

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK ÜÇ BOYUTLU
YAZICININ MODELE DAYALI DENETİMİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
AHMET PARLAK

HAZİRAN 2021

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK ÜÇ BOYUTLU
YAZICININ MODELE DAYALI DENETİMİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet PARLAK

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALTAN

ZONGULDAK

Haziran 2021

KABUL:

Ahmet PARLAK tarafından hazırlanan “Optimizasyon Algoritmaları kullanılarak Üç Boyutlu Yazıcının Modele Dayalı Denetim” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
17/06/2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALTAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Rukiye UZUN ARSLAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Batıkan Erdem DEMİR

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../2021

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ahmet PARLAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK ÜÇ BOYUTLU YAZICININ MODELE DAYALI DENETİMİ

Ahmet PARLAK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALTAN

Haziran 2021, 71 sayfa

Üç boyutlu (3B) biyo-yazıcılar, rejeneratif tıp ve doku mühendisliği alanlarında özellikle kulak, burun ve yüz-çene protezlerinin biyo-baskılarında yoğun şekilde kullanılmaktadır. Modelden modele farklılık gösteren baskı hataları yapay doku ve organların biyo-baskısında sıklıkla görülmektedir. Modelin yüzeyinde meydana gelen hatalar yazdırılacak organın verimli kullanımına engel olmaktadır. Yapay doku ve organ biyo-baskısı sürecinde meydana gelen hataların en aza indirilebilmesi için 3B yazıcının kontrolcü performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, yapay doku ve organların biyo-baskısı için Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm-WOA) tabanlı yeni bir uyarlanabilir PID kontrolcü geliştirilmiştir. Yerel minimumlardan kaçınmak ve kontrolcünün geçici durum yanıtını iyileştirebilmek için WOA algoritması tercih edilmiştir. Önerilen algoritmanın yakınsama hızı PID kontrolcünün parametrelerinin hızlı ve doğru şekilde ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Geliştirilen WOA tabanlı uyarlanabilir PID kontrolcünün performansı, performans metriklerinden biri olan zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (Integral of Time multiplied Squared Error-ITSE) yardımıyla ölçülmüştür. 3B yazıcı

ÖZET (devam ediyor)

için önerilen kontrolcünün performansı, klasik PID ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA) tabanlı PID kontrolcülerin performansı ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlardan, önerilen WOA tabanlı uyarlanabilir PID kontrolcünün 3B yazıcının geçici tepkisini önemli ölçüde iyileştirdiği ve yazdırılan burun ve kulak gibi organlardaki yüzey hatalarını ve baskı sürelerini en aza indirdiği görülmektedir.

Önerilen WOA tabanlı uyarlanabilir kontrolcü algoritması özgün olarak tasarlanan 3B yazıcı üzerine gömülerek kulak ve burun gibi organların baskıları alınmıştır. Yazdırılan organ baskıları klasik PID ve GA tabanlı PID kontrolcü algoritmaları ile yazdırılan modeller ile kıyaslanmıştır. WOA tabanlı uyarlanabilir PID kontrolcünün diğer kontrolcü algoritmalarına kıyasla hem baskı süresinde hem de yüzey hatalarının en aza indirilmesinde oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu yazıcı, yapay doku ve organ, metasezgisel optimizasyon, model tabanlı denetim.

Bilim Kodu: 608.05.00, 608.05.02

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

MODEL-BASED INSPECTION OF THE THREE-DIMENSIONAL PRINTER USING OPTIMIZATION ALGORITHMS

Ahmet PARLAK

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Aytaç ALTAN

June 2021, 71 pages

Three-dimensional (3D) bio-printers are used extensively in regenerative medicine and tissue engineering, especially in bio-printing of ear, nose and face-chin prostheses. Printing errors that differ from model to model are frequently seen in the bio-printing of artificial tissue and organ. Errors occurring on the surface of the model prevent the efficient use of the organ to be printed. The controller performance of the 3D printer needs to be improved so that errors in the artificial organ and tissue bio-printing process can be minimized. In this thesis, a novel adaptive PID controller based on Whale Optimization Algorithm (WOA) has been developed for bio-printing of artificial tissues and organs. The WOA algorithm is preferred to avoid local minima and to improve the transient response of the controller. The convergence speed of the proposed algorithm allows the parameters of the PID controller to be tuned quickly and accurately. The performance of the developed WOA based adaptive PID controller has been measured with the help of Integral of Time multiplied Squared Error (ITSE), which is one of the performance metrics. The performance of the proposed controller for the 3D printer has

ABSTRACT (continued)

been compared to the classical PID and Genetic Algorithm (GA) based PID controllers' performance. From the experimental obtained results, it can be seen that the proposed WOA based adaptive PID controller significantly improves the transient response of the 3D printer and minimizes surface defects in the printed organs such as the nose and ear.

The proposed WOA-based adaptive controller algorithm has been embedded on the originally designed 3D printer, and prints of organs such as ears and nose have been taken. Printed organ prints have been compared with models printed with classical PID and GA based PID controller algorithms. It has been observed that the WOA-based adaptive PID controller is quite successful in both printing time and minimizing surface defects compared to other controller algorithms.

Keywords: Three dimensional printer, artificial tissue and organ, metaheuristic optimization, model based control.

Science Code: 608.05.00, 608.05.02

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bilgi, birikim ve desteklerini benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALTAN 'a, en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu zorlu ve yorucu süreçte bana sürekli destek olan, beni cesaretlendirerek ve motive ederek manevi güç olan başta eşim olmak üzere değerli aileme teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamı 2020-75737790-01 numaralı proje kapsamında destekleyen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 YAPAY ORGAN VE DOKU BASIMI İÇİN 3B YAZICI TASARIMI.....	5
2.1 3B YAZICININ MEKANİK YAPISI	5
2.2 3B YAZICININ ELEKTRONİK DONANIMI.....	8
BÖLÜM 3 3B YAZICININ MODELLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER.....	13
3.1 KONTROL SİSTEMLERİ	13
3.1.1 Sistem.....	13
3.1.2 Denetim.....	14
3.1.3 Denetlenen	14
3.1.4 Giriş ve Çıkış	15
3.2 KONTROL YÖNTEMLERİ	15
3.2.1 Açık Çevrimli Kontrol	16
3.2.2 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri	16
3.3 GENETİK ALGORİTMA.....	19

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.3.1 Genetik Algoritma Bileşenleri	19
3.3.2 Genetik Algoritma Çalışması.....	20
3.4 BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI.....	21
3.5 ZIEGLER-NICHOLAS YÖNTEMİ.....	24
3.6 LEVENBERG-MARQUARDT SİSTEM TANIMLAMA YÖNTEMİ.....	24
3.7 TRANSFER FONKSİYONUNUN ELDE EDİLMESİ	26
3.8 EĞİTİM İÇİN KULLANILAN GEOMETRİK ŞEKİLLER.....	29
3.8.1 Yüzeysel Modeller	29
3.8.1.1 Kare Prizma.....	29
3.8.1.2 Silindir	30
3.8.1.3 Papyon	31
3.8.2 Katı Cisim Modeller	32
3.8.2.1 Dikdörtgenler Prizması	32
3.8.2.2 Küp.....	33
3.8.2.3 Silindir.....	33
3.8.2.4 Piramit	34
3.8.2.5 Dikdörtgen İçinden Çıkartılmış Silindir.....	35
3.8.2.6 Yıldızlı Papyon.....	35
3.8.2.7 Değiştirilmiş Dikdörtgenler Prizması.....	36
3.8.2.8 Kubbe	36
3.9 ZAMAN AĞIRLIKLİ KARESEL HATANIN İNTEGRALI.....	39
BÖLÜM 4 3B YAZICININ MODELE DAYALI DENETİMİ.....	41
4.1 3B YAZICININ TRANSFER FONKSİYONUNUN ELDE EDİLMESİ.....	41
4.1.1 x Eksenine için Transfer Fonksiyonu	41
4.1.2 y Eksenine için Transfer Fonksiyonu	43
4.1.3 z Eksenine için Transfer Fonksiyonu	46
4.2 SİSTEM MODELLENMESİ	48
4.3 KLASİK YÖNTEM PID KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ	49

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.3.1 x Eksenine için PID Katsayıları	49
4.3.2 y Eksenine için PID Katsayıları	50
4.3.3 z Eksenine için PID Katsayıları.....	51
4.4 GA-PID YÖNTEMİYLE PID KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ	51
4.4.1 x Eksenine için GA-PID Katsayıları	52
4.4.2 y Eksenine için GA-PID Katsayıları	53
4.4.3 z Eksenine için GA-PID Katsayıları.....	55
4.5 WOA-PID YÖNTEMİYLE PID KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ	56
4.5.1 x Eksenine için WOA-PID Katsayıları.....	56
4.5.2 y Eksenine için WOA-PID Katsayıları	58
4.5.3 z Eksenine için WOA-PID Katsayıları.....	59
 BÖLÜM 5 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	 61
 BÖLÜM 6 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	 65
 KAYNAKLAR.....	 67
 ÖZGEÇMİŞ	 71



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Kulak kaybı olan (a) protezsiz (b) protezli hastanın görünümü.....	2
Şekil 1.2 Burun kaybı olan (a) protezsiz (b) protezli hastanın görünümü.	2
Şekil 2.1 Ekstruderin (a) önden görünüm (b) arkadan görünüm.....	6
Şekil 2.2 Step motor (a) nema23 (b) nema17 (c) 400BM encoder.	6
Şekil 2.3 Eksen sıfırlama butonları (a) x eksen (b) y eksen (c) z eksen.	7
Şekil 2.4 Yatak, araba ve mil yapısı.....	7
Şekil 2.5 3B yazıcı Solidworks çiziminin farklı açılardan gösterimi.....	8
Şekil 2.6 Yapay organ ve doku baskısı için tasarlanan 3B yazıcının mekanik yapısı.	8
Şekil 2.7 SKR Pro v1.1 kontrol kartı.	9
Şekil 2.8 TB 6600 4A adım motor sürücüsü.....	9
Şekil 2.9 Elektronik komponentler (a) ESP32 (b) tek kanal röle kartı.....	10
Şekil 2.10 Elektronik komponentler (a) lcd ekran (b) trafo (c) pano.	10
Şekil 2.11 3B yazıcının elektronik tasarımının blok diyagramı.....	11
Şekil 3.1 Basit bir sistem gösterimi.....	14
Şekil 3.2 Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.....	16
Şekil 3.3 Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.....	16
Şekil 3.4 PID kontrollü kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.	18
Şekil 3.5 Genetik algoritma bileşenleri.	20
Şekil 3.6 Kambur balinaların kabarcık ağıyla beslenme davranışı.	21
Şekil 3.7 WOA akış şeması.....	23
Şekil 3.8 ZN yöntemi için uyarlanan deney düzeneği.	24
Şekil 3.9 Nema23 hız/tork grafiği.	28
Şekil 3.10 Kare prizmanın (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	30
Şekil 3.11 Silindirin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	30
Şekil 3.12 Papyonun (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	32
Şekil 3.13 Dikdörtgenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	32

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.14 Küpün (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	33
Şekil 3.15 Silindirin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	34
Şekil 3.16 Piramitin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	34
Şekil 3.17 Silindir çıkmış dikdörtgenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	35
Şekil 3.18 Yıldızlı papyonun (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	36
Şekil 3.19 Değiştirilmiş dikdörtgenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.	36
Şekil 3.20 Kubbenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.....	37
Şekil 4.1 x eksen deney düzeneği.	41
Şekil 4.2 x eksen için oluşturulan model grafiği.....	42
Şekil 4.3 x eksen için oluşturulan modelin test edilmesi.	43
Şekil 4.4 y eksen deney düzeneği.	44
Şekil 4.5 y eksen için oluşturulan model grafiği.	44
Şekil 4.6 y eksen için oluşturulan modelin test edilmesi.	45
Şekil 4.7 z eksen deney düzeneği.	46
Şekil 4.8 z eksen için oluşturulan model grafiği.....	47
Şekil 4.9 z eksen için oluşturulan modelin test edilmesi.	48
Şekil 4.10 Tasarlanan 3B yazıcının blok gösterimi.....	49
Şekil 4.11 ZN yöntemi ile x ekseninin birim basamak tepkisi.	50
Şekil 4.12 ZN yöntemi ile y ekseninin birim basamak tepkisi.	50
Şekil 4.13 ZN yöntemi ile z ekseninin birim basamak tepkisi.....	51
Şekil 4.14 GA-PID yöntemi ile x ekseninin birim basamak tepkisi.	52
Şekil 4.15 x eksen için klasik PID ile GA-PID birim basamak tepkisi kıyaslanması.	53
Şekil 4.16 GA-PID yöntemi ile y ekseninin birim basamak tepkisi.	54
Şekil 4.17 y eksen için klasik PID ile GA-PID birim basamak tepkisi kıyaslanması.	54
Şekil 4.18 GA-PID yöntemi ile z ekseninin birim basamak tepkisi.	55
Şekil 4.19 z eksen için klasik PID ile GA-PID birim basamak tepkisi kıyaslanması.....	56
Şekil 4.20 x eksen için WOA-PID birim basamak tepkisi.....	57
Şekil 4.21 x eksen için klasik PID, GA-PID ve WOA-PID karşılaştırılması.	57
Şekil 4.22 y eksen için WOA-PID birim basamak tepkisi.	58
Şekil 4.23 y eksen için klasik PID, GA-PID ve WOA-PID karşılaştırılması.	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.24 z ekseni için WOA-PID birim basamak tepkisi.....	59
Şekil 4.25 z ekseni için klasik PID, GA-PID ve WOA-PID karşılaştırılması.	59
Şekil 5.1 Solidworks katı model çizimleri (a) burun (b) kulak.	61
Şekil 5.2 Klasik PID katsayıları ile basılan (a) kulak (a) burun.	63
Şekil 5.3 GA-PID katsayıları ile basılan (a) kulak (a) burun.	63
Şekil 5.4 WOA-PID katsayıları ile basılan (a) kulak (a) burun.	63





ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 PID katsayılarının sisteme etkileri	19
Çizelge 3.2 Nema23 motor değerleri.	28
Çizelge 3.3 İkincil olarak basılan geometrik şekillere ilişkin veriler.....	38
Çizelge 4.1 x eksen için iterasyon sonuçları.....	43
Çizelge 4.2 y eksen için iterasyon sonuçları.....	45
Çizelge 4.3 z eksen için iterasyon sonuçları.	47
Çizelge 4.4 x eksen için GA-PID Parametreleri ve PID katsayıları.	52
Çizelge 4.5 y eksen için GA-PID Parametreleri ve PID katsayıları	53
Çizelge 4.6 z eksen için GA-PID Parametreleri ve PID katsayıları	55
Çizelge 4.7 Tüm eksen ve yöntemler için PID katsayıları	60
Çizelge 5.1 3B baskılara ait sayısal veriler.	62



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

τ	: Tau
Δ	: Delta
θ	: Teta
ω	: Omega
ξ	: Kısı
$\emptyset$	: Fi
Ω	: Ohm

KISALTMALAR

3B	: Üç Boyutlu
3D	: Three Dimensional
ARM	: Azaltılmış Komut Seti (Advanced RISC Machines)
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
bit/s	: Saniyedeki Bit Sayısı
DC	: Doğru Akım
dk	: Dakika
g	: Gram
GA	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
GA-PID	: Genetik Algoritma Tabanlı PID
ITSE	: Zaman Ağırlıklı Karesel Hatanın İntegrali (Integral Time-weighted Squared Error)
LCD	: Sıvı Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)
LM	: Levenberg-Marquardt
m	: Metre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

ör/s	: Saniyedeki Örnek Sayısı
P	: Oransal (Proportional)
PI	: Oransal İntegral (Proportional Integral)
PD	: Oransal Türevsel (Proportional Derivative)
PID	: Oransal İntegral Türevsel (Proportional Integral Derivative)
PLA	: Poliaktik Asit
RGB	: Kırmızı Yeşil Mavi (Red Green Blue)
s	: Saniye
USB	: Evrensel Seri Veriyolu (Universal Serial Bus)
WOA	: Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm)
WOA-PID	: Balina Optimizasyon Algoritma Tabanlı PID
ZN	: Ziegler–Nichols

BÖLÜM 1

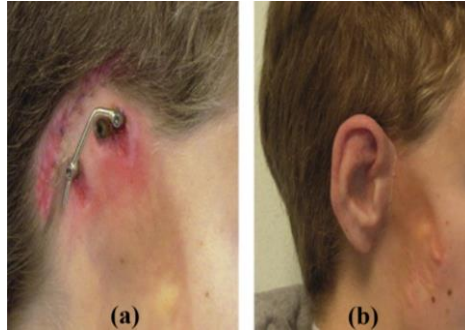
GİRİŞ

3B yazıcılar 1984 yılında bir fizik mühendisi olan Dr. Charles Hull tarafından geliştirilmiştir. Stereolitografi yöntemiyle baskı yapan bu yazıcının geliştirilmesinden sonra uzun yıllar günlük kullanıma girememiş, 2006 yılında Reprap projesi ile açık kaynak kodlu, düşük maliyetli üç boyutlu yazıcıların üretilmesi sonucunda günlük kullanıma girmeye başlamıştır. 3B yazıcılar günümüzde mühendislik, otomotiv parçaları, kuyumculuk aksesuarları, medikal parçalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Gross et al. 2014). Örneğin insanın rahatça yürüyebilmesi için gerekli olan ayak bileği (Zhong and Zhao 2017), robot kolu (Banerjee et al. 2018), otomotiv parçası (Durgun 2018) ve çeşitli modellerde üretilen seramik malzemeler bunlardan bazılarıdır (Owen et al. 2018). 3B yazıcıların kullanım alanları ve boyutlarında da önemli gelişmeler olmaktadır. 3B yazıcılar ile günümüzde silah kabzasından tekstil ürünlerine (Bozdemir 2018), ev veya ev parçası basılabildiği gibi çok küçük ölçekte mühendislik ve tıbbi gereksinimlerin olduğu parçalar da basılabilmektedir (Sathish et al. 2018).

3B yazıcılar günümüzde hızla gelişen endüstriyel alanlarda oldukça revaçtadır. Önceleri şirketlerin Ar-Ge bölümleri bir ürünü tasarlayıp fiziksel olarak elde edebilmeleri günler veya haftalar sürerken 3B yazıcılar sayesinde bu süreç artık saatlerle kıyaslanabilmektedir. 3B yazıcılar, son zamanlarda biyo-baskı konusunda da hızla kullanılmaya başlanmıştır.

Yüz, çene, kafatası, boyun ve ağız bölgesi ile ilgili hastalık, travma, doku eksikliği ve estetik sorunların tanı ve tedavisi maksillofasiyel cerrahi olarak adlandırılmaktadır. Plastik cerrahi, estetik cerrahi, rekonstrüktif mikrocerrahi, ortognatik cerrahi, diş hekimliği, kulak burun boğaz hekimliği maksillofasiyel cerrahinin ilgi alanları arasında yer almaktadır. Hastanın yüz bölgesinde, özellikle kulak, burun ve çene bölgesindeki kusurlar, hastanın duygusal bütünlüğünü, sosyal etkileşimini, benlik algısını ve yaşam kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Bauermeister et al. 2016). Maksillofasiyal kusurları olan hastaların yaşam kalitesi, cerrahi rekonstrüksiyon veya protez sağlandığında bile genellikle risk altındadır (Nemli vd. 2013, Irish et al. 2009, Levine et al. 2005, Horlock et al. 2005). Travmatik burun

ve kulak kusurları, özellikle toplumda gerçekleştirilen aktivitelerde özgüven kaybına ve moral motivasyon kaybına neden olabilmektedir (Hatamleh et al. 2010). Burun ve kulağın yüz bölgesindeki konumu göz önünde bulundurulduğunda, bu organların kaybı veya bu organlarda oluşacak kusurlar hastanın fiziksel görünümünü olumsuz yönde etkileyeceğinden, cerrahi operasyonun mümkün olmadığı durumlarda giyilebilir protez burun veya kulağın kullanımı büyük önem taşımaktadır (Watson and Hatamleh 2014). Aynalanacak mevcut bir parça olmadığında, geleneksel taş kalıplar kullanılarak üretilen protez burun ve kulağın hastaya uygulanmasında problemler yaşandığı bildirilmektedir (Hatamleh and Watson 2013). Literatürde yapılan çalışmalarda, burun ve kulak kaybı olan hastalara uygun protez organların basılabilmesi için hastanın yüz bölgesindeki yumuşak ve sert doku ayrı ayrı segmentlere ayrılmaktadır. Protezin hastanın cilt rengine uyumlu olması, hastanın protezi etkin kullanabilmesi açısından önemli olduğu için hastanın cilt rengi bir spektrofotometre ile ölçülmektedir. Protez organı takmadan önce kulak veya burun kaybı olan hastaların görünümü sırasıyla Şekil 1.1 (a) ve Şekil 1.2 (a)'da gösterilmektedir. Hastanın cilt tonuna uygun olarak 3B yazıcıda basılan kulak ve burun, yüz bölgesinde segmentlere ayrılan yumuşak doku ve sert doku ile bütünleştirilmektedir (Nuseir et al. 2019, Watson and Hatamleh 2014). 3B yazıcıda yazdırılan ve hastanın yüz bölgesine monte edilen protez kulak ve burnun görünümü sırasıyla Şekil 1.1 (b) ve Şekil 1.2 (b)'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Kulak kaybı olan (a) protezsiz (b) protezli hastanın görünümü.



Şekil 1.2 Burun kaybı olan (a) protezsiz (b) protezli hastanın görünümü.

Yapay organ ve dokuların yazdırılmasında kullanılan 3B yazıcılarda karşılaşılan hatalar yüzey hatası ve dolgu hatası olmak üzere iki kısımda ele alınmaktadır. 3B yazıcılarda yüzey ve nesne hataları geleneksel olarak yazdırma hızı veya ivmesi düşürülerek veya kullanılan nozul'ın uç genişliği değiştirilerek giderilmeye çalışılmaktadır. Ancak, yapay organ ve doku gibi hassasiyet gerektiren nesnelerin biyo-baskısında bu geleneksel yöntemler yetersiz kalmaktadır (Hatamleh and Watson 2013). Bu tez çalışmasında, yapay organ ve dokuların yazdırılmasında karşılaşılan bu hataların en aza indirilebilmesi için 3B yazıcının kontrol algoritmasının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yazdırılacak model üzerindeki yüzey hataların en aza indirilebilmesi için giriş-çıkış verileri kullanılarak 3B yazıcının sistem modeli tanımlanmaktadır. Sistem modelinin denetiminde kullanılan kontrolcünün parametre katsayıları önerilen Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm-WOA) ile kestirilmektedir. Hem optimizasyon algoritmasının hem de kontrolcünün performansı klasik PID ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA) tabanlı PID kontrolcü algoritması ile kıyaslanmaktadır.

Girişi takip eden ikinci bölümde, yapay organ ve dokuların yazdırılması için özgün olarak tasarlanan 3B yazıcının mekanik ve elektronik yapısı tanıtılmaktadır. Üçüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan optimizasyon algoritmaları ve kontrolcü yaklaşımları açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, 3B yazıcı sistem modelinin tanımlanma aşamaları anlatılmaktadır. Beşinci bölümde, önerilen WOA tabanlı uyarlanabilir kontrolcü ile elde edilen deneysel sonuçlar tartışılmakta ve bahsedilen diğer kontrolcü yaklaşımları ile kıyaslanmaktadır. Sonuç ve öneriler bölümünde ise, önerilen kontrolcü yaklaşımı ile birlikte ekstruder sarkaç sisteminin yapay organ ve doku basımındaki başarımı vurgulanmaktadır.



