir. 5. bölümde deneysel bulgular kısmında ise geliştirilen sistemin, mini filament makinesi üzerinde testlerine, standart PID denetleyiciler ile aralarındaki farklar, filament üretim denemeleri ve 3d baskı örnekleri üzerine bahsedilmiştir. 6. bölümde çalışmanın sonuç kısmından ve başarı ölçütlerinden bahsedilmiştir.

2. 3 BOYUTLU YAZICILAR VE FİLAMENTLER

2.1. 3 Boyutlu Yazıcılar

3 boyutlu yazıcılar bilgisayar ortamında tasarlanmış 3 boyutlu modelleri katı forma dönüştüren makinelerdir. Günümüzde 3 boyutlu yazıcılar tekstilden sağlığa birçok alanda kullanılmaktadır. 3 boyutlu yazıcıların günümüzde popüler olmasının başında 3 boyutlu tasarımların hızlı bir şekilde fiziksel nesnelere dönüştürülmesidir.

3 boyutlu yazıcıların tarihi 1980'li yıllara dayanmaktadır. İlk çalışmalarda biri Charles HULL tarafından 1984 yılında yapılmıştır ve 1986 yılında 3 boyutlu yazıcılar üzerine çalışma yapan ilk şirket kurulmuştur. Bu şirket tarafından ilk yazıcı 1988 yılında üretilmiş ve satışa sunulmuştur [22]. 1990'lı yıllarda Austin Teksas Üniversitesi'nde de 3 boyutlu yazıcılar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar gazetelere konu olmuştur. Şekil 2.1'de Austin Teksas Üniversitesi'nde geliştirilen 3D yazıcı ile ilgili bir gazete kupürünün görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Austin Teksas Üniversitesi'nde geliştirilen 3D yazıcı haberi.

Sanayi devriminden sonra 3 boyutlu yazıcıların kullanımı hızla artmıştır. 3 boyutlu yazıcıların üretimde kullanılmasının avantajlarından bazılarını; geniş kullanım alanlarına sahip olmaları, zaman ve maliyet açısından büyük kazanç sağlamaları, 3D modellerde geometrik özgürlük sunmaları, özellikle kullanılan geri dönüşümlü malzemeler içe çevre dostu olmaları, bilgisayar üzerinden çizilen nesnelere hızlı bir şekilde fiziksel objeye dönüştürmeleri olarak sıralayabiliriz [22].

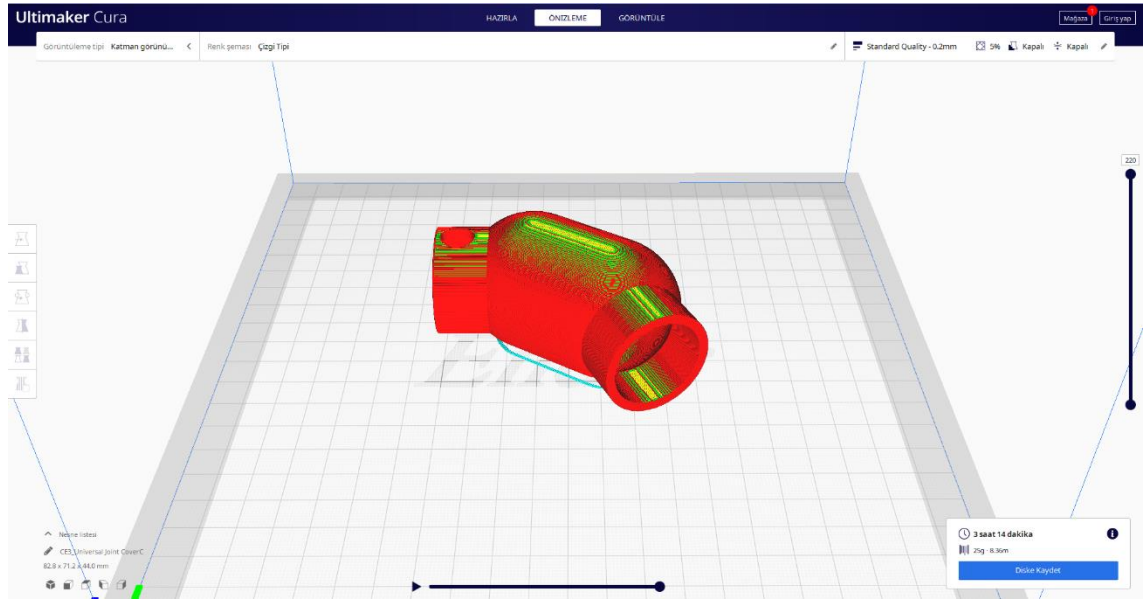
3 boyutlu yazıcılar seri üretim öncesi prototipleme için de birçok sektörde kullanılmaktadır. 3 boyutlu yazıcıların hemen hemen hepsi kullanılan malzemelerin (plastik, porselen, reçine vb.) katmanlar halinde birbirine eklenmesi ile üretim yaparlar. Bu üretim şekline katmanlı imalat yöntemi denilmektedir. 3B yazıcılar kullandıkları teknoloji ve malzemeye göre farklı kategorilere ayrılırlar. Bu kategorilerden bazıları; Bağlayıcı Püskürtmeli, Doğrudan Enerji Biriktirmeli, Malzeme Ekstrüzyonu, Malzeme Jeti, Toz Yatak Füzyonu, Sac Laminasyonu ve Fotopolimerizasyonu'dur [1]. Bu 3 boyutlu yazıcı ile üretim teknikleri arasında polimer türlerini kullanarak malzeme ekstrüzyonu işlemi ile yazım yapan 3B yazıcılar günümüzde en yaygın kullanılanlarıdır. Bu 3B yazıcılara FDM teknolojisi denilmektedir. Şekil 2.2'de FDM teknolojisine sahip bir 3 boyutlu yazıcının görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.2. FDM teknolojisine sahip 3 boyutlu yazıcı.

FDM teknolojisine sahip 3 boyutlu yazıcıların hammaddelerine(kartuşlarına) filament denilmektedir. FDM 3 boyutlu yazıcılar, filamentin belirli bir sıcaklıkta eritilerek eriyik plastiğin baskı tablası üzerine katmanlar halinde akıtılarak üretim yapma prensibine göre çalışmaktadır. Bilgisayar üzerinde çizim yapılan 3 boyutlu modeller bir dilimleyici program kullanılarak katman katman gcode'ları çıkarılmaktadır. Daha sonra bu gcode dosyası 3 boyutlu yazıcıya yüklenerek üretim işlemi başlamaktadır.

3 boyutlu modellerin gcode'lara çevrilmesi işlemine dilimleme denilmektedir. Dilimleme programları arasında en fazla açık kaynak kodlu ve birçok 3 boyutlu yazıcıya uygun olması sebebi ile Cura yazılımı kullanılmaktadır. Bu yazılım birçok yazıcı firması tarafından desteklenmektedir. Üreticiler yazıcı boyutlarının ve motor hızlarının bulunduğu profilleri oluşturmaktadır. Kullanıcılar bu profiller sayesinde tek bir yazılım üzerinden birden farklı markanın yazıcısını kontrol edebilirler ve çizimlerini özelleştirme imkanına sahip olabilirler. Şekil 2.3'de Cura yazılımının dilimleme görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.3. Cura ile 3 boyutlu modeli dilimleme.

Bu program üzerinden sıcaklık değerleri, malzemenin türü, makinenin üretim hızı, katman yüksekliği, katman genişliği vb. değerler ayarlanmaktadır. Üretim için 3 boyutlu nesnenin makine koduna (gcode) dönüştürmekte ve bu şekilde yazıcı üretime başlamaktadır.

FDM 3 boyutlu yazıcılar ile üretimde filamentler kullanılmaktadır. Günümüzde filamentler evrensel olarak 1.75 mm ve 2.85 mm çapında üretilmektedir. Filamentlerin hammaddesi polimerlerdir. Filamentler plastik enjeksiyon yöntemleri ile üretilmektedir. Filamentler PLA, ABS, PETG, PP, HIPS, NYLON, TPE, TPU, WOOD, PS, PE, PA vb. plastik türlerinde üretim yapılmaktadır [5].

2.2. Filamentler

Filamentler, 3 boyutlu yazıcıların hammaddeleridir. Filamentler, filament ekstrüzyon makineleri ile üretilmektedirler. Filament üretim prosesi 4 adımdan oluşmaktadır. Bu adımlardan ilki plastik malzemenin ekstrüder ile ısı ile eritilip, eriyik hale dönüştürülmesidir. İkinci adım ise soğutma işlemidir. Eriyik haldeki filamentin su veya hava ile soğutulup katı forma dönüştürülmesi sağlanmış olur. Su ile soğutma sisteminde iki adet su havuzu kullanılır. İlk su havuzu 60 - 80°C aralığında, ikinci su havuzu ise 30-50°C aralığındaki sudur. Bu iki su havuzunun sıcaklık değerinin farklı olmasının sebebi filamentin birden soğuyup kırılgan bir yapıya sahip olmasını önlemektir [11]. Üçüncü adım ise filamentin çapının ölçüldüğü alandır. Bu adımda lazer veya temaslı kalınlık ölçerler ise filamentin çap ölçümü gerçekleşir ve filament çapının ± 0.05 mm olması sağlanmaktadır. Son adım ise filamentlerin istiflendiği makara sarım sistemidir. Bu adımda soğutulmuş ve çap kontrolü yapılmış filamentin makara etrafına düzenli olarak sarılması gerçekleşir. Bu adımdan sonra filament kullanılmaya hazırdır. Şekil 2.4'de filamentlerin görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.4. Filamentler.

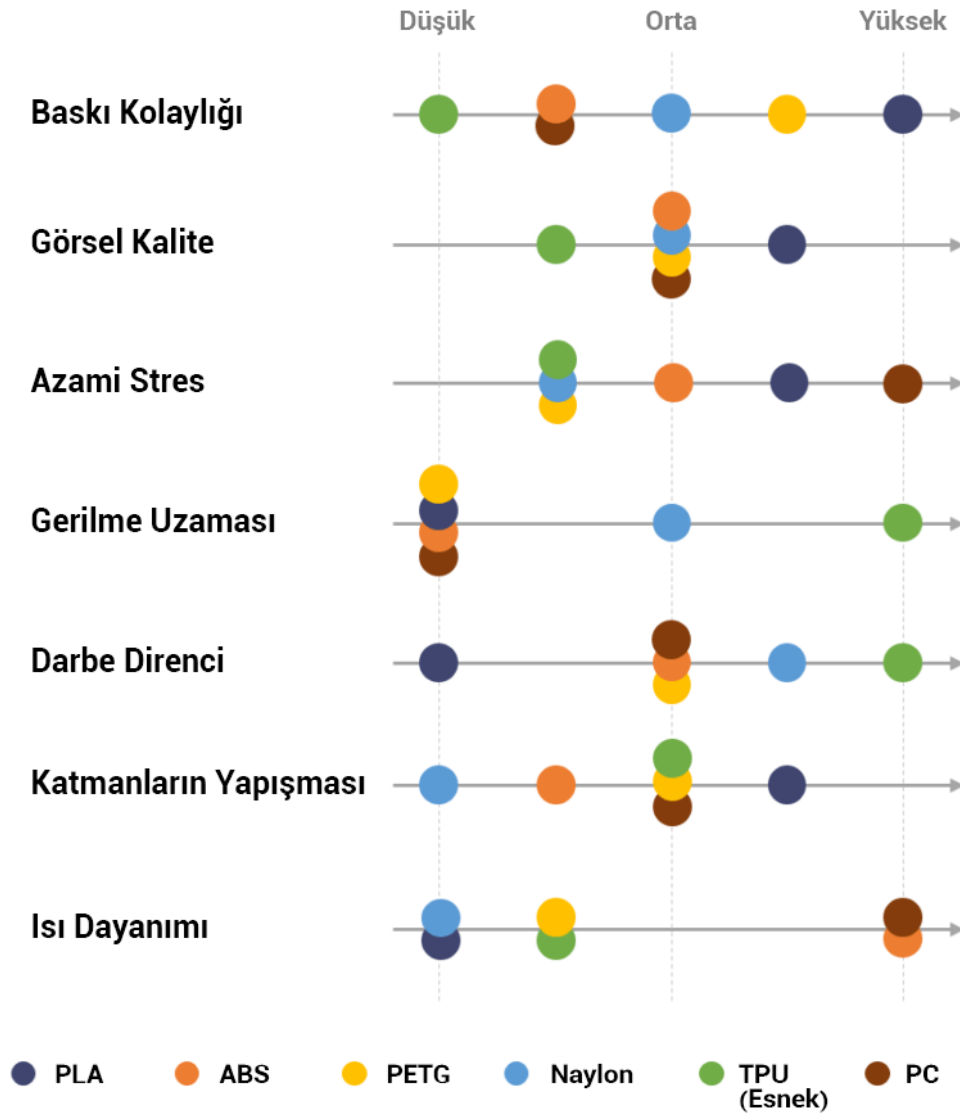
3 boyutlu yazıcılarda kullanılan filamentler yazıcı üreticilerinin tercihine göre dünya çapında standart çap kalınlıklarında üretilmektedirler. Bu çap kalınlıkları, 1.75 mm, 2.85 mm ve 3 mm şeklindedir. 3 boyutlu ürün baskısının kaliteli ve hızlı olarak gerçekleşebilmesi için kullanılan filamentin de hassas bir üretimden geçmiş olması gerekir. İyi bir filament esnek, kırılabilirliği düşük, yüksek çap hassasiyeti (± 0.05 mm), camsı geçiş sıcaklığı ekstrüzyon sırasında bozulmamış ve filament rulosu boyunca polimerin eşit bir şekilde erimesi gibi kalite unsurunu yüksek oranda etkileyen özelliklerine sahip olması beklenir [5]. Çap hassasiyetleri 3 boyutlu üretimdeki kalite ile doğru orantılıdır. 3 boyutlu yazıcı teknolojisi plastiği eritip katmanlar halinde yapıştırdığı için eriyen plastik miktarının da her katmanda aynı olması gereklidir.

3 boyutlu yazıcıların plastiğin eritilip çıkan nozul ucu farklı ölçülere sahip olmaktadır. Bu ölçüler 0.1 mm'den başlayarak 1.2 mm'ye kadar çıkmaktadır. Bu nozul genişliklerine göre eriyik filamentin akış oranı değişmektedir. Nozul ucunun genişliğine göre de yazıcıların hız ve kalite grafikleri değişmektedir. Yazıcı üreticileri kalite ve hız eğrisini optimum seviyede tutmak için genel olarak 0.4 mm genişliğinde nozul uçları kullanmaktadır. Kullanıcılar daha sonra bu nozul uçlarını 3 boyutlu baskı uygulamalarına göre değiştirebilmektedir. Nozul ucu ne kadar geniş ise baskı hızı o kadar artar ve yüzey kalitesi de buna bağlı olarak azalır. Nozul ucu ne kadar dar ise baskı hızı o kadar azalır ve baskı kalitesi de buna bağlı olarak artar. Şekil 2.5'de 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan nozul ucunun görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.5. 3 boyutlu yazıcı nozulu.

Filamentler eklenen katkılarına göre farklı karakteristik özelliklere sahip olurlar. Örnek vermek gerekirse PC/ABS filament türü üretim sırasın PC (Polikarbonat) ve ABS (Akrilonitril Butadin Stiren) plastik granüllerinin belirli oranlarla üretilmiş bir filament türüdür. Filamentler farklı katkı maddeleri ile üretildiği gibi farklı renklerde de üretim yapılmaktadır. Filament türünün seçimi yapılırken 3 boyutlu yazıcıdan baskı alınacak nesnenin kullanım alanı, ortam sıcaklığı ve yüzey parlaklığına dikkat edilmelidir. Filamentlerin türleri belirli özelliklere göre karşılaştırılabilir. Bu karşılaştırma özelliklerinde bazıları Baskı Kolaylığı, Görsel Kalite, Azami Stres, Gerilme Uzaması, Darbe Direnci, Katmanların Yapışması ve Isı Dayanımıdır. Şekil 2.6’da günümüzde yaygın olarak kullanılan filament türlerinin özelliklerinin karşılaştırma grafiğine yer verilmiştir [15].



Şekil 2.6. Filamentlerin karşılaştırılması [15].

Günümüzde 3 boyutlu yazılarda üretilecek modelin kullanım alanına göre değişmekte olup bu filament türleri arasında hızlı ve kolay üretim yapılabildiği için PLA (Polilaktik Asit), ABS (Akrilonitril Butadin Stiren) ve PETG (Polietilen Tereftalat) filamentler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra HIPS, TPU, PC, PVA, STH, gibi polimer türlerin yapılan filamentler de tercih edilmektedir. Bu filament türlerine farklı karışım maddeleri ve renklerde eklenerek yeni türler ortaya çıkmaktadır [4].

2.2.1. Filamentlerin Karakteristik Özellikleri

Filamentler üretildikleri hammaddelere göre farklı karakteristik özelliklere sahip olurlar. 3 boyutlu yazıcılarda üretilecek nesnelere için filament seçimleri kullanım alanlarına göre değişmektedir. Aşağıda bazı filament türlerinin karakteristik özelliklerine yer verilmiştir.

ABS Filamentler;

- Sertlik dereceleri çok yüksektir, bu sebepten dolayı darbelere karşı yüksek direnç göstermektedirler.
- Diğer filament türleri ile kıyaslandığında esneklik dereceleri düşüktür. Baskının genişliği ile orantılı olarak esneklikleri düşer.
- Aseton buharı ile çözümlenebilir. Katman izlerini giderilmesi istenilen durumlarda aseton ile yüzeyi pürüzsüzleştirilebilir.
- ABS petrolden üretilmiş bir malzeme olduğu için gıda ile kullanımı uygun değildir.
- 3 boyutlu yazıcılarda baskı sıcaklığı 220°C - 240°C arasındadır.
- 3 boyutlu yazıcılarda baskı sırasında çevresel faktörlerden çok fazla etkilenirler. Bu yüzden kapalı kasa yazıcılar ile üretime daha uygundur.
- Tabla yüzeyi sıcaklığı 80°C - 120°C arasında olması üretim kalitesi açısından çok önemlidir.
- 3 boyutlu baskıların kaliteli olabilmesi için tabla kalibrasyonunun çok iyi olması gereklidir. Aksi halde tabladan kalkma yapabilir ve baskı yarıda kalır.

