

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL TİP BOBİN SARIM CİHAZININ
PROTOTİP TASARIMI, ANALİZİ VE GERGİ
KONTROLÜ**

**Hazırlayan
Serhat KARACA**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Emir ESİM**

Yüksek Lisans Tezi

**Şubat 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENDÜSTRİYEL TİP BOBİN SARIM CİHAZININ
PROTOTİP TASARIMI, ANALİZİ VE GERGİ
KONTROLÜ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Serhat KARACA**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Emir ESİM**

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 5220140 proje kodu ile desteklenmiştir

**Şubat 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Serhat KARACA

“Endüstriyel Tip Bobin Sarım Cihazının Prototip Tasarımı, Analizi Ve Gergi Kontrolü ”
adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Serhat KARACA

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Emir ESİM

Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Emir ESİM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımı proje kodu 5220140 olarak destekleyen TÜBİTAK'a ve Ar-Ge Merkezi bünyesinde gerçekleştirdiğim tüm faaliyetlerinden dolayı hem bana imkân veren hemde beni destekleyen Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Serhat KARACA

Şubat 2025, KAYSERİ

ENDÜSTRİYEL TİP BOBİN SARIM CİHAZININ PROTOTİP TASARIMI, ANALİZİ VE GERGİ KONTROLÜ

Serhat KARACA

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2025
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emir ESİM

ÖZET

Endüstriyel üretim süreçlerinde, özellikle hassas malzeme sarımı gerektiren uygulamalarda, bobin sarma makinaları kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, bir bobin sarma makinası prototipinin tasarımı, yapısal analizi ve gergi kontrol sistemi detaylı olarak ele alınmıştır. Amaç, üretim süresince gergi kararlılığını sağlayarak hem malzeme kalitesini artırmak hem de sistemin uzun vadeli dayanıklılığını optimize etmektir. Prototip tasarımında, dört ana bölümü bulunan bir sistem düzenlenmiştir. Yapısal analizlerle, makinanın dayanıklılığını ve performansını optimize etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerindeki gerilme ve deformasyonlar detaylı olarak hesaplanmış, bu yükler altında güvenlik faktörleri belirlenerek cihazın gerilme yığılmaları tespit edilmiştir. Gergi kontrolü bölümünde, bir adım motoru ve vidalı mil mekanizması kullanılarak, sistemin üretim süresince dinamik yük değişikliklerine hızlı yanıt verebilmesini sağlamıştır. Yük hücresi (Loadcell), malzeme üzerindeki gerilimi anında ölçerek geri besleme sinyali oluşturmuş ve bu sinyal, motor hareketlerini hassas bir şekilde kontrol etmek için kullanılmıştır. Kontrol sistemi, farklı algoritmaların karşılaştırılmasıyla geliştirilmiştir. Klasik PID kontrolün yanı sıra, bulanık mantık tabanlı PID kontrol (Fuzzy-PID), genetik algoritma tabanlı PID (GAPID), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve kayan mod kontrolü (sliding mode control) çalışmaya dâhil edilmiştir. Bu çalışma, bobin sarma makinelerinin daha verimli, güvenli ve dayanıklı bir şekilde tasarlanmasına yönelik önemli katkılar sunmakta olup, sonuçlar makinenin performansını artıracak tasarım iyileştirmeleri sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Bobin Sarma Makinası, Gergi Kontrol, Yapısal Analiz, Kontrol Algoritmaları.

**PROTOTYPE DESIGN, ANALYSIS AND TENSION CONTROL OF INDUSTRIAL
TYPE COIL WINDING DEVICE**

Serhat KARACA

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, February 2025

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Emir ESİM

ABSTRACT

Coil winding machines play a critical role in industrial production processes, especially in applications requiring precision material winding. In this study, the design, structural analysis and tension control system of a bobbin winding machine prototype are discussed in detail. The aim is to optimise both the material quality and the long-term durability of the system by ensuring tension stability during production. In the prototype design, a system with four main sections is organised. Structural analyses were carried out using the finite element method (FEM) in order to optimise the durability and performance of the machine. Stresses and deformations on the system were calculated in detail, safety factors were determined under these loads and stress concentrations of the device were determined. In the tension control section, a stepping motor and ball screw mechanism were used to enable the system to respond quickly to dynamic load changes during production. The load cell instantly measured the stress on the material and generated a feedback signal, which was used to precisely control the motor movements. The control system was developed by comparing different algorithms. In addition to classical PID control, fuzzy logic based PID control (Fuzzy-PID), genetic algorithm based PID (GAPID), particle swarm optimisation (PSO) and sliding mode control (sliding mode control) have been included in the study. This study makes significant contributions to the design of more efficient, safe and robust winding machines and the results have provided design improvements that will improve the performance of the machine.

Keywords: Coil Winding Machine, Tension Control, Structural Analysis, Control Algorithms.

İÇİNDEKİLER

ENDÜSTRİYEL TİP BOBİN SARIM CİHAZININ PROTOTİP TASARIMI, ANALİZİ VE GERGİ KONTROLÜ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ve ONAY SAYFASI.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Bobin Sarma Makinaları.....	3
1.2. Gerger Kontrol Sistemleri ve Yöntemleri	4
1.3. Literatür Tarama	6
1.4. Araştırmanın Amacı ve Önemi	13

2. BÖLÜM

BOBİN SARMA MAKİNASININ TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE YAPISAL ANALİZİ

2.1. Bobin Sarma Makinaları Tasarımı ve Bileşenleri.....	15
2.1.1. Boşaltıcı Ünitesi Sistem Tasarımı	17
2.1.2. Gerger Ünitesi Tasarımı	18
2.1.3. Sarıcı ve Travers Ünitesi Tasarımı.....	20
2.2. Bobin Sarma Makinasının Sonlu Elemanlar Metodu ile Yapısal Analizi	23
2.2.2. Gerger Ünitesi Yapısal Analizi.....	31

3. BÖLÜM

GERGİ KONTROL SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ VE KULLANILAN KONTROL YÖNTEMLERİ

3.1. Sistemin Matematiksel Modeli.....	44
3.2. Sistemin kontrolü ve kullanılan yöntemler	46

3.2.1. PID Kontrol	47
3.2.2. PID Tuner	49
3.2.3. Fuzzy Logic (Bulanık Mantık) Kontrolü	50
3.2.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO).....	52
3.2.5. Genetik Algoritmayla PID Optimizasyonu.....	56
3.2.5.1. Genetik Algoritmaların Temelleri	58
3.2.6. Kayan Kipli Kontrol	62
3.2.7. Fuzzy – PID Hibrit Model Kontrol // Bulanık Mantık Esaslı Adaptif PID Denetim Organı.....	63
3.2.8. Mikro Adım Denetim Organı.....	65

4. BÖLÜM

SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

4.1. PID Tuner	68
4.2. PSO algoritmasıyla optimize edilen PID değerleri	69
4.3. GAPID algoritmasıyla optimize edilen PID değerleri	70
4.4. Kayan Kipli Kontrol (SMC).....	72
4.5. Fuzzy Logic	72
4.6. Bulanık Mantık tabanlı Adaptif PID Control	76
4.7. Mikro adım yöntemi ile step motorun kontrolü.....	79

5. BÖLÜM

BULGULAR

5.1. Simülasyon Ortamı ve Teknik Detaylar	84
5.2. Çalışma Yöntemi ve Uygulanan Kontrol Teknikleri	84
5.2.1. Kontrolcüsüz sistem modeli	85
5.2.3. PSO Algoritması ile PID Optimizasyonu	86
5.2.4. GAPID ile PID Optimizasyonu	88
5.2.5. Kayan Kipli Kontrol Modeli	88
5.2.6. Fuzzy Logic ile Kontrol	89
5.2.7. Fuzzy Logic Adaptif PID Hibrit Model	90
5.2.8. Mikro adım yöntemi ile step motor kontrolü	91
5.3. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Karşılaştırma	93

6. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Tartışma	97
6.2. Sonuçlar	98
6.3. Öneriler	99
KAYNAKÇA	101
ÖZGEÇMİŞ.....	112



KISALTMALAR VE SİMGELER

A	: Vidalı mil eğim katsayısı
b	: Sönüm oranı
D	: Motorun viskoz sürtünme değeri
d	: Tel çapı
D _S	: Dişli oranı
GAPID	: Genetik Algoritma Tabanlı PID
$\dot{I}_a$	: A fazının akım değeri
J	: Motorun atalet momenti
K	: Karkas oranı
K _D	: Türevsel Kazanç
K _{DF}	: Bulanık denetim organı tarafından üretilen türevsel kazanç
K _I	: Tümlensel Kazanç
K _{IF}	: Bulanık denetim organı tarafından üretilen tümlensel kazanç
K _N	: Katman sarım sayısı
K _p	: Oransal Kazanç
K _{PF}	: Bulanık denetim organı tarafından üretilen oransal kazanç
L _a	: A fazının indüktansı
m	: Midalı mil üzerindeki kütle
N _{as}	: Sarıcının bir turdaki adım sayısı
N _{at}	: Traversin bir turdaki adım sayısı
N _B	: Boşaltıcı tur adım sayısı
NB	: Negatif Big
NS	: Negatif Small
N _S	: Sarıcı tur adım sayısı
N _T	: Travers step
N _{ts}	: Travers adım sayısı
p	: Kutup sayısı
PB	: Pozitif Big
PID	: (Oransal – İntegral - Türev)
PS	: Pozitif Small
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
r _s	: Karkas yarıçapı

SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
SMC	: Kayan Kipli Kontrol
V_B	: Boşaltıcının hızı
V_S	: Sarıcının hızı
V_T	: Travers motorunun hızı
Z	: Zero



TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.	Yapısal analizde kullanılan malzemeler.....	25
Tablo 2.	Sistem parametrelerini değerleri	46
Tablo 3.	PID Tuner bloğunda ayarlanan PID değerleri.....	69
Tablo 4.	Farklı parçacık sayılarıyla optimize edilen PID değerleri.....	70
Tablo 5.	Genetik algoritmaya göre optimize edilmiş PID değerleri.....	72
Tablo 6.	Bulanık mantık denetleyici sistemin kural tablosu	75
Tablo 7.	Hibrit modelde kullanılan PID değerleri.....	77
Tablo 8.	Kontrolcü bloğu olmayan sistemin birim basamak cevabı	85
Tablo 9.	PID Tuner sisteminin birim basamak cevabı	86
Tablo 10.	PSO da kullanılan farklı parçacık sayılarındaki parametre tablosu	87
Tablo 11.	GAPID de kullanılan farklı parçacık sayılarındaki parametre tablosu	88
Tablo 12.	SMC kontrollü sistemin parametreleri	89
Tablo 13.	Bulanık Mantık Modelli Sistemin Parametreleri	90
Tablo 14.	Bulanık Mantık Adaptif PID Modelli Sistemin Parametreleri.....	91
Tablo 15.	Kontrol algoritmalarının performans sonuçları.....	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Sistem Tasarımı.....	16
Şekil 2.	Boşaltıcı Ünitesi Tasarımı.....	18
Şekil 3.	Gergi Kontrol Ünitesi Tasarımı.....	19
Şekil 4.	Sarıcı ve Travers Ünitesi Tasarımı.....	23
Şekil 5.	Boşaltıcı ünitesinde kullanılan malzemeler: (a) Çelik malzeme, (b) Alüminyum malzemeler, (c) ABS olan malzemeler	26
Şekil 6.	Boşaltıcı ünitesi mesh modeli	27
Şekil 7.	Boşaltıcı ünitesi sınır şartları.....	27
Şekil 8.	Boşaltıcı ünitesinin SEM modelindeki kontaklar: (a) Dişliler arasındaki kontakt yapısı, (b) ve (c) motor milinin döner aksanındaki kontak yapısı...	28
Şekil 9.	Boşaltıcı ünitesi sabit yüzeyleri.....	28
Şekil 10.	Boşaltıcı ünitesinin şekil değiştirme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü	29
Şekil 11.	Boşaltıcı ünitesi eş değer stress değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü	30
Şekil 12.	Boşaltıcı ünitesi Emniyet Katsayısı.....	31
Şekil 13.	Gergi bölümünde kullanılan malzemeler:(a) Çelik malzemeler, (b) Alüminyum malzemeler, (c) ABS olan malzemeler	32
Şekil 14.	Gergi ünitesi mesh modeli	32
Şekil 15.	Gergi ünitesi sınır şartları.....	33
Şekil 16.	Vidalı mil ve somunu arasındaki kontak yapıları	33
Şekil 17.	Gergi ünitesi şekil değiştirme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü	34
Şekil 18.	Gergi ünitesinin eş değer gerilme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü	35
Şekil 19.	Gergi ünitesinin emniyet katsayısı değeri	36
Şekil 20.	Sarıcı ve Travers ünitesi sınır şartlarının modeli	36
Şekil 21.	Sarıcı ve Travers ünitesi mesh modeli	37
Şekil 22.	Sarıcı ve Travers ünitesi malzeme dağılımı: (a) Çelik malzeme, (b) Alüminyum malzemeler, (c) ABS olan malzemeler	38
Şekil 23.	Sarıcı ve Travers Ünitesi sürtünme kontakt yapıları.....	39
Şekil 24.	Sarıcı ve Travers Ünitesi sabit destek kontak yapıları.	39

Şekil 25.	Sarıcı ve Travers ünitesi şekil değiştirme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü	40
Şekil 26.	Sarıcı ve Travers ünitesinin eş değer gerilme analiz değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü	41
Şekil 27.	Sarıcı ve Travers ünitesinin emniyet katsayısı	42
Şekil 28.	Sistemin kapalı çevrim modeli	45
Şekil 29.	PID kontrolcüsünün çalışma modeli	48
Şekil 30.	PID bloğu modeli	49
Şekil 31.	Bulanık mantık akış diyagramı	52
Şekil 32.	PSO algoritması için evrimsel denklemlerin gösterimi.....	53
Şekil 33.	PSO Algoritması akış diyagramı	55
Şekil 34.	Genetik algoritmanın akış diyagramı	58
Şekil 35.	Bulanık Mantık Esaslı PID Kontrol	65
Şekil 36.	Fuzzy Logic Adaptif PID Kontrolcü	65
Şekil 37.	Sistemin Modellenmesi	67
Şekil 38.	Kontrolcüsüz Sistem Modeli	68
Şekil 39.	PID Tuner ayarları	69
Şekil 40.	PSO - PID modeli	70
Şekil 41.	GAPID Modeli	71
Şekil 42.	SMC Modeli	72
Şekil 43.	Bulanık Mantık Kontrol Modeli	73
Şekil 44.	Giriş sinyallerinin üyelik fonksiyonları: (a) gerginlik değeri, (b) gerginliğin türev değeri	74
Şekil 45.	Çıkış Sinyali üyelik fonksiyonu	74
Şekil 46.	Rule editor'de tanımlanan kurallar	75
Şekil 47.	Kuralların Yüzeyi	76
Şekil 48.	Hibrit Model Sistem Tasarımı	78
Şekil 49.	Adaptif Fuzzy - PID Kontrolcüsü Modeli	78
Şekil 50.	Hata üyelik fonksiyon sınırı	79
Şekil 51.	Hata değişiminin sınırları	79
Şekil 52.	Çıkış üyelik fonksiyonun sınırları	79
Şekil 53.	Step Motor Dinamik Denklemleri	80
Şekil 54.	Fazların voltaj değerlerinin modellenmesi	80

Şekil 55.	Park dönüşümdeki voltaj değeri.....	81
Şekil 56.	Üretilen tork, açısal hız ve dönme açısı değerleri	81
Şekil 57.	Step motorun faz akımları	82
Şekil 58.	MATLAB ortamındaki Step Motor Modeli	82
Şekil 59.	Kontrolcüsüz Modelin Birim Basamak Cevabı	85
Şekil 60.	PID Tuner ile Kontrol Edilen Sistemin Birim Basamak Cevabı.....	86
Şekil 61.	Farklı Parçacık Sayılarındaki Modellerin Birim Basamak Cevabı	87
Şekil 62.	Farklı Hücre Sayıları ile Optimize Edilen PID Modelleri.....	88
Şekil 63.	SMC kontrollü modelin birim basamak cevabı	89
Şekil 64.	Bulanık Mantık Kontrollü Modelin Birim Basamak Cevabı	90
Şekil 65.	Hibrit Model Kontrolcünün Birim Basamak Cevabı	91
Şekil 66.	Bobinlerin Voltajları	92
Şekil 67.	Üretilen Elektriksel Tork.....	92
Şekil 68.	Motorun hızı.....	93
Şekil 69.	Motorun yer değiştirmesi	93

GİRİŞ

Sanayide yaygın olarak kullanılan bobin sarma makineleri, tel veya şerit halindeki malzemelerin belirli bir düzende ve gerilim kontrolü sağlanarak sarılmasını amaçlayan sistemlerdir. Bu makinelerin performansı, sarım esnasında telin gerilim dengesinin korunmasına bağlıdır. Gerilim kontrolü, telin kopma, esneme veya öngörülmeleyen deformasyonlarını önlemek için kritik bir faktördür. Geleneksel sistemlerde pasif mekanik gerilim kontrol mekanizmaları kullanılırken, gelişen teknoloji ile birlikte aktif kontrol sistemleri öne çıkmış ve endüstriyel uygulamalarda daha hassas ve verimli çözümler sunmaya başlamıştır. Bu tezde, bobin sarma makinelerinde hassas sarım sağlamak amacıyla tasarım, analiz ve gerginlik kontrolü aşamaları sistematik bir şekilde ele alınmıştır. Öncelikle, adım motor tahrikli bir vidalı mil mekanizması içeren yenilikçi bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemde, bir adım motoru yardımıyla vidalı mil düşey ekseninde hareket ettirilerek tel gerilimi dinamik olarak kontrol edilmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel yay ve mekanik direnç tabanlı pasif sistemlere göre daha hassas bir kontrol sunmakta ve farklı çalışma koşullarına uyum sağlayabilmektedir. Tasarım aşamasının ardından, sistemin yapısal analizi ANSYS programını kullanılarak gerçekleştirilmiş, gerilim ve şekil değiştirme dağılımları incelenerek tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır. Bu analizler, makinenin uzun vadeli performansını artırmak ve olası yapısal zayıflıkları önlemek amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. Son olarak, geliştirilen sistemin kontrol performansını değerlendirmek amacıyla farklı kontrol algoritmaları incelenmiştir. PID, Fuzzy-PID, GAPID, PSO ve Kayma Kipli Kontrol (SMC) algoritmaları MATLAB ortamında simüle edilerek karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, her bir algoritmanın dinamik gerilim değişikliklerine verdiği tepki ve sistemin genel stabilitesi ön plana alınarak avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Bu çalışmanın özgün değeri, bobin sarma makinelerinde gerilim kontrolünü sağlamak için motor tahrikli bir vidalı mil mekanizmasının kullanılması ve farklı kontrol algoritmalarının karşılaştırmalı analizinin gerçekleştirilmesidir. Bu tez, endüstriyel bobin sarma

makinelerinde gerilim kontrolü alanında yenilikçi bir yaklaşım sunarak hem akademik literatüre hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlamaktadır. Sonraki bölümlerde, geliştirilen sistemin detaylı tasarımı, kontrol algoritmalarının matematiksel modellemesi ve simülasyon sonuçları ayrıntılı olarak ele alınacaktır.