BÖLÜM 2

YAPAY ORGAN VE DOKU BASIMI İÇİN 3B YAZICI TASARIMI

Kartezyen, delta ve çekirdek xy gibi farklı tasarımlarda üretilen 3B yazıcılar genellikle xyz kartezyen koordinat sistemine bağlı ekstruder, nozul ve ısıtmalı yataktan oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında tasarlanan 3B yazıcıyı diğer yazıcılardan ayıran en önemli özellik üçlü ekstruder sarkaç sistemine sahip olmasıdır. Özgün olarak tasarlanan sarkaç şeklindeki ekstruder sisteminin kontrolü yapay doku ve organların minimum hata ile yazdırılmasında önemli rol oynamaktadır.

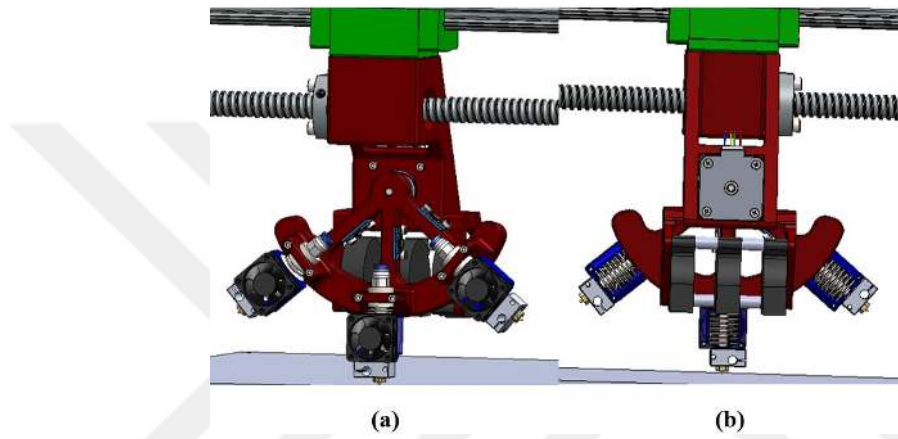
2.1 3B YAZICININ MEKANİK YAPISI

Tasarlanan 3B yazıcı $760 \times 760 \times 800$ mm boyutunda ana gövdeye ve ona bağlı $200 \times 400 \times 400$ mm boyutlarında filament bloğunun yanı sıra ana gövdeye entegre $150 \times 250 \times 350$ mm boyutlarında bir kontrol panosuna sahiptir. Tasarlanan yazıcıda, xyz eksenleri için dört adet Nema23 adım motoru ve filamentler için üç adet Nema17 adım motor kullanılmıştır. Ayrıca, filamentler arası geçiş için bir adet Nema17 adım motor kullanılmıştır. Filamentler için 0 ve ± 45 derecelik açı ile birbirinden ayrılmış toplam üç farklı ekstruder bulunmaktadır. Bu ekstruder sarkaç sistemi ile yazdırılacak nesnenin rengine göre filament seçimi yapılabilmektedir. Filament ve eksen motorlarından konum verisini okuyabilmek için bir turda 400 darbe çözünürlüğe sahip encoderler kullanılmıştır. Tasarlanan 3B yazıcıda 400×400 mm ölçülerine sahip bir yazdırma alanı bulunmaktadır. Yazdırma alanına yerleştirilen tabla harici bir ısıtma bloğu entegre edilmektedir. Z ekseninde 380 mm hareket edebilen tablanın boyutları $400 \times 400 \times 380$ mm'dir.

Motor, encoder, tabla gibi elemanların monte edildiği hareketli parçalar ve gövdeye vida ile sabitlenen parçalar 3B yazıcıdan çıkartılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ana gövde 30×30 mm ölçülerine sahip sigma alüminyum profillerden oluşturulmaktadır. Çalışmada kullanılan

3B yazıcının katı cisim modeli Solidworks ortamında elde edilmiş ve mekanik benzetim çalışmaları bu ortamda gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan 3B yazıcıyı diğer 3B yazıcılardan ayıran en önemli özellik, ekstruder sarkaç sistemine sahip olmasıdır. Üç nozuldan oluşan ekstruder sarkaç sistemi Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Yapay doku ve organların minimum hata ile basılabilmesi için 3B yazıcının eksen kontrolünün yanısıra ekstruder sarkaç sisteminin de etkin kontrolü çok önemlidir.

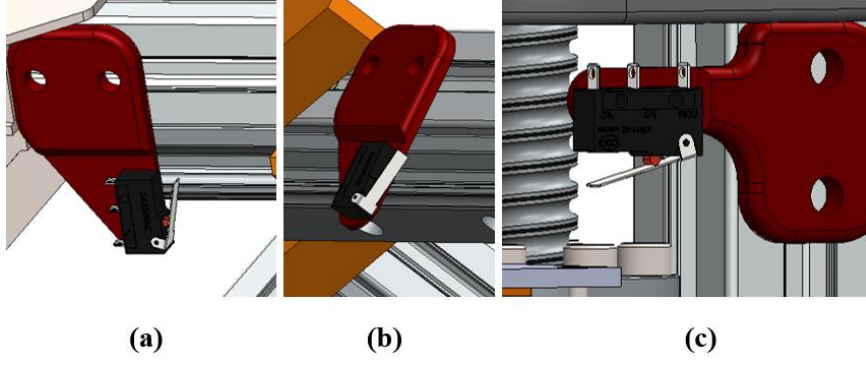


Şekil 2.1 Ekstruderin (a) önden görünüm (b) arkadan görünüm.

Tasarlanan 3B yazıcının her bir eksenine yerleştirilen motor ve encoderler Şekil 2.2’de sunulmaktadır. Eksenler için dört adet (z ekseninde iki adet) ve filament sistemi için üç adet olmak üzere toplam yedi endüstriyel tip motor kullanılmaktadır. Ekstruder sarkaç sisteminin referans konuma hareketi Şekil 2.3’te gösterilen butonlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

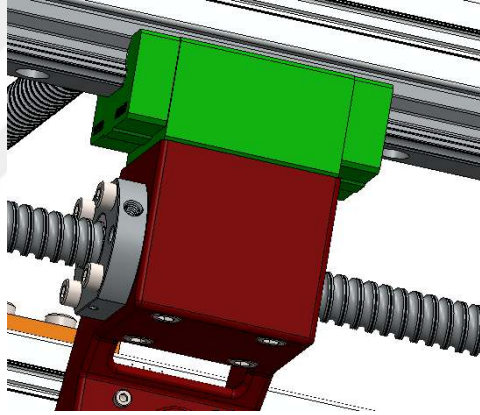


Şekil 2.2 Step motor (a) nema23 (b) nema17 (c) 400BM encoder.



Şekil 2.3 Eksen sıfırlama butonları (a) x eksen (b) y eksen (c) z eksen.

Motor ve encoder arasında hareketi sağlayacak olan ve bir turda 5 mm hareket hassasiyetine sahip vidalı mil, bu mil üzerinde hareket edebilmesi için gerekli olan rulmanlı yatak ve hareket esnasında sürtünmeyi en aza indiren dar araba 3B yazıcının tasarımında tercih edilmiştir. Söz konusu mekanizma Şekil 2.4’de gösterilmektedir.

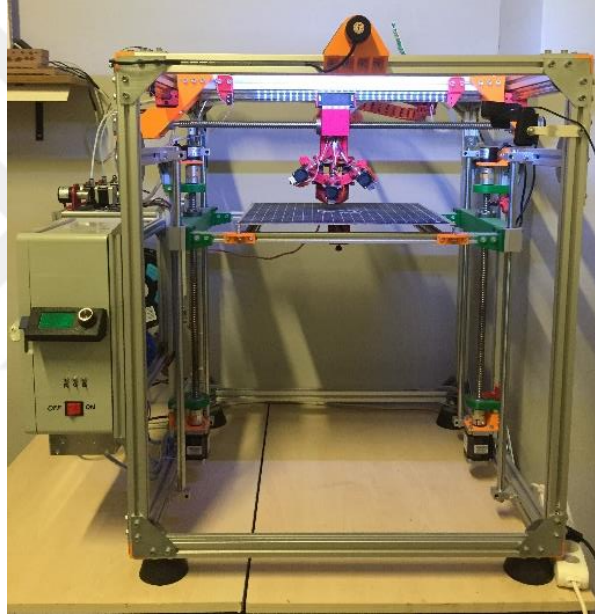


Şekil 2.4 Yatak, araba ve mil yapısı.

Çalışmada kullanılan 3B yazıcının Solidworks ortamında tasarlanan mekanik yapısı Şekil 2.5’te sunulmuştur. Yapay organ ve doku baskısı için gerçekleştirilen 3B yazıcı Şekil 2.6’da görülmektedir. Gerçekleştirilen 3B yazıcının, tabla sıcaklığının denetimi de yazdırılacak modelde kullanılan malzemenin türüne göre gerçekleştirilmektedir. Özgün olarak tasarlanan ekstruder sarkaç sistemi xy düzleminde hareket etmektedir. Ekstruder sarkaç sisteminde 45 derecelik açı ile yerleştirilmiş üç nozul bulunmaktadır. Ekstruder sarkaç sisteminde yer alan her nozul için soğutucu fan kullanılmaktadır.



Şekil 2.5 3B yazıcı Solidworks çiziminin farklı açılardan gösterimi.



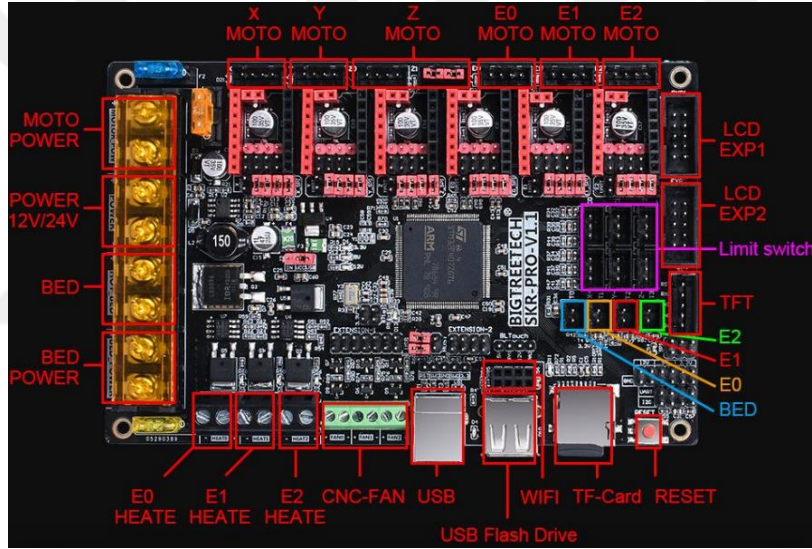
Şekil 2.6 Yapay organ ve doku baskısı için tasarlanan 3B yazıcının mekanik yapısı.

2.2 3B YAZICININ ELEKTRONİK DONANIMI

Tasarımını tanıttığımız 3B yazıcımızın oldukça önemli olan mekanik parçalarının yanı sıra bu tasarımı kontrol etmek ve motorlarımızı sürececek olan sürücülerin seçimi de bir o kadar önem arz etmektedir. Öncelikle yazıcımızın ana kontrol kartı olarak 32 birlik ARM işlemciye sahip SKR PRO V1.1 kartı Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Endüstride kullanılan 3B yazıcıların kontrol kartlarının büyük bir çoğunluğunda 32 bitlik işlemci kullanılmamaktadır. Bu işlemcinin kullanılmasında 3B yazıcının hızı ve tepki süresi önemli bir parametre olarak dikkate alınmıştır.

Çalışmada kullanılan ve Şekil 2.7’de gösterilen kontrol kartı Nema17 adım motorları için yeterli akımı sağlayabilmekte fakat Nema23 için yeterli akım sağlayamamaktadır. Hem kontrol kartımızı korumak hem de adım motorumuzun daha kararlı halde çalışabilmesi için harici sürücülere ihtiyaç duyulmaktadır. Burada motorlar için uygun olan TB 6600 4A adım motor sürücüsü seçilmiş ve kontrol paneline eklemiştir. Çalışmada kullanılan adım motor sürücüsü Şekil 2.8’de gösterilmektedir.

Kontrol panelimizdeki diğer önemli elektronik donanım ise ESP32 işlemcisidir. Bu işlemci 32 bit hıza sahip ve toplamda 7 adet encoderden gelen veriyi seri portta yazabilmektedir. Endüstride bu işi yapabilecek en küçük ve en hızlı işlemci olduğu için seçilen ESP32 işlemcisi Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



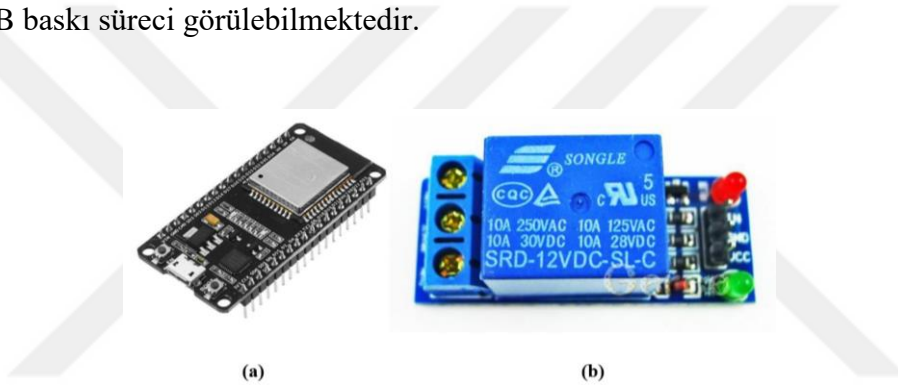
Şekil 2.7 SKR Pro v1.1 kontrol kartı.



Şekil 2.8 TB 6600 4A adım motor sürücüsü.

3B yazıcıda kullanılan yazdırma alanının sıcaklığı 220 Volt (V) ile çalışan ve 1000 Watt (W) gücünde olan bir ısıtıcı tabla ile sağlanmaktadır. Bu tablanın sıcaklığının kontrol edilebilmesi için ayrıca bir adet röle kartı sisteme dahil edilmiştir.

Isıtıcı tabla, hem yüksek akım çekildiğinde motor ve sürücülerine gelebilecek zararların önüne geçmek hem de kullanılan güç kaynağının daha düşük güçte çalışabilmesine olanak sağlamak için yazıcının güç kaynağından yalıtılmıştır. Kontrol paneli ve ısıtıcı tabla hariç diğer tüm elektronik ve mekanik devre elemanlarının ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlayabilmek için 12 V ve 30 A çıkış sağlayan kendinden fanlı bir güç ünitesi tercih edilmiştir. Seçilen güç ünitesi Şekil 2.10'da sunulmaktadır. Ayrıca ekran kartımızla uyumlu (Red Green Blue) RGB ışıklı bir Liquid Crystal Display (LCD) ekran kullanılmıştır. Şekil 2.10'da gösterilen bu ekran sayesinde 3B baskı süreci görülebilmektedir.



Şekil 2.9 Elektronik komponentler (a) ESP32 (b) tek kanal röle kartı.



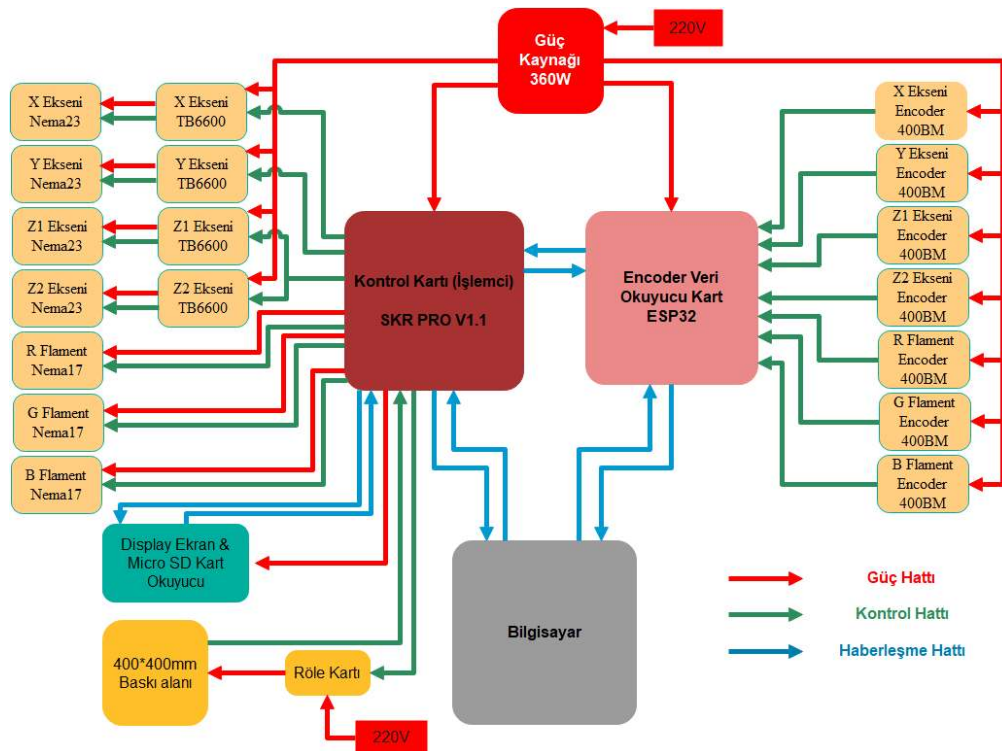
Şekil 2.10 Elektronik komponentler (a) lcd ekran (b) trafo (c) pano.

3B yazıcı için yukarıda tanıtılan donanımlar 30 × 30 alüminyum sigma profiller ile yapılan şase üzerine monte edilmiştir. Şekil 2.10 (c)'de gösterilen panonun içine elektronik donanımlar yerleştirilmiştir. Pano içerisine yerleştirilen elektronik devrenin blok diyagramı Şekil 2.11'de sunulmuştur. Burada, x, y ve z eksenleri için kullanılan toplamda dört adet Nema23 step motorunun kontrolü 3B yazıcının kontrol kartı ile sağlanmaktadır. Kontrol kartımızın yanı sıra ESP32 ile motorların bağlı olduğu milin diğer uçlarına bağladığımız

encoderlerden 400 darbe çözünürlüğünde bir okuma hassasiyetiyle aldığımız veri bilgisayar ortamına anlık olarak aktarılmaktadır. Aktarılan veri ile yazdırılan parçanın “g” kodu eşzamanlı bir şekilde aynı düzlemde çizdirilmektedir. Elde edilen veriler kıyaslanarak 3B yazıcının yazdırma hata miktarı belirlenmektedir. Aynı zamanda bu durum step motorun açık çevrim kontrol hatası olarak da adlandırılmaktadır.

ESP32 işlemcisi topladığı verileri işledikten sonra step motorun kontrolünü açık çevrimden kapalı çevrime dönüştürebilir. Step motorun kontrol kartının verdiği koordinatlara ne kadar hatayla gidip gitmediğini o andaki encoder verisiyle karşılaştırarak bulmak mümkündür. Burada gerçek zamanlı bir şekilde step motorun kontrolü aynı eksene bağlı olan kapalı çevrime dönüştürülmüştür.

Step motorun açık çevrimdeki PID katsayıları kontrol kartına referans olarak yüklenen Marlin yazılımında standart olarak belirtilmektedir. Ancak, bu katsayılar dinamik olmadığından 3B yazıcının yazdırma performansını çoğu zaman olumsuz yönde etkilemektedir. Buradaki katsayıları değiştirirken en önemli parametremiz 3B yazıcıdan çıkartılan parçaların dolgu ve yüzey hatalarının en aza indirilmesidir. Daha sonra ise bu hem doğrudan hem de dolaylı olarak step motorlarının hızının artmasına ve motor sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.11 3B yazıcının elektronik tasarımının blok diyagramı.



BÖLÜM 3

3B YAZICININ MODELLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Uzun yıllardan beri kontrol sistemleri sürekli değiştirilerek güçlendirilmektedir. Teknolojinin gelişimine ayak uydurmaya çalışılmaktadır. Burada kontrolden söz edebilmek için öncelikle dört temel bileşen göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar temel olarak sistem, denetim, denetlenen ve giriş-çıkış birimi olarak belirlenebilmektedir. Burada öncelikle belirtilen bileşenler tanımlanmaktadır.

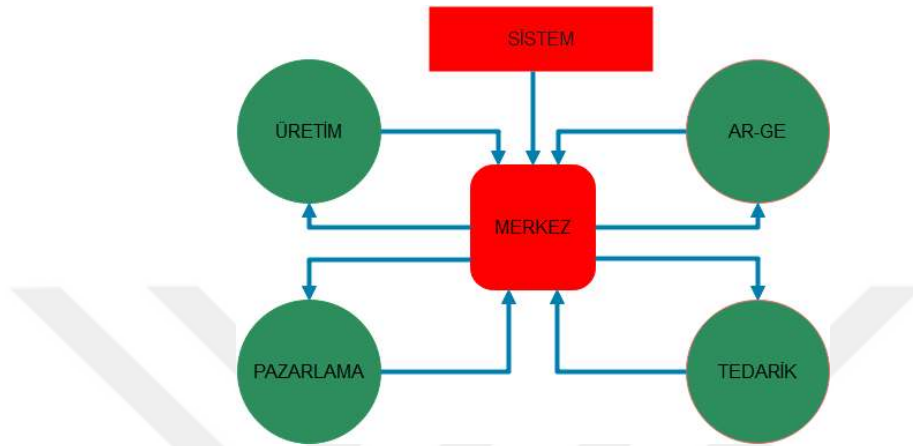
3.1 KONTROL SİSTEMLERİ

Yukarıda da belirttiğimiz gibi öncelikle kontrol sistemlerinin tanımlanması gerekmektedir. Burada önce literatürdeki tanımlar daha sonra ise bu tezdeki karşılıklarına yer verilmektedir. Birçok konuda olduğu gibi burada da tanımların yerinde ve zamanında yapılması oldukça önemlidir.

3.1.1 Sistem

Sistem genel olarak çok geniş bir kavramdır. Temel olarak ortak bir amacı gerçekleştirmek için planlı ve çoğu zaman birden fazla parçadan oluşan bir bütün olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak sistemi oluşturan parçalar birbiriyle etkileşim halindedirler. Burada en belirgin özellik sistemi oluşturan parçaların tamamının aynı amaca yönelik faaliyet göstermesi gerekmektedir (Uysal 2015). Temel olarak sistemin gösterimi Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Temel olarak aşağıda gösterildiği gibi olan sistemler genelde çok daha karmaşık olabilmektedir. Burada merkezdeki amaca yönelik çalışan Üretim, Araştırma Geliştirme (AR-GE), Pazarlama ve Tedarik olarak dört farklı birimden meydana gelmektedir. Bazı sistemleri oluşturan bölümler bile kendi aralarında sistemlere bölünebilmektedir.

Bu tez çalışmasında sistem, 3B yazıcı sistemi olarak tanımlanmaktadır. 3B yazıcıdan çıktı olarak almak istediğimiz ürünün en az hata ile üretilmesini sağlamak için kontrol sisteminde yapılan iyileştirmeler sistemin ana amacı olarak ifade edilmektedir. Burada motor kontrolü, encoderler ve ekstruder yapısı gibi bileşenlerin temel amacı 3B yazıcıdan çıktı olarak alınmak istenen parçanın en az hata ile çıkartılmasına olanak sağlamaktır.



Şekil 3.1 Basit bir sistem gösterimi.

3.1.2 Denetim

Denetim, değişken nitelikler kümesinin daha önceden belirlenmiş bir koşula uyum sağlayabilmesi amacıyla yapılması planlanan veya düzenlenen ve bu amaçla gerçekleştirilen işlemlerin tümü olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1’de gösterilen Merkez birimi diğer parçaların bu sistemin amacına yönelik ne derece uyum sağladıklarını denetlemektedir. Burada amaca yönelik kapsam dışı olay ve hareketleri ise geri bildirim sayesinde bütün parçaları sistemin bir parçası olarak tutmayı amaçlamaktadır.

3.1.3 Denetlenen

Denetlenen olarak tanımladığımız argümanlar ise bir önceki başlıktaki denetleyen birimin sistemin bir parçası olarak nitelendirdiği diğer birimleri kapsamaktadır. Yani temek olarak bir sistemdeki amaca yönelik denetleyen birim diğer birimleri denetlemektedir.