PLA Filamentler;

- PLA filamentler genel olarak sertte dönük bir yapısı vardır. Darbelere karşı direnç ABS filamentlere göre daha düşüktür.
- Esneklik değerleri ABS filamentlerden biraz daha fazladır fakat yine de kırılğan bir yapıya sahiptir.
- PLA filamentler mısır nişastası veya şeker kamışından üretilmektedir. Bu yönüyle doğada çözünebilir ve çevre dostudur.
- 3 boyutlu yazıcılarda baskı sıcaklığı 180°C - 220°C arasındadır.
- Baskı sırasında fan ile soğutma yapılarak yüzey kalitesi artar, ABS filament ile kıyaslandığında baskı sırasında çevresel faktörlerden etkilenmezler.
- Tabla yüzeyi sıcaklığı 50°C - 70°C arasında olabilir. Tabla yüzeyine yapıştırıcı sürüldüğü uygulamalarda tablanın ısıtılmasına gerek kalmaz.
- Tabla kalibrasyonu alt taban kalitesinin artması için önemlidir.

PETG Filamentler;

- PETG filamentlerin sertlik dereceleri ABS filamentlere göre daha düşüktür. Buna rağmen hem esneklik hem de darbe emiliminin yüksek olması sebebi ile ABS filamentlere bir alternatif olarak gösterilebilir.
- PETG filamentler, ABS ve PLA'dan daha esnek bir yapıya sahiptir.
- Gıdaya uygundur. Hatta günlük hayatta kullandığımız pet şişeler, damacaneler, bidonlar genellikle PETG hammaddeden üretilmektedir.
- 3 boyutlu yazıcılarda baskı sıcaklığı 220°C - 250°C arasındadır.
- 3 boyutlu yazıcılarda baskı sırasında çevresel faktörlerden ABS filamentlere göre daha az etkilenirler.
- Tabla yüzeyi sıcaklığı 70°C - 80°C arasında olabilir. Tabla yüzeyine ek bir yapıştırıcı sürülmesi baskı kalitesi açısından önemlidir.
- PETG esnek bir polimer türü olduğu için tabla kalibrasyonu ilk katmanın her yüzeyinin tam yapışması için önemlidir.

PLA filamentlerin üretimi diğer türler ile kıyaslandığında daha kolaydır. ABS hammaddelerden filament üretimi sırasında gaz açığa çıkar. Hızlı üretimlerde bu gaz alınmaz ise filamentin içinde baloncuklar oluşturur ve 3 boyutlu yazıcılarda baskı sırasında yüzey kalitesinin düşük olması, baskı sırasında nozulun tıkanması vb. sorunlara sebep olur. Mini ekstrüzyon makinelerinde boyutlarından dolayı genel olarak kovan üzerinde gaz alma odaları bulunmaz. Kovan uzunluğu kısa olduğu için bu gaz beslemeye doğru ilerler ve üretim sırasında baloncuk oluşumunu azaltır.

PETG filamentlerin üretim prosesi ise PLA filamentlere benzer. Nemden arındırılmış kaliteli bir hammadde ile kolay bir şekilde filament üretimi gerçekleştirilmektedir.

Bu tezin konusu olan “Filament Ekstrüzyon Makineleri için PID Kontrol Cihazı” üretim denemelerinde, yaygın kullanımı ve üretimi fazla olan PLA (Polilaktik Asit) Filamentler üzerinde çalışılmıştır.

3. FİLAMENT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Polimer, en kısa tabirle basit moleküllerin farklı kimyasal bağlar ile birleşmesi sonucunda oluşan yüksek molekül yoğunluğuna sahip maddeler olarak değerlendirilebilir. Polimerlerin bulunması ve kullanılmaya başlanması 1800'lü yıllara dayanmaktadır. Polimerler endüstri alanlarında türlerine göre, kauçuklar, fiberler ve plastikler şeklinde 3 ana gruba ayrılmaktadırlar [11]. Bu polimer türleri içinden plastikler üzerinde durulacaktır. Plastikler kendi içlerinde farklı özelliklere sahiptirler. Aşağıda maddeler halinde kısaca plastiklerin özelliklerine yer verilmiştir;

- Plastikler genellikle renksizdirler. Üretimi yapılacak nesneye göre üretim sırasında renklendirmeler yapılmaktadır.
- Plastiklerin elektriksel iletkenliği genellikle zayıftır. Bazı uygulamalarda elektriği yalıtması amacı ile kullanılmaktadır.
- Plastik çoğu malzemeden hafiftirler, yoğunlukları genel olarak 0,9 - 2,6 g/cm³ arasındadır.
- Isı iletkenlikle metallere göre düşüktür.
- Isıl genleşme katsayıları metallere göre çok daha fazladır.
- Kimyasal maddelere karşı metallere nazaran daha dayanıklıdır.

Günümüzde plastik malzemeler çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır ve günden güne kullanım alanları artmaktadır. Plastiğin kullanım alanları arasında 3 boyutlu yazıcılar önemli bir yere sahiptir.

Plastiklerin üretime hazır hale gelmesi sürecinde plastiğe katkı maddeleri eklenerek karışımlar oluşturulmaktadır. Bu karışımlar genellikle granül, hamur ve toz şeklinde olabilir ve üretim tekniğine göre değişiklikler gösterebilir. Plastiğin üretim yöntemine karar verilirken, üretilecek plastiklerin boyutları, maliyeti, fonksiyonelliği, üretim adedine karar verilmektedir. Kullanım alanlarına göre plastik türleri ve plastiğin işleme yöntemleri değişmektedir [11], [5].

Plastik üretim yöntemleri aşağıda maddeler halinde gösterilmiştir;

- Basma ile Kalıplama
- Enjeksiyon ile Kalıplama
- Ekstrüzyon ile Kalıplama
- Döner Kalıplama
- Isıl Şekillendirme
- Döküm Kalıplama
- Köpürtme Yöntemi
- Şişirme Yöntemi
- Transfer Kalıplama

Bu yöntemler üretilecek nesnenin şekline ve kullanım alanına göre değişmektedir. Filamentlerin üretiminde plastik ekstrüzyon yöntemi kullanılmaktadır.

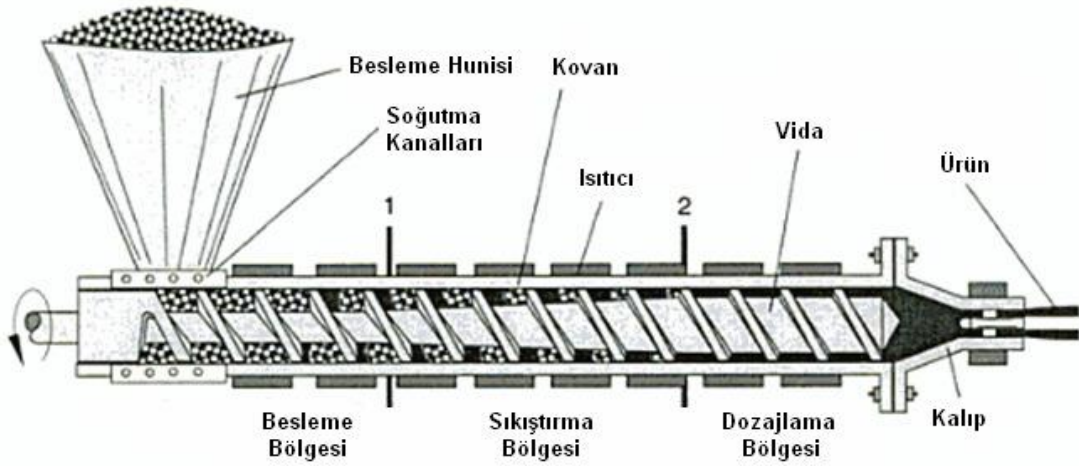
3.1. Filament Ekstrüzyon Makineleri

Plastiğin bir mil yardımıyla kovan içerisindeki sıcak bölgeye doğru itilmesi ve nozul tarafından belirli bir şekilde eriyik hale dönüşmesine ekstrüzyon denilmektedir. Ekstrüderler, plastik üretim sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekstrüzyon makinesi ilk olarak 1935 yılında Almanya'nın Hannover şehrinde Paul Troester Maschinenfabrik firması tarafından yapılmıştır. Plastik ekstrüzyon makineleri tek veya çift vidalı olarak 2'ye ayrılmaktadır [11], [5]. Çift vidalı ekstrüzyon makineleri farklı türden malzeme türünden oluşan plastiklerin üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Bunlara granül ve toz halindeki plastiklerin karıştırılarak üretim yapılmasını örnek gösterebiliriz. Tek vidalı ekstrüzyon makineleri ise genelde granül halindeki plastik ile yine granül halindeki boyar madde veya katkı maddelerini karışımı ile üretim yapılması gereken yerlerde kullanılmaktadır. 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan filamentlerin üretimi de ekstrüzyon makineleri ile yapılmaktadır. Filamentin içeriğinde genel olarak granül halindeki plastik ham madde (PLA, ABS, PETG vb.) ve yine granül halindeki boyar madde bulunmaktadır. Şekil 3.1'de granüllerin görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.1. Plastik granüller.

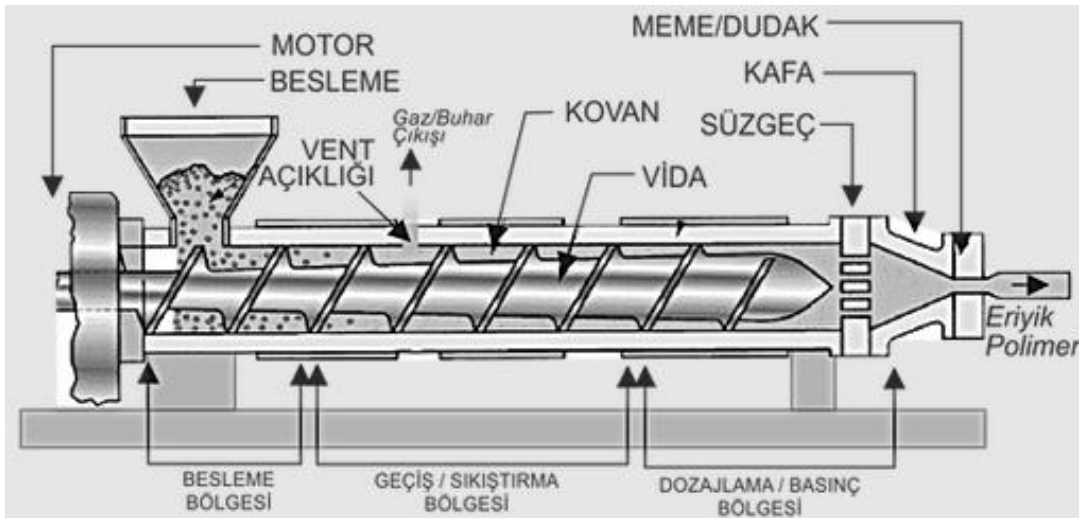
Ekstrüzyon makineleri genel olarak mil-kovan takımı, rulman kutusu, soğutma kanalları, redüktör, motor, bağlantı elemanları, rezistanslar, besleme haznesi, nozul (çıkış ucu), PID denetleyici ve termistörlerden oluşmaktadır. 3.3. Ekstrederdi kullanılan komponentler bölümünde tüm parçalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Şekil 3.2’de ekstrüzyon makinelerinin görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.2. Plastik ekstrüzyon makinesi.

3.2. Filament Ekstrüzyon Makinelerinin Bölümleri

Plastik ekstrüzyon makineleri plastik işleme yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Genel olarak çalışma mantıkları granül veya toz halindeki plastiği vida yardımı ile eritme bölgesine iterek eriyik haldeki plastiğin nozul ucundan çıkmasını sağlamaktır. Kullanım şekillerine göre tek vidalı ve çift vidalı olarak 2'ye ayrılmaktadırlar [18]. 3 boyutlu yazıcıların kartuşu olan filamentler de tek vidalı ekstrüzyon makineleri ile üretilmektedir. Tezin konusu olan PID kontrol denetiminde uygulama alanı filamentler olduğu için tek vidalı ekstrüzyon makineleri üzerinde durulacaktır. Tek vidalı ekstrüzyon makinelerinde kullanılan mekanik malzemeler üretilen plastik türüne, şekline göre değişmekte olup çoğunlukla ortak malzemeler kullanılmaktadır. Ekstrüderlerin genel olarak 3 farklı çalışma bölgesi vardır. Bu bölgeler besleme bölgesi, eritme (sıkıştırma) bölgesi ve plastikleştirme (basınç) bölgeleridir. Besleme bölgesi granül, toz veya hamur halindeki plastiğin eklendiği kısımdır. Bu kısma eklenen katı formdaki plastik ileriye doğru sürülerek sıkıştırma bölgesine ulaşır. Bu kısımdaki rezistanslar sayesinde plastik yumuşatılır ve plastikleştirme bölgesine doğru sürülür bu kısımdaki rezistanslarda plastiği hamur kıvamına ve akışkan hale getirir. Bu kısımda plastik nozula doğru sürülür ve nozuldaki eriyik haldeki plastik çıkarılır. Nozul ucunda malzemeye şekil verilerek soğutma ve işleme bölümüne aktarılır [5], [11], [18]. Şekil 3.3'de Plastik ekstrüzyon makinesinin görseline yer verilmiştir.



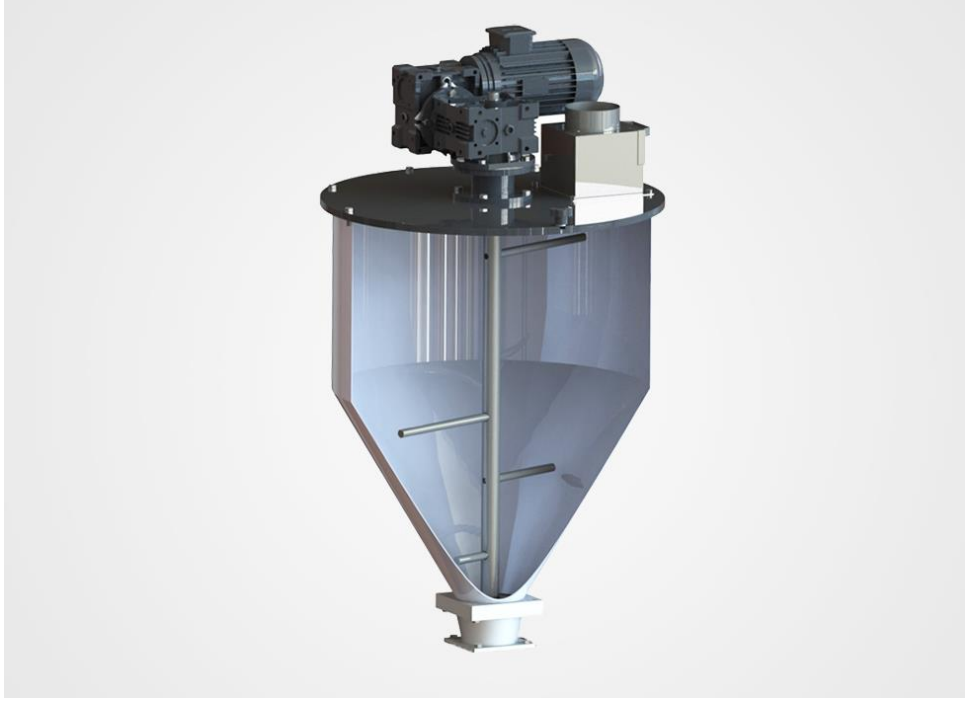
Şekil 3.3. Plastik ekstrüzyon makinesi bölümleri.

3.3. Ekstrüderlerde Kullanılan Komponentler

Ekstrüzyon makineleri üretim prosesine göre farklı komponentlerden oluşmaktadırlar. Ekstrüderin üretim prosesine uygun ve daha verimli çalışabilmesi için seçilecek komponentler çok önemlidir. Üretim sonucunda çıkan mamulün (eriyik plastik) kalitesi kullanılan hammadde, sıcaklık, motor hızı ve çıkış ucuna bağlıdır. Bu tezin amaçlarından birisi de malzemenin sıcaklığa bağlı yanma, kırılma, yüzey kalitesi gibi plastiği doğrudan etkileyecek etkenleri düzeltmek ve kaliteyi artırmaktır [5], [11]. Bu kısımda tek vidalı ekstrüderlerde kullanılan komponentlerden bahsedilecektir.

3.3.1. Besleme Haznesi

Besleme haznesi ekstrüzyon makinelerinde granül, toz veya hamur halindeki plastik malzemenin ekstrüzyon makinesini beslediği kısımdır. Malzeme akışını hızlandırmak ve tıkanmaları önlemek için konik bir şekilde yapılırlar. Konik şeklinden dolayı bazı kaynaklarda besleme hunisi adı da verilmektedir [11]. Malzeme yer çekimi kuvvetinin de etkisiyle sorunsuz bir şekilde kovanın besleme bölgesine aktarılırlar. Bazı besleme haznelerinde toz ve granül karışımlarında homojen bir üretim yapılması için motor ve karıştırıcı miller yer almaktadır. Aynı zamanda geri dönüştürülmüş hurda plastikler ve ham plastiğin karıştırılması için de karıştırıcı millerin kullanılması gereklidir. Besleme haznesi içindeki ham plastik malzemeler ekstrüzyon makinesinin hızına bağlı olarak sürekli azalmaktadır. Plastik malzeme oranı düştükçe besleme haznesine sürekli ekleme yapılması gerekmektedir. Eğer haznedeki malzeme çok fazla azalırsa yeterli basınç olmayacağı için ekstrüderin nozul ucundan çıkan malzemenin kalitesi düşecektir. Besleme haznesine eklenecek malzemeler bir operatör ile ya da hazneye bağlı bir hortum ve kompresörler yardımı ile yapılmaktadır. Bazı besleme haznelerinde nem alıcı modüller de bulunmaktadır. Plastiğin daha kaliteli bir şekilde işlenebilmesi için nemden tamamen arınması gereklidir. Plastiğin içerisinde nem olursa üretim sonucu çıkan eriyik plastikte hava kabarcıklarına ve buna bağlı olarak kırılmalar yaşanabilir. Kurutmalı besleme hazneleri hazneye bağlanan sıcak hava hortumları ile hazne içerisine sıcak hava verirler ve diğer bir hortum da vakum etkisi ile plastiğin içerisindeki nemi hapseder. Aynı zamanda da hazne içerisinde bulunan karıştırma mili sayesinde plastik hammaddenin içerisindeki nemin homojen bir şekilde alınıp malzemelerin kurutulmasını sağlamaktadır. Şekil 3.4'te üzerinde karıştırma mili bulunan bir besleme haznesinin görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.4. Besleme haznesi.