1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Bobin Sarma Makinaları

Bobin sarma makinelerinin gelişimi, 19. yüzyılın sonlarında sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte başladı. Bu dönemde, bobin sarma işlemi büyük oranda manuel olarak gerçekleştiriliyordu ve bu süreç hem zaman alıcı hem de hataya açık bir yöntemdi. İlk mekanik bobin sarma makineleri, bu manuel işlemi otomatikleştirerek telin bir makara üzerine sarılmasını sabit hızda dönen makaralar ve mekanik kollar yardımıyla sağlıyordu. Ancak, bu makinelerde telin gerginliğini kontrol etmek mümkün olmadığından, sarım işlemlerinde tutarsızlıklar ve kalite sorunları sıklıkla yaşanıyordu. 1920'lerde, elektrik motorlarının endüstriyel uygulamalara girmesiyle bobin sarma makinelerinde yarı otomatik sistemlere geçiş başlamıştır. Elektrik motorları, sarım hızını daha hassas bir şekilde kontrol etmeye olanak tanımıştır ve bu da üretim hızını artırırken operatörlerin iş yükünü azaltmıştır. Bu dönemde, gergi kontrolü hâlâ manuel olarak ayarlanıyor olsa da elektrik motorlarının sağladığı hız ve güç avantajı, sarım makinelerinin performansını ciddi şekilde yükseltmiştir. 1950'lerde ise transistör teknolojisinin gelişmesiyle birlikte elektronik devrelerin endüstriyel makinelere entegre edilmesi mümkün olmuştur. Bu, bobin sarma makinelerinde devrim niteliğinde bir ilerlemeye yol açmıştır. Transistörler ve dijital kontrol devreleri, sarım makinelerine elektronik tabanlı gergi kontrolü ve sarım hızının daha hassas bir şekilde yönetilmesini sağlayan yeni özellikler eklemiştir. Bu yenilikler, özellikle elektrik motoru kontrolünde büyük bir hassasiyet sağlarken ve operatör müdahalesini minimuma indirmiştir. Elektronik kontrollü makineler, telin gerginliğini izleyip ayarlayabilen sistemlerle bütünleştirilmiştir; böylece hem sarım kalitesi hem de üretim verimliliği önemli ölçüde artmıştır. Bu dönemde, üretim süreçlerindeki iyileştirmeler, bobin sarma makinelerinin geniş çaplı kullanılmasına olanak sağlamıştır. 1980'lere gelindiğinde mikroişlemcilerin endüstriyel makinelere

entegrasyonu ile bobin sarma makineleri çok daha gelişmiş bir yapı haline gelmiştir. Mikroişlemciler, makinelerin kontrolünü daha da otomatikleştirerek gergi kontrolü, sarım hızı, tel yönlendirme gibi kritik süreçlerin gerçek zamanlı olarak yönetilmesini mümkün kılmıştır. Bu teknolojik ilerlemeler, sarım işlemi sırasında her bir adımın anlık geri bildirimlerle izlenmesine ve gerektiğinde otomatik olarak düzeltilmesine olanak tanımıştır. Ayrıca bu dönem, makinelerin programlanabilir lojik denetleyiciler (PLC) ile çalışmasını sağlayarak sarım işlemlerinin operatör tarafından önceden programlanabilmesine ve tekrarlanabilen yüksek hassasiyetli süreçlerin uygulanmasına olanak vermiştir. Günümüzde bobin sarma makineleri, endüstriyel otomasyonun bir parçası olarak servo motorlar ve step motorlarla donatılmış, ileri seviye kontrol sistemlerine sahip olmuştur. Step motorlar, telin sarım sırasındaki hareketini doğrusal olarak kontrol edebilme kapasitesine sahipken, servo motorlar gergi kontrolünü çok hassas bir şekilde düzenleyebilmektedir. Ayrıca, gerçek zamanlı sensör geri beslemesi sayesinde, makine telin gerginliğini, pozisyonunu ve sarım düzenini sürekli olarak izleyip optimize edebilmektedir. Son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenimi teknolojileri de bobin sarma makinelerine entegre edilmiştir. Yapay zekâ destekli adaptif kontrol algoritmaları, telin özelliklerine ve sarım desenine göre makinenin otomatik olarak en uygun gergi ayarlarını yapabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, bilgisayar destekli tasarım (CAD) entegrasyonları sayesinde, sarım sürecinin baştan sona dijital olarak planlanması ve izlenmesi mümkün hale gelmiştir. Böylece, yüksek hızda, hassasiyetle ve minimal hata payıyla üretim yapılabilmektedir.

1.2. Gergi Kontrol Sistemleri ve Yöntemleri

Bobin sarma makinelerinde gergi kontrolü, sarılan malzemenin (tel, iplik, film vb.) istenilen gerginlikte tutulmasını sağlayan kritik bir süreçtir. Gergi kontrolünün doğru yapılmaması, malzemenin kopması, deformasyonu ya da hatalı sarım gibi ciddi kalite sorunlarına yol açabilir. Tarihsel olarak, gergi kontrol sistemleri de tıpkı bobin sarma makineleri gibi büyük bir teknolojik evrim geçirmiştir. İlk zamanlarda tamamen manuel olarak gerçekleştirilen bu işlem, zamanla mekanik ve elektronik sistemlerle otomatik hale gelmiştir. Bobin sarma makinelerinin ilk dönemlerinde gergi kontrolü operatörler tarafından manuel olarak yapılmaktaydı. Operatör, sarım işlemi sırasında teli ya da sarılan malzemeyi el yordamıyla gererek gerginliğin belirli bir seviyede kalmasını sağlamaya çalışıyordu. Ancak bu yöntem oldukça hataya açık, zaman alıcı ve düzensiz bir süreçti.

Malzemenin gerginliğini sabit tutmak operatörün becerisine ve deneyimine bağlıydı; bu da üretimde tutarsızlıklara yol açıyordu. 1920’lerde elektrik motorlarının kullanımıyla birlikte gergi kontrolüne yönelik ilk mekanik sistemler geliştirildi. Bu dönemde, sarım makinelerine mekanik fren sistemleri entegre edilerek makaralar üzerindeki gerginlik ayarlanabilir hale geldi. Ancak bu mekanik frenler, sabit bir direnç uyguladıkları için sarım hızındaki değişimlere uyum sağlamakta zorlanıyordu.

1950’li yıllarda transistörlerin ve elektronik devrelerin endüstride kullanılmaya başlamasıyla, gergi kontrol sistemlerinde de önemli ilerlemeler kaydedildi. Elektronik frenler ve manyetik kavramalar bu dönemde devreye girdi. Elektronik frenler, telin gerilme miktarını izleyerek ve ayarlayarak gergi kontrolünü daha hassas bir şekilde yapmaya olanak tanıdı. Ayrıca, sarım hızındaki değişikliklere uyum sağlayabilen bu sistemler, üretim sürecindeki kaliteyi önemli ölçüde artırdı. Manyetik kavramalar ise telin gerginliğini manyetik alanlar kullanarak ayarlıyor ve sürtünme gibi mekanik etkilerin en aza indirilmesine olanak sağlıyordu. Bu teknolojik yenilikler, sarım sürecindeki telin kopma ya da deformasyon gibi sorunlarını büyük ölçüde azalttı. 1980’lerde mikroişlemci teknolojisinin gelişimi, gergi kontrol sistemlerinde daha hassas ve esnek bir yapı sağladı. Mikroişlemci tabanlı kontrol sistemleri, sarım işlemi sırasında telin gerginliğini anlık olarak izleyip ayarlayabilen kapalı çevrim sistemlerin geliştirilmesine olanak tanıdı. Kapalı çevrim sistemler, sensörler aracılığıyla sarılan telin ya da malzemenin gerginliğini ölçer ve bu verileri mikroişlemciye gönderir. Mikroişlemci, alınan verilere göre motor ya da fren sistemlerini anında ayarlayarak gergi kontrolünü optimize eder. Bu sistemler, özellikle yüksek hızlı sarım işlemlerinde ve hassas malzemelerle çalışırken kritik önem taşıdı. Ayrıca, bu dönemde geliştirilen tork kontrollü motorlar da gergi kontrolünde kullanılan önemli bileşenlerden biri haline geldi. Tork kontrollü motorlar, malzemenin gerginliğini sabit tutarak sarım işleminin her adımında eşit bir kuvvet uygulayarak yüksek kalite sağladı. Günümüzde gergi kontrol sistemleri, tam otomatik ve adaptif sistemler haline gelmiştir. Modern bobin sarma makineleri, servo motorlar, step motorlar ve ileri seviye sensörlerle donatılmıştır. Bu sistemler, malzemenin gerginliğini gerçek zamanlı olarak ölçebilen sensörlerden gelen verilerle anlık ayarlamalar yaparak gergi kontrolünü sağlar. Örneğin, bir sarım işlemi sırasında hız değişikliği olduğunda, sistem telin gerginliğini ayarlamak için otomatik olarak motorların hızını veya fren kuvvetini değiştirir. Özellikle servo motorlar, yüksek hassasiyet ve tepki süreleri sayesinde gergi

kontrolünde çok etkili hale gelmiştir. Bunun yanında, manyetik frenler ve elektronik tork kontrollü sistemler, sarım makinelerinde kullanılan diğer önemli gergi kontrol teknolojileridir. Son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenimi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte gergi kontrol sistemleri daha da akıllı hale gelmiştir. Bu sistemler, önceki üretim verilerini analiz ederek sarım sırasında oluşabilecek gerilim değişimlerini tahmin edebilmekte ve önceden ayarlamalar yaparak malzemenin gerginliğini en uygun seviyede tutabilmektedir. Ayrıca, yapay zekâ destekli adaptif algoritmalar, farklı malzemelerle çalışırken en uygun gergi ayarlarını otomatik olarak belirleyebilir ve sarım sürecini optimize edebilir.