3.1.4 Giriş ve Çıkış

Giriş, merkezi denetleme biriminin denetlenen birimlerin bazılarını veya tamamını kapsayacak şekilde belirli bir amaç için alt birimlere verilen uyarı olarak gösterilebilmektedir. Çıkış ise belirlenen giriş için sistemin verdiği cevap olarak tanımlanmaktadır. Burada her bir girişin bir veya daha fazla çıkışı olabileceği gibi aynı zamanda her çıkışın da bir veya birden fazla girişe karşılık bir cevap olabilmesi mümkündür.

Bizim sistemimizde genel olarak girişte filament diye adlandırdığımız hammaddemiz bulunmakla beraber çıkış birimi olarak nitelendirdiğimiz kısım ise çıktı aldığımız parçalardan oluşmaktadır. Çıktıyı MicroSD (micro Secure Digital) üzerine bilgisayar aracılığı ile yüklediğimiz parçanın üç boyutlu çiziminin “g” kodları aracılığıyla 3B yazıcının anakartına tanıtılır. daha önceden 3B yazıcının yazdırma alanının boyutları belirlenir. Buradaki 3B yazıcının yazdırma alanı $400 \times 400 \times 380$ mm olarak belirtilmektedir.

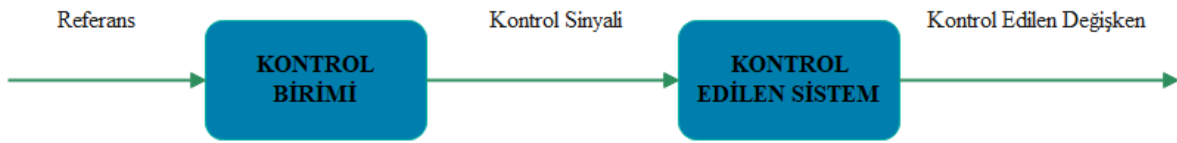
3.2 KONTROL YÖNTEMLERİ

Sistemlerin en önemli parametrelerinden biri de kontrol birimi olarak nitelendirilmektedir. Birçok alanda farklı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Burada en temel yöntem açık çevrimli kontrol yöntemleridir. Bu yöntem çoğu zaman yüksek hata oranı ile çalışmaktadır. Çünkü kontrol biriminin çıkıştaki durumdan haberi olmamaktadır. Bir diğer önemli yöntem ise kapalı çevrimli yöntemdir. Bu yöntemde kontrol biriminin çıkıştaki durumdan da haberi olabilmektedir. Çıkıştaki hata durumuna göre kontrol edeceği kısım belirlenip, hata oranını azaltılmaya çalışılmaktadır. Kapalı çevrim kontrol biriminde Oransal (Proportional-P), Oransal-İntegral (Proportional Integral-PI), Oransal-İntegral-Türevsel (Proportional Integral Derivative-PID) kontrol yöntemleri ile katsayılar belirlenebilmektedir. Burada en önemli kısım hata payını azaltmak olarak nitelendirilebilir. Fakat hata payını azaltırken hızında artması istenmektedir (Bennett 1993).

Klasik açık ve kapalı çevrimin dışında buradaki katsayıları belirlemek için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. En önemli kısım PID katsayılarının belirlenmesidir. Bu çalışmada PID parametre katsayıları literatürde sık kullanılan GA ile yakınsama hızı iyi olan ve yerel minimumlardan kaçabilen WOA algoritması ile kestirilmektedir.

3.2.1 Açık Çevrimli Kontrol

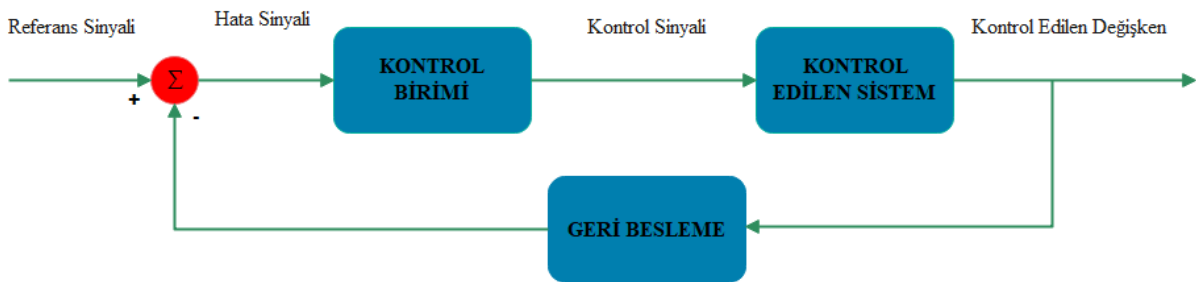
Bu kontrol sistemi literatürdeki en eski ve en basit yöntemdir. Sistemin hızı için oldukça önemlidir. Oldukça basit olduğu için günümüzde de kullanım alanlarına sahiptir. Çıkıştaki hatanın çok önemli olmadığı sistemlerde kullanılabilmektedir. Şekil 3.2’de blok diyagramına yer verilmektedir.



Şekil 3.2 Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.

3.2.2 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri

Bu yöntemde açık çevrimli kontrol yöntemine göre hata daha az olmaktadır. Burada motor kontrolü için gönderilen sinyalin istenilen işi yapıp yapmadığı da kontrol edilmektedir. Referans sinyali ile çıkıştan alınan sinyale göre kontrol birimi gönderdiği kontrol sinyalini değiştirmektedir. Basit bir kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.

Kapalı çevrimli kontrol yönteminde geri besleme ile hatayı sistem kendi içinde minimize etmektedir. Fakat burada kullanılacak olan kontrol sisteminde kontrol katsayıları belirlenmelidir. Bu katsayılarını belirlemek için aşağıdaki yöntemler uygulanmaktadır.

- Oransal Kontrol (P); kontrol edilen sistemin çıkışını referans sinyaline oranlayarak hatayı minimize etmeye çalışan bu yöntem donanım olarak biraz daha basit olsa da çoğu zaman yeterli iyileştirme yapamadığı için pek tercih edilmemektedir (Bennett 1993). Bu çevrimde sadece K_p değişkeni değiştirilerek hata minimize edilmektedir. K_p katsayısı referans sinyalinin hata sinyali ile oranlanarak bulunmaktadır. Denklemden $u(t)$ referans sinyali, $e(t)$ hata sinyali ve K_p oransal sabiti ve u_0 katsayı düzenleyici olarak adlandırılmaktadır. Burada hata sinyalinin sıfıra yaklaşması durumunda katsayı problemi yaşanmaması için kontrolcünün çıkışına u_0 katsayısı eklenir.

$$u(t) = K_p e(t) + u_0 \quad (3.1)$$

- Oransal ve İntegral Kontrol (PI); Kontrol edilen sistemin çıkışını kontrol edilmeye başlandığı andan itibaren tüm anlardaki hatalarının toplamına etkisi olarak gösterilir. Bu geçmişteki hataların toplamını ifade eder. Burada K_i integral sabitini temsil etmekte ve integral ise kontrol edilmeye başlanan andan itibaren işlemin sonuçlandığı ana kadar olan hataların toplamını ifade eder.

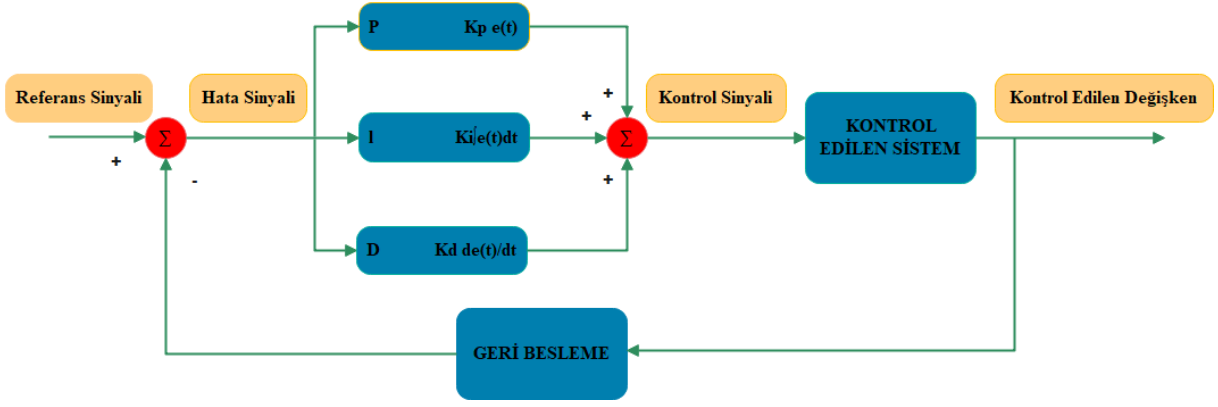
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

- Oransal ve Türevsel Kontrol (PD); Türev işlemi sistemden alınan çıktının hesaplandığı andan bir sonraki anda alacağı değere ilişkin bir veri üretir. Bu veriyi sistemdeki hatanın değişime oranısının türevi alınarak hesaplanır. Dolayısı ile türev kontrol etkisi sisteme bir öngörü kazandırarak hatayı minimize etmeye çalışmaktadır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d de(t)/dt \quad (3.3)$$

- Oransal, İntegral ve Türevsel Kontrol (PID); kontrol edilen sistemin hem yükselme ve yerleşme zamanını hızlandırmak hem de maksimum aşım miktarını azaltmak istiyorsak PID kontrol kullanmamız gerekmektedir. Yukarıda da belirttiğimiz gibi burada referans değerimize hem oransal olarak kıyaslamak hem de zamana göre hatanın türev ve integralini alarak hepsini toplayarak çıkışın referans değerimize olabildiğince örtüşmesi sağlanmaktadır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d de(t)/dt \quad (3.4)$$



Şekil 3.4 PID kontrollü kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.

Şekil 3.4’de gösterilen PID kontrollü kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir. Burada kontrolcü kontrol edilecek sistemin isterlerine göre P, PI, PD veya PID olarak seçim yapmaktadır. Geri beslemeli kontrol sistemlerinde genel olarak üç tasarım kriteri bulunmaktadır (Bennett 1993, Oviedo et al. 2006). Bu kriterler, en yüksek aşım, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı olarak ifade edilmektedir.

Şekil 3.4’deki blok diyagramda sadece oransal kontrolcü kullanılmak istendiği zaman alt alta üç bloktan sadece ilk bloğun kullanması yeterlidir. Bu esnada K_i ve K_d katsayıları sıfır olacağı için kontrolcü performansına etki etmeyecektir. PD kontrolcünün kullanılması istenen bir sistemde K_p ve K_d parametre katsayılarının ayarlanması gerekmektedir.

Günümüzde PID katsayıları sistemlerin kontrolü için oldukça önem arz etse de fazlasıyla karmaşık problemleri çözmede yeterince işlevsel olamamaktadır. PID kontrolcünün K_p , K_d ve K_i parametre katsayıları optimizasyon teknikleri ile kestirilebilmektedir (Batık vd. 2014). Bu tez çalışmasında, bu katsayıların kestirilmesi için GA ve WOA optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Her bir kontrolcünün performansı klasik PID ile kıyaslanmıştır.

PID kontrolcünün K_p , K_d ve K_i katsayılarının sistemin isteklerini pozitif veya negatif etkileyici yönleri bulunmaktadır. Örnek olarak, oransal denetleyici katsayısı olan K_p yükselme zamanını azaltır ama bunun yanında maksimum aşma değerini de yükselmektedir. Bu etkiler Çizelge 3.1’de gösterilmektedir (Oviedo et al. 2006).

Çizelge 3.1 PID katsayılarının sisteme etkileri

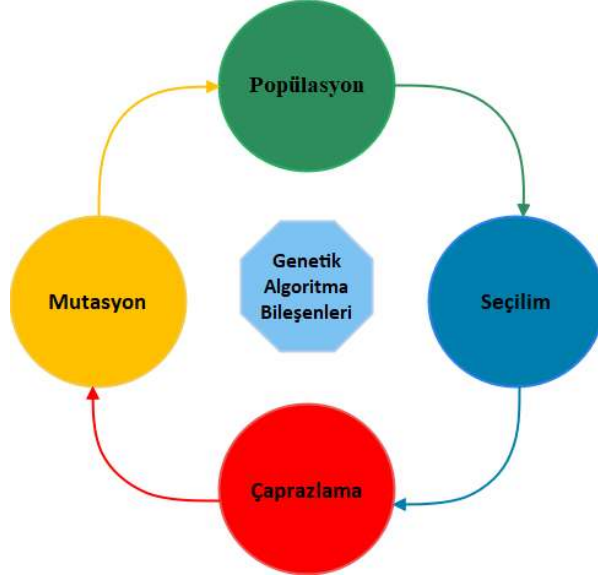
PID Seçimi	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Oturma Hatası	Maksimum Aşım
Oransal Etki K_p	Azalır	Çok Küçük Etki	Azalır	Artar
İntegral Etki K_i	Azalır	Artar	Sıfırlanır	Artar
Türevsel Etki K_d	Çok Küçük Etki	Azalır	Çok Küçük Etki	Azalır

3.3 GENETİK ALGORİTMA

Genetik Algoritma (GA) ilk defa Holland tarafından 1973’de kullanılmaya başlanmış ve bu anlamda optimizasyon algoritmalarının temelini oluşturmuştur. Canlı sistemlerdeki genetik şifre mantığı kullanılarak sezgisel olarak en iyi çözümü veya en iyi çözüme yakın olabilecek bir sonuç bulmayı hedeflemektedir. Bu mantık doğal seçim yani güçlü bireyin hayatta kalma olasılığının yüksek olmasıdır. Bu yöntemle evrim sonucu hayatta kalan bireyi en iyi sonuç olarak adlandırmaktadır (Holland 1973, Dandy et al. 1996). GA’lar problemlere tek çözüm üretmek yerine birbirinden bağımsız farklı çözümlerden oluşan çözüm kümeleri üretirler. GA evrimsel sürecin bilgisayar ortamında uyarlanması olarak da adlandırılmaktadır (Panda and Padhy 2008). Burada GA, PID kontrolörü için en uygun katsayıları hesaplayarak kontrol kartına iletmektedir. GA temel olarak Şekil 3.5’de gösterildiği gibi 4 ana unsurdan oluşmaktadır (Holland 1973).

3.3.1 Genetik Algoritma Bileşenleri

- **Popülasyon:** Bütün olası sonuçların içinde bulunduğu çözüm kümesini oluşturmaktadır.
- **Seçilim:** Çözüm kümesindeki sonuçların amaç fonksiyonuna göre en iyilerinin seçilme işleminin yapıldığı birimdir. Bu birim bu algoritmanın en önemli birimidir.
- **Çaprazlama:** En iyi çözümlerin arasında çaprazlama yaparak en iyilerin en iyisini bulmayı hedeflemektedir.
- **Mutasyon:** Bir önceki en iyi sonuç ile şimdiki en iyi sonuç arasında kıyaslama yaparak ikisinin de amaca en uygun olan sonucunu yeni en iyi sonuç olarak göndermektedir.



Şekil 3.5 Genetik algoritma bileşenleri.

3.3.2 Genetik Algoritma Çalışması

Şekil 3.5’te görülen GA bileşenlerinin çözümü aranan probleme göre uyarlanması gerekmektedir. Burada problem isterlerimize göre PID katsayılarının belirlenmesidir (Dikmen vd. 2014). GA’nın çalışma prensibi aşağıda belirtilen 7 adımla tanımlanmaktadır.

Adım 1: Başlangıç populasyonları için klasik PID parametreleri seçilir.

Adım 2: Populasyonlardaki parametrelerin uygunluk değerleri hesaplanır. Önceki değerler ile kıyaslanıp isterlere göre en iyileri parametreler seçilir.

Adım 3: Populasyonlardaki parametreler çaprazlama için parametre seçim yöntemine göre seçilir.

Adım 4: Seçilen parametreler çaprazlama olasılığına göre çaprazlanarak yeni parametreler elde edilir.

Adım 5: Yeni parametrelere mutasyon olasılığına göre mutasyon uygulanır.

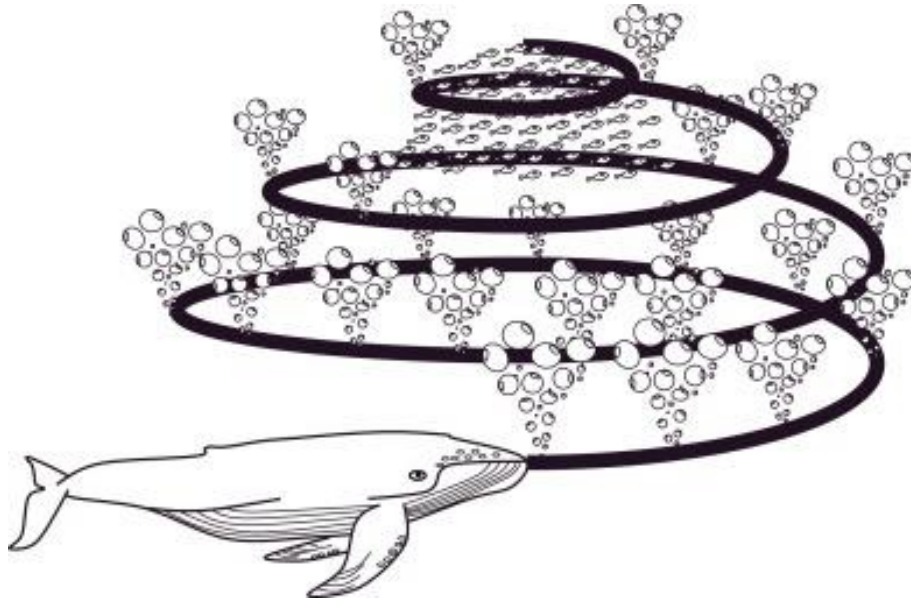
Adım 6: Yeni parametreler populasyonun mevcut parametreleri olarak belirlenir.

Adım 7: İsterlerdeki parametreler belirlene kadar veya optimum değerler sağlanana kadar 2. adıma gidilerek devam edilir.

3.4 BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Bu algoritma adından da anlaşılacağı üzere balinaların avlanma stratejisinden almaktadır. Dünyanın en büyük memeli hayvanı olarak kabul edilirler. Mavi Balina, Kambur Balina gibi 7 farklı ana türü bulunan bu canlılar 30 m boya ve 180 ton ağırlığa kadar çıkabilmektedirler. Balinalar okyanusun yüzeyinden sürekli nefes almak zorunda kaldıkları için asla tamamen uyuyamamaktadırlar. Aslında beyinlerinin bir kısmı asla uyumamaktadır. Öte yandan balinaların düşünebildikleri, yargılayabildikleri hatta akıllı olmalarına inanılan hücre sayısı yetişkin bir insandan iki kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Bazı türlerinde ise kendi aralarında kullandıkları lehçenin sürekli güncellendiği de gözlemlenmiştir (Mirjalili and Lewis 2016).

Kambur balinalar genellikle yüzeye yakın küçük balık sürüleriyle beslenmeyi seçmektedirler. Bu balinalar yüzeyden 12 m aşağıdan başlayarak Şekil 3.6'daki gibi yüzeye doğru spiral olarak baloncuk çıkartarak hareket etmektedir. Aşağıdaki şekilde 9 farklı kambur balinanın 300 farklı baloncuk hareketinden yola çıkılarak oluşturulmuştur (Mirjalili and Lewis 2016). Ancak bu balinalar bu döngüden sonra av olan balıkların bu hareketleri ezberleyememesi için sonraki döngülerde 3 farklı manevra hareketi yapmaktadır. Bu hareketler mercan döngüsü, lob kuyruğu ve yakalama döngüsü olarak isimlendirilmektedir. Ayrıca, bu tarz avlanma yöntemi sadece kambur balinalarda gözlemlendiği de bilinmektedir (Hassan et al. 2019).



Şekil 3.6 Kambur balinaların kabarcık ağıyla beslenme davranışı.

WOA hedef avın mevcut en iyi çözüm olduğunu varsaymaktadır. Buna göre her iterasyon sonucunda diğer çözümlerle kıyaslanarak en iyi çözüm tekrar yenilenir.

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (3.5)$$

$$X(t + 1) = X^*(t) - A \cdot D \quad (3.6)$$

Burada t iterasyon sayısını, A ve C vektör katsayılarını, X^* ise en iyi çözümün konum vektörü, X ise konum vektörü olarak belirlenmektedir. A ve C katsayıları her iterasyonda Denklem 3.7 ve 3.8’de gösterildiği gibi yeniden hesaplanır.

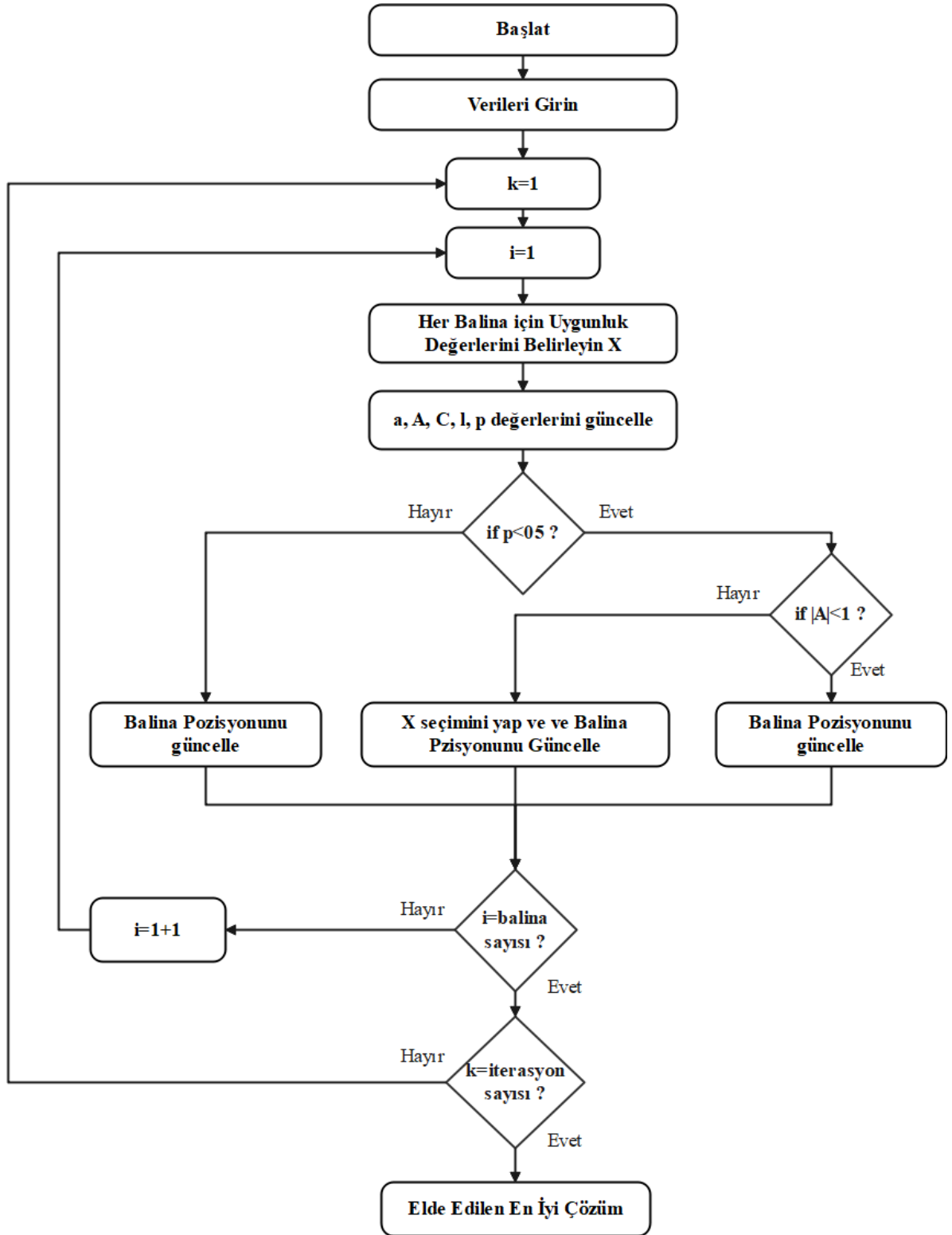
$$A = 2 \cdot a * r - a \quad (3.7)$$

$$C = 2 \cdot r \quad (3.8)$$

Burada a , 2’den 0’a doğrusal olarak azalmakta olan bir değişken ve r ise rastgele bir sayı olarak belirlenmektedir. Bu modelde en iyi çözüm denklem 3.9’daki gibi hesaplanır.

$$X(t + 1) = \begin{cases} X^*(t) - A \cdot D & \text{eğer } p < 0,5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t) & \text{eğer } p > 0,5 \end{cases} \quad (3.9)$$

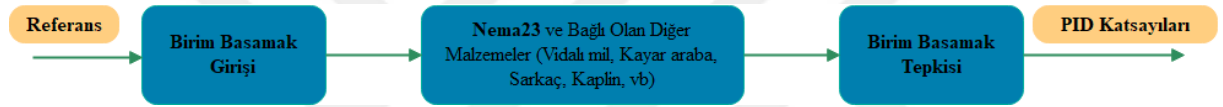
Burada p , 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı ifade etmektedir. D' şimdiye kadar olan en iyi çözümü ifade etmektedir. Buradaki matematiksel ifadeler ile WOA’nın akış şeması Şekil 3.7’de gösterilmektedir (Mirjalili and Lewis 2016).