3.3.2. Motor ve Sürücü

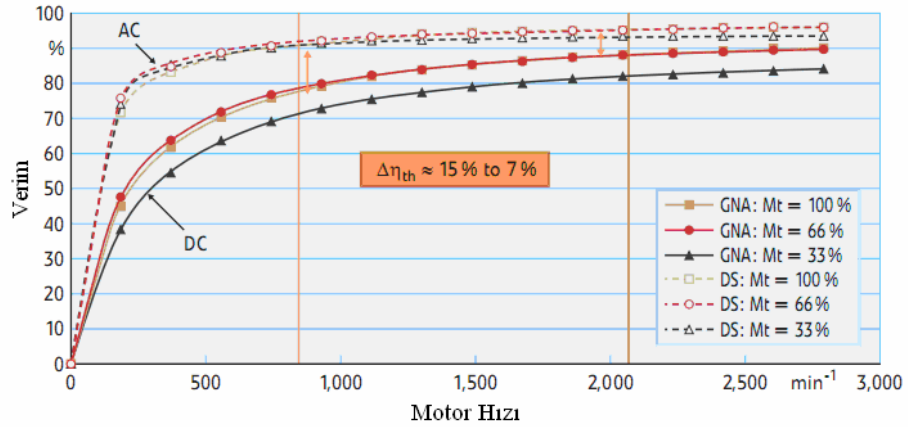
Ekstrüder motorunun görevi, ekstrüder sistemlerinde bulunan malzemeyi besleme bölgesinden nozul ucuna kadar ilerleten milin dönmesini sağlamaktır. Ekstrüzyon makinelerinde vidanın dönme hızının hassas bir biçimde kontrol edilmesi ve hızının sabit tutulması çok önemlidir. Hız kontrolü eğer hassas olmazsa ekstrüzyonu yapılan malzemenin nozul ucundaki basıncı değişeceği için üretimde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Özellikle ince kalınlığa sahip ürünlerde çap dalgalanmaları çok daha fazla yaşanmaktadır. Örnek vermek gerekirse, bu tezin konusu olan filament üretiminde bu dalgalanma sonucunda 1.75 mm üretilmesi gereken filamentin çapında dalgalanmalara sebep olacaktır ve bu durumda 3 boyutlu yazıcılardaki üretim kalitesini düşürecektir.

Motor ve motor sürücü birbirleri ile uyumlu olacak şekilde seçilmelidir. Motor sürücünün motoru hassas bir biçimde sürmesinin yanında yüksek hızlara çıkabilmesi ve hız/tork dengesinin sağlanması gerekmektedir. Tek vidalı ekstrüderler motoru hızı ortalama 1800 dev/dk, vidanın hızı ise kullanılan redüktör tahvil oranına göre ve üretim prosesine bağlı değişmekte olup ortalama 100 dev/dk'dır [11], [18]. Şekil 3.5'de ekstrüzyon makinelerinde kullanılan motor görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.5. Motor.

Ekstrüzyon makinelerinde çok farklı tipte motor kullanılabilir. Genel olarak endüstriyel hatlarda alternatif akım (AC) motor ve motor sürücülerini kullanılırken mini ekstrüzyon makinelerinde doğru akım (DC) motor ve motor sürücülerini kullanılmaktadır. AC motorların verimlilikleri DC motorlara göre daha yüksektir. DC motorların ise kapladıkları alan ve hız hassasiyeti AC motorlara göre daha yüksektir. Bu tezin deneylerinde mini bir filament ekstrüzyon makinesi kullanıldığı için DC motor yer almaktadır. Şekil 3.6’da Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan 44 kW gücündeki iki AC ve DC motorun tork/verimlilik değerlerine yer verilmiştir [11], [19].



Şekil 3.6. AC ve DC motorların karşılaştırılması [11].

3.3.3. Kovan

Kovan, ekstrüzyon makinelerinin en temel parçalarından biridir. Kovanın görevi genel olarak ekstrüder vidasını yataklamak, ısı iletkenliği sayesinde plastiğin eritilmesini sağlamak, ısı değişimlerini azaltarak plastik malzemenin her tarafının eşit ısıtılmasını sağlamaktır. Kovanlar yüksek basınç altında çalışmak için tasarlanmıştır. Ömürlerinin uzun olması ve uzun saatler boyunca çalışabilmeleri için aşınma ve korozyon direnci yüksek iç ve dış yüzeye sahip olmaları gerekmektedir [11].

Kovanların yüzeylerinin sertleştirilmesi ve aşınmaların önlenmesi amacıyla nitrasyon işlemi yapılmaktadır. Nitrasyon işlemi ile nitrürlenmiş kovanlar, daha sert ve çizilmelere karşı daha dayanıklı hale gelirler. Kovanların maliyetleri vidaya göre çok daha fazla olduğu için bu işlem kovanların eskimemesi ve zarar görmemesi için çok önemlidir. Kovanların kalınlıkları ve uzunlukları üretilecek malzemeye göre değişmektedir. Et kalınlığı düşük olan kovanlar ısı değişimlerinden çok fazla etkilenirler ve plastiğin kimyasal yapısını bozabilirler. Tam tersi olarak kalınlığı çok fazla olan kovanlar ise çok geç ısınırlar ve sıcaklık kontrolleri zor olur. Vidanın uzunluğuna, kalınlığına ve üretilecek plastik prosesinin türüne göre optimum kalınlıkta olmaları gerekmektedir.

Kovanların üzerinde termokupullar için delikler açılmaktadır. Sıcaklık ölçümleri kovanın plastiğe en yakın kısmından ölçülmesi plastiğin sıcaklığını kontrol etmek için ve ısıtıcılar için çok önemlidir.

Kovanın üzerinde besleme haznesinin monte edilmesi için vidanın ortalama 2 hatve uzunluğunda olacak şekilde bir malzeme besleme deliği bulunmaktadır. Bu delikten besleme haznesi içindeki ham plastikler dökülerek vidanın malzemeyi yakalayıp ileriye doğru sürmesi sağlanmaktadır. Kovanın içinin daha pürüzsüz ve malzemenin nozul ucuna doğru daha rahat kaymasını sağlamak için honlama işlemi yapılmaktadır. Honlama işlemi ile daha parlak ve kaygan bir yüzey elde edilmektedir. Şekil 3.7’de kovan görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.7. Kovan.

3.3.4. Vida

Vida, ekstrüzyon makinelerinin en önemli parçasıdır. Milin etrafında helisel bir dişle çevrilidir. Vidalar üretim prosesine uygun olacak şekilde farklı çaplarda ve uzunluklardadır. Vidaların görevi genel olarak plastik malzemenin kovan içerisinde besleme bölgesinden çıkış ucuna (nozül) doğru taşınmasını sağlamaktır. Plastik malzemenin ısınması ve sıkıştırması vida sayesinde olur. Vida dizaynı ekstrüderin plastik üretim prosesini iyi bir şekilde yerine getirmesinde en önemli etkenlerdendir. Vidalar, çalışma esnasında çok yüksek basınç ve kuvvetin etkisinde kalırlar. Plastik sıkıştırma bölgesine gelene kadar çok sert bir yapıda olur ve vidaya büyük bir geri itme kuvveti uygular. Vidaların üretiminde nitrasyonlama işlemine uygun çelikler kullanılmaktadır. Vidaların bu yüksek kuvvet ve basınç altında uzun ömürlü çalışması nitrasyon sertlik derecesine göre değişmektedir. Vidaların ömrü, üretimi yapılan plastik malzemeye, çalışma sıcaklığına, hızına ve plastik malzemeye katılan katkı maddelerine göre değişmektedir.

Vidaların çapları 8 mm'den başlayarak 200 mm'ye büyümektedir. Bu tezde filament üretiminde kullanılan mini filament ekstrüzyon makinesinin vidası 20 mm çapında ve 400 mm uzunluğundadır. Şekil 3.8'de farklı çap ve türlerde vidaların görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.8. Ekstrüzyon vidaları.

3.3.5. Nozul

Nozul, ekstrüzyon makinesinin başka bir parçası olan kovanın çıkış ucuna bağlanmaktadır. Ekstrüzyon prensibi ile çalışan makinelerden çıkan ürünler farklı formlara sahip olabilirler. Bunlardan bazıları, boru, profil, levha, film şerit ve bu tezin de konusu olan filamenttir. Nozul ucunun diğer bir deyişle ekstrüzyon kalıbının üretilecek malzemeye uygun olması gereklidir. Ekstrüderlerde genel olarak kovan ile nozul arasında kırıcı plaka denilen bir eleman daha eklenir. Bu eleman, küçük deliklerden oluşan çok delikli metal bir malzemedir. Kırıcı plakanın ana görevi eriyik haldeki malzemenin vidadan kaynaklı oluşan spiral hareketi doğrusal bir harekete çevirmektir. Aynı zaman da nozul ucundaki basıncı artırarak oluşabilecek tıkanmaları de önler. Bu sayede nozul ucundan çıkan eriyik formdaki malzemenin yüzey kalitesi ve şekil bozuklukları en aza indirgenmiş olur. Nozul ile kırıcı plaka arasında bir filtre sistemi de eklenebilir. Bu filtre sistemi de istenmeyen parçacıkların nozul ucundan geçişi engellenmiş olur. Nozul ucuna yapılan basınç ne kadar stabil olursa çıkan malzemenin de kalitesi o kadar artar. Nozul ucundan çıkan malzemenin basıncı, motor, kovan uzunluğu, vida uzunluğu, kırıcı plaka, filtre sistemi ve besleme bölgesindeki basınçla doğru orantılıdır. Filament üretimi gibi proseslerde nozulun çapı, filamentin çapına bağlı olarak 1.75 mm filament için 2 - 3 mm arası, 2.85 mm filament için 3 - 4 mm arasında değişmektedir. Şekil 3.9'da filament ekstrüderi için tasarlanmış bir nozul görseline yer verilmektedir.



Şekil 3.9. Nozul.

3.3.6. Redüktörler

Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan motorun hızı ile vidanın çalışma hızı arasında üretim prosesine bağlı olarak büyük farklar vardır. Vidanın hızını düşürmek ve torku artırmak için redüktörler kullanılmaktadır. Kullanılan redüktörlerin tahvil oranları, motorun hızına ve vidanın istenilen çevrim hızına göre değişmektedir. Tahvil oranları 15:1 ile 50:1 aralığında olabilmektedir. Aynı zamanda tahvil oranları AC ve DC motorlara göre de değişim göstermektedir.

Ekstrüderde yaygın olarak 2 çeşit redüktör tipi kullanılmaktadır. Bunlar 2 kademeli düz dişli ve helisel sonsuz dişli redüktör tipleridir. Redüktör dişlilerin verimleri %98 seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Tahvil oranı arttıkça verimlilik seviyesi motor hızına bağlı olarak düşmektedir [5], [11]. Tahvil oranı seçerken motorun hızı, vida hızı, istenilen tork miktarı, maliyet, alan gibi parametreler dikkate alınmaktadır.

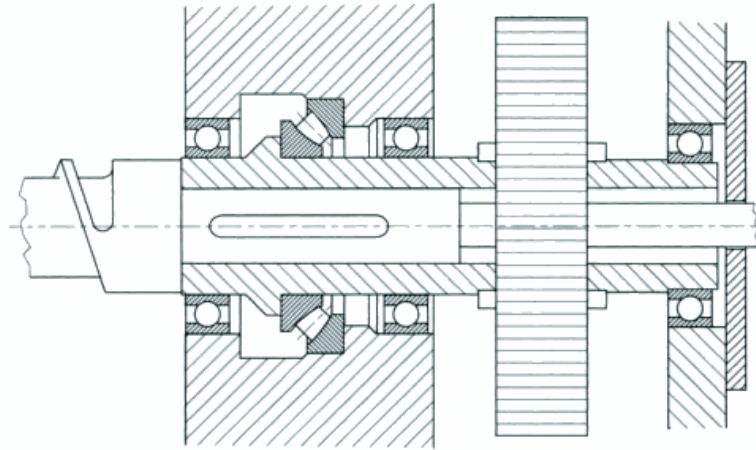
Günümüzde bazı uygulamalarda ekstrüderlerde kullanılan redüktörler motora doğrudan bağlanmaz. Bunun yerine kayış, kasnak ve zincir gibi mekanizmalarla bağlanırlar. Bu tip uygulamaların en büyük avantajı tahvil oranlarının dişli çarklarını boyutlarına göre değiştirilmesidir. Bunu yanı sıra aşırı tork yüklenmelerinde vidayı, motoru ve redüktörü koruyarak kayış, kasnak ve zincirin kendini koparması sistemin zarar görmesini koruyacaktır. Dezavantajları ise kullanılan ara bağlantı parçaları nedeni ile daha fazla güç kaybı oluşması ve verimin düşmesidir. Bu durumdan kaçınmak için genel olarak güçlü bir motor sürücü ile tork değerlerindeki kaybı minimuma düşürerek hız ayarlanmalıdır.

Redüktör seçiminde diğer önemli nokta ise bağlantı yapısıdır. Redüktörler motora uygun olacak şekilde delik milli veya kamalı milli olarak kullanılmaktadır. Bazı redüktörlerin iç mekanizmasında büte ve aksenal rulmanlara yer verilmektedir. Bu tür redüktörlere vida kama ile delik kısmına sıkı geçme olarak oturmaktadır. Kamalı milli olan redüktör türleri ise genel olarak rulman kutusu olan kovan ve vida grubunda kullanılmaktadır. Kovanın redüktör ile bağlantısının arasına eklenen büte ve aksenal rulmanlar fener mili kullanılarak kamalı milli redüktöre oturtulabilir. Bu farklar ekstrüderin amacına ve plastik eritme prosesine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.10'da tek vidalı ekstrüderlerde kullanılan bir redüktörün görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.10. Ekstrüder redüktörü.

Ekstrüderin çıkış ucunda eriyik plastiğin nozula yaptığı basınç çok yüksektir. Nozuldaki basınç değeri 50 ile 400 bar arasındadır. Ekstrüderin büyüklüğü ne kadar fazla ile bu basınç vidanın karesiyle doğru orantılı olacak şekilde artmaktadır. Bu basınç redüktörde bulunan aksenal ve büte rulmanlar ile karşılanmaktadır [11], [18]. Çok fazla basınç olduğu durumlarda basıncın tamamını karşılamak için redüktör ile kovan arasına ekstra bir rulman kutusunu eklenmesi gerekmektedir. Şekil 3.11’de büte rulmanlı redüktör görseline yer verilmiştir [11].



Şekil 3.11. Büte rulman montajlı redüktör.

3.3.7. Isıtıcılar

Plastik ekstrüzyon makinelerinde besleme haznesine eklenen granül veya toz halindeki plastiğin vida ile ileri sürülerek nozul ucundan çıkması için plastiğin eritilmesi gereklidir. Plastiğin eritilmesi için gerekli sıcaklık da ısıtıcılar tarafından sağlanmaktadır. Her plastik türünün erime sıcaklığı farklıdır. Örnek vermek gerekirse PLA plastik türünde erime sıcaklığı 180°C iken PEEK plastik türünde bu değer 450°C seviyelerine kadar çıkmaktadır.

Isıtıcılara diğer bir tabirle rezistans denilmektedir. Görevi elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürmektir. Sarmal direnç tellerinden oluşur. Tellerin kalınlık ve uzunluklarına göre de gücü belirlenir. Doğru akım ile çalışan rezistanslar olduğu gibi genellikle ekstrüzyon makinelerinde alternatif akım rezistanslar tercih edilmektedir.

Ekstrüzyon makinelerinde üretilecek plastiğe göre ısıtıcıların türü ve gücü değişmektedir. Genel olarak ısıtıcılar besleme bölgesi sonu, sıkıştırma bölgesi, basınç-ölçüm bölgesi ve nozul kısmına yerleştirilirler. Isıtıcılar farklı formlara sahip olabilirler. Ekstrüzyon makinelerinde kovanın etrafını sardığı ve çember şeklinde kovanın her yerini eşit ısıttığı için genellikle kelepçe ve yolluk rezistanslar tercih edilmektedir. Bazı 2 parçalı kovan uygulamalarında, kovan ikiye bölünebildiği için fişek rezistanslar tercih edilmektedir. Nozul ucunda plastiğin donması durumlarına karşılık da meme rezistans türü endüstriyel makinelerde kullanılabilir. Şekil 3.12’de seramik kelepçe rezistansın görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.12. Seramik kelepçe rezistans.

3.3.8. Soğutma Sistemi

Ekstrüder sistemlerinin soğutulması, üretim proseslerine göre göre değişmekte olup çok önemli bir işlemdir. Soğutma işlemi çok düşük seviyelerde ve mümkün oldukça düşük bir oranda olmalıdır. Soğutma işlemi yüksek seviyelerde olursa makinenin ısıtma verimini düşürür ve kovanın dışarıya ısı vererek enerji kaybetmesine neden olur [11]. Ekstrüzyon makinelerinde kovan ısıtma işlemi ana motorda harcanan elektrik enerjisinin düşürülmesine katkı da bulunur. Soğutma işlemi ise tam tersi olarak enerji tüketimini artırmaktadır.