1.3. Literatür Tarama

Bobin sarım makinelerinde üretim hızını ve kalitesini artırmak, aynı zamanda hata oranlarını minimize etmek amacıyla çeşitli alanlarda farklı kontrol teknikleriyle pek çok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, önceki çalışmaların bulguları ve yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

Delis, bobin sarım makinelerinin tasarımında makara yapısının karmaşıklığı, malzeme gerginliği, makinenin çok yönlülüğü, otomasyon veya operatör müdahalesi gereksinimi, üretim kapasitesi ve bütçe gibi faktörlerin belirleyici olduğunu ifade etmiştir. Araştırmasında, yalnızca düz makara tipi sarım makineleriyle sınırlı kalmayıp mil sarım ve pilot sarım tipi cihazların prensipleri ile bu cihazlar arasındaki farklara değinmiş, sargı kalitelerinin benzer düzeyde olduğu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte, klasik makinelerin çok yönlülük, ürün gereksinimleri ve maliyet gibi konularda yetersiz kalması, otomasyonun bir gereklilik haline gelmesine neden olmuştur. Delis, sarım sırasında malzeme gerginliğinin; sarımın düzenli ve sıralı yapılabilmesi, dağılmanın önlenmesi, telde uzama, deformasyon ve kopmanın engellenmesi açısından kritik bir parametre olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda, gerginliğin ölçülmesi ve kontrol edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Statik gergi kontrolünde yaylı mekanizmalar, sürtünme yüzeyleri ve pnömatik sistemlerin kullanıldığını ifade ederken, dinamik sarım sırasında bu sistemlerin yetersiz kaldığını ve gerginliğin dinamik olarak ölçülmesi ve kontrol edilmesi gerektiğini dile getirmiştir. Ayrıca, sarım sırasında istenmeyen ancak giderilmesi zor olan olumsuzlukları da ele almıştır [1].

Yeung ve çalışma arkadaşları, tekstil ipliklerinin sarım hızını artırırken sarım gerginliğindeki değişimi minimize etmeyi hedefleyen bir kontrol tekniği geliştirmiştir. Bu teknik sayesinde, sarım hızı 800 m/d'den 2000 m/d'ye çıkarılmıştır. Gerginlik ölçümleri için 1 kHz frekans cevabında, yüksek ve geniş bant üçgen bir strain gauge tipi sensör kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan bulanık kontrol algoritması, 2000 m/d sarım hızına ulaşarak sarım hızının artırılması sağlamıştır. Ek olarak, senkronize bir kompensatör kullanılarak 800 m/d sarım hızında gerginlik değişimlerinin kontrolsüz duruma göre yaklaşık %50 oranında azaltıldığı tespit edilmiştir [2].

Lin, dokuma kumaş sarımında üretkenliği artırmanın önemli bir yolu olarak sarım hızının yükseltilmesini önermiştir. Ancak, hızın artmasıyla birlikte sistemdeki sürtünme ve atalet değişimlerinin, gözlemci tasarımında problemlere yol açabileceğini vurgulamıştır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, sürtünme ve atalet etkilerini dengelemeye yönelik matematiksel model iyileştirmeleri ve istatistiksel yeniden değerlendirme teknikleri kullanarak bir gözlemci geliştirmiştir. Geliştirilen bu sistemin, gerginlik tahmininde daha yüksek bir hassasiyet sağlaması hedeflenmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalar, yöntemin klasik kontrol yaklaşımlarına benzer bir başarı elde ettiğini göstermiştir [3].

Manning, bobin sarım makineleri üzerine kapsamlı bilgiler sunmuş ve bu makinelerde gerginlik kontrolünün önemini ve temel amacını vurgulamıştır. Çalışmasında, sarılan tellerin fiziksel özellikleri, makinelerden beklenen performans kriterleri, kullanılan makina türleri ve gergi mekanizmalarının işleyişi hakkında detaylı bilgiler aktarmıştır. Ayrıca, farklı sarım uygulamalarında gerginliğin doğru bir şekilde kontrol edilmesinin hem ürün kalitesini artırmak hem de sistemin uzun vadeli performansını korumak açısından kritik bir rol oynadığını ifade etmiştir [4].

Norbert ve çalışma arkadaşları, gergi kontrolünde kullanılan kol-makara (dancer roll) ve yük hücresi (load cell) sistemlerini teorik olarak karşılaştırmıştır. Araştırmada, Güney Avrupa'da faaliyet gösteren bir kâğıt kaplama (off-machine coater) makinesinden elde edilen verilerle kararlılık ve dinamik tepki analizi gerçekleştirilmiştir. İncelenen iki sistem, ana makaradan sarılarak kaplama yapılan kâğıdın gerginliğini ölçmekte ve bu ölçümlere dayanarak sarım hızı ile gerginlik kontrolünü sağlamaktadır. Sonuçlar, gezer makara ve yük hücresi sistemleri arasında genel anlamda bir performans farkı bulunmadığını göstermiştir. Ancak, 10 ms'nin altında bir filtreleme uygulandığında, yük

hücresi sistemi daha iyi kontrol kazancı, daha hızlı tepki süresi ve gerginlik değişiminde daha düşük dalgalanma sağlamıştır. Bu bulgular, yük hücresinin dinamik kontrol uygulamalarında daha yüksek bir verimlilik sunduğunu ortaya koymaktadır [5].

Gerd Voss ve Kurt Hefti, 0.02-0.2 mm aralığındaki tel çaplarına yönelik tel sarım makinelerinde kullanılan makaraların sarım sürecindeki pasif gergi sistemleri ile elektronik aktif kontrol sistemlerini karşılaştırmıştır. Araştırmalarında, yüksek hız ve üretim esnekliği gereksinimlerini karşılamada pasif kontrol sistemlerinin yeterli olmadığını vurgulamışlardır. Aktif kontrol sistemlerinin ise 30 m/s gibi yüksek sarım hızlarında daha istikrarlı bir performans sağladığını ve bu sayede üretim süreçlerinin daha ekonomik hale getirilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu bulgular, modern üretim ihtiyaçları doğrultusunda aktif kontrol sistemlerinin üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır [6].

Benjamin C. McDow ve Christopher D. Rahn, kalınlığı genişliğine oranla oldukça küçük olan film malzemelerin gerginlik kontrolü için kol-makara (dancer roll) sistemine yönelik bir dinamik model geliştirmiştir. Bu model üzerinde klasik PID kontrolcü ile model tabanlı adaptif kontrolcüyü kullanarak karşılaştırmalı analizler yapmışlardır. Araştırma bulgularına göre, model tabanlı adaptif kontrolcü kullanımıyla, PID kontrolcüye kıyasla üç kat daha hızlı tepki süresi, %50 daha az izleme hatası ve beş kata kadar daha etkili bozucu giriş baskılama yeteneği elde edilmiştir. Ayrıca, PID kontrolcünün standart durumlar için yeterli bir performans sergilediği, ancak değişken hızlar veya gerilme koşullarında adaptif kontrolcünün daha uygun bir çözüm sunduğu belirtilmiştir [7].

Seung Ho Song ve Seung Ki Sul, şerit makinelerinde gerginlik kontrolünü iyileştirmek amacıyla ileri besleme yöntemiyle gerginlik hesaplamaları gerçekleştirmiş ve bu sayede daha hızlı bir dinamik kontrol yanıtı elde etmişlerdir. Çalışmalarında, tamburun tork dengesini analiz etmek için ivmelenme torkunu da içeren bir gözlemleyici tasarlayarak, ileri besleme tabanlı bir kontrol mekanizması geliştirmişlerdir. Bu yenilikçi kontrol yaklaşımı, gerginlik değişimlerini daha hassas bir şekilde yönetmeyi mümkün kılmış ve sistem performansını önemli ölçüde artırmıştır [8].

Mu Tian Yan ve Pin Hsum Huang, tel erozyon makinelerinde tel gerginliğini optimize etmek amacıyla bir adım önden adaptif kontrolcü tekniğini araştırmıştır. Bu yaklaşımı kullanarak, kalıcı hata oranını %7'ye düşürmüş ve köşe bölgelerinde oluşan geometrik kontur hatalarını %40 ila %50 oranında azaltmayı başarmışlardır. Elde edilen sonuçlar,

adaptif kontrol yöntemlerinin yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda hata minimizasyonu ve işlem kalitesi üzerindeki olumlu etkilerini açıkça ortaya koymaktadır [9].

Yoshinori Ando ve çalışma arkadaşları, makara sarımında gerginlik kontrolüne yönelik bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, kol-makara sistemi bir yay ile entegre edilmiş ve bu sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen modelde, hıza bağımlı bir giriş uygulanmış ve sistem, PID kontrolcü kullanılarak kontrol edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, referans gerginlik değeri %10,3'lük bir sapma ile başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir. Bu çalışma, kol-makara sistemlerinin gergi kontrolündeki etkinliğini ve PID kontrolün bu tür uygulamalarda sağladığı doğruluk seviyesini göstermektedir [10].

rulodan rulo baskı makinelerinin düzgün çalışması ve baskı performansının sağlanması için önemli bir faktör olan çoklu giriş ve çoklu çıkış web-gerilim sistemlerinin kararlılığını incelemektedir. Hareketli silindirlerin (dancer makara) hareketlerinden kaynaklanan açıklık-uzunluk değişimlerinin, tesis dinamikleri modellemesinde iki farklı şekilde ele alındığı belirtilmektedir: birincisi, hareketli silindirlerinin atalet ve viskoz sürtünmelerini dikkate almadan açıklık-uzunluk değişimlerinin etkisini, ikincisi ise bu etmenleri dikkate alarak açıklık-uzunluk değişimlerini modellemektedir. Önerilen modelin doğrusallaştırılmış sisteminin kararlılığı, özdeğerler aracılığıyla analiz edilmekte ve bu analiz simülasyonlarla doğrulanmaktadır [11].