Şekil 3.7 WOA akış şeması.

3.5 ZIEGLER-NICHOLAS YÖNTEMİ

Ziegler-Nicholas (ZN) kuralı PID katsayıları (K_p , K_i ve K_d) için en iyi değerler üretmeye çalışan sezgisel bir PID ayarlama kuralıdır. 1940 yılına kadar PID katsayıları geleneksel yöntemlerle elde edilmektedir. Bu yıllardan sonra Ziegler-Nicholas yöntemiyle nihayet özellikle mühendislik alanında büyük ölçüde bir pratiklik kazanılmış oldu. Ayarlama kuralları arasında basit ve pratik yapısı neticesinde günümüzde de pek çok alanda da kullanılmaktadır. Bu yöntem henüz en iyi alternatif olmasa da basit ve uygulaması pratik olmasından dolayı hala güçlü bir adaydır (Valerio and Da Costa 2006). ZN yöntemi hem zaman hem de frekans cevabına göre PID katsayıları belirlenebilmektedir. Burada sadece açık çevrimli zaman cevabına göre PID katsayıları belirlenmektedir. Şekil 3.8’de ZN yöntemiyle PID katsayılarının belirlenmesi için gerekli deney düzeneğinin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.8 ZN yöntemi için uyarlanan deney düzeneği.

ZN yöntemi basit ve uyarlaması kolay olan bir yöntem olarak popülerliğini sürdürmektedir. Basit olarak iki adet parametre bulunmaya çalışılmaktadır. Sistemde açık çevrimde birim basamak yanıtına göre birim basamak yanıtına göre verdiği gecikme ve buna bağlı olan zaman sabiti olarak bilinmektedir. Sistemin cevabına göre basit olarak PID katsayıları belirlenmektedir. Bu parametreler bulunurken öncelikle açık çevrim birim basamak fonksiyonuna verdiği yanıtı eğrisinin maksimum eğime sahip olduğu noktadır. Bu noktaya bükülme noktası denilmektedir. Daha sonra bükülme noktası ile basamak tepkisinin başlangıç noktası ile birleştirilerek bir teğet doğrusu çizilir. Bu yöntem sayesinde sistemin transfer fonksiyonunun mertebesi düşük fakat tepkisi yeterince gürbüz olmamaktadır. Şekil 3.8’deki blok diyagramının adımları Şekil 4.1, 4.5 ve 4.9’da gösterilen eksenler için tekrarlanmıştır.

3.6 LEVENBERG-MARQUARDT SİSTEM TANIMLAMA YÖNTEMİ

Sistem tanımlama yöntemlerinden biri olan Levenberg-Marquardt (LM) metodu kullanılmaktadır (Li et al. 2017). Nema23 step motorunun transfer fonksiyonunun deneysel

olarak elde edilebilmesi için encoder verisi yardımıyla model oluşturulacaktır. Doğrusal olmayan fonksiyonlar için genelleştirilmiş en küçük kareler çözümü,

$$\Delta_p = (A^T A)^{-1} A^T \Delta_d \quad (3.10)$$

ile verilmektedir (Gavin 2019). Bu yöntem gizli ve çıkış katmanını olarak iki bölümden oluşmaktadır. Veri bazı parametrelerin çözümü için net bilgi içermiyorsa veri ayırmacılık dizeyinin bu parametrelere karşılık gelen sütunları ve bu parametrelere ait öz değerler sıfıra yakın olur. Yineleme küçük olan öz değerlerin neden olduğu salınımların sönümlenmesi gerekir. Denklem 3.10'da denklemin köşegenlerine sistemin özelliğine göre seçilen sayısal değerler eklenerek;

$$\Delta_p = (A^T A + \varepsilon^2 I)^{-1} A^T \Delta_d \quad (3.11)$$

elde edilerek bulunur ve bu çözüme ters LM çözümü yada sönümlü en küçük kareler yöntemi olarak adlandırılır. Burada I birim dizey, ε^2 sönüm faktörü olarak bilinmektedir. Burada sönüm faktörü sayısal değerlerden oluşmaktadır. Sönüm faktörü eğer büyük ise geçişler sert olmaktadır. Ve sönüm faktörü sıfır olduğu zaman ise çözüme Gauss-Newton yöntemi ile devam edilmektedir. Başlangıçta sönümleme katsayısı LM faktörünün en küçük öz değeri olarak alınmakta ve sonrasında yinelemeli olarak bu parametre Denklem 3.12'deki bağlantıya göre yenilenmektedir.

$$\Delta X = \frac{x_{goz} - x_{hes}}{x_{goz}} \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'de ΔX , her bir yenilemede hesaplanan ve gözlemlenen arasındaki çakışmazlık ölçütünün değeridir. Ve hata olarak,

$$rmse = \sum_{i=1}^n (b_i^{goz} - b_i^{kur})^2 \quad (3.13)$$

eşitliği verilir.

3.7 TRANSFER FONKSİYONUNUN ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde Nema23 step motorunun transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Bu modelde statorlar arasındaki karşılıklı endüktans ihmal edilir. Rotor ve stator sargıları arasındaki karşılıklı endüktanslar olduğu gibi alınırlar. Kieburtz terminal voltajlarının her biri Denklem 3.14 yardımıyla türetilmiştir.

$$v(t) = R_i(t) + K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (3.14)$$

Burada s domainine geçmek için Laplace dönüşümü alınır,

$$V(s) = R I(s) + K_e s\theta(s) \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Burada K_e motorun voltaj sabitidir ve deneysel olarak bulunmaktadır. Bu nedenle,

$$I(s) = \frac{[V(s) - K_e s\theta(s)]}{R} \quad (3.16)$$

Tork bileşenleri, motorun diferansiyel denkleminin Laplace dönüşümü alınarak elde edilir.

$$T^e(s) = Js^2 \theta(s) + Bs\theta(s) + K_r \theta(s) \quad (3.17)$$

Burada K_r doğrusallaştırılmış geri yükleme torkudur. Denklem 3.16 ve 3.17 yardımıyla transfer fonksiyonunu

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_t}{R} \frac{K_r}{J}}{\frac{BR + K_t K_e}{JR} \frac{K_r}{J}} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.18)$$

olarak elde edilir. Burada ω_n doğal frekans ve K_t ise amper başına motorun tork sabitidir.

$$\omega_n = (K_r/J)^{1/2} \quad (3.19)$$

$$\xi = \frac{K_t K_e + BR}{2R(jK_r)^{1/2}} \quad (3.20)$$

$$K = \frac{K_t}{RK_r} \quad (3.21)$$

Burada, K sönümlleme sabiti olarak bilinmektedir. $V(s)$ 'nin bir adım voltajı varsayımıyla ters Laplace dönüşümü alınarak kolayca gözlemlenebilir. Denklem 3.18'deki ifadenin ters Laplace dönüşümü;

$$\theta(t) = KV \left\{ 1 - \frac{1}{(1 - \xi^2)^{1/2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin \left[\omega_n (1 - \xi^2)^{1/2} t \right] + \emptyset \right\} \quad (3.22)$$

olarak elde edilir. Burada $\emptyset$ deneysel olarak elde edilmekte ve

$$\emptyset = \frac{\tan^{-1}(1 - \xi^2)^{1/2}}{\xi} \quad (3.23)$$

ile tanımlanmaktadır.

Bu deney gerçekleştirilirken step motor bir jeneratör olarak çalıştırılmaktadır. Elde edilen devire karşılık üretilen voltaja göre grafik eğiminden elde edilir. Çizelge 3.2'de belirtilen Nema23 adım motorunun katalog bilgileri kullanılarak transfer fonksiyonu teorik olarak elde edilmektedir. Motorun jeneratör olarak kullanıldığındaki hızına karşılık üretilen torku gösteren katalog bilgisi Şekil 3.9'da gösterilmektedir.

Denklem 3.18 ve Çizelge 3.2'deki veriler kullanılarak 3'üncü dereceden transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Bu denklem 3B yazıcıda kullanılan step motor için yeterli olmaktadır. Fakat burada deneysel olarak step motor haricinde bağlı bulunduğu vidalı mil, ray, araba gibi diğer komponentler de etki etmektedir. Bunun için Denklem 3.24'de gösterilen transfer fonksiyonunu kullanılmamaktadır. Bunun yerine deneysel olarak step motor ve bağlı olduğu komponentler ile beraber sistemin birim basamak tepkisine verdiği cevaba göre işlem yapılmaktadır.

$$G = \frac{15,84}{s^3 + 500s^2 + 1,567 \cdot 10^6 s + 4,95 \cdot 10^8} \quad (3.24)$$

Çizelge 3.2 Nema23 motor değerleri.

No	Parametre	Değer
1	Voltaj	3.6 V
2	Akım	3.0 A
3	Endüktans	2.4Mh %20
4	Direnç	1.2Ω %10
5	Tutma Torku	21Kg.cm
6	Faz Sayısı	4
7	Ağırlık	1.3 kg
8	Adım Açısı	1.8° %5
9	Ölçüleri	57*57*82mm
10	Mil Çapı	8mm %0,15



Şekil 3.9 Nema23 hız/tork grafiği.

3.8 EĞİTİM İÇİN KULLANILAN GEOMETRİK ŞEKİLLER

3B yazıcının modellenmesinde çeşitli geometrilere sahip şekil yapıları gürbüz modelin oluşturulabilmesi için kullanılmıştır. Özellikle yüzeysel hataları minimum düzeyde tutmak için birbirinden farklı şekiller ile modelin eğitilmesi oldukça önemlidir. Modeli eğitmek için ilk önce kare prizma, silindir ve papyon adını verdiğimiz geometrilerin sadece dış yüzeyini ele alarak 3B yazıcının yüzeysel hareketleri belirlenmektedir. Daha sonra ise katı cisim olarak dikdörtgenler prizması, küp, silindir, piramit, silindir çıkartılmış dikdörtgenler prizması, papyon, simetrik olmayan prizma ve kubbe adını verdiğimiz toplam sekiz adet geometri ile model eğitilmektedir. Burada geometriler 3B yazıcıdan normal şartlarda baskı alınırken yapmak zorunda kaldığı bütün hareketleri içermesi için farklı farklı seçilmektedir.

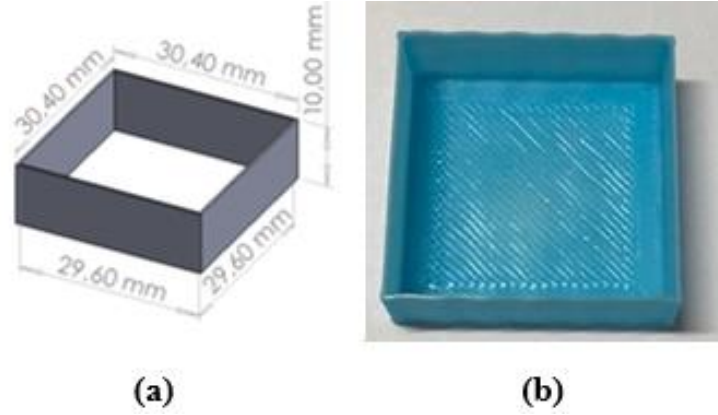
3.8.1 Yüzeysel Modeller

3B yazıcıda öncelikle basit geometriye sahip üç adet şeklin sadece dış yüzeylerini çıkartarak bir model oluşturulmaktadır. Biyo-baskı konusunda gürbüz bir model elde etmek için en önemli sorun olan yüzeysel hataları minimuma indirmek gerekmektedir. Bu hataları minimuma indirmek için öncelikle bu şekillerin sadece yüzeysel hatalarının incelenmesi gerekmektedir.

3.8.1.1 Kare Prizma

Öncelikle kare prizmanın dış yüzeyini kullanarak 3B yazıcının doğrusal anlamdaki tepkisini ve bu tepkideki hatalar ile model eğitilmektedir. Öyle ki bu model aynı anda ya x ekseninde ya da y ekseninde hareket etmesi sağlanmaktadır. Basit olarak bu şeklimizin Solidworks çizimi ve 3B yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Burada amaç 3B yazıcımız x ekseninde düz hareket ederken durup y ekseninde hareketine devam etmesidir. Yani düz giderken 90 derecelik bir dönüş yaparak devam etmesidir. Burada şeklimiz 10 mm'lik yüksekliğe sahip ve 30×30 mm'lik alana sahip bir kare prizmadır. Burada duvar kalınlığı 0.4 mm olarak belirlenmektedir. Nozul ile aynı ölçüde olması ve duvardaki hata paylarının daha belirgin olarak gösterilmesi amaçlanmaktadır. Encoderlerden elde ettiğimiz veri ise 180.050 satırdan oluşmaktadır. Elde ettiğimiz verilerde seri porttan yazdırırken ve encoderden okurken hatalı veriler oluşmaktadır. Burada verilerin hatalı bölümleri çıkartılmaktadır. Burada her bir verinin içinde harcanan filament miktarı ve xyz (x , y ve z

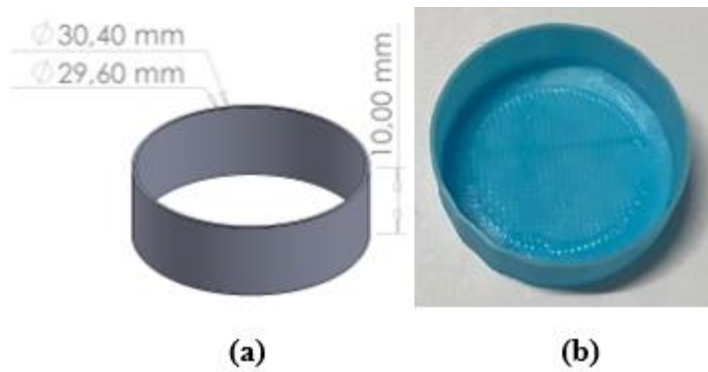
kartezyen eksenleri) eksenlerinin kartezyen koordinat sistemindeki hareketleri gözlemlenmiştir.



Şekil 3.10 Kare prizmanın (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.1.2 Silindir

Modelin eğitimde ikinci geometrik şekil olarak silindir kullanılmaktadır. 3B yazıcının dairesel hareketindeki tepkisi ve bu tepkideki hataları ile model eğitilmektedir. Öyle ki bu model ile 3B yazıcının aynı anda hem x ekseninde hem de y ekseninde hareket etmesi sağlanmaktadır. Bu sayede hatanın kaynak noktasının iki eksenin aynı anda çalıştığı durumlar modele öğretilmektedir. Basit olarak bu şeklin Solidworks çizimi ve 3B yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



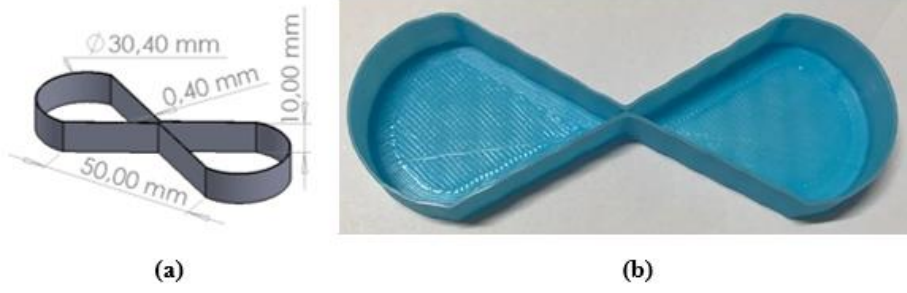
Şekil 3.11 Silindirin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

Burada amaç 3B yazıcımız x ve y ekseninde aynı anda hareketten kaynaklı hatalarının tespit edilmesidir. Referans olarak kullanılan geometrik şekil 10 mm’lik yüksekliğe sahip ve 30

mm'lik çapa sahip bir silindirik yapıdan oluşmaktadır. Burada duvar kalınlığı 0.4 *mm* olarak belirlenmekte ve buna göre baskı alınmaktadır. Nozul ile aynı ölçüde olması ve duvardaki hata paylarının daha belirgin olarak gösterilmesi amaçlanmaktadır. Encoderlerden elde ettiğimiz veri ise 159.676 satırdan oluşmaktadır. Elde ettiğimiz verilerde encoderden veriyi okurken ve/veya seri porttan yazdırırken hatalar oluşmaktadır. Verilerin hatalı bölümleri çıkartılmaktadır. Burada her bir verinin içinde harcanan filament miktarı ve *xyz* eksenlerinin kartezyen koordinat sistemindeki hareketleri gözlemlenmiştir.

3.8.1.3 Papyon

Modelin eğitimi için üçüncü geometrik şekil olarak papyon adını verdiğimiz geometrik şekil kullanılmaktadır. 3B yazıcının, dairesel hareket yaparken düz hareket yapmasını veya düz hareket yaparken dairesel harekete geçerken hareket kabiliyeti gözlemlenmektedir. Modelin gürbüzlüğü için bu manevra kabiliyeti oldukça önem arz etmektedir. 3B yazıcılarda basılabilecek parçaların büyük bir çoğunluğu karmaşık yapılardan oluştuğu için modelin buna uygun olarak eğitilmesi gerekmektedir. Bu sayede hatanın kaynak noktasının eksenlerin aynı anda veya herhangi bir eksenden mi kaynaklandığı daha rahat gözlemlenebilecektir. Bu şekil daha net bir ifadeyle modelimizin önceki şekillerde öğrenebildiği hareketlerin sentezi şeklindedir. Basit olarak bu şeklimizin Solidworks çizimi ve 3B yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Burada amaç 3B yazıcımız *x* ve *y* ekseninde hatanın hem eksenlerin aynı anda çalıştığı hemde tek tek çalıştığı durumlar göz önüne alınarak tespit edilmektedir. Burada şeklimiz 10 *mm*'lik yüksekliğe sahip ve 50 × 30 *mm*'lik bir dikdörtgenin kısa kenarlarına 30 *mm*'lik iki adet yarım silindir eklenmiş ve dikdörtgenler prizmasının köşegenlerini ile uzun kenarları arasındaki alan çıkartılarak elde edilmektedir. Nozul ile aynı ölçüde olması ve duvardaki hata paylarının daha belirgin olarak gösterilmesi amaçlanmaktadır. Encoderlerden elde ettiğimiz veri ise 237.866 satırdan oluşmaktadır. Elde ettiğimiz verilerde encoderden veriyi okurken veya seri porttan yazdırırken hatalar oluşmaktadır. Burada verilerin hatalı bölümleri çıkartılarak anlamlı veri elde edilmektedir. Burada her bir verinin içinde harcanan filament miktarı ve *xyz* eksenlerinin kartezyen koordinat sistemindeki hareketleri gözlemlenmektedir.



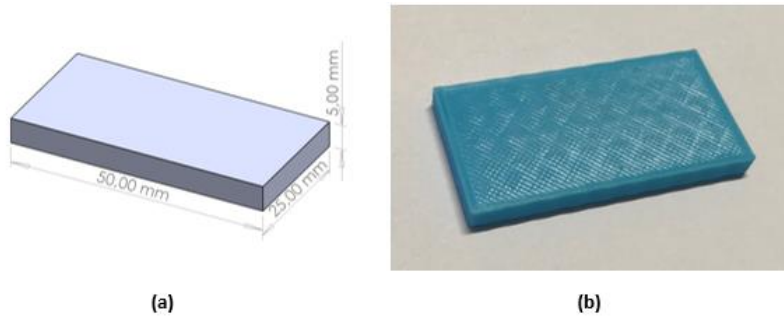
Şekil 3.12 Papyonun (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2 Katı Cisim Modeller

Modelin gürbüz olabilmesi için eğitim kısmı oldukça önem arz etmektedir. Yukarıdaki şekillerden aldığımız veriler modelin eğitim kısmına eklenmektedir. Fakat bu modelin yeterince gürbüz olabilmesi için basit ve karmaşık katı cisimler üzerinde test edilmesi gerekmektedir. Aşağıda gösterilen parçalar modeli oluşturmak için uyarlanabilir PID kontrolcünün katsayılarını elde edilmesi için eğitim amaçlı kullanılmaktadır.

3.8.2.1 Dikdörtgenler Prizması

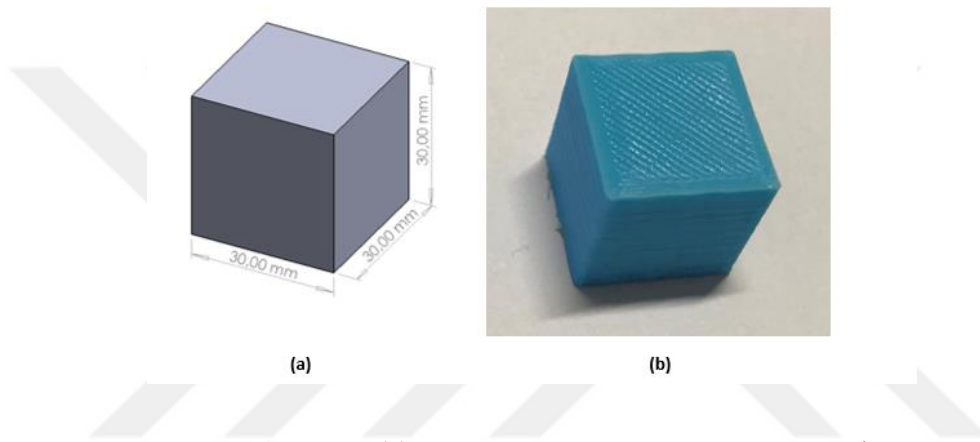
Basit olarak adlandırdığımız geometrik şekiller arasında ilk sırada yer alan dikdörtgenler prizması $50 \times 25 \times 5 \text{ mm}$ ölçülerinden meydana gelmektedir. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmekte ve baskı süresi yaklaşık 47 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400 ör/sn (saniyede alınan örnek sayısı) hızla alınan veri toplamda 224.496 satır olarak elde edilmektedir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15 g olarak ölçülmektedir. Yazdırılan cismin Solidworks çizimi ve yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.13 Dikdörtgenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2.2 K p

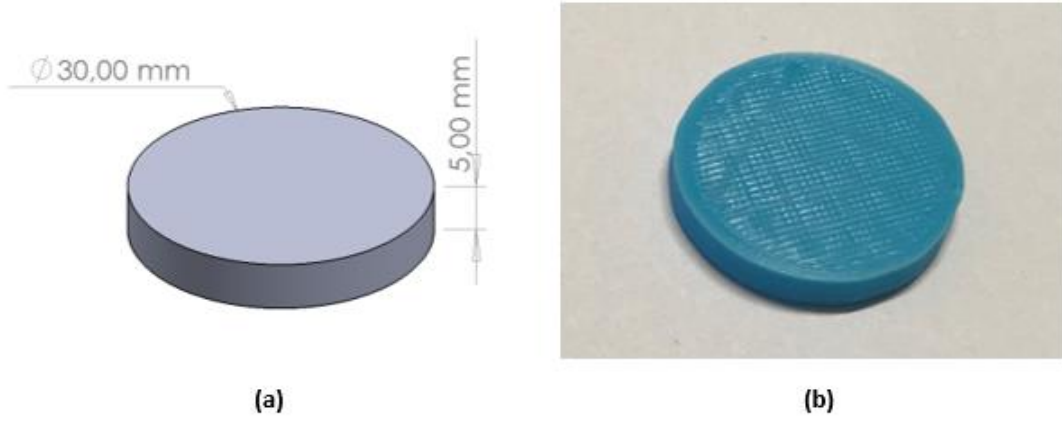
Basit  ekillerimiz arasında ikinci sırada yer alan k p $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}$ ölçülerinden oluşmaktadır. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak belirlenmekte ve baskı süresi yaklaşık 68 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400  r/sn hızla alınan veri toplamda 263.240 satır olarak elde edilmiştir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler  izelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15g olarak hesaplanmaktadır. Basılan cismin Solidworks  izimi ve yazıcıdan alınan çıktısı  ekil 3.14'de g r lmektedir.