Kovan soğutmak için tasarlanan soğutucuların asıl görevi, sıcaklığın çok artması durumunda kovayı soğutarak eriyik haldeki plastiğin yanmasını önlemektedir. Kovanların çok ısınmasının sebebi ise, endüstriyel cihazlarda ısıtıcıları kontrol etmek için standart yazılıma sahip PID kontrol cihazlarının kullanılmasıdır. Bu cihazların etki-tepki süreleri çok fazla olduğu için sıcaklığı ayarlanan değerin üstünde tutarlar; bu sebeplerden dolayı kovan ısısı yükselir ve soğutma işleminin yapılması gereklidir. Bu tezde yapılan çalışma ile sıcaklık değerlerini $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle tutarak aynı zamanda kovan soğutma sisteminde harcanan enerji tüketimini de azaltmaktadır. Soğutucular genel olarak rezistansların olduğu kısımlara mont edilirler. Soğutucu olarak da salyangoz fanlar kullanılır. Şekil 3.13’de soğutucu montajlarının yapıldığı bir ekstrüzyon sisteminin görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.13. Soğutucu montajlı ekstrüder sistemi.

Soğutucu sistemler sadece kovan ve rezistanslar için kullanılmazlar aynı zamanda besleme bölgesi içinde kullanılırlar. Kovan üzerindeki sıcaklık besleme hunisine kadar ilerlerse eğer plastik granüller kovan içerisine girmeden huni içerisinde erimeye başlayıp topaklanmaya sebep olabilmektedir. Böyle bir durumda malzeme akışı durur ve ekstrüderin nozulundan çıkan eriyik malzemede şekil bozukluğuna sebep olmaktadır. Bu sorunlarda çıkan mamülün kalitesini yüksek oranda düşürmektedir. Besleme hunisi yapımında sıklıkla paslanmaz çelik malzemeler kullanılır. Plastik malzemenin içerisine karışması riskinden dolayı boya yapılmazlar ve ısındığında plastik malzemeyi tutma eğiliminde olurlar. Besleme boğazı soğutma işleminde salyangoz fanlar, alüminyum bloklar, su soğutma sistemleri kullanılabilir. Bu sistemlerin seçimleri ekstrüder uzunluğuna, üretilecek malzeme türüne ve besleme hunisinin boyutuna göre değişmektedir.

3.3.9. Sıcaklık Ölçümü

Ekstrüzyon makinelerinin en önemli parçalarından biri de sıcaklık ölçümü için kullanılan termokupllardır. Termokupl temel olarak iki farklı alaşımdan oluşur. Uç kısmında bulunan bu iki alaşım birbirine kaynaklıdır. Bu alaşımların oluşturduğu kaynak noktasına sıcak nokta, açık uçlara ise soğuk nokta adı verilmektedir. Sıcaklık ölçümü bu iki nokta arasındaki gerilim farkına göre ölçülmektedir.

Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan termokupl sayısı, ısıtma bölgelerinde kullanılan rezistans sayısı ile doğru orantılıdır. Buna göre örnek vermek gerekirse, dört adet ısıtıcı kullanan bir ekstrüzyon makinesinde 4 adet termokupl bulunmaktadır. Bazı uygulamalarda nozul (çıkış) ucunda da termokupl ile malzemenin çıkış sıcaklığı da ölçülmektedir.

Ekstrüzyon makinelerinde genel olarak vidalı tip termokupllar kullanılmaktadır. Bu tip termokuplların kullanılma nedeni, kovanın üzerinde açılan vidalı deliklere oturması ve vidalanmasıdır. Ekstrüzyon makinesinde kullanılan kovanın kalınlığına göre m6 - m12 ebatlarında termokupllar kullanılmaktadır. Bazı rezistans türlerinde ise termokupllar rezistansın üzerinde yer alırlar. Bu tip termokupl türleri kovanın sıcaklığı yerine rezistansın sıcaklığını ölçtüğü için fazla tercih edilmezler.

Termokupllar sıcaklık ölçüm aralığına göre farklı türlerde bulunmaktadır. Aşağıda termokupl türleri ve destekledikleri sıcaklık aralıklarına yer verilmiştir [21].

- T tipi Termokupl: -200°C / 300°C
- J tipi Termokupl: -200°C / 800°C
- K tipi Termokupl: -200°C / 1200°C
- E tipi Termokupl: -200°C / 1200°C
- N tipi Termokupl: 0°C / 1200°C
- S tipi Termokupl: 0°C / 1500°C
- R tipi Termokupl: 0°C / 1600°C
- B tipi Termokupl: 0°C / 1800°C
- W tipi Termokupl: 0°C / 2000°C

Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan termokuplların boyları da uygulamaya göre farklılıklar göstermektedir. Termokuplun kovan içine fazla girmesi kovan iç et kalınlığını düşürdüğü için yüksek basınçlarda metalin aşınarak eriyik haldeki malzemenin yukarı sızmasına sebep olacaktır. Aynı zamanda derinliğin çok az olması ise kovan içindeki malzemenin sıcaklığının net bir şekilde ölçülememesine sebep olacaktır. Şekil 3.14'de Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan termokupl görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.14. Ekstrüzyon makinelerinde kullanılan termokupl.

3.3.10. Sıcaklık Kontrolcüsü

Plastik ekstrüzyon makinelerinin beyni diyebileceğimiz diğer bir bileşen ise PID sıcaklık kontrol cihazıdır. Bu cihazların üzerinde giriş çıkış soketleri ve bir de ekran bulunur. Giriş soketine kovan üzerine yerleştirilmiş olan termokuplların uçları bağlanır. Çıkış soketine ise rezistansları kontrol etmek için kullanılacak ekipmanlar (role, SSR, kontaktör vb.) bağlanır. Ekran üzerinde ise anlık termokupl sıcaklığı ve istenilen kovan sıcaklığı gösterilir. Kontrol cihazı üzerindeki tuşlar ile istenilen sıcaklık ayarlanır ve PID algoritması devreye girerek kovayı ısıtmak için gerekli sinyalleri verir. PID sıcaklık kontrol cihazlarında genel olarak tek termokupl girişi bulunur. Kovan üzerine konumlandırılmış rezistans ve termokupl sayısı kadar kontrol cihazı kullanılması gerekmektedir.

Bu cihazların sıcaklık kontrolün kullanılmasının avantajlarını; modüler olması, farklı türlerde termokuplları desteklemesi, PID parametrelerinin ayarlanabilmesi, role veya SSR çıkışlarına yer verilmesi vb. olarak sıralayabiliriz. Dezavantajlarını ise; termokupl ölçüm hassasiyetlerinin $\pm 3^{\circ}\text{C}$ olması, PID kontrol döngüsünün uzun olması, 1 termokupl ölçümü ve 1 adet güç çıkışı vermesi, istenilen sıcaklık değerini $\pm 5^{\circ}\text{C}$ aralığında tutması vb. olarak sıralayabiliriz.

PID kontrol cihazları farklı ebatlarda ve şekillerde bulunurlar. Üreticilere göre boyutları değişmektedir fakat genel olarak kullanım arayüzleri aynıdır. Şekil 3.15’de PID sıcaklık kontrol cihazının görseline yer verilmiştir [10].

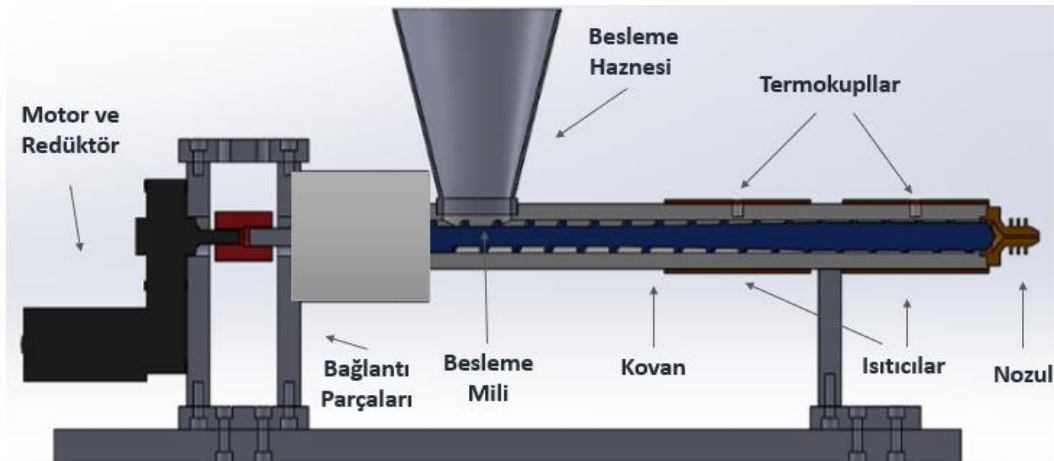


Şekil 3.15. PID sıcaklık kontrol cihazı.

4. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde bu tezin konusu olan filament ekstrüzyon makineleri için geliştirilen PID denetleyicisinin yapım aşamalarından bahsedilecektir. Çalışmalara ilk olarak materyal seçimi ile başlanmıştır. Ekstrüzyon makinelerinde kullanılmak üzere uygun komponentler seçilmiştir. Kullanılan bu komponentlere göre elektronik kart tasarımı yapılmıştır. PID algoritması geliştirilerek kodlar yazılmıştır ve sistem üzerinde denemeler yapılmıştır.

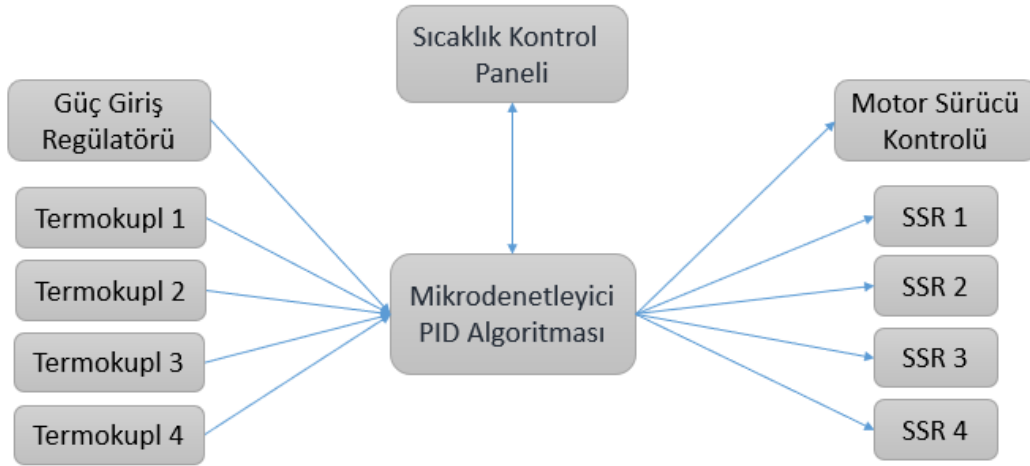
Plastik ekstrüzyon sistemlerinde plastiğin eritildiği ve nozul ucuna kadar olan kısmına kovan adı verilmektedir. Isıtıcı rezistanslar ve ısı ölçümü için kullanılan termokupllar bu kovan üzerine yerleştirilmiştir. Kovanlar genel olarak 3 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; besleme bölgesi, sıkıştırma bölgesi ve ölçme bölgesidir. Genel olarak ekstrüzyon sistemlerinde, bu 3 bölgenin ısı ölçümleri ve ısı ayarlarının ayrı ayrı yapılması gereklidir. Bunun sebebi plastiğin besleme bölgesinden ölçüm bölgesine kadar gelen kısımda plastiğin belirli sıcaklıklarla artırılması gerekliliğidir. Eğer sıcaklıklar düzgün bir şekilde arttırılmazsa polimerde yanma, bağ yapısının bozulması ve çıkan eriyik haldeki plastiğin çapının kararsız olması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu tezde bu sorunların çözümüne yönelik bir PID sıcaklık denetleyici geliştirilmiştir. Sonraki bölümlerde yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Şekil 4.1'de denemelerde kullanılan mini filament ekstrüzyon makinesinin iç görseline yer verilmiştir.



Şekil 4.1. Mini filament ekstrüzyon makinesi iç görseli.

4.1. Materyal Seçimi

Geliştirilen PID denetleyicinin denemelerini yapmak için 20 mm çapında 400 mm uzunluğunda ve 55 mm kovan kalınlığına sahip mini bir ekstrüzyon makinesi kullanılmıştır. Bu makinenin kovan uzunluğu kısa olduğu için 2 bölgeyi ısıtma ve denetim yapılmıştır. Şekil 4.1’de deneysel sonuçların alındığı ekstrüzyon makinesi görülmektedir. Filament üretiminde ise hammadde olarak 4043D PLA kullanılmıştır. 4043D PLA’dan filament üretimi için kovan sıcaklığının 180°C olması gerekir. Deneysel sonuçların doğruluğu için, ekstrüzyon makinesinin vida hızını denetleyen motor hız kontrolü, termokupllar ve diğer bileşenler, seçilen filament ürününe göre ayarlanmıştır [14]. Şekil 4.2’de sistemin genel şeması görülmektedir. Sıcaklık hassasiyeti dikkate alınarak Cr-Al alaşımlı K tipi termokupl tercih edilmiştir. Isıtıcı kontrol kısmında standart olarak kullanılan aç-kapa röleler, ısıtıcıların denetimi için yetersiz kalacaktır. Bunların yerine PWM sinyalleri ile hassas bir şekilde çalışabilen SSR’ler (Solid State Relay) kullanılmıştır. Standart PID denetim cihazları ile yapılan ön çalışmada röle sistemi kullanan modellerin ayarlanan sıcaklık değerlerinden $\pm 5^\circ$ sapmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. SSR röleler PWM sinyalleri ile AC kırpma yaparak çalıştıkları için, set değerine yaklaşırken aç-kapa işlemini 100 milisaniyede bir yaparak, sıcaklık değerinin sapma miktarını düşürmektedirler. Şekil 4.2’de denetim sisteminin genel şemasının görseline yer verilmiştir.



Şekil 4.2. Denetim sisteminin genel şeması.

Sistem tasarımında kullanılan malzemeler aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır.

4.1.1. Termokupl

Endüstride sıcaklığı ölçmek için, farklı sensörler ve yöntemler kullanılmaktadır. Plastik ekstrüzyon sistemlerinde sıcaklık ölçümleri için genellikle termokupllar kullanılmaktadır. Bunun sebebi termokupllar yüksek sıcaklıkta ve yüksek ölçüm hassasiyetlerinde çalışabilirler. Termokupllar kendi içlerinde J, T, K, N, E, S, R ve B türlerine ayrılmaktadır. Yapılan ön literatür araştırmalarında termokupllar içerisinde sıcaklık, hassasiyet, modüller ve mikrodenetleyici uyumu baz alınarak Cr-Al alaşımli K tipi termokupl tercih edilmiştir. Tercih edilen termokupl 0° - 800° C aralığında ölçüm yapabilme yeteneğine sahiptir. Kullanılan K tipi termokupl görseli Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. K tipi termokupl.

4.1.2. Max6675

Ekstrüzyon makinesine bağlanacak termokupllarla sıcaklık ölçümü yapmak için, mikrodenetleyiciler ile yüksek doğrulukta ölçüm yapabilen max6675 entegresi kullanılmıştır. 0°C ile 700°C arasında ölçüm yapabilmektedir. 12 bit çözünürlüğünde ve 0.25°C hassasiyet ile sıcaklık ölçümü yapabilmektedir. Bu entegre ile kullanılan K tipi termokupllardaki sıcaklığa göre voltaj değişimleri okunur ve mikrodenetleyiciye veriler SPI haberleşme yöntemi ile gönderilir [17]. Ekstrüzyon makinelerinde genel olarak 4 farklı bölgeden sıcaklık ölçümü yapıldığı için tasarlanan devre kartında 4 adet max6675 entegresi kullanılmıştır. Entegrenin görseli Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Max6675 entegresi.

4.1.3. SSR (Solid State Relay)

Isıtıcı kontrol kısmında standart olarak kullanılan aç-kapa rölelerin ısıtıcıların denetimi için yetersiz geleceği, bunun yerine PWM sinyalleri ile hassas bir şekilde çalışabilen SSR (Solid State Relay) kullanılmıştır. Standart PID denetim cihazları ile yapılan ön çalışmada role sistemi kullanan modellerin ayarlanan sıcaklık değerden $\pm 5^\circ$ sapmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. SSR röleler PWM sinyalleri ile AC kırpma yaparak çalıştıkları için, Set değerine yaklaşırken aç-kapa işlemini 100 milisaniyede bir yaparak sıcaklık değerinin sapma değerini düşürmektedirler. Sistemin tasarımında yüksek güçte çalışan ısıtıcılar göz önünde bulundurularak 100A değerinde SSR kullanılmıştır. SSR ile kurulan sistemde PID denetim algoritması yardımı ile sapma miktarının $\pm 1^\circ$ olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan SSR modülünün görseli Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. SSR (Solid State Relay).