Sun Yuqiu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Kâğıt gerginliği, web ofset baskı kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. MATLAB/SIMULINK ile yapılan simülasyon, kâğıt gerginliği kontrol sistemi üzerinde kapalı devre kontrol diyagramı sunarak, sistemin aşım değeri, tepki hızı ve kalıntısı gibi parametrelerin kontrol doğruluğunu nasıl etkilediğini ortaya koymuştur. Uygunsuz gerginlik, kâğıt kayması, kırışması veya yırtılması gibi hatalara yol açarak, verimliliği düşürebilir. Sabit kâğıt gerginliği, mevcut çalışma hızının 80 m/s civarında tutulabilmesi için gereklidir. Kâğıt gerginliği, üretim, aktarma ve kullanım sırasında şekil değiştirme gibi faktörlerden dolayı değişebilir ve bu da sistemde düzensiz sarmaya yol açabilir. Rulo çapı küçüldükçe kâğıt gerginliği artar [12].

Jun Pan ve çalışma arkadaşları, kablosuz Radyo Frekansı Tanımlama (RFID) algılama makaralarında, özellikle küçük çaplı teller (<0.1 mm) için yüksek hızlarda sarım esnasında başlama ve bitiş anlarında, ayrıca zamanla artan ataletin neden olduğu gerilme dalgalanmalarını ele alan bir kontrolcü geliştirmiştir. Çalışmada, sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve klasik PID kontrolcü katsayılarını optimize eden bulanık mantık tabanlı bir kontrol yapısının benzetim analizleri gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçları, bulanık mantık tabanlı kontrol yaklaşımlarının, sarım sırasında oluşan gerilme dalgalanmalarının etkili bir şekilde azaltılmasında klasik PID kontrolcülere kıyasla daha iyi bir performans sağladığını göstermektedir [13].

Jiashun ve arkadaşları, adım motoru servo kontrol sistemine pan-Boolean PID kontrol algoritması uygulanmıştır. MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturulan matematiksel simülasyon modelinin analiz sonuçları, pan-Boolean PID kontrolünün hızlı yanıt, düşük aşım, kısa ayar süresi ve yüksek sağlamlık gibi avantajlar sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, algoritmanın uygulanabilirliğini test etmek için özel bir kontrol çipine dayalı bir servo kontrolörü tasarlanmış, bu kontrolörün endüstriyel gereksinimleri karşılayacak işlevselliğe sahip olduğu doğrulanmıştır [14].

Robert Agyare Ofosu ve Huangqiu Zhu yaptığı makalede, hareketli ağılardaki gerginlik kontrolüne yönelik farklı kontrol algoritmalarını sistematik bir şekilde incelemektedir. İncelenen yöntemler arasında klasik kontrol, gelişmiş kontrol, gözlemci tabanlı kontrol, yapay zeka tabanlı kontrol ve hibrit kontrol teknikleri yer almaktadır. Çalışma, mevcut gerginlik kontrol tekniklerinin güçlü ve zayıf yönlerini ele alarak bu alandaki literatüre kapsamlı bir bakış sunmayı amaçlamaktadır. İnceleme sonucunda, ağ gerginlik kontrol sistemleri üzerine önemli araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, bu konuya ilişkin kapsamlı bir literatür çalışmasının eksik olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hibrit kontrol algoritmalarının, geliştirilmiş kontrol performansı ve optimize edilmiş yanıtları sayesinde gerginlik kontrolü uygulamalarında giderek daha fazla tercih edildiği görülmüştür. Bu bağlamda, hibrit kontrol algoritmalarının tel gerginlik kontrol sistemlerinde uygulanması, kablo üretim süreçlerinde kaliteyi artırma potansiyeline sahip önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [15].

Shuai ve arkadaşlarının yayınladığı makalede, otomatik fide dikim makinesinin fide toplama mekanizmasının açılıp kapanma konumlandırma doğruluğunun zorlu çalışma

koşullarından etkilendiği, bu sorunu çözmek için uyarlanabilir bulanık PID kontrol algoritmasının önerildiği belirtilmektedir. Fide toplama mekanizmasının konumlandırma doğruluğu üzerine yapılan teorik analiz ve hesaplamalarla, adım motoru açısal hız kontrolü için matematiksel bir model oluşturulmuş ve MATLAB/Simulink'te bulanık PID tabanlı kontrol modeli geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, bulanık PID kontrol sisteminin dış bozulma etkileri altında daha hızlı toparlandığını göstermektedir. Gerçek testler ise, bulanık PID kontrolünün PID'ye göre daha yüksek hassasiyet ve kararlılık sağladığını doğrulamıştır [16].

Yan Lin Huang ve arkadaşlarının yayınladığı makalede, adım motorlarının uyumlu robotik aktüatörler olarak değerlerini keşfetmek için adım motorları için sensörsüz bir tork kontrol yöntemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Üretilen uyumlu hareket, adım motorlarının etkileşim torku/kuvvet perspektifinden insanlarla veya çevreyle daha doğru bir şekilde temas etmesini sağlar. Bu, pozisyon ve tork kontrolünün her ikisinin de önemli olduğu uygulamalarda adım motorlarının kullanımını büyük ölçüde genişletecektir [17].

Stephen J. Dodds ve çalışma arkadaşları, doğal mıknatıslı senkron motorların parçalı stator bölümündeki sarım ve gergi kontrolüne yönelik bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, gergi kontrolü için Gözlemleyici Tabanlı Kararlı Kontrol ve Zorlanmış Dinamik Kontrol teknikleri kullanılmıştır. Araştırmacılar, sistemin bilinen matematiksel modeli ve tasarladıkları gözlemleyici aracılığıyla kontrol benzetimlerini gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, gözlemleyici tabanlı yaklaşımların, senkron motorlarda gergi kontrolü sağlamak ve sistemin dinamik yanıtını iyileştirmek için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir [18].

Gang Yuan Mao ve çalışma arkadaşları, gergi kontrolünde klasik PID kontrolcülerinin parametre ayarlarının zorluklarına dikkat çekmiştir. Bu sorunu aşmak için, adaptif öğrenme tabanlı bir Bulanık PID kontrol yapısı geliştirerek, parametrelerini gerçek zamanlı olarak değiştirebilen bir sistemin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, adaptif öğrenme mekanizması ile desteklenen Bulanık PID kontrolcünün, klasik PID kontrolcülere kıyasla daha esnek ve dinamik koşullara uyum sağlayabilen bir kontrol performansı sunduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle değişken çalışma koşulları altında gergi kontrolünün hassasiyetini artırmayı hedeflemiştir [19].

Van Tu Duong ve çalışma arkadaşları, fırçasız DC motorların sarım işlemlerinde gergi kontrolü üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, dikdörtgen kesitli makaralara yapılan sarım sırasında meydana gelebilecek gergi dalgalanmalarını, teldeki uzama ve bükülme sorunlarını önlemek amacıyla aktif tel aküsü kullanmayı önermişlerdir. Gergi kontrolü, tel konumunun servo valf aracılığıyla ayarlandığı ve pnömotik bir silindir ile düzenlendiği bir sistem üzerinden sağlanmıştır. Klasik PID kontrolcüyü temel alarak tasarladıkları sistemin simülasyon sonuçlarına göre, sistem istenilen gerginlik seviyesine 0.8 saniye içinde ulaşmıştır. İlerleyen çalışmalarda ise Bulanık Mantık tabanlı bir kontrolcü uygulayarak, aktif tel aküsü ile pasif kontrol mekanizmalarının sarım hacmi ve gergi değişimi üzerindeki etkilerini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Elde edilen bulgular, aktif tel aküsüyle daha kararlı ve hassas bir gergi kontrolünün mümkün olduğunu ortaya koymuştur [20, 21].

Abdulbasit Alhinqari ve arkadaşının yaptığı çalışmada, iki kutuplu hibrit adım motorunun çalışma teorisini açıklamayı amaçlamaktadır. Motorun rotorunun hareketi, bağımsız bobinlerine uygulanan senkron faz voltajlarıyla sağlanabilir ve rotorun açısal yer değiştirmesi, geri besleme sinyali olmadan belirlenebilir. Bu yaklaşım, açık döngülü kontrol olarak tanımlanır. Motorun rotor açısal yer değiştirmesini kontrol etmek için uygun senkron faz voltajlarının nasıl sağlanacağı incelenmektedir. Bu süreç, bir kod çözme devresi ve aktüatörden oluşan bir sürücü tarafından gerçekleştirilir. Motorun matematiksel modeli doğrusal olmayan bir durum-bağımlı sistemle temsil edilir ve bu model, Matlab/Simulink ortamında uygulanarak simüle edilir. Elde edilen simülasyon sonuçları, rotorun açısal yer değiştirmelerindeki adımlama davranışını göstermekte ve açık döngülü kontrolün, adımların boyutunu belirli bir doğrulukla kontrol edebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sürücünün dönüş yönünü kontrol etme yeteneği de doğrulanmıştır [22].