Şekil 3.14 Küpün (a) Solidworks  izimi (b) 3B yazıcı  ıktısı.

3.8.2.3 Silindir

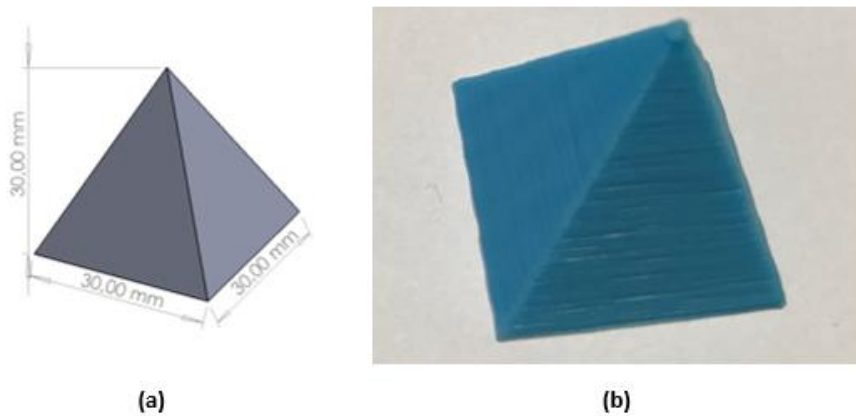
Basit  ekillerimiz kartezyen koordinat sisteminde  alı tı ımız için en zoru olarak değerlendirilebilecek ve üçüncü sırada yer alan silindir 30 mm çapında ve yüksekliği 5 mm ölçülerindedir. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmiştir ve baskı süresi yaklaşık 29 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400  r/sn hızla alınan veri toplamda 170.023 satır olarak elde edilmektedir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler  izelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15 g olarak ölçülmektedir. Basılan cismin Solidworks  izimi ve yazıcıdan alınan çıktısı  ekil 3.15'de g r lmektedir.



Şekil 3.15 Silindirin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2.4 Piramit

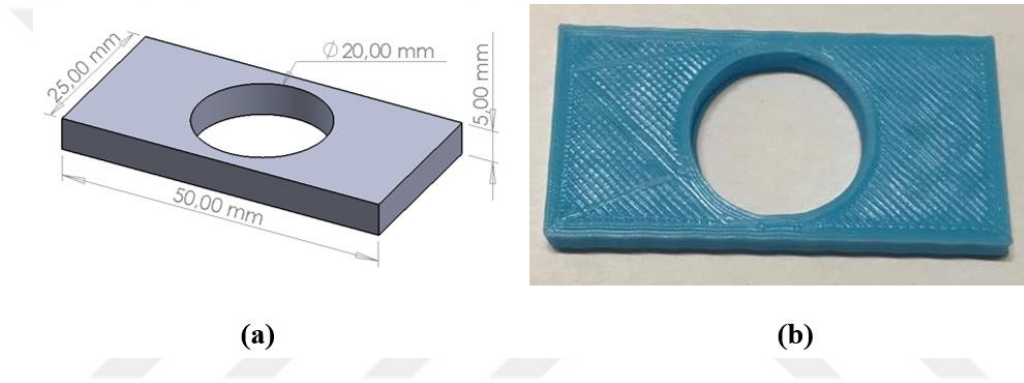
Basit şekillerimiz arasında dördüncü sırada yer alan piramit 30×30 mm taban ölçülerine ait ve tavan yüksekliğinin tabana olan uzaklığı 30 mm'dir. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmekte ve baskı süresi yaklaşık 57 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400 ör/sn hızla alınan veri toplamda 239.829 satır olarak elde edilmektedir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15 g olarak ölçülmektedir. Basılan cismin Solidworks çizimi ve yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16 Piramitin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2.5 Dikdörtgen İçinden Çıkartılmış Silindir

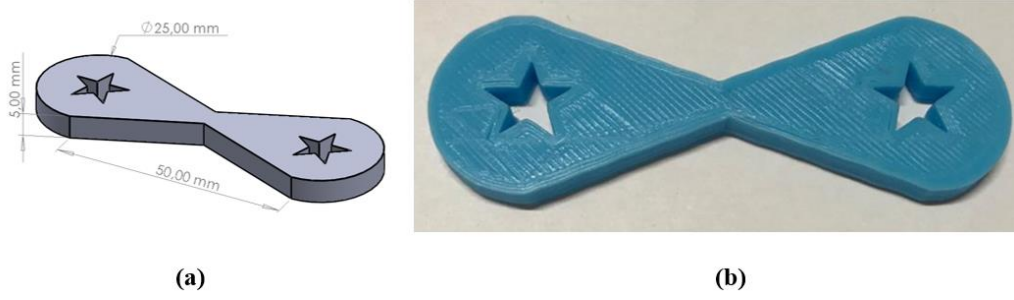
Karmaşık şekillerimiz arasında sınıflandırdığımız $50 \times 25 \times 5$ mm ölçülerindeki bir dikdörtgenler prizmasının tam ortasında çapı 20 mm yüksekliği 5 mm olan bir silindir çıkartılarak oluşturulmaktadır. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmekte ve baskı süresi yaklaşık 89 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400 ör/sn hızla alınan veri toplamda 383.357 satır olarak elde edilmektedir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15 g olarak ölçülmektedir. Basılan cismin Solidworks çizimi ve yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.17 Silindir çıkmış dikdörtgenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2.6 Yıldızlı Papyon

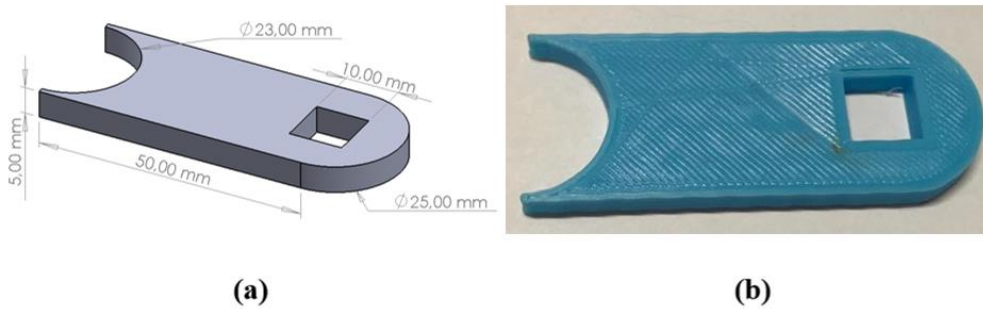
Karmaşık şekillerimiz arasında sınıflandırdığımız yıldızlı papyonun ölçüleri $50 \times 25 \times 5$ mm ölçülerindeki bir dikdörtgenler prizmasının uzun kenarlarını içe doğru daraltılması ve kısa kenarlarından yarım daire ile uzatılmasının ardından yarım dairelerin merkezlerinden yıldız şeklinin çıkartılması sonucunda oluşturulmaktadır. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmekte ve baskı süresi yaklaşık 42 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden saniyede 400 veri alınmış ve toplamda 336.525 satır kod elde edilmektedir. Şekil 3.18'de Solidworks çizimi ve yazıcıdan alınan çıktısı görülmektedir.



Şekil 3.18 Yıldızlı papyonun (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2.7 Değiştirilmiş Dikdörtgenler Prizması

Karmaşık şekillerimiz arasında sınıflandırdığımız bu parça $50 \times 25 \times 5$ mm ölçülerindeki dikdörtgenler prizmasının kısa kenarlarından birine çapı 23 mm olan bir yarım silindir çıkartılarak oluşturulmaktadır. Diğer kısa kenarına ise önce çapı 25 mm olan bir yarım silindir eklenmiş ve sonrasında silindirin merkezinden $10 \times 10 \times 5$ mm ölçülerindeki yıldız çıkartılarak elde edilmektedir. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmekte ve baskı süresi yaklaşık 49 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400 ör/sn hızla alınan veri toplamda 388.788 satır olarak elde edilmektedir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15 g olarak ölçülmektedir. Basılan cismin Solidworks çizimi ve yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.19'da görülmektedir.

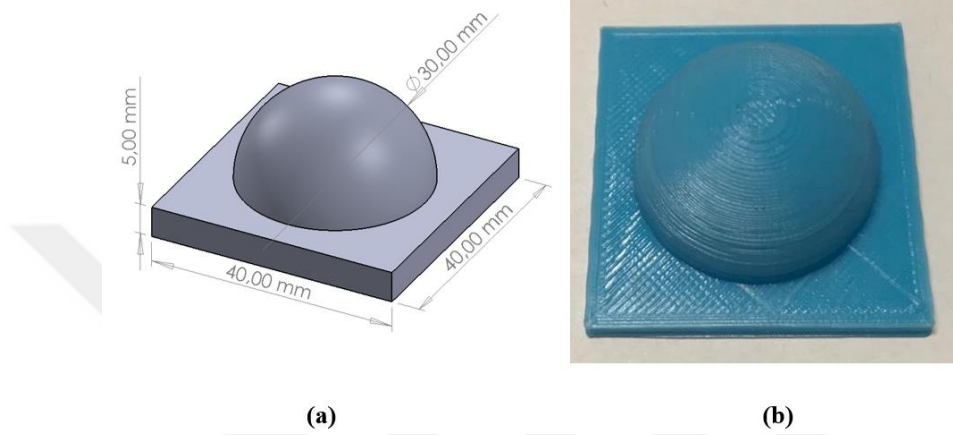


Şekil 3.19 Değiştirilmiş dikdörtgenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

3.8.2.8 Kubbe

Karmaşık şekillerimiz arasında sınıflandırdığımız kubbe $40 \times 40 \times 5$ mm ölçülerindeki kare prizmanın tam merkezinden yukarı yönlü çapı 30 mm olan bir yarım küre eklenerek elde

edilmektedir. 3B yazıcıdan çıktı alınırken duvarlar hariç doluluk oranı % 20 olarak seçilmekte ve baskı süresi yaklaşık 57 dakika sürmektedir. Toplamda 5 adet encoderden 400 ör/sn hızla alınan veri toplamda 336.525 satır olarak elde edilmektedir. Elde edilen veriye ilişkin diğer bilgiler Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Bu baskı için toplamda 3 m filament harcanmış ve toplam ağırlık 15 g olarak ölçülmektedir. Basılan cismin Solidworks çizimi ve yazıcıdan alınan çıktısı Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.20 Kubbenin (a) Solidworks çizimi (b) 3B yazıcı çıktısı.

Yukarıda eğitim için ilk etapta ilk üç şekil ile bir model oluşturulmuştur. Sonra oluşturulan modelde en baştaki modelin PID katsayıları tekrar düzenlenmiştir. Tekrar düzenlenen model ile sonraki sekiz adet geometrik şekil çıkartılmıştır. Genel olarak modele önce emeklemek daha sonra yürümek öğretilmektedir. Bu yöntem modelin gürbüz olabilmesi konusunda oldukça önem arz etmektedir. Burada sonuç itibarıyla medikal baskı alınacak olması baskıdaki özellikle yüzeysel hataların minimum düzeyde bulunması oldukça önemlidir.

Çizelge 3.3'de emeklemeyi öğrenen model ile alınan baskılardan elde edilen veriler bulunmaktadır. Bu çizelgede baskı süresi cismin 3B yazıcıdaki basım süresini göstermektedir. Basım işleminde 3B yazıcımızda 1.75 mm lik PLA (Biopolimer Polilaktik Asit) malzemenin oluşmaktadır. Kullanılan filament ise kaç m filament kullanıldığını göstermektedir. Malzemenin ağırlığı ise basımda sonraki ağırlığını temsil etmektedir. Burada kullanılan baskı süresi, filament ve malzemenin ağırlığı Cura programındaki verilere göre belirlenmiştir.

Çizelge 3.3 İkincil olarak basılan geometrik şekillere ilişkin veriler

	Baskı Süresi	Kullanılan Flament	Malzemenin Ağırlığı	Örnek Sayısı	Veri Uzunluğu	Veri Hızı
	(s)	(m)	(g)	(adet)	(bit)	(bit/s)
<i>Dikdörtgenler Prizması</i>	2280	1,25	3,76	224.496	80.873.512	28.658
<i>Küp</i>	6960	4,31	12,97	263.240	87.078.256	21.233
<i>Silindir</i>	1320	0,72	2,17	170.023	57.309.624	32.710
<i>Piramit</i>	2880	1,69	5,09	239.829	84.967.024	24.758
<i>Silindir Çıkartılmış Dikdörtgen</i>	2480	1,14	3,43	383.357	137.988.616	25.904
<i>Papyon</i>	3000	1,48	4,46	554.944	202.283.968	33.243
<i>Değiştirilmiş Dikdörtgen</i>	5580	1,33	4,01	388.788	141.358.696	28.890
<i>Kubbe</i>	4620	2,43	7,31	336.525	121.827.368	35.591

Örnek sayısı 5 adet encoderden eşzaman olarak alınan veri satırını temsil etmektedir. Her bir satırda flament ve xyz eksenlerindeki encoderlerden alınan verilere yer verilmiştir. Burada encoderlerin gönderdiği verilerin alınmaya başladığı andaki konumları referans alınarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerin içindeki tarih ve saat verisi çıkartılmış ve sadece encoder verisi kalmıştır ve bit cinsinden gösterilmektedir. Veri hızı ise elde edilen verilerin basım süresine oranı olarak gösterilmektedir. Bit/saniye (bit/s) olarak verilmiştir. Bu veri encoderlerin okuma, kullandığımız ESP32 mikroişlemcisinin işleme ve yazma hızlarıyla beraber seri porttan aldığımız bilgisayarın USB'den (Universal Serial Bus) veri okuma ve yazma hızlarıyla bağlantılıdır.

3.9 ZAMAN AĞIRLIKLIL KARESEL HATANIN İNTEGRALI

Bu tez çalışmasında klasik PID, GA-PID ve WOA-PID olarak yapılan çalışmaların kıyaslanmasında amaç fonksiyonu olarak zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (Integral Time-weighted Squared Error-ITSE) olarak seçilmiştir (Panda et al. 2012). ITSE matematiksel olarak

$$ITSE = \int_0^{t_{sim}} t(r(t) - y(t))^2 dt = \int_0^{t_{sim}} te^2 dt \quad (3.25)$$

ile ifade edilmektedir. Burada $e(t)$ hata oranını temsil etmektedir. Denklem 3.25 ile ifade edilen ITSE performans ölçütü geliştirilen kontrolcünün parametrelerinin ayarlanmasında kullanılmaktadır. ITSE performans ölçütü aynı zamanda çalışmada bahsedilen optimizasyon algoritmaları için amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Optimizasyon algoritmaları bu ölçüte göre PID parametre katsayılarını kestirmektedir. 3B yazıcının geçici tepki süresinin azaltılarak yazdırılacak yapay organ ve dokulardaki yüzey hatalarının en aza indirilmesi hedeflenmektedir.



BÖLÜM 4

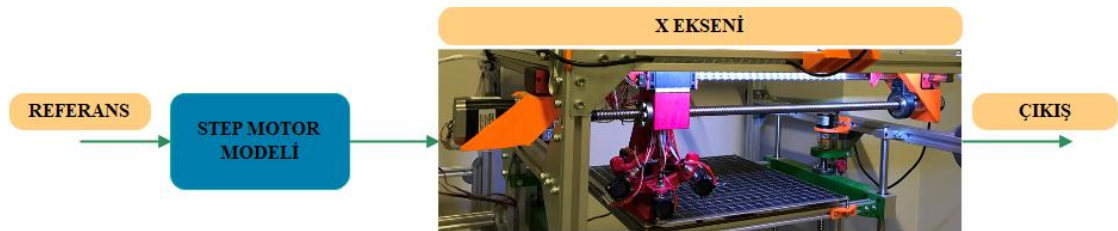
3B YAZICININ MODELE DAYALI DENETİMİ

4.1 3B YAZICININ TRANSFER FONKSİYONUNUN ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde her bir ekseninde yer alan adım motor ve ekstruder sarkaç sistemi gibi özgün tasarıma sahip bir yapı üzerinde step motorun birim basamak tepkilerine verilen cevaplara bakarak transfer fonksiyonları elde edilmektedir. Her eksen için yapı farklı olduğu için her biri için ayrı ayrı transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Buradaki geometriye bakarak x ve y eksenlerindeki modelin birbirine daha çok benzediği görülmektedir.

4.1.1 x Ekseni için Transfer Fonksiyonu

x ekseni için model tahmin edilebilmesi için step motorunun birim basamak tepkisine verdiği cevaptan faydalanılmaktadır. Burada motorun her bir adımı için 360/200 derece/adım oranı ile her bir adımının açısı karşılığı 1.8 derece olduğu bilinmektedir. Step motora bir puls verdiğimizde motorun tepkisi encoder aracılığıyla kaydedilmektedir. Daha sonra bu veriyi MATLAB programının sistem tanımlama yöntemlerinden LM yöntemi ile eğrisi elde edilmektedir. Burada x ekseni için hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.1 de gösterilmektedir.



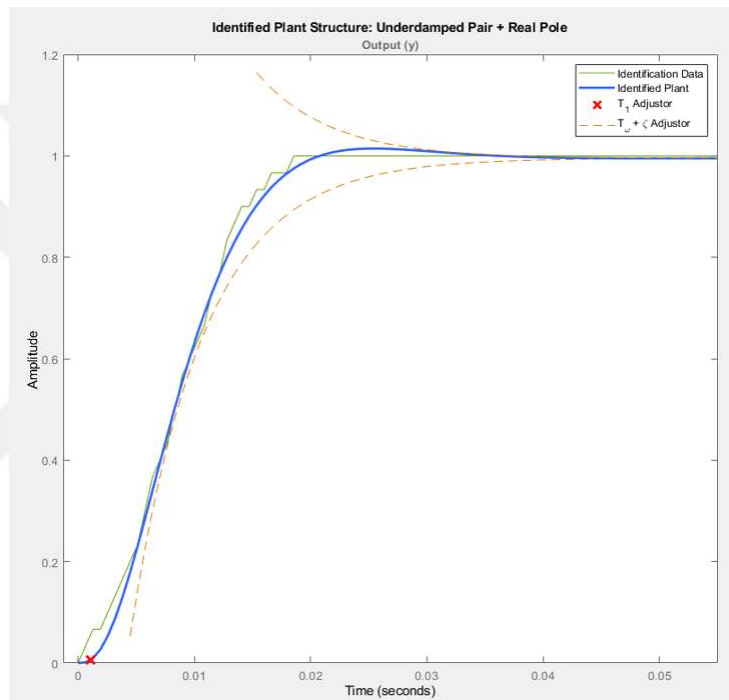
Şekil 4.1 x ekseni deney düzeneği.

Burada deneysel olarak elde ettiğimiz değerler ve MATLAB sistem tanımlama eklentisi ile x ekseni için elde ettiğimiz transfer fonksiyonu ve bu fonksiyon için kullanacağımız katsayılar

verilmektedir. Deneysel olarak elde edilen grafik ve bu grafiğe göre elde edilen eğri Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Bu grafiğe göre elde edilen 3’üncü dereceden transfer fonksiyonu ise Denklem 4.1 ve 4.2 ile verilmektedir.

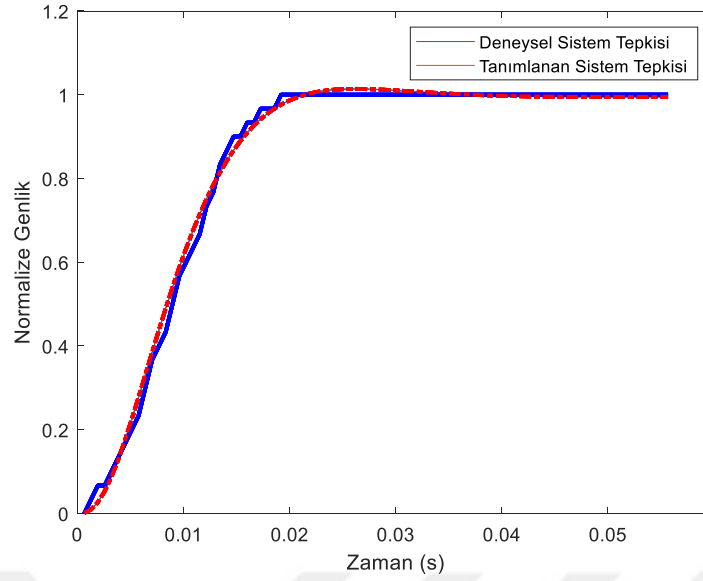
$$G = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_\omega^2 s^2 + 2\xi T_\omega s + 1)} \quad (4.1)$$

$$G = \frac{0,9953}{27,02 \times 10^{-9} s^3 + 33,08 \times 10^{-6} s^2 + 8,86 \times 10^{-3} s + 1} \quad (4.2)$$



Şekil 4.2 xekseni için oluşturulan model grafiği.

Sistem tanımlama yöntemi sayesinde elde edilen katsayılar $K = 0.9953$, $T_1 = 0.001101$, $T_\omega = 0.004954$ ve $\xi = 0.783$ olarak bulunmaktadır. Bu katsayılar LM metodu ile 11 iterasyon sonucunda ve %94,75 başarımla bulunmaktadır. Her bir iterasyon için elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilmektedir. Denklem 4.1’deki bilinmeyenlerin yerine deneysel olarak elde ettiğimiz değerleri yerine koyduktan sonra elde edilen x ekseni için olan transfer fonksiyonu Denklem 4.2’deki gibi olmaktadır. Oluşturulan model, elde edilen transfer fonksiyonu sayesinde test edilmiş ve sistemin tepkisi Şekil 4.3’te sunulmuştur.



Şekil 4.3 x eksenini için oluşturulan modelin test edilmesi.

Çizelge 4.1 x eksenini için iterasyon sonuçları.