4.1.4. Rezistans

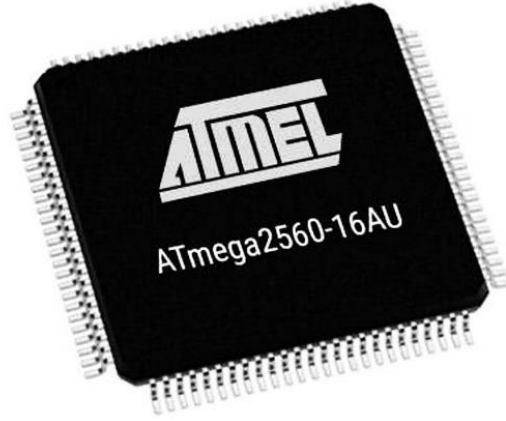
Plastik ekstrüzyon sistemlerinin ısıtıcı tarafında genel olarak rezistanslar kullanılmaktadır. Isıtıcı rezistanslar kendi içlerinde türlerine göre ayrılmaktadır. Plastik ekstrüzyon sistemlerinde kovanın etrafını tam sarması ve eşit bir şekilde ısının dağılmasını sağlamak için kelepçe rezistanslar kullanılmaktadır. Tasarımı yapılan PID kontrol cihazı SSR (Solid State Relay) ile denetleneceği için her türlü rezistans türünü desteklemektedir. Denemeler yapılırken kovan etrafına ısı yayılımının düzgün olması ve montajının kolay olması için kelepçe rezistans kullanılmıştır. Kullanılan kelepçe rezistans pirinç malzemeden yapılmıştır ve ısıyı iletme katsayısı metallere göre daha yüksektir. Bunun sayesinde ısı iletimde kayıp çok daha düşüktür. Kullanılan kelepçe rezistans görseli Şekil 4.6'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Kelepçe rezistans.

4.1.5. Mikrodenetleyici

Mikrodenetleyici olarak giriş - çıkış portlarının yeterli olması, yüksek hızlarda çalışabilmesi, dokunmatik ekran, max6675, SSR ile uyumlu çalışabildiği için Atmel firmasının AVR mimarisi ile geliştirilen, 54 adet giriş çıkış bacağı bulunan ve dahili ADC modülüne sahip Atmega2560 model mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Kullanılan Atmega2560 görseli Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Atmega2560 mikrodnetleyicisi.

4.1.6. Motor Sürücü

Tasarlanan PID kontrol cihazına yerleşik bir motor sürücü de eklenmiştir. Bu motor sürücü ile mini ekstrüzyon cihazlarına bağlanan dc motorların kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Motor sürücü olarak hem anlık yüksek akımlara çıkabilmesi hem de 14A olan kararlı durum motor akımı kullanılan küçük boyuttaki ekstrüzyon makinesinin motoru için yeterli olduğundan dolayı VNH2SP30 entegresi kullanılmıştır. Aynı zamanda yüksek akım ve gerilim değerlerinde bir motor ile çalışılması durumu için elektronik karta harici motor sürücü çıkışlarına yer verilmiştir. Kullanılan motor sürücü görseli Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. VNH2SP30 motor sürücü.

4.1.7. Dokunmatik Ekran

Tasarlanan PID kontrol cihazının sıcaklık verilerinin okunabilmesi, sıcaklık değerlerinin ayarlanabilmesi, motor kontrolünün yapılabilmesi ve kullanımı kolay olması gibi avantajlarından dolayı dokunmatik ekran kullanılmıştır. Mikrodenetleyiciler ile seri port üzerinden haberleşme yapabilmesi hem kablolamada hem de mikrodenetleyicinin daha az bacak kullanması büyük avantaj sağlamaktadır. Kullanılan dokunmatik ekran görseli Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Dokunmatik ekran.

4.2. PID Denetleyici Tasarımı

Plastik ekstrüzyon işlemi sırasında ısı değerlerinin ayarlanan değerlerde sabit tutulması için PID kapalı çevrim denetim algoritması kullanılmıştır. PID denetleyici hata sinyalinin değişiminden ve geçmiş değerlerinden de faydalanarak çıkış üretir. İstenilen değer ile ölçülen değer arasındaki farkı azaltacak şekilde K_P , K_I ve K_D parametrelerinin seçilmesi gerekir (1). Bu parametreleri belirlemek için COHEN-COON, YUWANA-SEBORG ve ZIEGLER-NICHOLS gibi yöntemler kullanılır [13]. Bu yöntemler arasından ZIEGLER-NICHOLS yöntemi ve YUWANA-SEBORG yöntemi ile denemeler yapılmıştır ve kovanın sıcaklığını sabit bir değerde tutmak için en uygun olanı seçilmiştir. İlk denemeler ZIEGLER-NICHOLS yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

ZIEGLER-NICHOLS yönteminde açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki tip metod kullanılmaktadır [24]. Bu çalışmada kapalı çevrim ZIEGLER-NICHOLS yöntemi denemeleri yapılmıştır. Denemeler sırasında PLA polimer türü kullanılmıştır. PLA polimeri ile filament üretmek için kovan sıcaklığını 180°C 'de sabit olarak tutmak gereklidir. Bu yöntemi uygulamak için önce P, I ve D parametrelerine bir basamak değeri verilmiştir ve bu şekilde testler yapılmıştır.

P, I ve D katsayıları belirlenirken aşağıdaki işlem adımları uygulanmıştır.

- Yazılımsal olarak istenilen sıcaklık değeri ayarlanmıştır.
- İntegral zaman sabiti sonsuza getirilmiştir.
- Türev zaman sabitine 0 değeri verilmiştir.
- Kontrol kazancına küçük bir değer verilmiştir.
- Ayarlanan sıcaklık değerine küçük bir basamak etkisi yapılarak sıcaklığın sapma miktarları gözlemlenmiştir.
- Kontrol kazancı kademeli olarak artırılarak proses değerinin salınımlı olması sağlanmıştır.
- Daha sonra salınım periyodu (Pu) ve Kontrol kazancı (Ku) değerleri formülize edilerek P, I ve D parametreleri bulunmuştur.

Kullanılacak P, I ve D parametreleri belirlenirken aşağıdaki denklemlerden faydalanılmıştır.

- $P = \frac{Ku}{2}$
- $P, I = \frac{Ku}{2.2}, \frac{Pu}{1.2}$
- $P, I, D = \frac{Ku}{1.7}, \frac{Pu}{2}, \frac{Pu}{8}$

Yapılan denemelerde en yakın Ku değeri 28.8 olarak bulunmuştur. Pu değeri ise 14.6 olarak bulunmuştur. P, I, D parametreler formülize edildiğinde P = 16.9, I=7.3, D=1.8 olarak bulunmuştur. Bu değerler makine üzerinden test edildiği zaman sıcaklık değerlerinin tam olarak oturmadığı ve ayarlanan sıcaklık değeri ile kovan sıcaklığı arasındaki fark zaman içinde daha da arttığı gözlemlenmiştir. Bu yöntemin mini filament ekstrüzyon makinesi için uygun olmadığına karar verilmiştir.

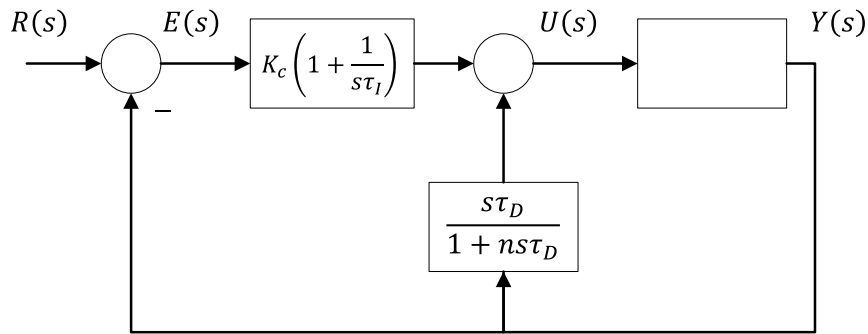
Bu çalışmada, filament ekstrüzyon sistemlerinde etki – tepki süreleri çok yavaş olduğundan dolayı YUWANA-SEBORG yöntemi tercih edilmiştir. Kovanı 20°C (oda sıcaklığı)’den PLA filament üretmek için kullanılan ortalama sıcaklık olan 180°C’ye ısıtmak için genel olarak 20 dakika kadar bir zaman geçmektedir [14]. Isınan metal kovanın ısıyı üzerinde tutması ve yayması için geçen zaman fazladır. Aynı zamanda

kullanılan mil-kovan uzunlukları, kovanın çapı, sıkıştırma oranı ve motor hızı her ekstrüzyon makinesinde farklılık göstermektedir.

Seçilen materyal özelliklerine göre yapılan ön benzetimler sırasında en iyi sonuç YUWANA-SEBORG yönteminde görülmüştür. Şekil 4.10'da P-I-D etkileşimsiz denetim ile sıcaklık kontrolünde kullanılan kapalı döngü kontrol sistemi görülmektedir [12]. S düzlemindeki PID çıkışı $U(s)$, denklem (2)'den hesaplanır. Burada n , filtre faktörüdür. $P(s)$ kontrol edilmek istenen sıcaklık sisteminin transfer fonksiyonunu ifade eder.

$$u(t) = \bar{u} + K_C \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

$$U(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{s\tau_I} \right) E(s) - \frac{s\tau_D}{1 + ns\tau_D} Y(s) \quad (2)$$



Şekil 4.10. PID ile kapalı döngü sıcaklık kontrolü.

Çıkış değişkeninin belirli sıcaklık değerinde salınması dikkate alınarak süreç kazancı (K_m), zaman sabiti (τ_m) ve zaman gecikmesi (d_m) hesaplanır. Kontrol parametrelerinin YUWANA-SEBORG yönteminde hesaplanması için eşitlik (3)-(5) kullanılır [9]. Bu denklemlerde kullanılan katsayılar integral hata kriteri (IAE) ve zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) kriterlerine göre belirlenir [6].

$$K_C = \frac{a}{K_m} \left(\frac{d_m}{\tau_m} \right)^{-b} \quad (3)$$

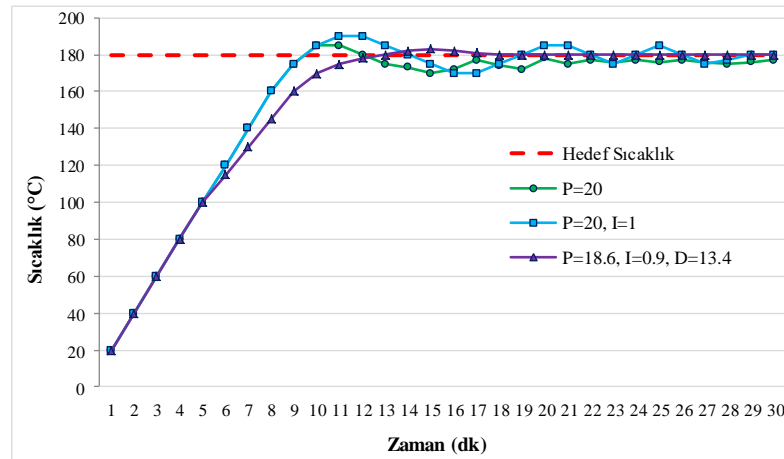
$$\tau_I = \tau_m * c + \left(\frac{d_m}{\tau_m} \right)^d \quad (4)$$

$$\tau_D = e \left(\frac{d_m}{\tau_m} \right)^f \tau_m \quad (5)$$

YUWANA-SEBORG yöntemi kullanılarak P, I ve D değerleri deneysel olarak bulunmuştur. P, I ve D katsayılarının belirlenmesi için aşağıdaki işlem adımları gerçekleştirilmiştir.

- Önce istenilen sıcaklık değeri ayarlanmıştır.
- İntegral ve türevsel denetim terimleri sıfır alınmış ve küçük değerlerden başlanarak bir oransal denetim değeri belirlenmiştir.
- Bu denetim etkisinde iken ayarlanan sıcaklık noktasına uygun bir kademe etkisi verilmiştir.
- Oransal denetim değeri (P) ayarlanan sıcaklık değeri $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ve salınımlı olacak şekilde ayarlanmıştır.
- Çıkış değişkeninin belirli sıcaklık değerinde salınması sonunda süreç kazancı (K_C), zaman sabiti (τ_I) ve zaman gecikmesi (τ_D) hesaplanmıştır.

Benzetim denemeleri sonucunda farklı katsayılar ile elde edilen sıcaklık - zaman grafikleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Seçilen katsayılar ile ekstrüzyon sisteminin ısınma ve kararlı hale gelme süresi 20 dakika olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.11. Benzetim denemeleri.

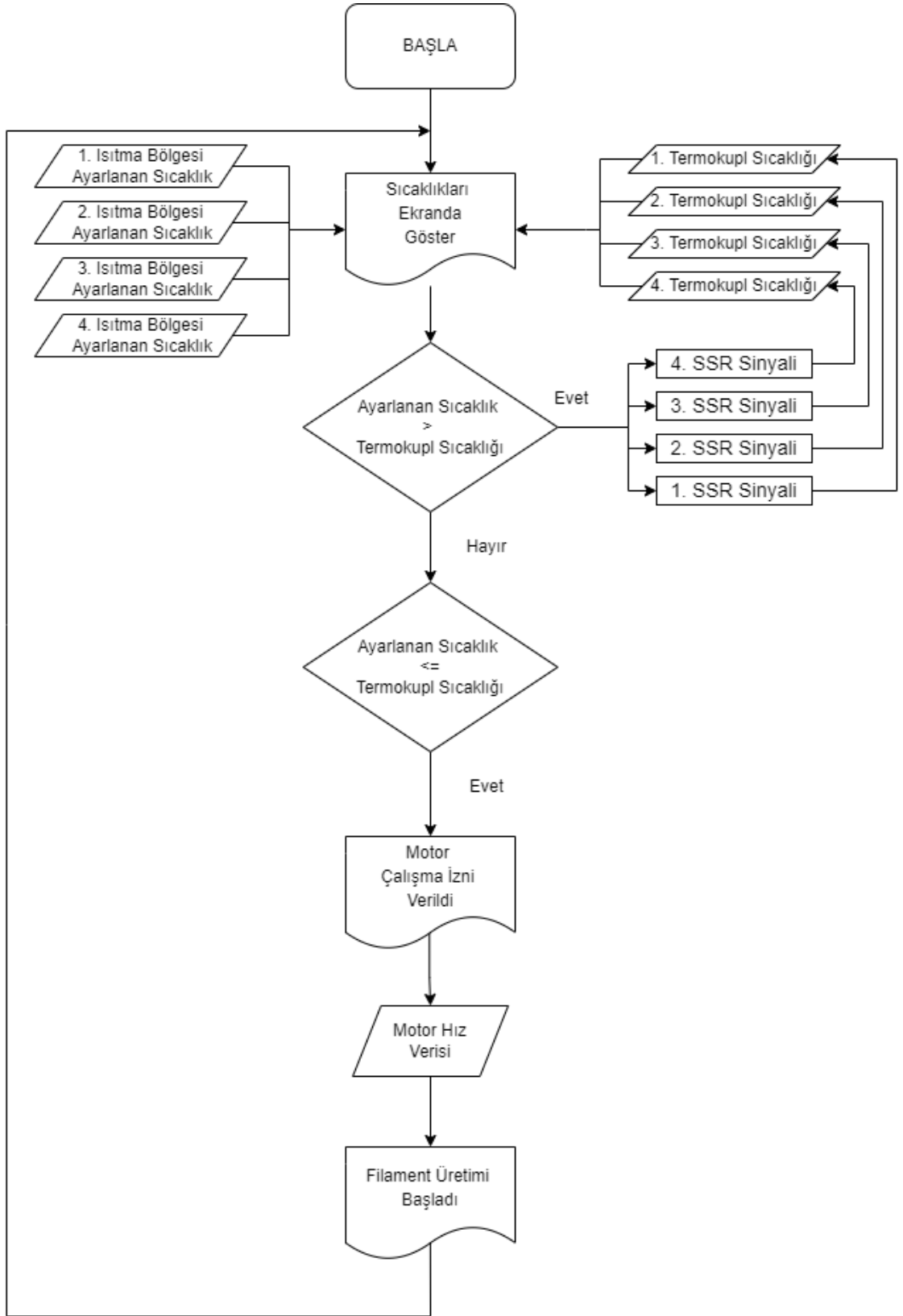
4.3. Yazılım

Bu tezin konusu olan filament ekstrüderler için tasarlanan PID denetleyicisinin, ekran, motor sürücü, termokupl okuyucu entegrelerin ve solid state rölelerin kontrolü için C dilinde yazılım geliştirilmiştir. Kullanılan Nextion ekran üzerinde ise firmanın geliştirdiği Nextion yazılımı kullanılmıştır. Geliştirilen yazılım genel olarak max6675 modüllerine bağlı termokupllardan saniyelik veriyi okuyarak, PID yazılımı ile solid state röleleri kontrol etmektedir. Ekran üzerinden sıcaklık değerleri okunmakta ve aynı zamanda makinenin 4 ısıtma bölgesi için çalışma sıcaklıklarının girilmesi sağlanmıştır. Bu girilen sıcaklık değerlerine göre de PID yazılımı anlık sıcaklık verilerine göre solid state rölelere çalışma sinyalleri göndermektedir.

Diğer bir kontrol edilen devre elemanı ise motor sürücüdür. Termokupllardan ölçülen sıcaklık değeri ayarlanan sıcaklık değerine eşit veya büyük olduğu zaman ekran üzerindeki motor açma düğmesi aktif olur ve motor hızı ayarlanabilir. Bu korumanın amacı sıcaklık istenilen değere ulaşmadan ekstrüzyon işlemi başlatılmak istenirse plastik eriyik hale geçmediği için motor, redüktör ve vida zorlanacaktır. Hatta uzun süreli olarak motorun çalışmasına maruz kalındığında parçalarda kırılmalar meydana gelebilmektedir.

Sıcaklık istenen değere ulaştığı zaman ekran üzerinden motor sürücünün hızı ayarlanır ve ayarlanan hıza göre mikrodenetleyici devrede kullanılan motor sürücü VNH2SP30 entegresine PWM değerler gönderir. Bu verilere göre de motor akım ve gerilimini ayarlar. Motor çalışma anında yüksek akım çekerse kendini korumaya alır ve durur. Motorun yüksek akım çekmesi durumunda kovan içerisinde vidanın dönme hareketinde bir sorun olduğu ve plastiğin tam erimediği düşünülür. Bu durum kontrol edildikten sonra tekrar motor açma düğmesine basılarak motorun tekrar çalışması sağlanır.