Janos Mate Kiss ve arkadaşları, bir DC servo sisteminde PI, PID ve SMC kontrol yöntemlerini simülasyon ve gerçek dünya ölçümleriyle uygulamayı hedeflemektedir. Sistem, öğretim aracı olarak kullanılabilir. Seçilen programlama ortamı, gerçek dünya süreçlerine güçlü donanım bağlantıları sağlayan grafiksel bir platform olan National Instruments (NI) LabVIEW'dir. LabVIEW, kullanıcı ara yüzü öğelerini ve algoritma blok diyagramlarını düğümlerle temsil eden bir programlama yapısına sahiptir. Kontrol Tasarım ve Simülasyon Modülü, zaman ve frekans alanında kontrol teorisi uygulamaları

için çeşitli VI'lar içerir. Simülasyon döngüleri, Simulink'e benzer grafiksel model tanımları sunar ve dinamik sistemlerin adım adım simülasyonunu sağlar. MathScript RT Modülü, LabVIEW'e entegre metin tabanlı bir programlama ortamı olup, MATLAB'a benzer şekilde çalışır ve LabVIEW programlarında kullanılabilir [23].

Carlos E. Marquez-Garcia ve arkadaşlarının yayınladığı makalede, yüksek doğruluklu mekatronik sistemler için geliştirilmiş yeni bir yaklaşımı tanıtmaktadır. Özellikle, bilyalı vidalı besleme tahrik sisteminin deneysel doğrulaması ve bu sistemin kontrolü için kullanılan FPGA tabanlı yapılandırılabilir tasarım önerilmektedir. Donanım tasarımının özelleştirilmiş bir mimarisi ile, verilerin işlenmesi, yüksek performans ve veri iletimi amaçlanan uygulamalarla uyumlu hale getirilmiştir. Makalede, PID kontrolörü ve matematiksel model kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların, simülasyon verileriyle karşılaştırılması yapılmış ve büyük farklar olup olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, düşük maliyetli bir FPGA kullanılarak oluşturulan besleme-sürücü sisteminin, kapalı devre kontrolü ile aynı tepkiyi verdiğini ve bu sistemin mükemmel bir konumlandırma kontrolü sağladığını göstermektedir. Deneysel bulgular, önerilen yaklaşımın etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamaktadır [24].

1.4. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bobin sarma makineleri üzerine yapılan bu çalışmada, makinenin tasarımı, yapısal analizi ve yenilikçi gergi kontrolü ele alınmıştır. Bu makinaların tasarımı analizi ve kontrolü üzerinde yapılan çalışmalar, makinenin işlevselliğini, verimliliğini ve güvenliğini optimize etmeyi amaçlar. Bu çalışmalar, çeşitli mühendislik prensiplerini ve teknikleri kullanarak makine tasarımının her yönünü incelemeyi içerir. Çalışma kapsamında makine tasarımı, SolidWorks yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bobin sarma makinelerinin geleneksel dört temel bölümünden (boşaltıcı, gergi, sarıcı ve travers) sarıcı ve travers kısımları birleştirilerek üç temel bölüm üzerinden tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu sadeleştirilmiş tasarım, yapısal dayanım ve güvenlik analizleri ise imalat öncesinde ANSYS programında Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler, makinenin statik ve dinamik yükler altında gösterdiği performansı değerlendirmekte ve tasarımın güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Gergi kontrolünde literatüre katkı sağlamak amacıyla, vidalı bir mekanizma motor yardımıyla yukarı ve aşağı yönde hareket ettirilerek dinamik gergi kontrolü sağlanmıştır. Bu yaklaşım, gergi

kuvvetinin hassas bir şekilde ayarlanmasını mümkün kılarak, sarım işleminin güvenliğini ve verimliliğini artırmakta, aynı zamanda üretim sırasında malzemenin olası hasar görme riskini minimize etmektedir. Çalışma, söz konusu yeni tasarımın performansını değerlendirmeye yönelik ayrıntılı analiz ve simülasyonları kapsamaktadır. Gergi kontrolünde yüksek hassasiyet sağlamak amacıyla, bu sistemde klasik PID, bulanık mantık tabanlı PID (Fuzzy-PID), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritma tabanlı PID (GAPID) ve kayma kipli kontrol (Sliding Mode Control) yöntemleri uygulanmıştır. MATLAB ortamında yapılan simülasyonlarla her bir kontrol algoritması, gergi kontrolü üzerindeki etkinliği, avantajları ve dezavantajları açısından kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, söz konusu algoritmaların tamamı ilk defa karşılaştırmalı bir analizle ele alınmış olup, hassas sarımlar için hangi kontrol yönteminin daha avantajlı olduğu kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

2. BÖLÜM

BOBİN SARMA MAKİNASININ TASARIMI VE SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE YAPISAL ANALİZİ

2.1. Bobin Sarma Makinaları Tasarımı ve Bileşenleri

Günümüz endüstriyel sistem tasarımlarında, verimlilik ve maliyet etkinliği, mühendislik uygulamalarının temel hedefleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, dört ana bileşenden oluşan bir bobin sarma makinesi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın temel bileşenleri; boşaltıcı ünitesi, gergi kontrol ünitesi, travers (yönlendirici) ünitesi ve sarıcı ünitesi olarak yapılandırılmıştır. Bu bileşenlerin mekanik tasarımı, mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan SolidWorks yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve optimize edilmiştir. Sistemin şase yapısında, 20x20 mm boyutlarında Alüminyum sigma profiller tercih edilmiştir. Bu malzeme seçimi, Alüminyumun hafifliği, üretim süreçlerine uyumluluğu ve maliyet avantajı nedeniyle yapılmıştır. Ayrıca, çelikle karşılaştırıldığında alüminyum, daha düşük yoğunluğa sahip olması sebebiyle montaj ve bakım süreçlerinde kolaylık sağlamaktadır. Bununla birlikte, sarıcı bölümde motoru taşıyan yapı ve boşaltıcı bölümde ana makarayı taşıyan yapı, çelik malzeme ile güçlendirilmiştir. Bu yaklaşım, yapısal bütünlüğü artırmanın yanı sıra, yüksek mukavemet gerektiren bölümlerde uzun ömürlü performans sağlamayı hedeflemiştir. Sistem tasarımında kullanılan bobinler, 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak ABS polimerinden üretilmiştir. Bu üretim yöntemi, prototip geliştirme aşamasında esneklik ve düşük maliyet avantajı sağlamaktadır. Üretilen bobinler, mekanik sistemin işlevsel testlerinde başarıyla kullanılmıştır. Tasarımın genel görünümü *Şekil 1*'de detaylı olarak sunulmuştur.

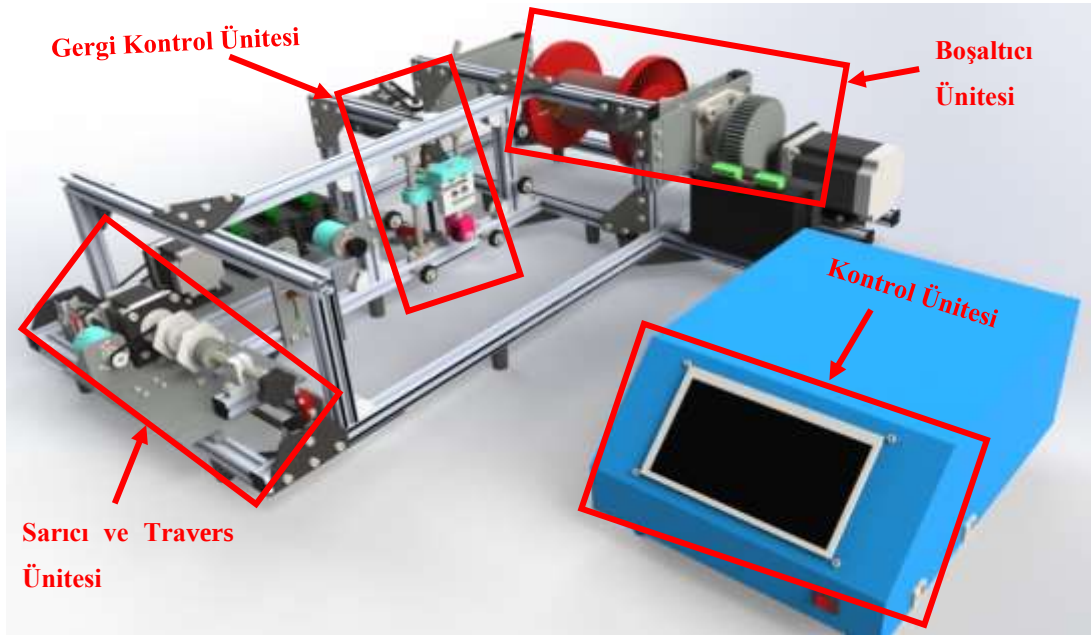
Elektronik donanım açısından, sistem aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Bir adet Nextion ekran, kullanıcı ara yüzü olarak işlev görmektedir.

- Dört adet step motor ve bu motorlara özel dört adet sürücü, hareket kontrolünü sağlamaktadır.
- İki adet enkoder, hassas geri bildirim mekanizması sunmakta ve sistemin doğruluğunu artırmaktadır.
- S- tipi Loadcell sensörü, telin gerginliğini ölçmek için kullanılmıştır.
- Dört adet sınır anahtarı, güvenlik ve hareket sınırlarının tanımlanması amacıyla kullanılmıştır.

Sistemin kontrolü, Arduino Mega mikrodnetleyicisi ile sağlanmaktadır. Arduino Mega, sunduğu geniş giriş-çıkış pin kapasitesi sayesinde karmaşık kontrol yapılarını desteklemekte ve sistemin merkezi kontrol ünitesi olarak işlev görmektedir. Bu mikrodnetleyici, elektronik donanımları ve mekanik bileşenleri entegre ederek sistemin yüksek verimlilik ve hassasiyet ile çalışmasını sağlamaktadır.