Iteration	Cost	Norm of step	First-order optimality	Improvement (%)		
				Expected	Achieved	Bisections
0	0.00102279	-	688	7.64e+04	-	-
1	0.000261718	73.3	361	7.64e+04	74.4	0
2	0.000240483	61.7	11.5	3.04e+04	8.11	0
3	0.000240461	1.77	0.103	38.1	0.00906	0
4	0.000240461	3.04	0.0574	0.757	0.000228	0
5	0.00024046	0.98	0.0274	0.104	3.54e-05	0
6	0.00024046	0.481	0.0134	0.0193	6.69e-06	0
7	0.00024046	0.206	0.00593	0.00374	1.3e-06	0
8	0.00024046	0.0914	0.00265	0.000726	2.51e-07	0
9	0.00024046	0.0402	0.00117	0.000141	4.87e-08	0
10	0.00024046	0.0177	0.000516	2.73e-05	9.45e-09	0
11	0.00024046	0.00779	0.000227	5.29e-06	1.83e-09	0

4.1.2 y Eksenini için Transfer Fonksiyonu

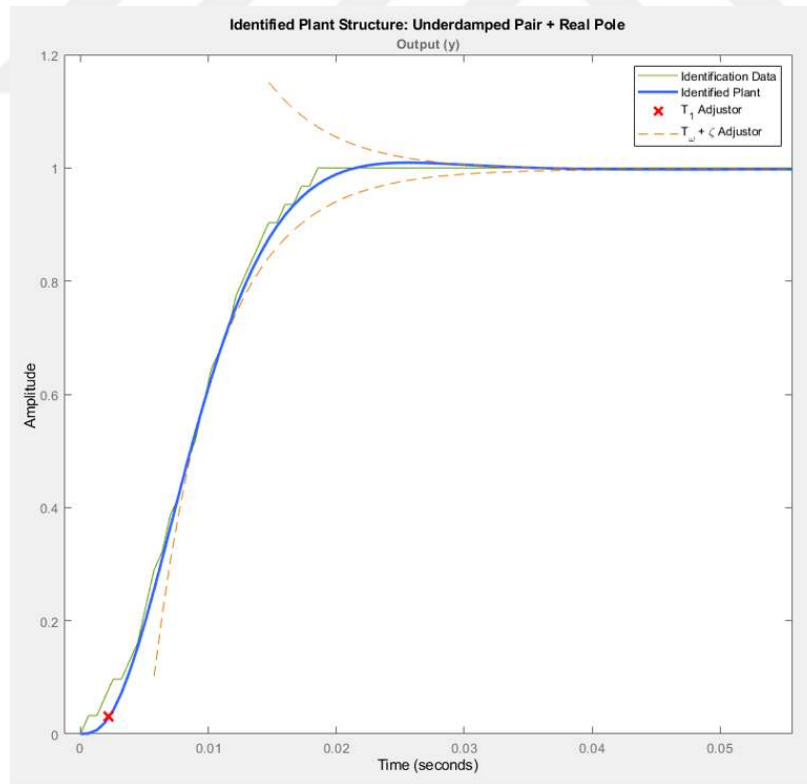
y eksenini model parametre kestirimi için adım motorunun birim basamak tepkisine verdiği cevaptan faydalanılmaktadır. Burada motorun her bir adımını için 360/200 derece/adım oranı ile her bir adımının açısı karşılığı 1.8 derece olduğu bilinmektedir. Step motora bir darbe verildiğinde motorun tepkisi encoder aracılığı ile kaydedilmektedir. Daha sonra bu veriler kullanılarak LM yöntemi ile transfer fonksiyonu eğrisi elde edilmektedir. Burada y eksenini için hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 y ekseni deney düzeneği.

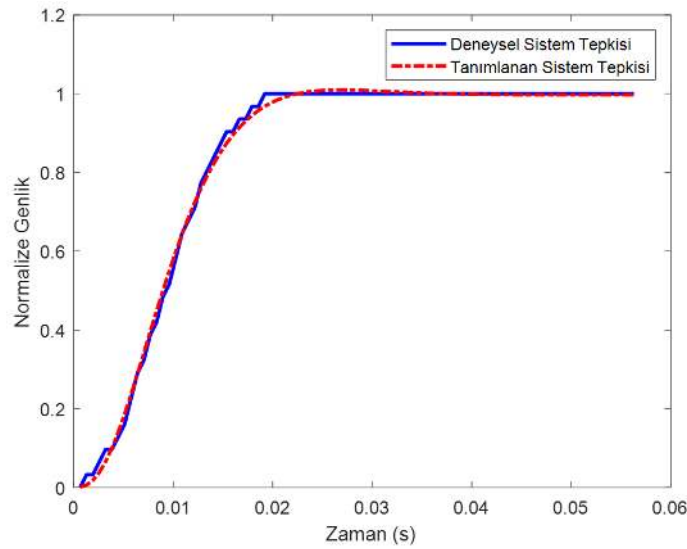
Burada deneysel olarak elde ettiğimiz değerler ve MATLAB sistem tanımlama eklentisi ile y ekseni için elde ettiğimiz transfer fonksiyonu ve bu fonksiyon için kullanacağımız katsayılar verilmektedir. Deneysel olarak elde edilen grafik ve bu grafiğe göre elde edilen eğri Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Bu grafiğe göre elde edilen 3'üncü dereceden transfer fonksiyonu ise Denklem 4.1 ve 4.3 ile verilmektedir.

$$G = \frac{0,9975}{44,18 \times 10^{-9}s^3 + 35,72 \times s^2 + 9,36 \times 10^{-3}s + 1} \quad (4.3)$$



Şekil 4.5 y ekseni için oluşturulan model grafiği.

Deneyisel olarak elde edilen 3'üncü dereceden transfer fonksiyonu ise Denklem 4.3'te gösterilmiştir. Sistem tanımlama sayesinde elde edilen katsayılar $K = 0,9975$, $T_1 = 0.002227$, $T_\omega = 0.004454$ ve $\xi = 0.801$ olarak bulunmaktadır. Bu katsayılar LM metodu ile 15 iterasyon sonucunda ve %96.05 başarımla bulunmaktadır Her bir iterasyon için elde edilen değerler Çizelge 4.2'de verilmektedir. Denklem 4.1'deki bilinmeyenlerin yerine deneyisel olarak elde ettiğimiz değerleri yerine koyduktan sonra elde edilen y eksenini için olan transfer fonksiyonu Denklem 4.3'teki gibi olmaktadır. Oluşturulan model, elde edilen transfer fonksiyonu sayesinde test edilmiş ve sistemin tepkisi Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.6 y eksenini için oluşturulan modelin test edilmesi.

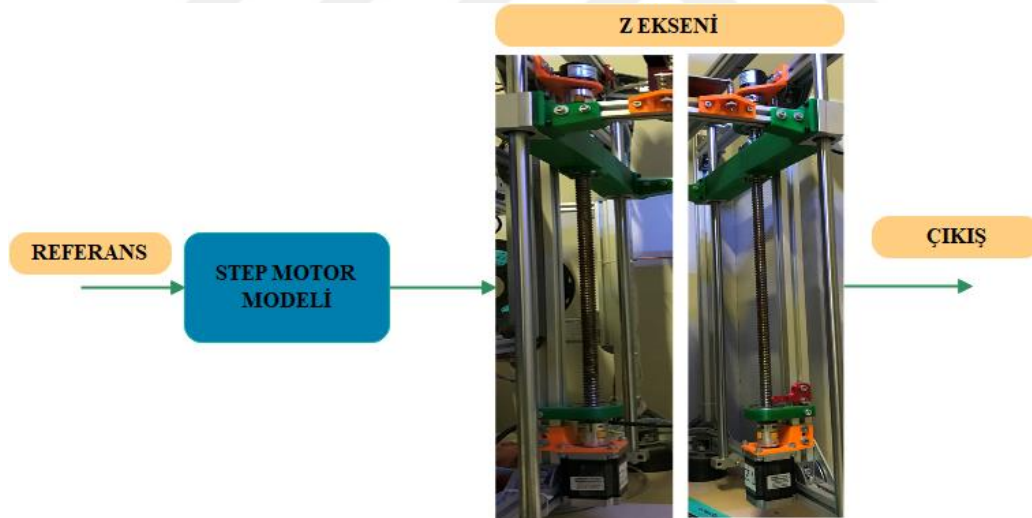
Çizelge 4.2 y eksenini için iterasyon sonuçları.

Iteration	Cost	Norm of step	First-order optimality	Improvement (%)		
				Expected	Achieved	Bisections
0	0.0233249	-	185	4.25e+03	-	-
1	0.0224339	81.2	217	4.25e+03	3.82	3
2	0.0205414	111	240	4.43e+03	8.44	3
3	0.00165626	586	635	4.84e+03	91.9	0
4	0.00110477	400	905	5.42e+04	33.3	1
5	0.000295958	168	1.85e+03	7.84e+04	73.2	0
6	0.000155027	87.6	710	1.75e+05	47.6	0
7	0.000141659	3.94	14.1	5.58e+04	8.62	0
8	0.000141621	12.1	11.7	193	0.0269	0
9	0.000141615	1.73	0.211	25.3	0.00385	0
10	0.000141615	0.746	0.0422	0.637	0.000114	0
11	0.000141615	0.184	0.011	0.0483	8.73e-06	0
12	0.000141615	0.0535	0.00342	0.00375	6.79e-07	0
13	0.000141615	0.0148	0.000986	0.000293	5.31e-08	0
14	0.000141615	0.00415	0.000278	2.29e-05	4.15e-09	0
15	0.000141615	0.00116	7.79e-05	1.79e-06	3.23e-10	0

4.1.3 z Eksenini için Transfer Fonksiyonu

Y eksenini için model tahmin edilebilmesi için step motorunun birim basamak tepkisine verdiği cevaptan faydalanılmaktadır. Burada motorun her bir adımı için 360/200 derece/adım oranı ile her bir adımının açısal karşılığı 1.8 derece olduğu bilinmektedir. Step motora bir darbe verdiğimizde motorun tepkisi encoder aracılığı ile kaydedilmektedir. Daha sonra bu veriyi MATLAB programının sistem tanımlama yöntemlerinden LM yöntemi ile transfer fonksiyonu eğrisi elde edilmektedir. Burada z eksenini için hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

Burada deneysel olarak elde ettiğimiz değerler ve MATLAB sistem tanımlama eklentisi ile z eksenini için elde ettiğimiz transfer fonksiyonu ve bu fonksiyon için kullanacağımız katsayılar verilmektedir. Deneysel olarak elde edilen grafik ve bu grafiğe göre elde edilen eğri Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Bu grafiğe göre elde edilen 3’üncü dereceden transfer fonksiyonu ise Denklem 4.1 ve 4.4 ile verilmektedir.

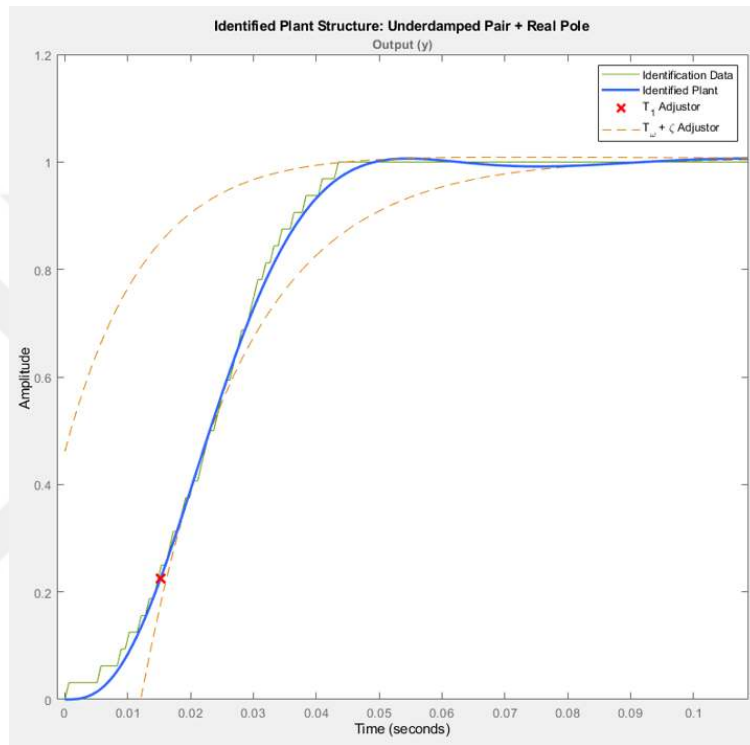


Şekil 4.7 z eksenini deney düzeneği.

Deneysel olarak elde edilen 3. dereceden transfer fonksiyonu ise denklem 4.15’de gösterilmiştir. Sistem tanımlama sayesinde elde edilen katsayılar $K = 1,007$, $T_1 = 0.01523$, $T_w = 0.008704$ ve $\xi = 0.504$ olarak bulunmaktadır. Bu katsayılar LM metodu ile 7 iterasyon sonucunda ve %96,28 başarımla bulunmaktadır. Her bir iterasyon için elde edilen değerler Çizelge 4.3’te verilmektedir. Denklem 4.1’deki bilinmeyenlerin yerine deneysel

olarak elde ettiğimiz değerleri yerine koyduktan sonra elde edilen y eksenini için olan transfer fonksiyonu Denklem 4.4'deki gibi olmaktadır. Oluşturulan model, elde edilen transfer fonksiyonu sayesinde test edilmiş ve sistemin tepkisi Şekil 4.9'da sunulmuştur.

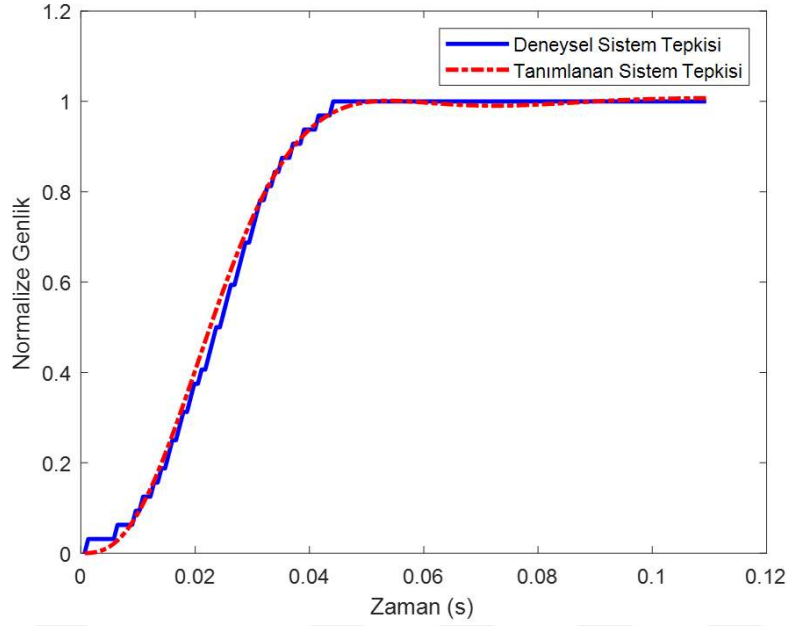
$$G = \frac{1,007}{1,15 \times 10^{-6}s^3 + 0,21 \times 10^{-3}s^2 + 24 \times 10^{-3}s + 1} \quad (4.4)$$



Şekil 4.8 z eksenini için oluşturulan model grafiği.

Çizelge 4.3 z eksenini için iterasyon sonuçları.

Iteration	Cost	Norm of step	First-order optimality	Improvement (%)		
				Expected	Achieved	Bisections
0	0.0319471	-	741	3.08e+03	-	-
1	0.00205343	38.1	2.17e+03	3.08e+03	93.6	0
2	0.000213995	13	3.01e+03	4.52e+04	89.6	0
3	0.00015873	3.72	40.8	1.24e+05	25.8	0
4	0.000158634	0.498	6.08	370	0.0606	0
5	0.000158634	0.018	0.0405	1.03	0.000166	0
6	0.000158634	0.00082	0.00291	0.00141	2.31e-07	0
7	0.000158634	4.83e-05	9.32e-05	3.01e-06	4.94e-10	0

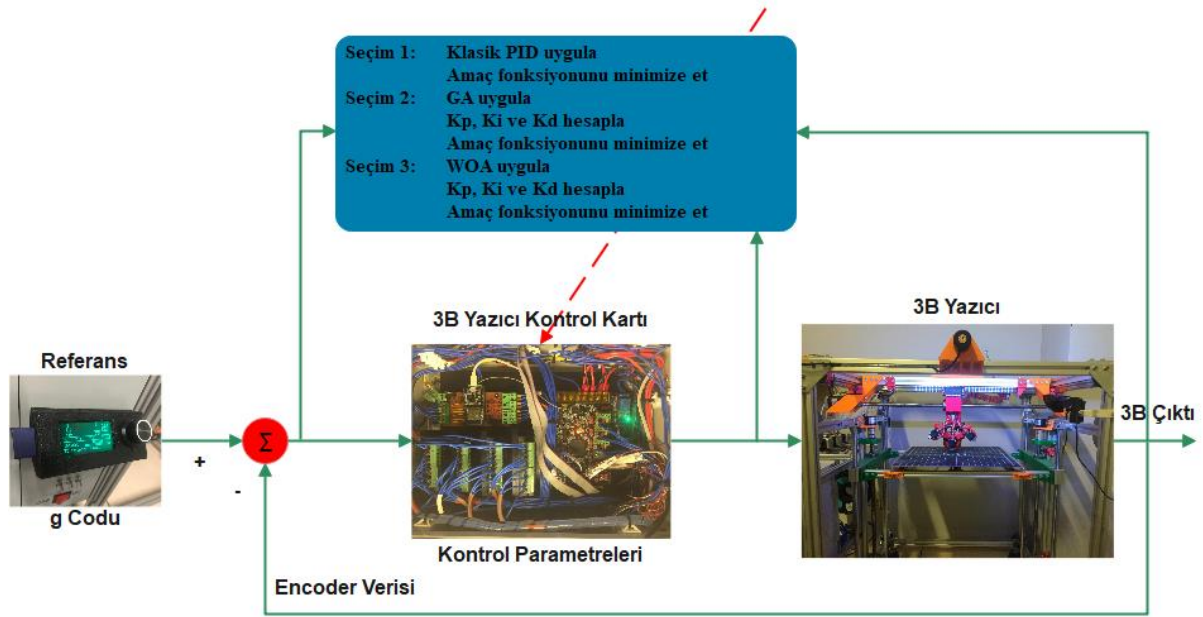


Şekil 4.9 z eksenini içeren oluşturulan modelin test edilmesi.

4.2 SİSTEM MODELLENMESİ

Sistem modellemesi 3B yazıcının modele dayalı denetimi için oldukça önemlidir. Burada x , y ve z eksenleri için Denklem 4.2, 4.3 ve 4.4 ile gösterilen transfer fonksiyonlarının katsayılarının iyileştirilmesi gerçekleştirilmektedir. Öncelikle, bu katsayılar ilk önce Ziegler-Nichols (ZN) yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Çalışmanın sonraki aşamasında, model katsayıları literatürde sıklıkla kullanılan GA ile kestirilmekte ve sistemin denetimi için gerekli PID parametre katsayıları GA-PID ile hesaplanmaktadır. Çalışmanın son aşamasında, model katsayıları önerilen WOA ile kestirilmekte ve sistemin denetimi için gerekli olan PID parametre katsayıları WOA-PID ile hesaplanmaktadır. Denetleyicilerin performansı, en yaygın kullanılan performans ölçütlerinden biri olan ITSE yardımıyla ölçülmektedir.

Tasarlanan 3B yazıcı için çalışmada bahsedilen kontrolcü algoritmalarının kontrol kartına gömülmesi ve 3B yazıcının blok yapısı Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Şekil 4.10'da gösterilen blok diyagramda referans olarak SD karttan okunan "g" kodu alınarak 3B yazıcının kontrol kartına gönderilmektedir. Burada o esnada hangi kontrol algoritması test edilecek ise o algoritma için elde edilen transfer fonksiyonu katsayıları seçilmektedir. Klasik PID test edilecek ise Seçim 1, GA-PID test edilecek ise Seçim 2 ve WOA-PID test edilecek ise Seçim 3 devreye alınır ve her algoritma için optimize edilen parametre katsayıları kullanılır.



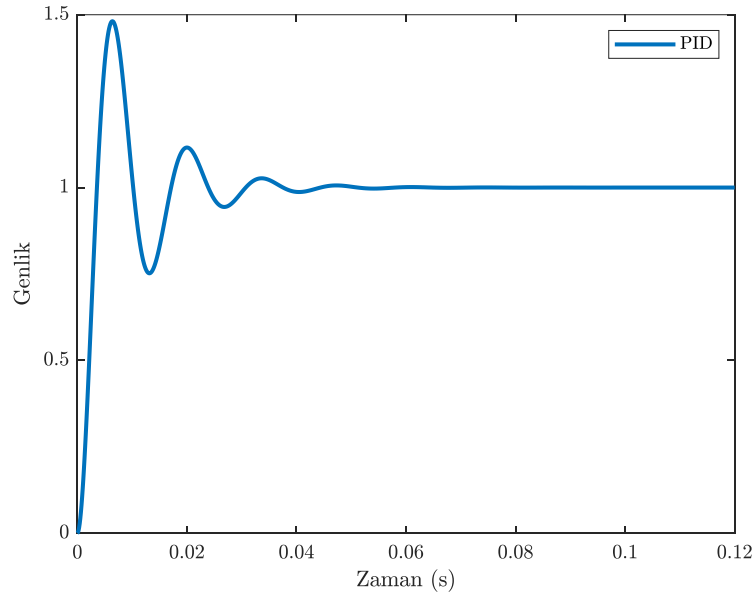
Şekil 4.10 Tasarlanan 3B yazıcının blok gösterimi.

4.3 KLASİK YÖNTEM PID KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ

Buradaki yöntemde daha önceden LM sistem tanımlama yöntemi ile elde edilen transfer fonksiyonunun PID katsayıları kestirilmektedir. PID katsayılarını elde ederken ZN yöntemi kullanılmaktadır. Transfer fonksiyonu her eksen için ayrı ayrı elde edildiği için katsayılar da farklı farklı olmaktadır. Her eksen için ayrı ayrı transfer fonksiyonu ve birim basamak tepkisine ait grafikler ayrı ayrı gösterilmektedir.

4.3.1 x Eksenini için PID Katsayıları

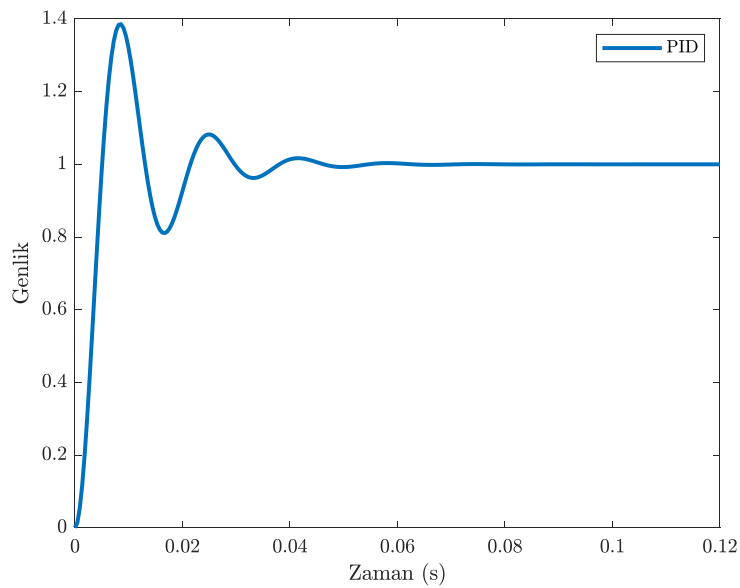
Denklem 4.2'deki transfer fonksiyonunun PID katsayıları ZN yöntemi ile elde edilmekte ve birim basamak tepkisi Şekil 4.11'de gösterilmektedir. PID parametreleri, $K_c = 10.5041$, $P_u = 0.010564$, $K_p = 6.1974$, $T_i = 0.0053$ ve $T_d = 0.0013$ olarak hesaplanmaktadır. Burada maksimum aşımın kötü bir sonuç gösterdiği görülmektedir. Yerleşme süresi ise 50 ms olarak görülmektedir. Burada yükselme ve yerleşme zamanları tasarım kriterlerini karşılayabilse de maksimum aşım sorun teşkil etmektedir.



Şekil 4.11 ZN yöntemi ile x ekseninin birim basamak tepkisi.