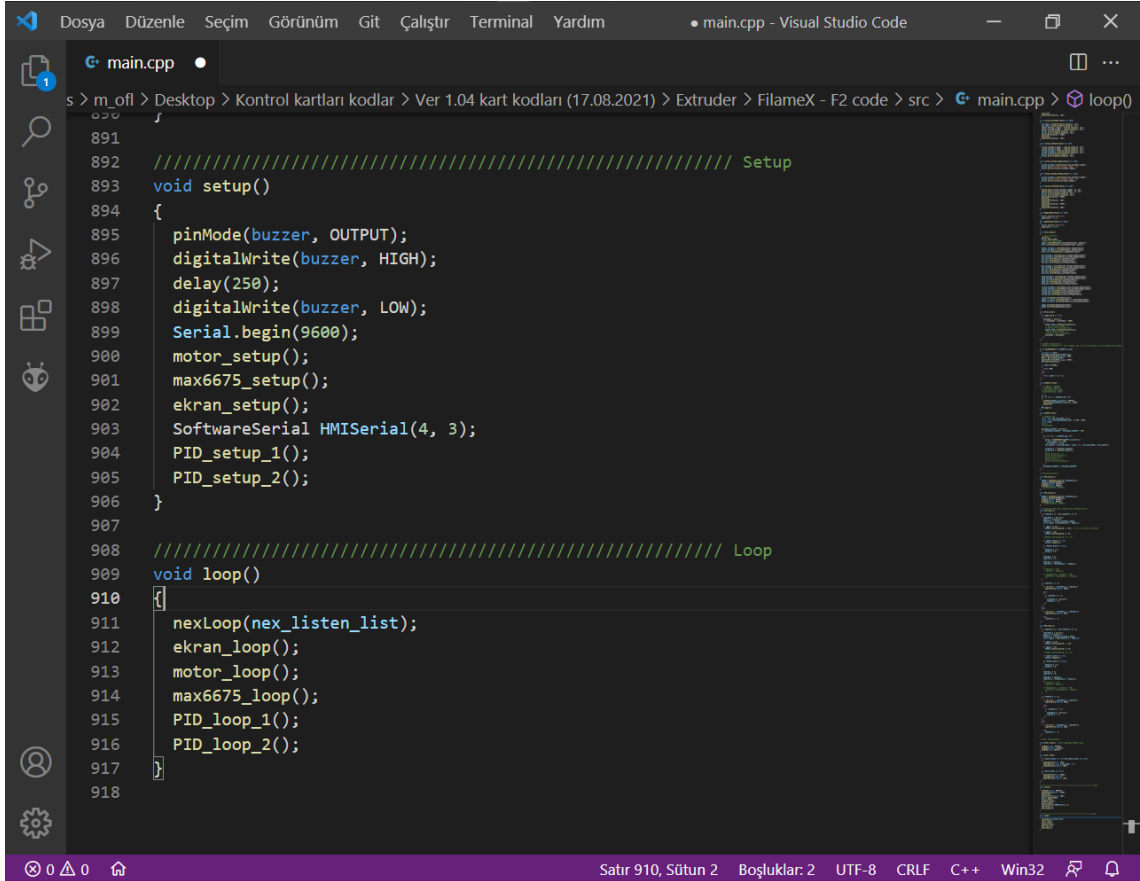
Dokunmatik ekranın arayüzünde, ekranda sıcaklık değerlerini gösterilmesi, motor hızının ayarlanması, hazır profiller üzerinden otomatik üretim yapılması gibi temel fonksiyonların içerdiği bir yazılım mevcuttur. Ekran üzerinde ısıtıcıların ve motorun kapatılıp açılması için butonlar da yer almaktadır. Şekil 4.12’de yazılımın akış şemasının görseline yer verilmiştir.



Şekil 4.12.Yazılım akış diyagramı.

4.3.1. Anakart yazılımı

Elektronik kartın üzerinde Arduino modellerinde de kullanılan ATMEGA 2560 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyicinin kullanılma amacını, motor sürücü kontrolü, Nextion dokunmatik ekran ile uyumluluğu, Max6675 entegresi ile SPI üzerinden sorunsuz haberleşebilmesi gibi sıralayabiliriz. ATMEGA 328P mikrodenetleyicisini kodlamak için genel olarak Atmel Studio, İAR, Arduino ide, Visual Studio code gibi programlar kullanılmaktadır. Kodlama sırasında kod bloklarını otomatik tamamlaması, Platformio eklentisi ile sorunsuz çalışması ve derleme sırasında belleği daha verimli kullandığı için Visual Studio Code idesi kullanılmıştır. Visual Studio üzerine platformio eklentisi kurularak Arduino idesinde yer alan Arduino kodlarını kullanılması sağlanmıştır. Bu mikrodenetleyiciyi Visual Studio üzerinden kodlamak için Arduino modellerinden, bu denetleyiciyi kullanan Arduino Mega modelinin bootloader yazılımı yüklenmiştir. Şekil 4.13’de anakart yazılımının yazılması için kullanılan Visual Studio Code idesinin görseline yer verilmiştir.



```
main.cpp
s > m_ofl > Desktop > Kontrol kartları kodlar > Ver 1.04 kart kodları (17.08.2021) > Extruder > FilameX - F2 code > src > main.cpp > loop0
891
892 //////////////////////////////////////////////////// Setup
893 void setup()
894 {
895     pinMode(buzzer, OUTPUT);
896     digitalWrite(buzzer, HIGH);
897     delay(250);
898     digitalWrite(buzzer, LOW);
899     Serial.begin(9600);
900     motor_setup();
901     max6675_setup();
902     ekran_setup();
903     SoftwareSerial HMISerial(4, 3);
904     PID_setup_1();
905     PID_setup_2();
906 }
907
908 //////////////////////////////////////////////////// Loop
909 void loop()
910 {
911     nexLoop(nex_listen_list);
912     ekran_loop();
913     motor_loop();
914     max6675_loop();
915     PID_loop_1();
916     PID_loop_2();
917 }
918
```

Şekil 4.13. Visual Studio Code arayüzü.

Dokunmatik ekran kütüphaneleri eklenerek, ekranın kontrolünde kullanılan kodlar yazılmıştır. Ekran ile mikrodenetleyicinin haberleşmesi için tx ve rx pinleri belirlenmiştir. Motor sürücü için kullanılacak pinler tanımlanmıştır. Bu pinleri kullanarak motor sürücünün PWM olarak hız ayarları yapılmıştır. Akım okuması için analog pini tanımlanmıştır ve bu pin üzerinden 0 - 1024 arasında veriler okunup hesaplanarak akım değeri bulunmuştur.

PID algoritmasının çalışması ekran üzerinden sıcaklık değerlerinin girilmesi ile başlamaktadır. Isıtma bölgeleri için istenilen 4 farklı sıcaklık değerleri girildikten sonra 4 ayrı termokupldan gelen veriler ile istenilen sıcaklık değerleri karşılaştırılarak sıcaklık farkı bulunur. Bu sıcaklık farkına göre ayarlanan P, I ve D değerlerine göre solid state rölelere PWM sinyaller gönderilmektedir. Bu süreç 100 milisaniyede bir olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede kovan üzerinde bulunan sıcaklık bölgelerinin istenilen sıcaklığa hızlı ve kontrollü bir şekilde ulaşması sağlanmaktadır. Bu süre ayarlanan sıcaklık değerine bağlı olarak değişmektedir.

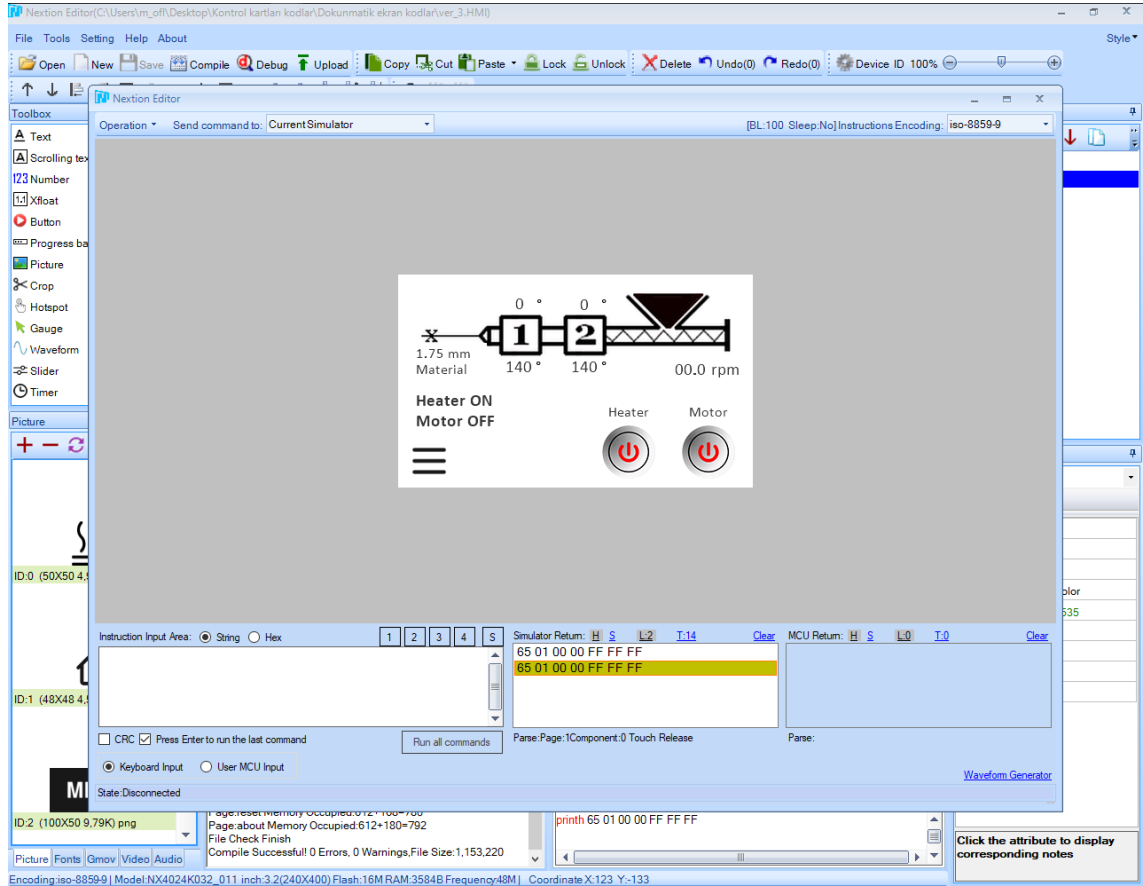
Denemeler sırasında mini filament ekstrüzyon makinesi kullanılmıştır. Kullanılan makinede 2 ısıtma bölgesi olduğu için denemeler 2 termokupl ve 2 solid state role ile yapılmıştır. Filament üretim denemelerinde kullanılan PLA hammadde 180°C’de üretim yapıldığı için 1. Bölge için 180°C, 2.bölge için 160°C sıcaklık ayarlanmıştır.

Termokupllardan gelen veriler ile ekran üzerinden ayarlanan sıcaklık değerleri arasında fark 3°C ye kadar düştüğü anda ekran üzerindeki motor açma düğmesi aktif olur ve artık motor kontrol edilebilir. Motorun hızı ekrandaki rpm değerleri üzerinden ayarlanır. Filament ekstrüzyon işlemi motorun aktif olması ile başlamaktadır. Filament üretimindeki filamentin çap hassasiyetinin stabil olması için motorun hız değeri ve stabil olması çok önemlidir. Motor hızının değişken olması nozul ucundan çıkan filamentin dalgalı bir görünümde olmasına ve 3d boyutlu yazıcılardan üretilen baskılarda yüzey kalitesinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Kullanılan extrüderlerde motor sürücünün akım ve gerilim seviyesinin yetmemesi durumlarda, harici bir motor sürücü kullanılması için elektronik kart üzerindeki harici pinlere yer verilmiştir. Bu pinler üzerinden de PWM olarak harici motor sürücüler kontrol edilebilmektedir.

Yazılımın akışının daha iyi anlaşması için sonraki bölümlerde ekran yazılımı, motor sürücü yazılımı ve devre şemaları üzerine bilgiler verilecektir.

4.3.2. Ekran Yazılımı

Filament ekstruderler için tasarlanan PID denetleyicinin kontrol edilebilmesi ve sıcaklık değerlerinin okunabilmesi için ekran kullanılmıştır. Ekran seçimi olarak kullanım kolaylığı, ATMEGA 2596 ile uyumlu çalışabildiği için Nextion 3.2 inch dokunmatik ekran seçilmiştir. Dokunmatik ekran mikrodenetleyici ile UART üzerinden haberleşmektedir. Ekranı programlamak için üreticinin destek verdiği Nextion arayüz programı kullanılmıştır. Bu program üzerinden ekrana menüler, sıcaklık değerleri gösteren sayı kutuları, sıcaklık değerlerini değiştirilebildiği butonlar eklenmiştir. Ekranın tasarımı yapılırken her butonun içine kodlar eklenmiştir. Butonlara maksimum sıcaklık değerleri, ısıtıcıları ve motoru açma-kapatma işlemleri gibi temel kodlar yazılmıştır. Mikrodenetleyici üzerinde yapılacak işlemlerin bazıları ekran kodlarına yazılmıştır. Bu sayede mikrodenetleyici üzerindeki işlem yükü hafifletilmiştir. Şekil 4.14'de ekranın kodlamasının yapıldığı Nextion programının ara yüzüne yer verilmiştir.

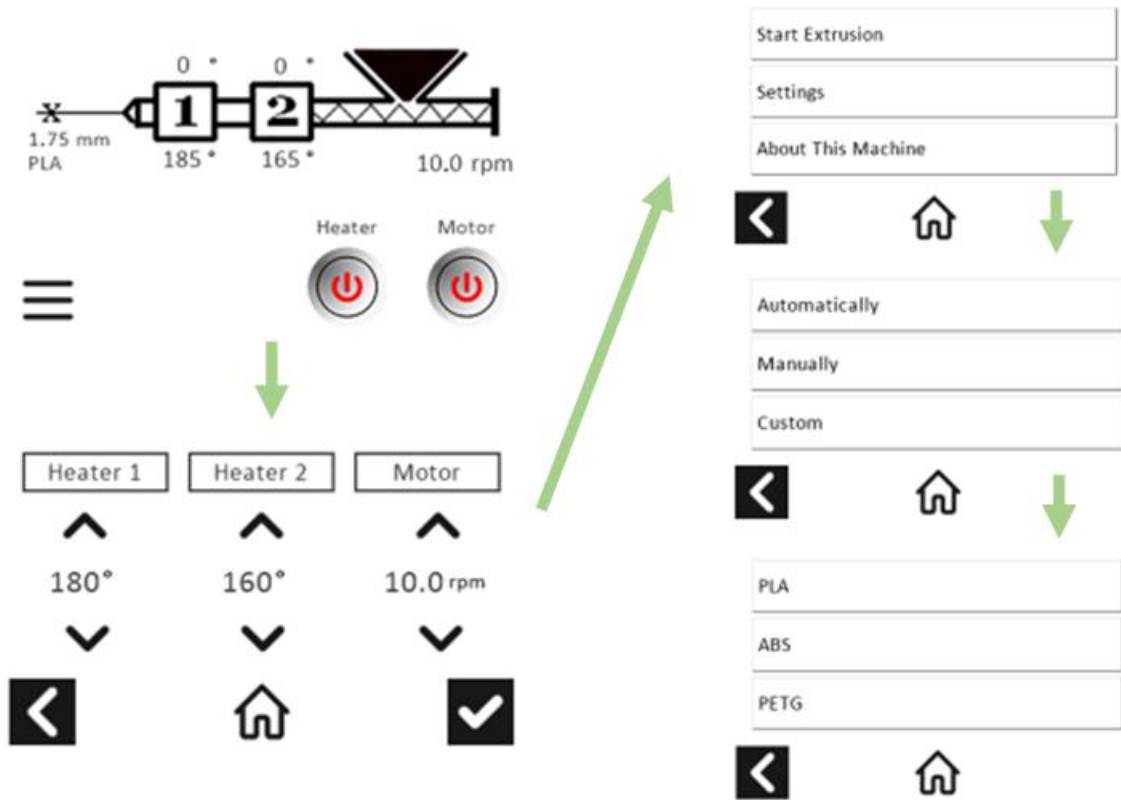


Şekil 4.14. Nextion programlama editörü.

Filament üretimi için kullanılan mini filament ekstrüzyon makinesinin kovan uzunluğu 400 mm olduğu için 2 adet ısıtıcı ve termokupl kullanılmıştır. Bu ısıtıcı ve termokuplları

temsil etmek için ana sayfada kovan üzerinde 2 adet ısıtıcı ve termokupl görseli eklenmiştir.

Anakart yazılımı üzerinden her saniyede bir kovan sıcaklık değerleri gönderilmektedir. Bu sıcaklık değerleri ekran üzerindeki kovanın sembolik resminin üzerinde konumlandırılmıştır. Kovanın resminin altında ise ayarlanan sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Ekran üzerine eklenen menü sayesinde ekran için bazı ayarların yapılması, ekstrüzyon işlemi sırasında sıcaklık, motor hız ayarlarını kolayca değiştirilmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda bazı polimer türleri için otomatik sıcaklık ayarlarının olduğu bir menü de eklenmiştir. Bu menü üzerinden filament üretiminde çok fazla kullanılan PLA, ABS ve PETG plastik türlerini üretmek için sıcaklık değerleri otomatik olarak ayarlanmaktadır. Örnek vermek gerekirse PLA filament üretimi için 1. ısıtma bölgesi 180°C, 2. ısıtma bölgesi 160°C iken PETG filament üretimi için bu değerler 1. ısıtma bölgesi için 225°C, 2. ısıtma bölgesi 205°C olarak ayarlanmaktadır. Şekil 4.15’de dokunmatik ekran için tasarlanan ekran görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 4.15. Dokunmatik ekran tasarımı.