Bu tasarım, mekanik ve elektronik sistemlerin uyumlu bir şekilde entegre edilmesiyle, endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek yüksek performanslı bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. Sistem Tasarımı

2.1.1. Boşaltıcı Ünitesi Sistem Tasarımı

Farklı boyutlardaki makaraların takılabilmesi için ayarlanabilir bir mil ile boşaltıcının dönme hareketini sağlayan motor ve rulman yataklama sistemi içeren bölümün tasarımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Boşaltıcı bölümü nema 34 step motor ve sürücüsü kullanılmıştır. Sistemde boşalan makara için 0.28 mm^2 kalınlığında $9.5 \text{ kg}'lık$ emaye kaplı bakır iletken kullanılmıştır. Boşaltıcı step motorunun sarım sırasında sisteme sağladığı tel miktarı, dönüş hızına bağlıdır. Sağlanan tel miktarı, sarıcı tarafından karkasa sarılan tel miktarıyla aynı olmazsa, tel üzerinde gerginleşme veya bollaşma gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, boşaltıcı step motorunun hızı, sarıcı step motorunun hızı ile Denklem 1 kullanılarak ilişkilendirilmiştir.

$$V_b = \frac{N_b}{N_s} \times \frac{V_s}{K} \times D_s \quad (1)$$

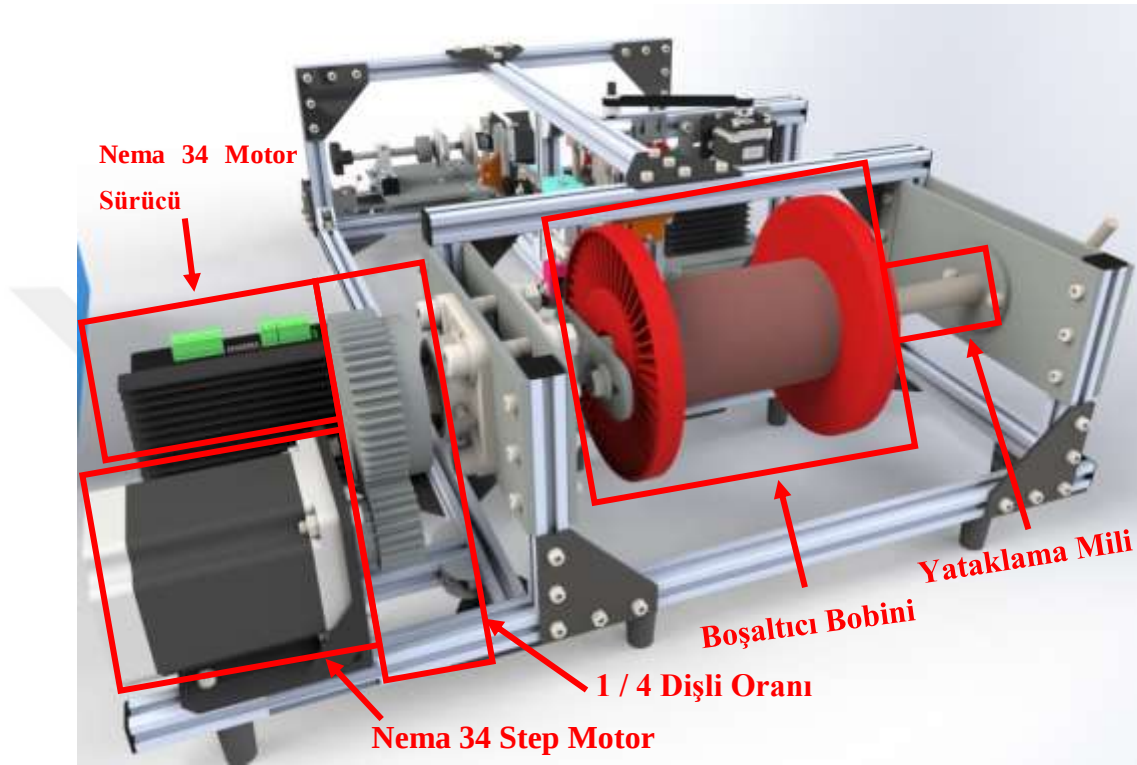
Bu denklemde kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- V_b (Boşaltıcı hız): Boşaltıcı step motorunun hız değeri.
- N_b (Boşaltıcı tur adım sayısı): Boşaltıcı step motorunun bir turu tamamlamak için atması gereken adım sayısı.
- K (Karkas oranı) : Sarılan karkasın çapının, sisteme teli sağlayan dolu karkasın çapına oranı.
- D_s (Dişli oranı): Boşaltıcı step motorunun dolu karkası çevirmek için bağlı olduğu dişlilerin oranı.

Telin sarıldığı karkasta katman sayısı arttıkça, sarım bölgesinin çapı da büyüdüğü için sarılan tel miktarı artmaktadır. Bu nedenle, sarıcı motorun hızı sabit tutulurken, boşaltıcı motorun hızı, her katmanda Denklem 2 kullanılarak artırılmıştır.

$$V_b = V_b \times \left(1 + \frac{d}{2 r_s}\right) \quad (2)$$

Boşaltıcı step motoru, belirtilen hızda katman sarımı boyunca dönmeye devam etmektedir. Yeni katmana geçerken, sarıcı step motoru ile durur ve travers, tel için yeni açığı sağladığında hem boşaltıcı hem de sarıcı step motorları sarım işlemine devam etmektedir.

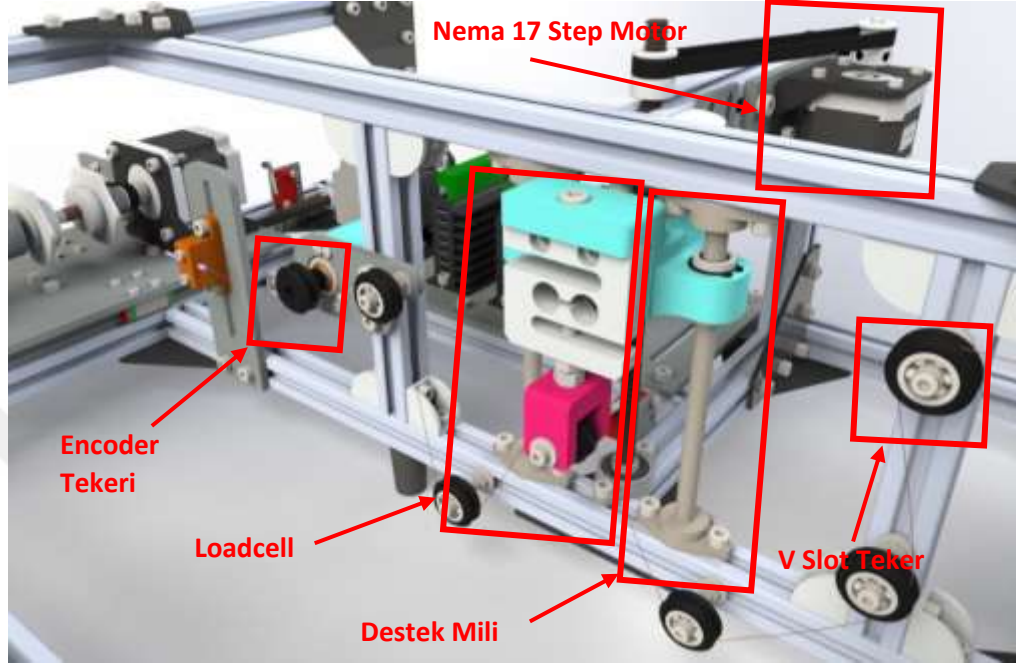


Şekil 2. Boşaltıcı Ünitesi Tasarımı

2.1.2. Gergi Ünitesi Tasarımı

Boşaltıcıdan sarıcıya doğru ilerleyen telin gerginliğini ölçen bir Loadcell (gerginlik sensörü) ve bu ölçümle telin gerginlik değerini ayarlayan mekanizma, telin Y (dikey) ekseninde hareket etmesini sağlayan bölümde yer almaktadır. Nema 17 Step motorunun dönmesiyle vidalı milin arabası aşağı – yukarı yönde hareket ederek gerginliği ayarlanmıştır. Bu bölümde, eksen hareketi trapezoidal vida sistemiyle sağlanmıştır, telin hareketi v-slot teker sistemiyle yönlendirilmiştir ve hız ölçümü için enkoder mekanizması kullanılmıştır. Step motorun vidalı mili döndürmesiyle arabasının hareket etmesi, sistemin konumlandırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Dikey eksen de sabitlemek için 10 mm çapta olan 2 adet melle desteklenmiştir. Miller üzerindeki lineer kızaklarla da aşağı ve yukarı yönde hareketi desteklenmiştir. Dikey eksen de alt ve üst kısımlar için

sınır anahtarları (Limit Switch) kullanılmıştır. Modellenen sistem *Şekil 3*'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Gergi Kontrol Ünitesi Tasarımı

Sarım işlemi boyunca telin gergin bir şekilde sarılması gerekmektedir. Telin aşırı gergin olduğu durumlarda, tel esneyip inceler ya da gergin olmadığı durumlarda ise karkasa boşluklu sarılması, düzgün sarımı engellemektedir. Tel gerginliğini belirli bir seviyede tutmak için Loadcell'in bulunduğu mekanizma step motor ile kontrol edilmektedir. Tel gerginliğini kaybettiğinde, Loadcell yukarı hareket ederek gerginliği artırmaktadır. Tel, belirlenen değerden fazla gerildiğinde ise Loadcell aşağı hareket ederek gerginliği azaltmaktadır. Gerginlik istenilen seviyede olduğunda, step motorun hareketi durdurulmaktadır. Mevcut sistemde, Loadcell üzerinden saniyede 50 ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm miktarı artırıldığında, step motorların sürülmesi için işlemci hızı yetersiz kalmakta ve step motorların hareketinde yavaşlama gözlemlenmektedir. Loadcell mekanizmasının hareket edebileceği üst ve alt sınırları belirlemek ve bu sınırların aşılmasını önlemek amacıyla iki adet Limit Switch kullanılmıştır. Mekanizma tel gerginliğini dengelemek için hareket ederken, bir süre sonra alt veya üst sınıra ulaşmaktadır. Mekanizmanın hangi Limit Switch'e bastığına bağlı olarak iki farklı senaryo gerçekleşmektedir. Birinci senaryoda, üstteki Limit Switch'e basıldığında gerçekleşen adımlar şu şekildedir:

1. Tüm motorlar durur.
2. Loadcell step motoru, Loadcell'i merkez pozisyona hareket ettirerek aşağıya doğru iner. Bu esnada telde gevşeme meydana gelir.
3. Telin gerginliğini istenilen seviyeye getirmek amacıyla, Loadcell'den gelen veri incelenir; boşaltıcı step motor ters yönde dönerek gerginliği artırır.
4. Gerginlik istenilen seviyeye ulaştığında, boşaltıcı motor durur.
5. Tüm sistem, sarıma kaldığı yerden devam eder.