4.3.2 y Eksenini için PID Katsayıları

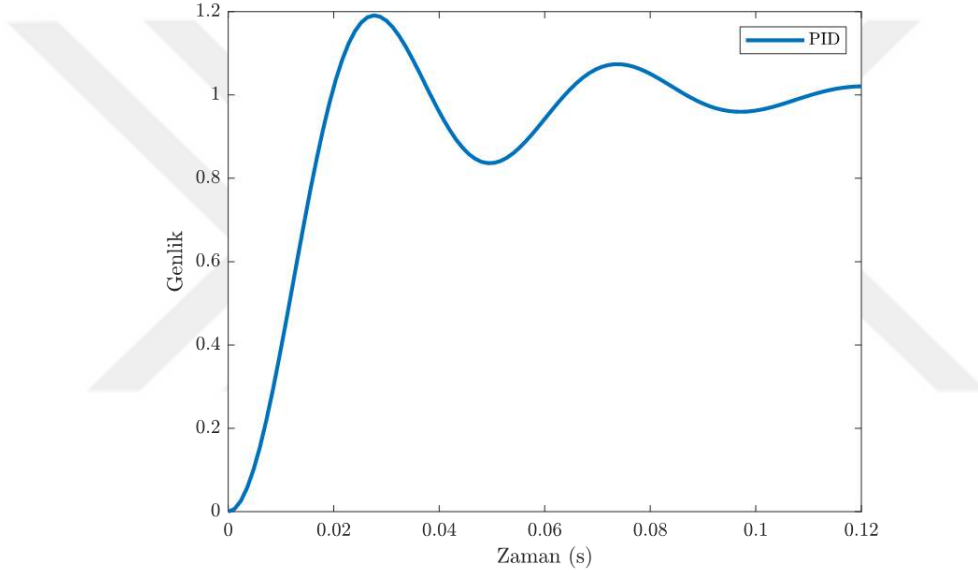
Denklem 4.3'teki transfer fonksiyonunun PID katsayılarını ZN yöntemi ile birim basamak tepkisi Şekil 4.12'de gösterilmektedir. PID parametreleri $K_c = 6.5902$, $P_u = 0.013647$, $K_p = 3.8882$, $T_i = 0.0068$ ve $T_d = 0.0016$ olarak hesaplanmaktadır. Burada maksimum aşımın kötü bir sonuç gösterdiği görülmektedir. Yerleşme süresi ise 60 ms olarak görülmektedir. Burada yükselme ve oturma zamanları tasarım kriterlerini karşılayabilse de maksimum aşım sorun teşkil etmektedir.



Şekil 4.12 ZN yöntemi ile y ekseninin birim basamak tepkisi.

4.3.3 z Eksenini için PID Katsayıları

Denklem 4.4'deki transfer fonksiyonunun PID katsayılarını ZN yöntemi ile birim basamak tepkisi şekil 4.13'te gösterilmektedir. ZN yöntemi için hesaplanan isterler belirlenmekte ve gösterilmektedir. PID parametreleri $K_c = 3.3333$, $P_u = 0.04356$, $K_p = 1.9665$, $T_i = 0.0218$ ve $T_d = 0.0052$ olarak hesaplanmaktadır. Burada maksimum aşım %19 olurken yerleşme süresi diğer eksenlere göre daha uzun sürmektedir. Yerleşme süresi ise yaklaşık 190 ms olarak görülmektedir. Burada yükselme ve yerleşme zamanları tasarım kriterlerini karşılayabilse de maksimum aşım sorun teşkil etmektedir.



Şekil 4.13 ZN yöntemi ile z ekseninin birim basamak tepkisi.

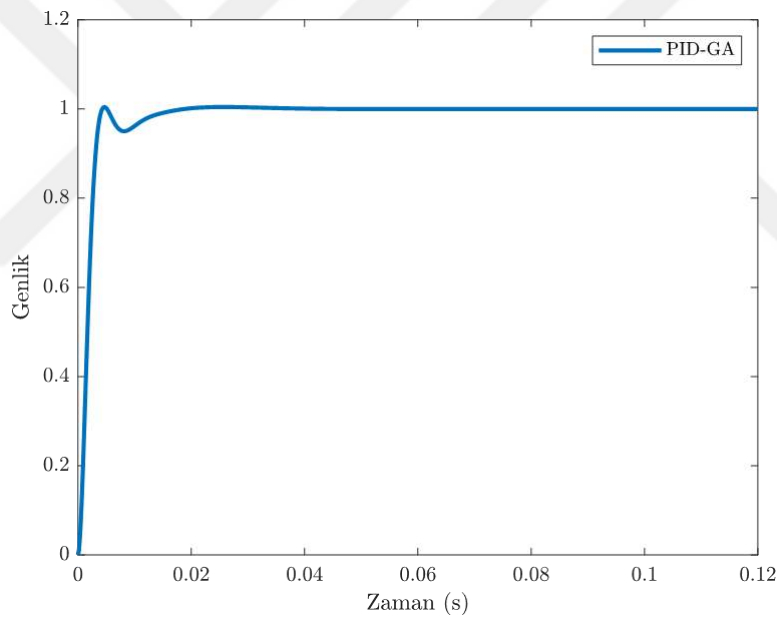
4.4 GA-PID YÖNTEMİYLE PID KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ

ZN yöntemi sayesinde iyileştirilmiş bir kontrol sistemi boşta çalışan bir motor için yeterince iyi sonuçlar verebilse de 3B yazıcı sistemi gibi karmaşık sistemlerde yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden PID parametrelerinin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Aksi durumda, sistemin referans sinyalini en az hata ile takip etmesi zor olacaktır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için hem model hem de kontrolcü parametreleri GA ile optimize edilen GA-PID kontrolcü algoritması ile 3B yazıcı sistemi kontrol edilmektedir. Bu yaklaşıma göre PID parametreleri x , y ve z eksenleri için ayrı ayrı elde edilmiştir.

4.4.1 x Eksenini için GA-PID Katsayıları

Denklem 4.2'deki transfer fonksiyonunu yine GA-PID kontrolcü yaklaşımı için kullanmaktadır. Transfer fonksiyonunun katsayılarının kestiriminde kullanılan GA tekniğindeki popülasyon büyüklüğü (N_p), iterasyon sayısı (T), çaprazlama olasılık değeri (P_c), mutasyon olasılık değeri (P_m), çaprazlama mutasyon değeri (P_m) parametre değerleri belirlenmektedir. GA-PID için belirlenen değerler ve bu değerler sonucunda PID katsayıları Çizelge 4.4'de gösterilmektedir.

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi klasik PID yöntemine göre en yüksek aşım oldukça törpülendiği görülmektedir. Burada oturma zamanı 10ms, yükselme zamanı 1,8 ms ve en yüksek aşım ise %0,9 civarında olmaktadır.

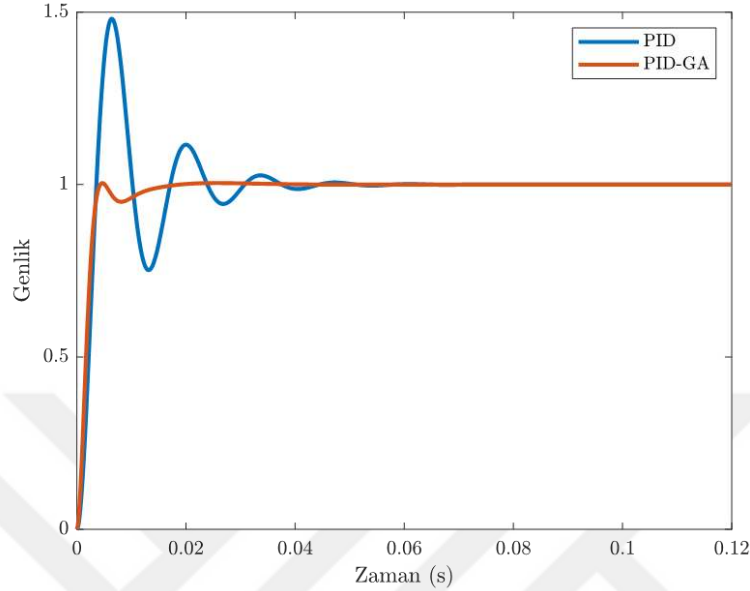


Şekil 4.14 GA-PID yöntemi ile x ekseninin birim basamak tepkisi.

Çizelge 4.4 x eksenini için GA-PID Parametreleri ve PID katsayıları.

N_p (adet)	T (adet)	etac (%)	etam (%)	P_c (%)	P_m (%)	K_p	K_i	K_d
100	100	20	20	80	20	4.1751	500	0.017314

x eksenini için klasik PID ve GA-PID için elde edilen birim basamak cevapları Şekil 4.15'te gösterilmektedir. GA-PID kontrolcünün hem geçici durum hem de kalıcı durum yanıtının klasik PID kontrolcü yanıtına göre oldukça iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15 x eksenini için klasik PID ile GA-PID birim basamak tepkisi kıyaslanması.

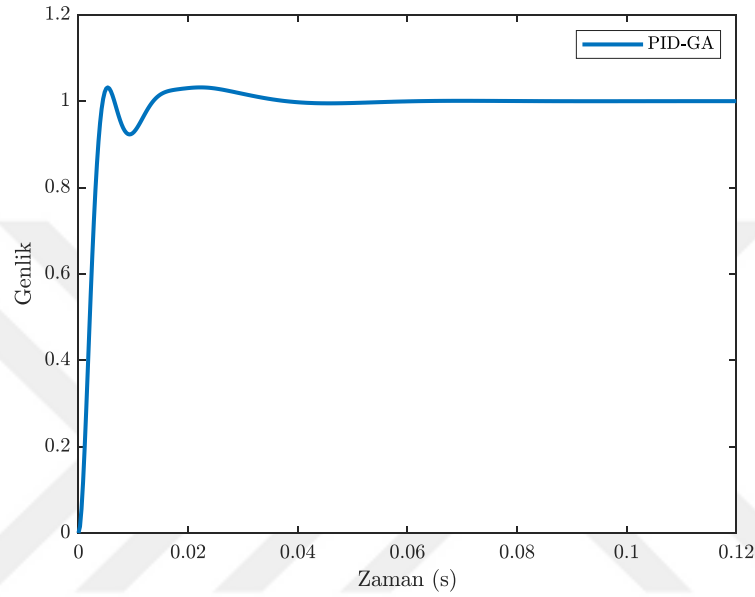
4.4.2 y Eksenini için GA-PID Katsayıları

Denklem 4.3'teki transfer fonksiyonunu yine GA-PID kontrolcü yaklaşımı için kullanılmaktadır. Transfer fonksiyonunun katsayılarının kestiriminde kullanılan GA tekniğindeki popülasyon büyüklüğü (N_p), iterasyon sayısı (T), çaprazlama olasılık değeri (e_{tac}), mutasyon olasılık değeri (e_{tam}), çaprazlama olasılık değeri (P_c) ve çaprazlama mutasyon değeri (P_m) parametre değerleri belirlenmektedir. GA-PID için belirlenen değerler ve bu değerler sonucunda PID katsayıları Çizelge 4.5'de gösterilmektedir.

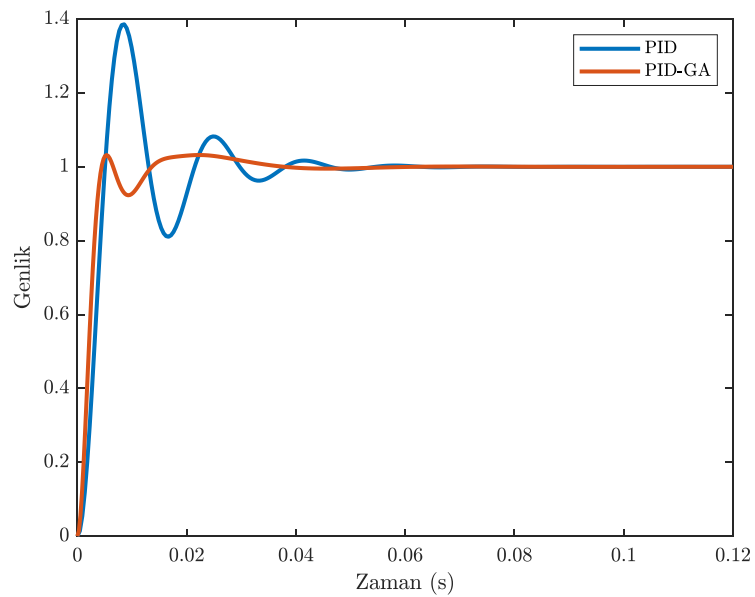
Çizelge 4.5 y eksenini için GA-PID Parametreleri ve PID katsayıları

N_p (adet)	T (adet)	e_{tac} (%)	e_{tam} (%)	P_c (%)	P_m (%)	K_p	K_i	K_d
100	100	20	20	80	20	3.0318	500	0.01788

Şekil 4.16’de görüldüğü gibi klasik PID yöntemine göre en yüksek aşım oldukça törpülendiği görülmektedir. Burada oturma zamanı 55 ms , yükselme zamanı 3.3 ms ve en yüksek aşım ise %3,5 civarında olmaktadır. y eksenini için klasik PID ve GA-PID için elde edilen birim basamak cevapları Şekil 4.17’de gösterilmektedir. GA-PID kontrolcünün hem geçici durum hem de kalıcı durum yanıtının klasik PID kontrolcü yanıtına göre oldukça iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16 GA-PID yöntemi ile y ekseninin birim basamak tepkisi.



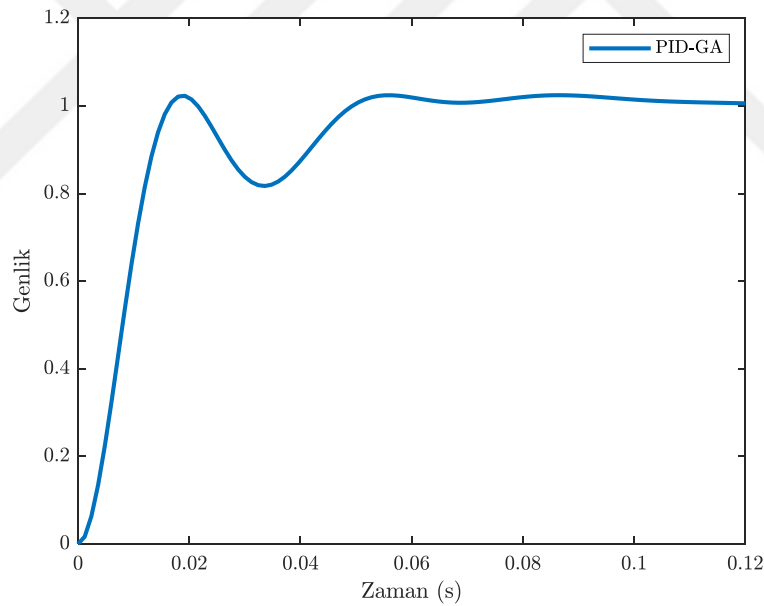
Şekil 4.17 y eksenini için klasik PID ile GA-PID birim basamak tepkisi kıyaslanması.

4.4.3 z Eksenini için GA-PID Katsayıları

Denklem 4.4'deki transfer fonksiyonunu yine GA-PID içinde kullanmaktadır. Transfer fonksiyonunun katsayılarının kestiriminde kullanılan GA tekniğindeki popülasyon büyüklüğü (N_p), iterasyon sayısı (T), çaprazlama olasılık değeri (etac), mutasyon olasılık değeri (etam), çaprazlama olasılık değeri (P_c) ve çaprazlama mutasyon değeri (P_m) parametre değerleri belirlenmektedir. GA-PID için belirlenen değerler ve bu değerler sonucunda PID katsayıları Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 z eksenini için GA-PID Parametreleri ve PID katsayıları

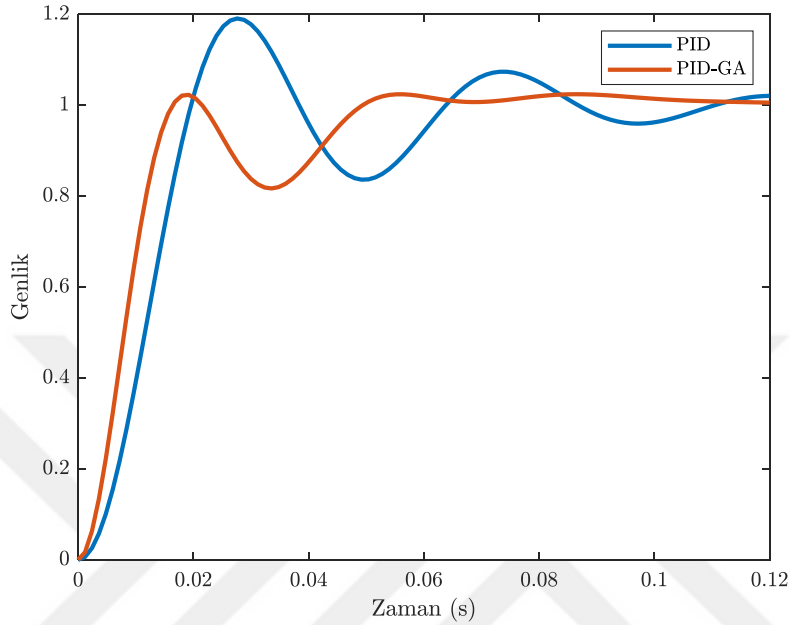
N_p (adet)	T (adet)	etac (%)	etam (%)	P_c (%)	P_m (%)	K_p	K_i	K_d
100	100	20	20	80	20	1.9753	99.9611	0.027877



Şekil 4.18 GA-PID yöntemi ile z ekseninin birim basamak tepkisi.

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi klasik PID yöntemine göre en yüksek aşım oldukça törpülendiği görülmektedir. Burada oturma zamanı 55 ms, yükselme zamanı 12 ms ve en yüksek aşım ise %3,5 civarında olmaktadır. z eksenini için klasik PID ve GA-PID için elde edilen birim basamak cevapları Şekil 4.19'da gösterilmektedir. GA-PID kontrolcünün hem geçici durum hem de kalıcı durum yanıtının klasik PID kontrolcü yanıtına göre oldukça iyi olduğu

görülmektedir. Z eksenı için kontrolcü yanıtları diğır eksenler için elde edilen yanıtlarla kıyaslandığında, z eksenı için kalıcı durum yanıtı için yerleşme süresinin daha uzun olduğu görülmektedir. 3B yazıcıda z ekseninin hareketindeki değışim belirli periyot aralığında sonra olduğu için bu durum ihmal edilebilir olarak kabul edilebilir.



Şekil 4.19 z eksenı için klasik PID ile GA-PID birim basamak tepkisi kıyaslanması.

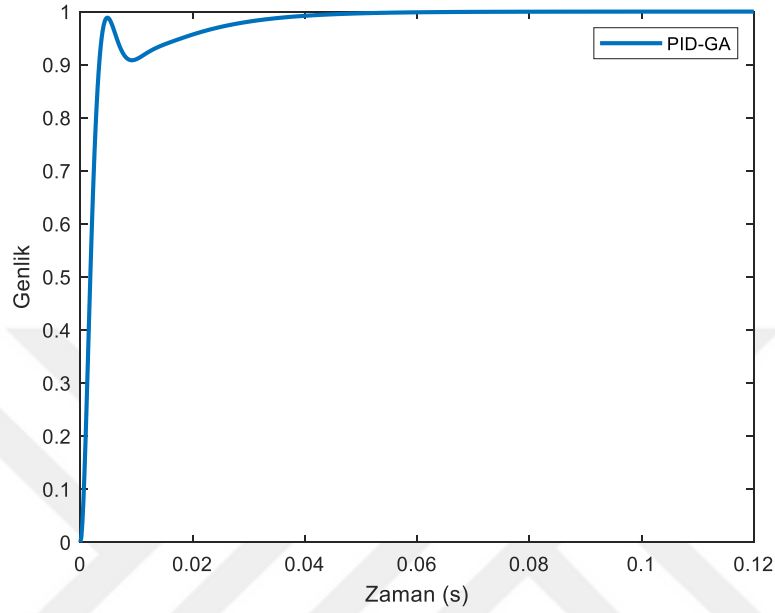
4.5 WOA-PID YÖNTEMİYLE PID KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde, 3B yazıcının x , y ve z eksenleri için ZN, GA-PID ve WOA-PID kontrolcü yaklaşımları ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmaktadır. GA-PID kontrolcü yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar ZN kontrolcü ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında GA-PID kontrolcü yaklaşımı ile hem geçici durum hem de kalıcı durumda iyileşme olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında önerilen WOA-PID kontrolcü yaklaşımı bahsedilen her iki kontrolcü yaklaşımı ile kıyaslandığında, önerilen kontrolcü yaklaşımının her iki kontrolcü yaklaşımına göre oldukça iyi sonuçlar verdiğı görülmektedir.

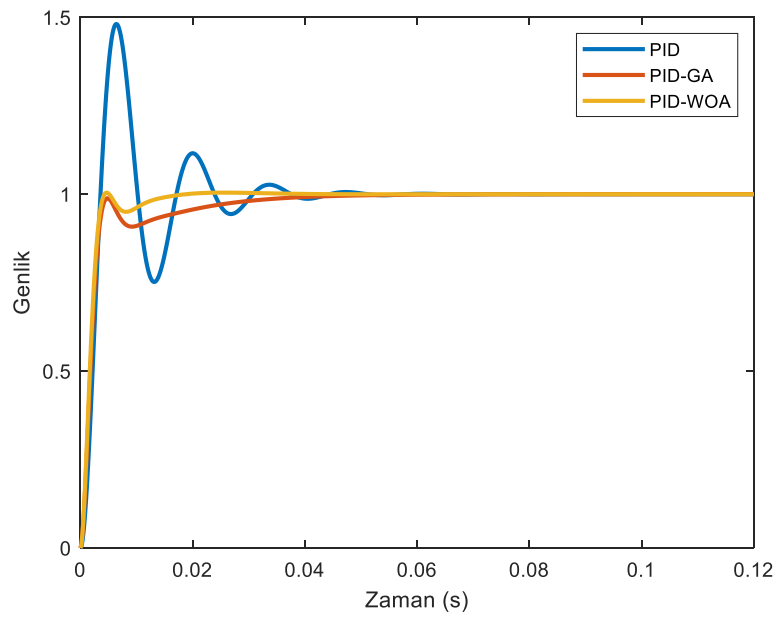
4.5.1 x Eksenı için WOA-PID Katsayıları

Denklem 4.2'deki transfer fonksiyonunu WOA-PID kontrolcü yaklaşımı için kullanmaktadır. Şekil 4.20'de x ekseninin WOA-PID yöntemi ile elde edilen birim basamak tepkisi yer almaktadır. Ayrıca x eksenı için WOA-PID parametrelerinden arama ajanı ve jenerasyon

sayısı 100 olarak seçilmiş, popülasyon tipi bit strings olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak WOA-PID ile x eksenini için elde edilen PID parametreleri $K_p = 4.1751$, $K_i = 500$ ve $K_d = 0.017314$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.21’de ise üç yöntemin aynı ekseninde çizilmiş birim basamak tepkileri yer almaktadır.



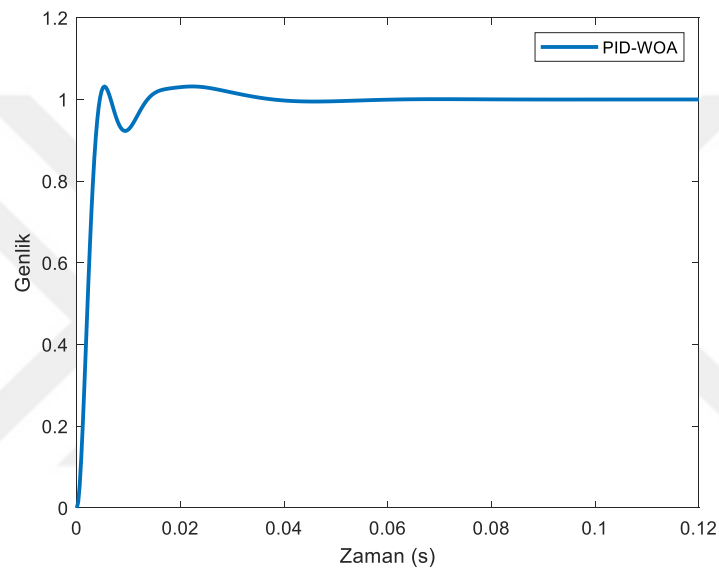
Şekil 4.20 x eksenini için WOA-PID birim basamak tepkisi.