4.4. Motor Sürücü Algoritması

Filament ekstrüzyon makinelerinde üretilen filamentin kalitesini, vida dönüş hızı ve hızın stabil olması çok büyük oranda artırmaktadır. Endüstriyel büyük ekstrüderlerde motor kontrolü kullanılan motorun cinsine bağlı olarak AC veya DC motor sürücüler ile yapılmaktadır. DC motorlarda motor hız kontrolü, gerilim değişimi ile yapılırken AC motor sürücülerde hız kontrolü frekans kontrolü ile yapılmaktadır. Bu çalışmada filament üretimi için kullanılan mini filament ekstrüzyon makinesi 24V DC bir motora sahip olduğu için anakart üzerinde dahili bir DC motor sürücü kullanılmıştır. Motor sürücü olarak maksimum 30A akımı ve maksimum 41V gerilimi destekleyebilen VNH2SP30 motor sürücü kullanılmıştır. Kullanılan motor sürücü mikrodenetleyici üzerinden gelen PWM sinyallere göre motor hız kontrolü yapmaktadır. Motor sürücü maksimum 20 kHz frekansındaki PWM sinyalleri algılayabilmektedir. Bu değerde ekstrüzyon makinelerindeki motor hız kontrolü için yüksek ve yeterli bir değerdir.

Kullanılan motor sürücü ile 0.1 rpm hassasiyetinde hız değişimleri yapılabilmektedir. Bu sayede nozul ucundan çıkan filamentin çap genişliği ayarlanabilmektedir. Motor hızının stabil tutulması sayesinde filament yüzeyinde dalgalanma oluşmamaktadır. Aynı zamanda 3 boyutlu yazıcılardan alınan baskı örneklerinde dış yüzey kalitelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bulgular ve Tartışma bölümünde 3 boyutlu yazıcıdan alınan baskı örneklerinin görsellerine yer verilmiştir.

Filament üretim prosesi yüksek motor gücü gerektirmektedir. Kullanılan motorların akım ve tork değerleri yüksek olması gerekmektedir. Aynı zamanda sıkıştırma bölgesinde yabancı maddelerden dolayı meydana gelecek hata durumlarına motorun akım değeri yükselmektedir. Bu durumda motor yeterli torku sağlayıp vidayı döndürmeye devam ettiğinde mekanik aksamda, vida kırılması, kovan çatlama, redüktör kırılması gibi olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Akım değerinin çok fazla yükseldiği durumlarda motorun kendini durdurması oluşabilecek hataların önlenmesi için çok önemlidir. Bu durumları önlemek için VNH2SP30 motor sürücüsü içerisinde yer alan dahili akım sensörü kullanılmıştır. Akım sensöründen gelen değerler mikrodenetleyicinin analog pinlerinden okunarak yüksek akım değerlerine ulaştığında motoru durdurarak oluşabilecek olumsuz durumları önlemektedir. Akım korumasının yanında motor sürücünün kendi içerisinde yüksek gerilim ve düşük gerilim durumlarında kendini kapatma özelliği de bulunmaktadır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarımı yapılan PID kontrol sistemi, mini filament makinesi üzerine entegre edilmiştir, test ve denemeler bu makine üzerinde yapılmıştır. Filament ekstrüzyon makinesi üzerinde bulunan kovanın ısıtma bölgeleri için 2 adet rezistans kullanılmıştır. Kovan üzerindeki ısıtma bölgelerinin sıcaklıklarını ölçmek için 2 adet termokupl kullanılmıştır. Vidanın döndürülmesi için 19 Nm gücünde 24V DC bir motor kullanılmıştır.

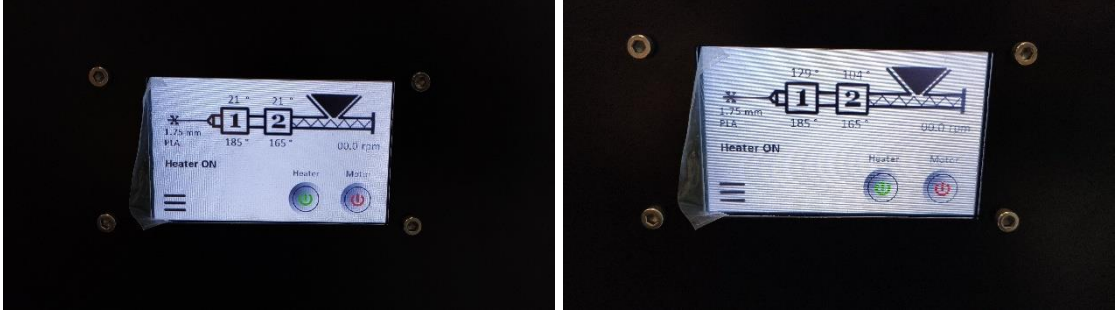
Ekstrüderden çıkan eriyik haldeki filamentin soğutulup katı forma gelmesi için soğutucular kullanılmıştır. Soğuyan filamentin makaraya sarılması içinse sarma ünitesi kullanılmıştır. Sarma ünitesinin üzerinde bulunan çekme motorları ile filament çekilmiştir ve 1.75 mm çapta üretim yapılması sağlanmıştır. Filament çap ölçümleri makinenin üzerinde bulunan komparatörlü çap ölçüm sensörü ile yapılmıştır.

Şekil 5.1’de PID denemeleri yapılan mini filament ekstrüzyon makinesinin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.1. Mini filament ekstrüzyon makinesi [23].

PID denetleyicinin dokunmatik ekranı üzerinden filament üretimi için gerekli olan sıcaklık değerleri ayarlanmıştır. Kovanı ısıtmak için solid state röleye bağlı rezistanslar aktif olmuştur ve sıcaklık değerleri termokupllar ile ölçülerek sıcaklığın ayarlanan değere gelmesi beklenmiştir. Filament üretim denemelerinde 4043D PLA hammadde kullanılmıştır. PLA hammaddenin katalog verilerine uygun olacak şekilde 1. ısıtma bölgesi 185°C, 2. ısıtma bölgesi ise 165°C sıcaklığa ayarlanmıştır [9]. Kovan sıcaklığının oda sıcaklığından ayarlanan sıcaklık değerlerine yükselmesi yaklaşık olarak 20 dakika sürmüştür. Şekil 5.2’de makinenin ısınma aşamalarının görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 5.2. Makinenin ısınma aşaması.

Ekstrüderin ısınması tamamlandıktan sonra kovan içinde bir önceki üretimden kalan artık plastiklerin temizlenmesi için besleme haznesine bir miktar PLA granül eklenmiştir. Bu işlem filamentin içinde artık malzeme veya farklı türden bir plastiğin olmaması için önemlidir. Aynı zamanda kovan içerisinde soğuk granüller geçtikçe kovan soğumakta ve ısı değişimlerine neden olmaktadır. Bu işlem kovan sıcaklığının oturması için de çok önemlidir. Şekil 5.3'de besleme haznesine eklenen PLA hammaddenin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.3. Besleme haznesine eklenen hammadde.

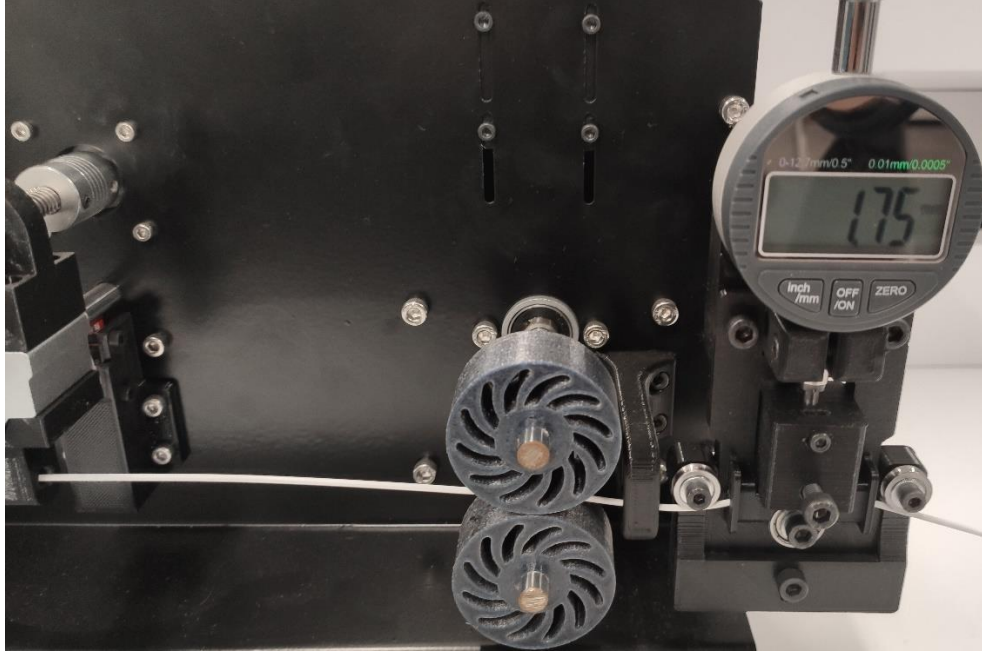
Motor aktif edilerek 10 rpm hıza ayarlanmıştır ve kovanın içindeki önceki üretimden kalan artık plastikler nozul ucundan çıkarılmıştır. Bu işleme kusturma işlemi de denilmektedir. Besleme haznesine eklenen PLA granüller bitene kadar bu işleme devam edilmiştir. Şekil 5.4’de kovan temizleme işleminin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.4. Kovan temizleme işlemi.

Kovan temizleme işlemi yapıldıktan sonra filament üretimi besleme haznesine PLA granüller eklenerek başlatılmıştır. Kullanılan PLA granüller ~5 mm çapındadır ve filament üretimi için uygun akışkanlık değerlerindedir. Eriyik haldeki filament nozul ucundan çıkmaya başlayınca soğutma modülünden geçirilerek soğutulması sağlanmıştır. Soğutma modülünde bulunan fanlar ile 165 cfm hava akışı sağlanmıştır ve filamentin sıcaklık değerini 185°C’den ~30°C’ye düşürülmesi sağlanmıştır. Soğutulmuş filament sarma modülüne bağlanmıştır. Sarma modülü üzerinde 3 adet motor bulunmaktadır. Bu motorlardan ilki çekme tekerlerini kontrol eden motordur. İkinci motor filamentin makaraya düzgün bir şekilde istiflenmesini sağlamak için kullanılan gezici sistemin motorudur. Üçüncü motor ise filament makarasını çeviren ve filamentin sarımını yapmak için kullanılmaktadır.

Sarma modülünde bulunan çekme tekerlerinin hızları ayarlanarak $\pm 0,05$ mm hassasiyet ile 1.75 mm çapında filament üretilmesi sağlanmıştır. Şekil 5.5’de sarma modülünde yer alan filament çap sensörünü görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.5. Filament çap sensörü.

Filament üretiminden sonra filament çap sensörünün hassasiyetini doğrulamak için mikrometre ile ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler yapılırken üretilen filamentin belirli bölümlerinden kesitler alınmıştır ve ölçümler sonucunda hassasiyetin $\pm 0,05$ mm olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.6'da mikrometre ile filament ölçümünün görseline yer verilmiştir.



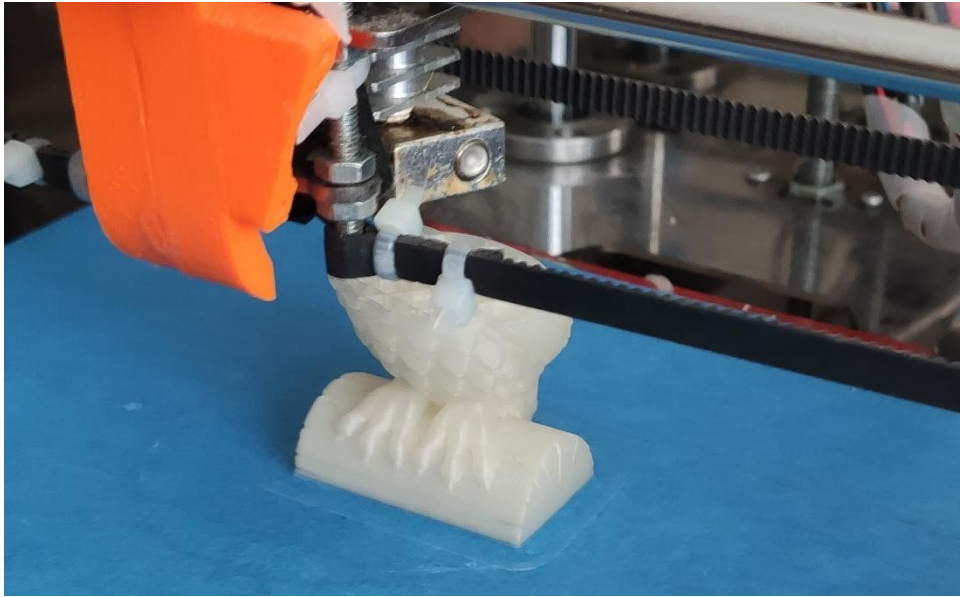
Şekil 5.6. Mikrometre ile filament çap ölçümü.

Makara üzerine filamentin sarılması ile birlikte ilk filament üretim denemeleri yapılmıştır. Şekil 5.7’de makaraya sarılmış filamentin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.7. Üretilen filamentin makaraya sarılması.

Saatlik olarak ~333 metre / 1000 Gr olacak şekilde motor hızları ayarlanarak üretim yapılmıştır. Üretim hızı 2 katına çıkarılmış ve üretilen filamentin kırılma testi yapılmıştır. Hıza bağlı olarak kalitede herhangi bir düşüş gözlenmemiştir. Üretimi yapılan filament ile 3 boyutlu yazıcıdan çıktılar alınmıştır. Yüzey kalitesini göstermek için üzerinde fazla detay bulunan baykuş figürü basılmıştır. Şekil 5.8’de PID denetleyici kullanılarak üretilen filamentin 3 boyutlu yazıcıda baskı görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.8. 3 boyutlu yazıcı ile deneme baskısının üretilmesi.

Baykuş figürünün detayları belirli olacak şekilde baskı alınmıştır. Baskı denemeleri 60 mm/sn hız oranı ile yapılmıştır. Bu değer çoğu 3 boyutlu yazıcı üreticinin standart olarak sunduğu baskı hızıdır. Test denemelerinde yüzeylerdeki katman izlerinin çok düşük olduğu ve saçaklanma, ipliklenme gibi sorunların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda renk pigmenti eklenmediği durumlarda üretilen filamentin içeriğinde yanmış taneciklerin olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.9'da 3 boyutlu yazıcı ile üretilen baykuş figürünün baskılarının görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.9. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen baykuş figürü.

Aynı zamanda PLA granüllere renk pigmenti de katılarak filament üretim denemeleri yapılmıştır. Eklenen renk pigmentleri PP (polipropilen) malzemeden üretilmiştir. Granüllerin içine %3 oranında renk pigmenti eklenmiştir. Renk tonu olarak gümüş gri bir renk seçilmiştir. Bu rengin seçilmesinin nedeni parlak bir görünüme sahip olması ve üretilecek nesnelere üzerinde hataların daha fazla belli olmasıdır. Renk pigmentleri ile PLA granüller ayrı bir kaptaki karıştırılmıştır ve besleme haznesine eklenmiştir. Şekil 5.10'da besleme haznesine eklenen PLA granüller ve renk pigmentinin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.10. Besleme haznesine eklenen PLA ve renk pigmenti karışımı.

Renkli filament üretiminde de aynı proses işlemleri yapılmıştır. Sıcaklık değerleri 1. ısıtma bölgesi için 185°C ve 2. ısıtma bölgesi için 165°C olarak ayarlanmıştır. Soğutma ve sarma işlemi renk katkısız filament üretimi ile aynı olacak şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 5.11’de üretimi yapılan gümüş gri filamentin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.11. Gümüş gri renkte üretilmiş PLA filament.

Gümüş gri filament üretimi tamamlandıktan sonra, renk katkısız filament denemelerinde 3 boyutlu yazıcı ile baskı alınan baykuş figürü tekrar üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcı üretim hızı 60 mm/sn ayarlanmıştır. Üretim sırasında herhangi bir saçaklanma, tıkanma, yanık filament sorunları yaşanmamıştır. 200 mikron katman kalınlığı ile üretim yapılmıştır. Sıcaklık değerleri nozul 205°C'ye ve tabla 60°C'ye ayarlanmıştır. Dış yüzeyde katman izlerinin çok az belli olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.12'de gümüş gri filament ile üretilen baykuş figürünün görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.12. Gümüş gri filament ile üretilmiş baykuş figürü.

Piyasada bulunan başka bir markanın ürettiği gümüş renkli PLA filament tedarik edilerek aynı ayarlarda ve aynı 3 boyutlu yazıcıda test baskıları alınmıştır. Sıcaklık değerleri nozul 205°C'ye ve tabla 60°C'ye ayarlanmıştır. Yazıcı hızı 60 mm/sn ve 200 mikron katman kalınlığı olacak şekilde baykuş figürünün baskısı alınmıştır. Figürün stl dosyası aynı dilimleme programı ile dilimlenmiştir ve ayarlar değiştirilmeden aynı dosya kullanılarak hem dışarıdan tedarik edilen filament ile hem de bu çalışmada konusu geçen mini filament ekstrüzyon makinesi ile baskı örnekleri alınmıştır.