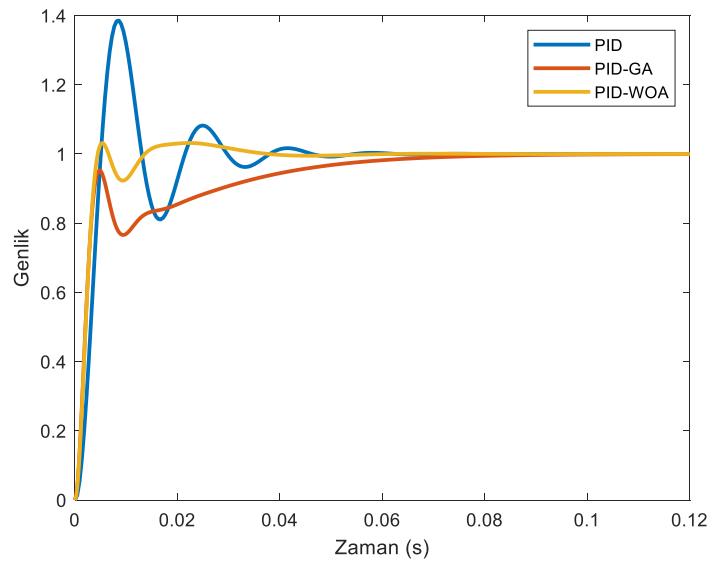
Şekil 4.21 x eksenini için klasik PID, GA-PID ve WOA-PID karşılaştırılması.

4.5.2 y Eksenini için WOA-PID Katsayıları

Denklem 4.3'teki transfer fonksiyonu WOA-PID kontrolcü yaklaşımı için kullanılmaktadır. Şekil 4.22'de y ekseninin WOA-PID yöntemi ile elde edilen birim basamak tepkisi yer almaktadır. Ayrıca x eksenini için WOA-PID parametrelerinden arama ajanı ve jenerasyon sayısı 100 olarak seçilmiş, popülasyon tipi bit strings olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak WOA-PID ile y eksenini için elde edilen PID parametreleri $K_p = 3.0318$, $K_i = 500$ ve $K_d = 0.01788$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.23'te ise üç yöntemin aynı ekseninde çizilmiş birim basamak tepkileri yer almaktadır.



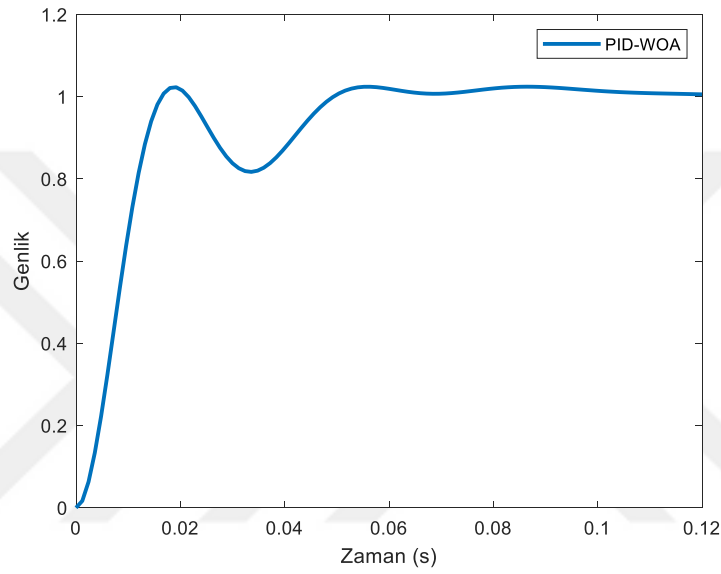
Şekil 4.22 y eksenini için WOA-PID birim basamak tepkisi.



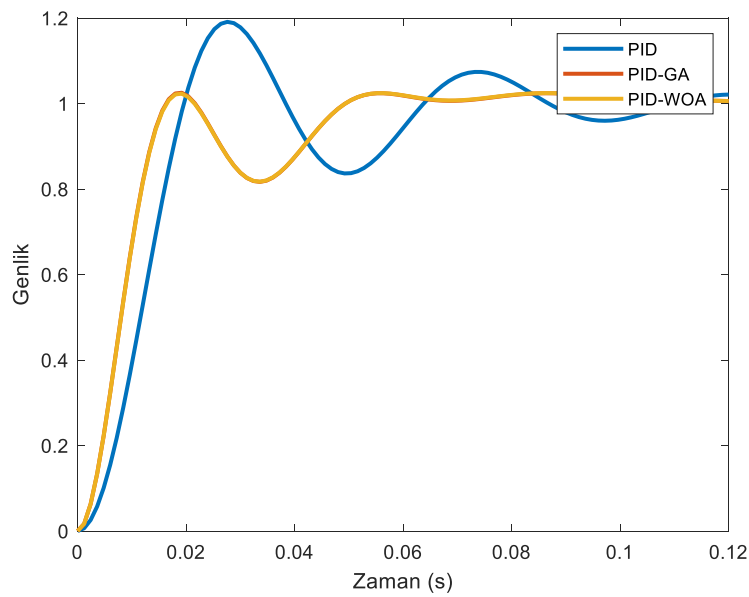
Şekil 4.23 y eksenini için klasik PID, GA-PID ve WOA-PID karşılaştırılması.

4.5.3 z Eksenini için WOA-PID Katsayıları

x ve y eksenlerinden sonra z eksenini için de aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Burada arama ajanı ve popülasyon sayısı 100 olarak seçilmekte ve popülasyon tipi bit strings olarak belirlenmektedir. WOA-PID ile z eksenini için elde edilen PID parametreleri $K_p = 1.9753$, $K_i = 99.9611$ ve $K_d = 0.027877$ olarak hesaplanmıştır. z eksenini için WOA-PID yöntemi ile elde edilen birim basamak tepkisi Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Şekil 4.25'te ise üç yöntemin aynı ekseninde çizilmiş birim basamak tepkileri yer almaktadır.



Şekil 4.24 z eksenini için WOA-PID birim basamak tepkisi.



Şekil 4.25 z eksenini için klasik PID, GA-PID ve WOA-PID karşılaştırılması.

3B yazıcının her bir ekseninin klasik PID, GA-PID ve WOA-PID ile kontrolü için hesaplanan PID parametre katsayıları Çizelge 4.7’de verilmektedir.

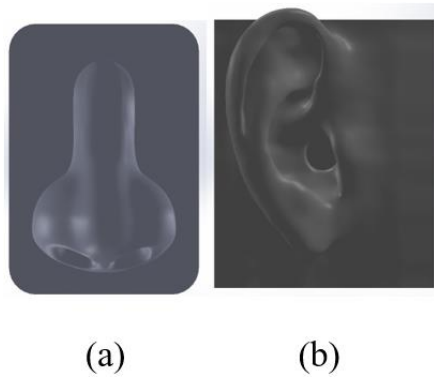
Çizelge 4.7 Tüm eksen ve yöntemler için PID katsayıları

	<i>Eksen</i>	K_p	K_i	K_d
<i>Klasik PID</i>	x	6.1974	0.00530	0.00130
	y	3.8882	0.00680	0.001600
	z	1.9665	0.02180	0.005200
<i>GA-PID</i>	x	4.2660	297.2295	0.015634
	y	2.7062	131.2621	0.018899
	z	1.9908	100.000	0.027910
<i>WOA-PID</i>	x	4.1751	500.000	0.017314
	y	3.0318	500.000	0.017880
	z	1.9753	99.9611	0.027877

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bölüm 4’te oluşturulan üç kontrolcü yaklaşımı tasarlanan 3B yazıcının kontrol kartına gömülerek kulak ve burun gibi yapay organ baskıları alınmaktadır. Yazdırılacak burun ve kulak için Solidworks çizimleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Bu çizimler bir insanın organlarıyla yaklaşık olarak aynı boyutlardadır. Yapay organlara ait “g” kodları referans olarak alınmakta ve klasik PID, GA-PID ve WOA-PID kontrolcü yaklaşımları ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak her bir organ için hata miktarları belirlenmektedir. Bu tez çalışmasında bahsedilen üç kontrolcü yaklaşımı ile yapay kulak ve burun organları farklı renklerde yazdırılmaktadır. Yazdırılan yapay organlar için hata miktarları belirlenirken sadece yüzey hata miktarları değil dolgu hata miktarları da dikkate alınmaktadır. Bu tez çalışmasında, her bir kontrolcü yaklaşımı ile yazdırılan yapay kulak ve burun için 0.4 mm ’lik nozul kullanılmaktadır. Klasik PID, GA-PID ve WOA-PID kontrolcü yaklaşımları ile yazdırılan yapay organlara ilişkin veriler Çizelge 5.1’de sunulmaktadır. Referans olarak sıklıkla kullanılan Marlin yazılımındaki PID parametre katsayıları kullanılmaktadır.



Şekil 5.1 Solidworks katı model çizimleri (a) burun (b) kulak.

Yapay kulak ve burun için yazdırma hızı 60 mm/sn olarak belirlenmiştir. Daha hassas bir baskı için dış duvar kalınlığı 40 mm/sn olarak ayarlanmıştır. Dış duvar katman sayıları bütün

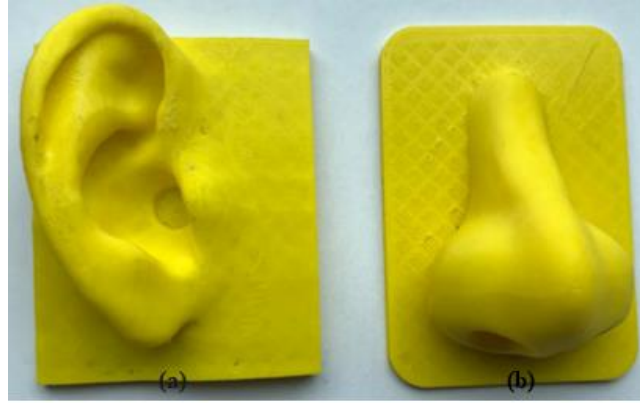
baskılar için sabit ve dört adettir. İç doluluk oranları ise tüm baskılar için %35 alınmıştır. z eksenini iç katmanlar arasındaki kalınlık 0.1 mm olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1 3B baskılara ait sayısal veriler.

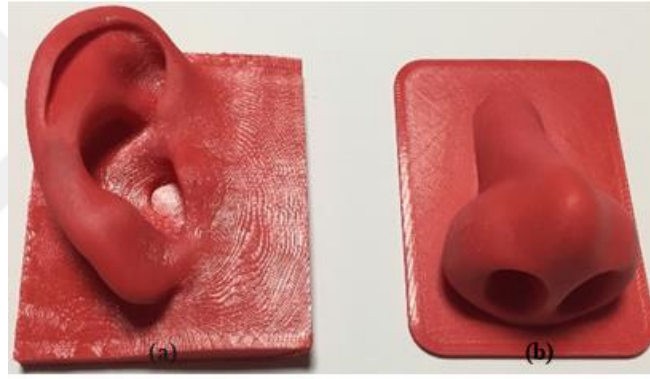
<i>No</i>	<i>Kullanılan Yöntem</i>	<i>Bastırılan Parça</i>	<i>Baskı Süresi(dk)</i>	<i>Baskı Boyutları (x*y*z) (mm)</i>	<i>Duvar sayısı</i>	<i>Doluluk oranı (%)</i>
1	Klasik PID		707	67*85*39	4	35
2			403	60*85*44	4	35
3	GA-PID		576	67*85*39	4	35
4			367	60*85*44	4	35
5	WOA-PID		561	67*85*39	4	35
6			358	60*85*44	4	35

Klasik PID yöntemiyle hesaplanan katsayılar ile alınan baskı Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Burada baskı süresinin ve baskıdaki yüzey hatalarının diğer yöntemlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Transfer fonksiyonunun katsayıları GA-PID yöntemi ile hesaplandığı zaman alınan baskı Şekil 5.3’te gösterilmektedir. Burada baskı süresi klasik PID yöntemine göre oldukça kısalmaktadır. Baskı süresinin kısaltılmasının yanında baskıdaki yüzey hatalarının da daha az olduğu görülmektedir. 3B baskıdaki hataları en aza indirmek için bu tez çalışmasında WOA-PID kontrolcü yaklaşımı önerilmektedir. Bu yaklaşım kullanılarak alınan baskı Şekil 5.4’de gösterilmektedir. Baskı süresinin klasik PID ve GA-PID yaklaşımlarına göre daha kısa olduğu Çizelge 5.1’de görülmektedir. Önerilen yaklaşım ile elde edilen

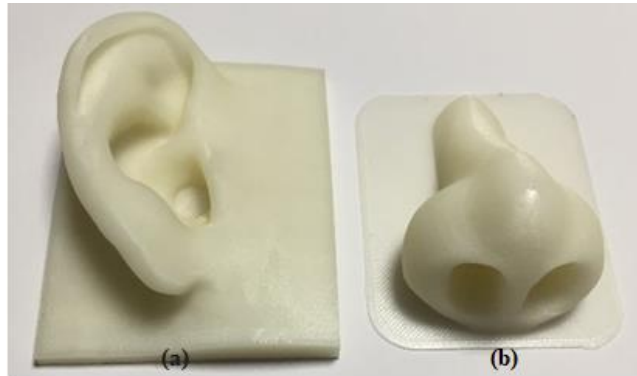
baskılarda hem yüzey hatalarının hem de dolgu hatalarının diğer yaklaşımlara göre daha az olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.2 Klasik PID katsayıları ile basılan (a) kulak (a) burun.



Şekil 5.3 GA-PID katsayıları ile basılan (a) kulak (a) burun.



Şekil 5.4 WOA-PID katsayıları ile basılan (a) kulak (a) burun.

Klasik PID yöntemi ile alınan baskıdaki yüzey hatalarının daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu baskının için sarı renk seçilmiştir. Bu yöntem ile alınan baskılardan kulak,

buruna göre daha fazla girintili olduğu için yüzey hataları daha belirgin olmaktadır. Yazdırılacak organın geometrisi ne kadar karmaşık olursa hata miktarının da buna paralel olarak artacağı görölmektedir.

GA-PID yaklaşımı ile yapay kulak ve burun kırmızı filament kullanılarak yazdırılmıştır. Klasik PID yöntemine göre yüzey hataları oldukça azaldığı görölmektedir. Kullanılan kontrolcü yaklaşımının geçici durum yanıtı klasik PID yaklaşımına göre daha hızlı olduğu için özellikle geçişlerdeki yüzey hatalarının azaldığı gözlemlenmektedir.

Bu tez çalışmasında önerilen WOA-PID kontrolcü yaklaşımı ile yapay kulak ve burun beyaz filament kullanılarak yazdırılmıştır. Önerilen kontrolcü yaklaşımının hem geçici durum yanıtı hem de kalıcı durum yanıtı bahsedilen diğer kontrolcü yaklaşımlarına göre daha hızlı olduğu için karmaşık geometriye sahip organların baskısında hata miktarlarının en aza indiğı görölmektedir. Önerilen kontrolcü yaklaşımı özellikle karmaşık geometriye sahip organların minimum hata ile basımındaki başarımı nedeniyle diğer yaklaşımlara göre gürbüzdür. Elde edilen modelin gürbüz olmasının yanı sıra yüzeysel hatanın az olması oldukça önem arz etmektedir. Bu modelin gürbüz olabilmesinin yanında baskı süresinin de kısılması endüstriyel anlamda bir fark yaratmaktadır. Daha kısa sürede ve daha pürüzsüz yapay doku veya organın üretimi için WOA-PID modelinin oldukça avantajlı olduğı görölmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kulak ve burun gibi yapay doku ve organların biyo-baskısı için parametreleri meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından WOA ile kestirilen yeni bir uyarlanabilir PID kontrolcü yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcü algoritması özgün olarak tasarlanan 3B yazıcı üzerinde test edilmiştir. WOA algoritması, en iyi PID kontrolcü parametrelerinin ayarlanması için ITSE performans kriterlerine göre adım adım çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın PID kontrolcünün parametrelerini hızlı ve etkili bir şekilde hesapladığını göstermiştir.

Önerilen WOA-PID kontrolcü yaklaşımının hem klasik PID hem de GA-PID kontrolcü yaklaşımlarına göre 3B yazıcı sisteminin geçici durum ve kalıcı durum yanıtını iyileştirdiği görülmektedir. Bu durum, özellikle yapay organ ve dokulardaki yüzey hatalarının en aza indirilmesinde oldukça önem arz etmektedir. Tasarlanan 3B yazıcıda kulak ve burun protez modelleri yazdırılarak yazıcının performansı test edilmiştir. Geliştirilen WOA tabanlı uyarlamalı PID algoritması ile elde edilen sonuçlar GA tabanlı uyarlamalı PID ve klasik PID kontrolcü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan 3B yazıcı ve önerilen WOA tabanlı uyarlamalı kontrolcünün protez kulak ve burun üretim sürecindeki hatalarını belirgin biçimde azalttığı gözlemlenmiştir. Özellikle protez doku ve organların iç içe geçmiş kompleks geometrilere sahip baskılarında önemli bir sorun olan yüzey hataları önerilen algoritma ile en aza indirilmiştir.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalarda canlı yapıların, doku ve organların oluşturulabilmesi için canlı hücrelerin minimum hata ile konumlandırılmasını sağlayacak yapay zekâ temelli algoritmalar tasarlanan 3B yazıcının kontrolünde kullanılabilecektir. Bu sayede, canlı hücrelerin hassas konumlandırılmasıyla hedef doku veya organların oluşturulması esnasında meydana gelen yüzey alanı ve üretim kusurları en aza indirilebilecektir.



KAYNAKLAR

- Batık Z, Kaçar S, Çavuşoğlu Ü, Akgül A ve Sevin A** (2014) Kontrolör Tasarımı için GA Kullanıldığı MATLAB ve NET Tabanlı Bir Windows Uygulaması. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1): 24-34.
- Banerjee D, Yu K and Aggarwal G** (2018) Robotic Arm based 3D Reconstruction Test Automation. *IEEE Access*, 6: 7206-7213.
- Bauermeister A J, Zuriarrain A and Newman M I** (2016) Three-Dimensional Printing in Plastic and Reconstructive Surgery: A Systematic Review. *Annals of Plastic Surgery*, 77(5): 569-576.
- Bennett S** (1993) Development of the PID Controller. *IEEE Control Systems Magazine*, 13(6): 58-62.
- Bozdemir M** (2018) Silah Kabzasının 3B Yazıcılarla Tasarım ve İmalatı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1): 57-68.
- Dandy G C, Simpson A R and Murphy L J** (1996) An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization. *Water Resources Research*, 32(2): 449-458.
- Dikmen H, Dikmen H, Elbir A, Eksi Z ve Çelik F** (2014) Gezgiri Satıcı Probleminin Karınca Kolonisi ve Genetik Algoritmalarla Eniyilemesi ve Karşılaştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1): 8-13.
- Durgun İ** (2018) Otomotiv Ürün Geliştirme Sürecinde Doğrudan Dijital İmalat. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(1): 90-96.
- Gavin H P** (2019) The Levenberg-Marquardt Algorithm for Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems. *Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University*, 1-19.
- Gross B C, Erkal J L, Lockwood S Y, Chen C and Spence D M** (2014) Evaluation of 3D Printing and its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical Chemistry*, 86: 3240-3253.
- Hassan M K, El Desouky A I, Elghamrawy S M and Sarhan A M** (2019) A Hybrid Real-Time Remote Monitoring Framework with NB-WOA Algorithm for Patients with Chronic Diseases. *Future Generation Computer Systems*, 93: 77-95.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hatamleh M M, Haylock C, Watson J and Watts D C** (2010) Maxillofacial Prosthetic Rehabilitation in the UK: A Survey of Maxillofacial Prosthetists' and Technologists' Attitudes and Opinions. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 39(12): 1186-1192.
- Hatamleh M M and Watson J** (2013) Construction of An Implant-Retained Auricular Prosthesis with the Aid of Contemporary Digital Technologies: A Clinical Report. *Journal of Prosthodontics: Implant, Esthetic and Reconstructive Dentistry*, 22(2): 132-136.
- Holland J H** (1973) Genetic Algorithms and the Optimal Allocation of Trials. *SIAM Journal on Computing*, 2(2): 88-105.
- Horlock N, Vögelin E, Bradbury E T, Grobbelaar A O and Gault D T** (2005) Psychosocial Outcome of Patients after Ear Reconstruction: A Retrospective Study of 62 Patients. *Annals of Plastic Surgery*, 54(5): 517-524.
- Irish J, Sandhu N, Simpson C, Wood R, Gilbert R, Gullane P, Brown D, Goldstein D, Devins G and Barker E** (2009) Quality of Life in Patients with Maxillectomy Prostheses. *Head & Neck: Journal for the Sciences and Specialties of the Head and Neck*, 31(6): 813-821.
- Levine E, Degutis L, Pruzinsky T, Shin J and Persing J A** (2005) Quality of Life and Facial Trauma: Psychological and Body Image Effects. *Annals of Plastic Surgery*, 54(5): 502-510.
- Li J, Zheng W X, Gu J and Hua L** (2017) Parameter Estimation Algorithms for Hammerstein Output Error Systems using Levenberg–Marquardt Optimization Method with Varying Interval Measurements. *Journal of the Franklin Institute*, 354(1): 316-331.
- Mirjalili S and Lewis A** (2016) The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95: 51-67.
- Nemli S K, Aydin C, Yilmaz H, Bal B T and Arici Y K** (2013) Quality of Life of Patients with Implant-Retained Maxillofacial Prostheses: A Prospective and Retrospective Study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 109(1): 44-52.
- Nuseir A, Hatamleh M M D, Alnazzawi A, Al-Rabab'ah M, Kamel B and Jaradat E** (2019) Direct 3D Printing of Flexible Nasal Prosthesis: Optimized Digital Workflow from Scan to Fit. *Journal of Prosthodontics*, 28(1): 10-14.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Oviedo J J E, Boelen T and Van Overschee P** (2006) Robust Advanced PID Control (RaPID): PID Tuning based on Engineering Specifications. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1): 15-19.
- Owen D, Hickey J, Cusson A, Ayeni O I, Rhoades J, Deng Y and Zhang J** (2018) 3D Printing of Ceramic Components using a Customized 3D Ceramic Printer. *Progress in Additive Manufacturing*, 3(1): 3-9.
- Panda S and Padhy N P** (2008) Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for FACTS-based Controller Design. *Applied Soft Computing*, 8(4): 1418-1427.
- Panda S, Sahu B K and Mohanty P K** (2012) Design and Performance Analysis of PID Controller for an Automatic Voltage Regulator System using Simplified Particle Swarm Optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349(8): 2609-2625.
- Sathish T, Vijayakumar M D and Ayyangar A K** (2018) Design and Fabrication of Industrial Components using 3D Printing. *Materials Today: Proceedings*, 5(6): 14489-14498.
- Uysal Ş** (2015) Performans Yönetimi Sisteminin Tanımı, Tarihçesi, Amaç ve Temel Unsurlarına Genel Bir Bakış. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 5(2): 32-39.
- Valerio D and Da Costa J S** (2006) Tuning of Fractional PID Controllers with Ziegler–Nichols-Type Rules. *Signal Processing*, 86(10): 2771-2784.
- Watson J and Hatamleh M M** (2014) Complete Integration of Technology for Improved Reproduction of Auricular Prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 111(5): 430-436.
- Zhong N and Zhao X** (2017) 3D Printing for Clinical Application in Otorhinolaryngology. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 274(12): 4079-4089.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet PARLAK, 2016 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2017 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünde tezli yüksek lisans eğitimine başladı ve hala eğitime devam etmektedir. Araştırma ilgi alanları arasında robot kolu, optimizasyon algoritmaları ve bulanık mantık uygulamaları bulunmaktadır.