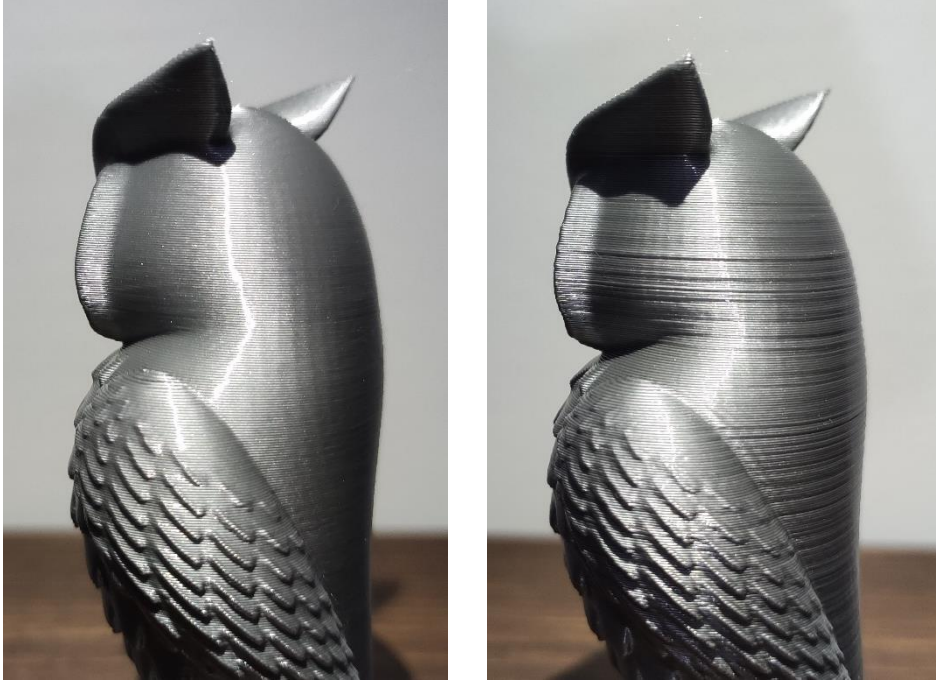
Şekil 5.13'de başka bir markaya ait olan gümüş gri filament ile üretilen baykuş figürünün görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.13. Başka bir markaya ait gümüş gri filament ile üretilmiş baykuş figürü.

Aynı koşullar altında 2 farklı filament ile üretilen figürlerin yüzey kalitelerinde farklar görülmektedir. Bu çalışmada konusu geçen mini filament makinesi ile üretilmiş filament ile basılan baykuş figürünün yüzey pürüzlülüğü daha az iken başka bir markanın filamentini ile basılan baykuş figürünün yüzeylerinde katmanlar arası tutarsızlık ve renk farklılıkları gözlemlenmiştir. 2 filamentin hammaddesi de 4043D PLA'dır. Dışarıdan tedarik edilen filamentin renklendirilmesi için kullanılan renk pigmenti bilinmemekle beraber ~%2 değerinde olan bu karışımın meydana getireceği farklılıklar önemsenmemiştir.

Şekil 5.14’de 2 farklı filament ile üretilen baskının daha detaylı karşılaştırma görseline yer verilmiştir. Soldaki görselde bu çalışmada konusu geçen makinede üretilmiş filamentin baskı örneği, sağdaki görselde ise başka bir markadan tedarik edilmiş bir filamentin baskı örneği görülmektedir.



Şekil 5.14. 2 farklı filament ile baskısı alınan figürlerin karşılaştırılması.

Standart filament üretiminin yanında katkıli filamentler üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bu filamentler arasında geri dönüşümden üretilmiş zeytin çekirdeği katkıli ABS granüller temin edilerek filament üretim denemeleri yapılmıştır. Şekil 5.15’de temin edilen katkıli granüllerin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.15. Zeytin çekirdeği katkıli ABS granüller.

Zeytin çekirdeği katkılı ABS filamentlerin üretiminde ısı değerleri üretim sırasında bulunmuştur. Genel olarak ABS granüllerden filament üretiminde sıcaklık değerleri 220°C ile 240°C arasında olmaktadır. %40 zeytin çekirdeği katkısı ile birlikte üretim için en uygun değerlerin 1. ısıtma bölgesi için 188°C ve 2. ısıtma bölgesi için 164°C olarak bulunmuştur. Üretimde motor hızı 16 rpm değerine sabitlenmiştir.

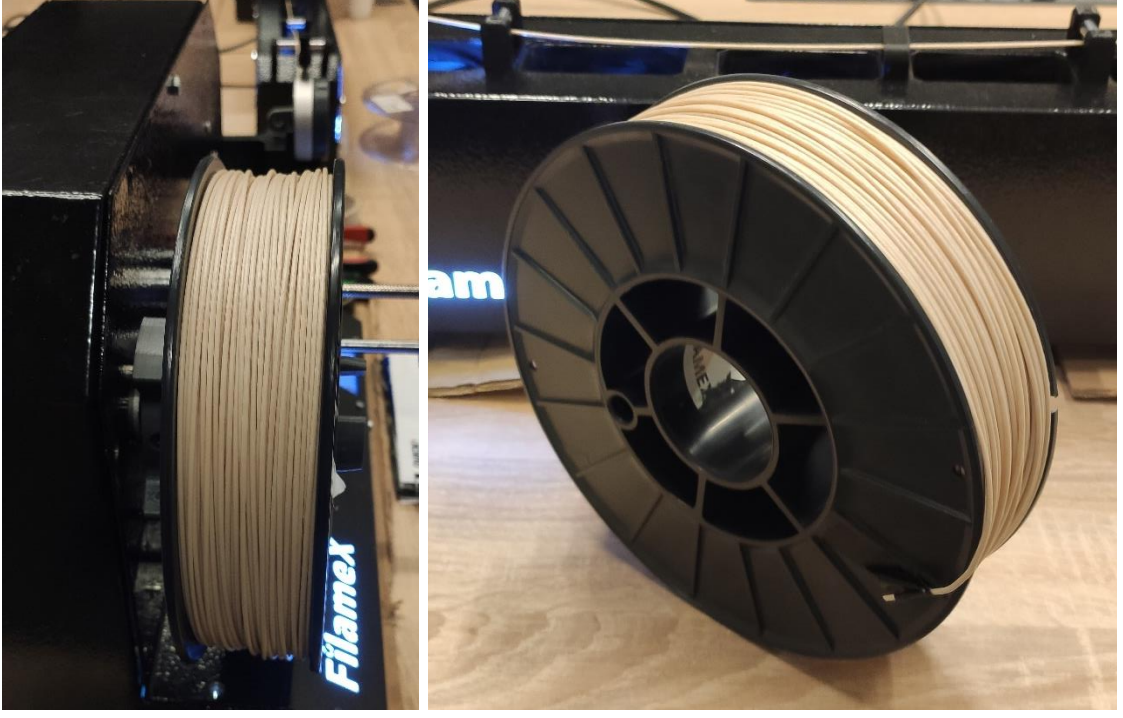
Şekil 5.16'da ekran üzerinden ayarlanan ısı değerlerinin görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.16. Katkılı filament için ısı değerleri.

3 boyutlu yazıcılar ile katkılı filament ile baskı almak, standart filament ile baskı almaktan daha zor bir süreçtir. Bunun nedeni katkılı filamentlerin içinde bulunan katkı taneciklerinin boyutlarıdır. Katkı taneciklerinin boyutu yaklaşık 20 - 50 mikron aralığında olmalıdır. Filament üretimleri sırasında 3 boyutlu yazıcı ile üretimde nozul ucundaki oluşabilecek tıkanmaları minimuma düşürmek için filament çapı 1.70 mm olarak üretilmiştir. Bu sayede üretim denemeleri sırasında herhangi bir tıkanma yaşanmamıştır. Filament üretimleri başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır.

Şekil 5.17'de zeytin çekirdeği katkılı ABS filament üretimlerine ait görsellere yer verilmiştir.



Şekil 5.17. Zeytin çekirdeği katkılı filament.

Ekstrüzyon makineleri ile geliştirilen PID denetleyicisi, test ve denemelerde kullanılan mini filament ekstrüzyon cihazı üzerinde başarılı bir şekilde çalışmıştır. Denemelerde istenilen sıcaklık değerlerinde $\pm 1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle çalışmıştır. Aynı zamanda dahili motor sürücü kullanılmıştır ve akım, hız dalgalanmaları görülmemiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mevcut durumda 3 boyutlu yazıcıların hammaddesi olan filamentlerin üretiminde ısı denetimi için standart PID kontrol cihazları kullanılmaktadır. Bu PID'ler röle veya SSR denetimlidir ve kullandıkları termokuplların ölçüm hassasiyetleri düşük cihazlardır. Ayrıca standart PID kontrol cihazlarının 1 adet termokupl girişi ve 1 adet güç çıkışı vardır. Filament ekstrüzyon sistemlerinde genel olarak 4 adet ısıtma bölgesi bulunmaktadır. Her bölge için ayrı PID kontrol cihazı kullanılmaktadır. Bu da üretim prosesini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda bu PID denetleyicilerin sağlıklı filament üretimi için gerekli olan $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassasiyetine sahip olmadığı görülmüştür.

Bu çalışma ile ekstrüzyon makinelerinde filament üretiminde sıcaklık hassasiyeti artırılarak üretilen filamentin kalitesinin artırılması hedeflenmiştir. Filamentin üretimi sırasında sıcaklık değişimleri $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de tutularak sıcaklık değişimlerinden kaynaklı filamentin kırılması ve renk değişimleri gibi sorunlar önlenmiştir. Geliştirilen PID denetleyici ile sıcaklık ölçüm hassasiyeti yüksek ve SSR (Solid State Relay) ile hassas ısıtıcı denetimi yapılmıştır. Filamentler sıcaklıkları sabit tutularak üretileceği için daha hassas çap denetimi, yanık içermeyen polimer karışımı ve daha düşük kırılma özelliklere sahip olmaktadır. Geliştirilen PID denetleyici üzerinde 4 adet termokupl ölçümü ve 4 adet SSR çıkış bulunmaktadır. Motor sürücü kontrolü de yapılabilmektedir. Dokunmatik bir panel üzerinden tüm kontroller yapılabilmektedir. Bu da kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Geliştirilen sistem diğer yüksek ısı denetimi gerektiren endüstriyel alanlara da uygulanabilir olarak tasarlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A. F Yuran ve İ. Yavuz, “Endüstri 4.0 ve 3 boyutlu yazıcıların karşılaştırılması”, *Mühendis ve Makina*, c. 62, sayı 704, ss. 580-606, 2021.
- [2] S. Kökhan ve U. Özcan, “3d yazıcıların eğitimde kullanımı”, *Bilim, Eğitim, Sanat ve Teknoloji Dergisi*, c. 2, sayı 1, ss. 81-85, 2018.
- [3] Ü. G. Başçı ve R. Yamanoglu, “Yeni nesil üretim teknolojisi : fdm ile eklemeli imalat”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, c. 5, sayı 2, ss. 339-352, 2021.
- [4] E. Çanti, M. Aydın ve F. Yıldırım, “Production and characterization of composite filaments for 3d printing”, *Politeknik Dergisi*, c. 21 sayı 2, ss. 397-402, 2018.
- [5] İ. Karagöz, A. Danış Bekdemir, ve Ö. Tuna, “3b yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemler ve gelişmeler üzerine bir derleme”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 4, ss.1186-1213, 2021.
- [6] M. Aydın, B. Güler ve K. Çetinkaya, “Dikey ekstrüzyon (filament) sistemi tasarım ve prototip imalatı”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, c. 2, sayı 1, ss. 1-10, 2018.
- [7] A. Özbilgi, “Plastik enjeksiyon makinesi tasarımı ve imalatı”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye, 2019.
- [8] Anonim. (2021, 14 Aralık). [Online]. Erişim: https://www.iemai3d.com/wpcontent/uploads/2020/12/PEEK_TDS.pdf
- [9] Anonim. (2021, 14 Aralık). [Online]. Erişim: https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf
- [10] Anonim. (2021, 14 Aralık). [Online]. Erişim: <https://tde-instruments.de/wpcontent/uploads/2019/09/EMKO-ecoPID-PID-Temperature-Controller-Instruction-Manual.pdf>
- [11] A. Demirci, “Plastik ekstrüderlerinde ısıtma-sogutma proseslerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [12] C. Uçar, “Endüstriyel sistemlerde ileri kontrol algoritmalarının uygulanması”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [13] A. Gani, E. Kılıç, Ö. F. Keçecioglu, H. Açıkgoz ve M. Şekkeli, “Endüstriyel uygulamalarda kullanılan karışım tankının seviye ve sıcaklık denetimi için pid ve bulanık mantık denetleyici tasarımı”, *Mühendis ve Makina*, c. 57, sayı 675, ss. 41-48, 2016.
- [14] B. Çelik, B. Şener, G. Serin ve H. O. Unver, “Ergiyik filament fabrikasyonu, 3b yazıcılar için kompozit filament ekstrüder makinesi geliştirilmesi”, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, c. 17, sayı 2, ss. 65-75, 2020.

- [15] Anonim. (2021, 17 Aralık). [Online]. Erişim: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- [16] M. H. Wankhade ve S. G. Bahaley, “Design and development of plastic filament extruder for 3d printing”, *IRA-International Journal of Technology & Engineering*, c. 10, sayı 3, ss. 23-30, 2018.
- [17] Anonim. (2021, 17 Aralık). [Online]. Erişim: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675>.
- [18] T. Demirel, “Plastik ekstrüderlerinde malzeme akışı”, Yüksek lisans tezi, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1997.
- [19] Anonim. (2021, 17 Aralık). [Online]. Erişim: <https://docs.rsonline.com/12ce/0900766b8158374c.pdf>
- [20] Anonim. (2021, 29 Aralık). [Online]. Erişim: <https://www.st.com/resource/en/data-sheet/vnh2sp30-e.pdf>
- [21] Anonim. (2022, 1 Ocak). [Online]. Erişim: <https://elimko.com.tr/files/Termokupllar-GenelBilgiler.pdf>
- [22] G. Yıldırım, S. Yıldırım, ve E. Çelik, “Yeni bir bakış - 3 boyutlu yazıcılar ve öğretimsel kullanımı: bir içerik analizi”, *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi*, c. 13, sayı 25, ss. 163-184, 2018.
- [23] Anonim. (2022, 1 Ocak). [Online]. Erişim: <https://www.-3dfilamex.com/filamex-fx-plus-serisi-filament-uretim-hatti/>
- [24] İ. Yazıcı, A. Özdemir ve F. Vatansever, “Kendinden ayarlamalı sayısal pıd tasarımı” *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 6 sayı 1, ss. 73-75, 2002.
- [25] E. Çantı, M. Aydın, “Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts”, *Rapid Prototyping Journal*, c. 24, sayı 1, ss. 171-176, 2018.
- [26] Anonim. (2021, 12 Aralık). [Online]. Erişim: <https://3dprinting.com/materials/>
- [27] A. Gültaş, A. Çankaya, A. Güllü ve M. Gürü, “Çinko borat katkıli polipropilen’in reolojik özelliklerinin belirlenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 29, sayı 2, ss. 227-234, 2014.
- [28] M. D. Symes, P. J. Kitson, J. Yan, C. Richmond, G. Cooper, R Bowman, T. Vilbrandt ve L. Cronin, “Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis”, *Nature Chemistry*, c. 4, sayı 5, ss. 349-354, 2012.
- [29] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei ve S. Wang, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”, *Composites Part B: Engineering*, c. 80, sayı 1, ss. 369-378, 2015.
- [30] Z. Weng, J. Wang, T. Senthil ve L. Wu, “Mechanical and thermal properties of abs/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3d printing”, *Materials & Design*, c. 102, ss 276-283, 2016.
- [31] S. Dul, L. Fambri ve A. Pegoretti, “Fused deposition modelling with abs–graphene nanocomposites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 85, sayı 1, ss. 181-191, 2016.

- [32] M. Aydın, F. Yıldırım ve E. Çantı, “Farklı yazdırma parametrelerinde pla filamentin işlem performansının incelenmesi”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, c. 3, sayı 2, ss. 102-115, 2019.
- [33] Ö. Zaimoğlu ve M. Yıldırım, “Moda tasarımında inovatif bir yöntem: üç boyutlu yazıcılar ile giysi tasarımı uygulamaları”, *İdil*, c. 6, sayı 38, ss. 2949-2976, 2017.
- [34] N.C. Sakarya, “Tekstil ve moda tasarımında üç boyutlu yazıcı kullanımının tasarıma etkileri ve bir tasarım önerisi”, Yüksek lisans tezi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [35] C. Qianqian, B. Philippe, P. C. Hae, S. Abdelghani ve B. Joël. “Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes”, *Composite Structures*, c. 93, ss. 1692–703, 2011.
- [36] F. Perrin, M. Bureau, J. Denault ve JI. Dickson, “Mode I interlaminar crack propagation in continuous glass fiber/polypropylene composites: temperature and molding condition dependence”, *Composites Science and Technology*, c. 63, ss. 597–607, 2003.
- [37] P. Mitschang, M. Blinzler ve A. Wöginger, “Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends”, *Composites Science and Technology*, c. 63, ss. 99–110, 2003.
- [38] M. S. Kamer ve Ş. Temiz, “3 boyutlu yazıcıda abs ve pla filamentler ile farklı tabla ve nozul sıcaklıkları kullanılarak üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin araştırılması”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 24, sayı 4, ss. 341-358, 2021.
- [39] N. B. Turner, R. Strong ve A. S. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: 1. Process design and modeling”, *Rapid Prototyping*, c. 20, ss. 192–204, 2014.
- [40] N. B. Turner, R. Strong ve A. S. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness”, *Rapid Prototyping*, c. 21, ss. 61-250, 2015.
- [41] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song ve Z. Li, “Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling”, *Materials Science and Engineering*, c. 301, ss. 30-125, 2001.
- [42] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei ve S. Wang, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”, *Composites Part B: Engineering*, c. 80, ss. 78-369, 2015.
- [43] H. L. Tekinalp, V. Kunc, G. G. M. Velez, C. E. Duty, L. J. Love ve A. K. Naskar, “Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing”, *Composites Science and Technology*, c. 105, ss. 50-144, 2014.
- [44] R.Gray, D. Baird ve J. Bohn, “Thermoplastic composites reinforced with long fiber thermotropic liquid crystalline polymers for fused deposition modeling” *Polymers and Polymer Composites*, c. 19, sayı 4, 94-383, 1998.
- [45] R.Gray, D. Baird ve J. Bohn, “Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts”, *Rapid Prototyping*, c. 4, sayı 1, 14–25, 1998.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat OFLEZER

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Lise	Anestezi Teknisyenliği	Sağlık Meslek Lisesi	2012