İkinci senaryoda, alttaki Limit Switch'e basıldığında gerçekleşen adımlar şu şekildedir:

1. Tüm motorlar durur.
2. Loadcell step motoru, Loadcell'i merkez pozisyona hareket ettirerek yukarıya doğru hareket eder. Bu hareket, telde gerilmeye sebep olacağı için üçüncü madde gereklidir.
3. İkinci madde ile eş zamanlı olarak, telin kopmaması için boşaltıcı step motoru sisteme düşük bir hızda tel vermeye devam eder.
4. Loadcell merkez pozisyona döndüğünde, telin gerginliğini istenilen seviyeye getirmek amacıyla Loadcell'den gelen veri incelenir; boşaltıcı step motor ters yönde dönerek gerginliği artırır.
5. Gerginlik istenilen seviyeye ulaştığında, boşaltıcı step motor durur.
6. Tüm sistem, sarıma kaldığı yerden devam eder.

2.1.3. Sarıcı ve Travers Ünitesi Tasarımı

Sarıcı bölümünde, telin yalnızca X (yatay) ekseninde hareket etmesini sağlayan ve telin bobin üzerine düzenli bir şekilde sarılmasını mümkün kılan travers bölümü, Şekil 4'te gösterildiği şekilde tasarlanmıştır. Sarıcı motoru olarak nema 23 step motor kullanılmıştır. Bu bölümde eksen hareketi kızak-rulman ve trapezoidal vida ile sağlanmıştır. Sarıcı bölümünde metraj uzunluğunun hesaplanması için sarıcı motorunda enkoder kullanılmıştır. Radyal hareket için nema 23 step motor kullanılmıştır. Radyal

hareketlerde sağ ve sol sınırların belirlenmesi için sınır anahtarları kullanılmıştır. Sistemin senkron çalışmasını sağlamak amacıyla, sarıcı step motorunun hızı referans olarak alınmıştır. Yapılan çalışmalarda, sarıcı step motorunun hızının 2 saniyede bir tur atacak şekilde ayarlanmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda, 400 step/tur oranına sahip sarıcı step motorunun hızı 200 step/saniye olarak belirlenmiştir. Sarım işlemi başladığında, sarıcı step motoru travers yön değiştirene kadar dönme işlemine devam etmektedir. Travers yön değiştirdiğinde, sarıcı motor bir sonraki katman için dönmeye devam etmektedir. Tüm katmanlar tamamlandığında ise sarıcı motor hareketini durdurarak işlemi tamamlamaktadır. Düzgün bir sarım elde edebilmek için traversin, her bir sarım turu başına tel çapı kadar olacak şekilde, sarıcı step motorunun hızıyla senkronize bir şekilde yatayda hareket etmesi gerekmektedir. Bu hareketi sağlamak için gerekli hesaplamalar Denklem 3 ve Denklem 4'te verilmiştir. Denklem 1, travers step motorunun, girilen tel çapına bağlı olarak, her bir tur sarımda yatayda kat etmesi gereken adım sayısını hesaplamaktadır. Denklem 4 ise travers hızının, sarıcı step motorunun hızıyla uyumlu olmasını sağlamak için yapılması gereken hesaplamayı göstermektedir.

$$N_t = d \times \frac{N_{as}}{H} \quad (3)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Travers step (N_t): Karkasın bir turluk tel sarımına karşılık traversin yatayda atması gereken adım sayısı.
- Tel çapı (d): Sistemde kullanılan telin çap değeri.
- Travers tur adım sayısı (N_{as}): Travers step motorunun bir turu tamamlamak için attığı adım sayısı.
- Vidalı mil hatvesi (H) : Travers motoruna bağlı milin bir tur dönmesi sonucunda traversin yatayda hareket ettiği mesafe.

$$V_t = N_t / \frac{N_{as}}{V_s} \quad (4)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Travers hızı (V_t): Travers step motorunun saniyede attığı adım sayısı.
- Sarıcı hızı (V_s): Sarıcı step motorunun saniyede attığı adım sayısı.
- Sarıcı tur adım sayısı (N_{as}): Sarıcı step motorunun bir turu tamamlaması için atması gereken adım sayısı.

Travers step motorunun her bir katman için atması gereken toplam adım sayısı, Denklem 5 ile hesaplanmıştır.

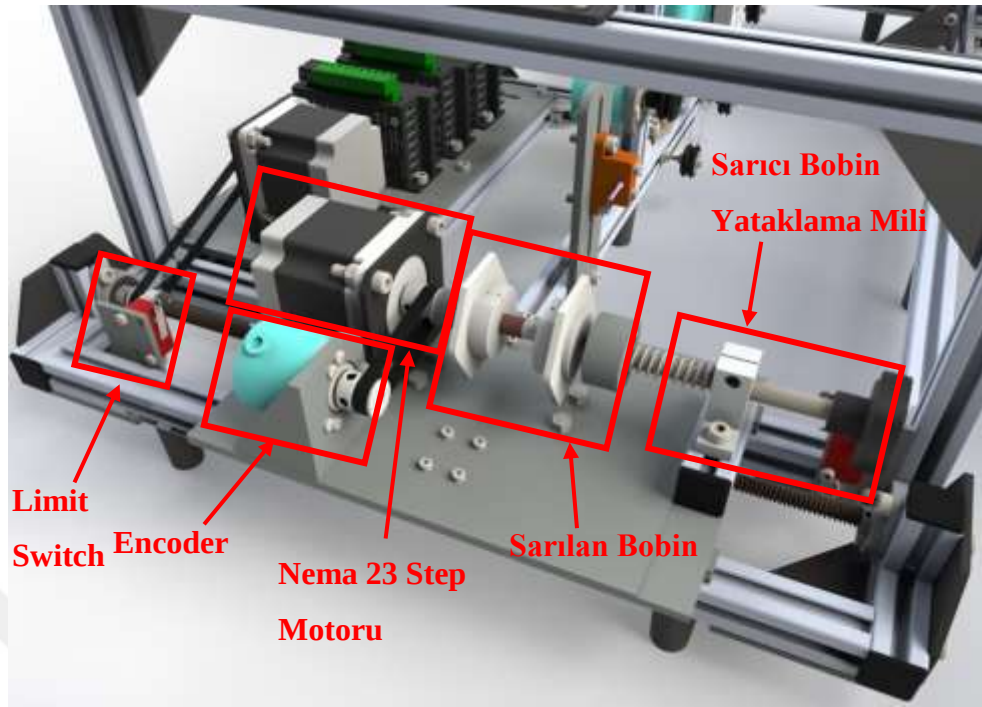
$$N_{ts} = K_N \times N_t \quad (5)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Travers adım sayısı (N_{ts}): Travers step motorunun her bir katman için atması gereken toplam adım sayısı.
- Katman sarım sayısı (K_N): Karkasın her katmanında yapılan tur sarım sayısı.

Katman sarım sayısının hesaplanması, sarım alanının uzunluğunun tel çapına bölünmesiyle elde edilmektedir.

Sistem ilk çalıştığında, karkasın istenilen konumda sarıma başlaması için travers, Limit Switch'e doğru otomatik olarak hareket etmektedir. Limit Switch'e çarptıktan sonra, kendisine atanan pozisyona geri dönmektedir. Bu hareket sırasında, telin nozul sonrası sarım yönünün tersine açılı kalabilmesi için travers, telin paralel olduğu pozisyondan 4 mm daha ileri gitmektedir. Böylece açılı tel, sarılmakta olan telleri sıkıştırarak bir kuvvet uygulamaktadır. Her katman tamamlandığında, sarım yönü değişeceği için sistem durur ve travers, telin açısını sarım yönünün tersine getirmek için 8 mm ilerlemektedir. Bu ilerleme tamamlandığında, tüm sistem sarıma kaldığı yerden devam etmektedir.



Şekil 4. Sarıcı ve Travers Ünitesi Tasarımı

2.2. Bobin Sarma Makinasının Sonlu Elemanlar Metodu ile Yapısal Analizi

Yapısal analiz, bir yapının veya mekanik sistemin, çeşitli dış kuvvetler, yüklemeler, titreşimler veya termal etkiler altındaki davranışını inceleyen önemli bir mühendislik disiplini. Bu analiz, yapının dayanıklılığının, deformasyon özelliklerinin, kararlılığının ve genel güvenliğinin değerlendirilmesini sağlar. Mühendislik projelerinde yapının güvenli ve etkin bir şekilde tasarlanmasına olanak tanıyarak, yapının servis ömrü boyunca karşılaşılabileceği potansiyel risklerin önceden belirlenmesi ve önlenmesine katkıda bulunur. Yapısal analiz, genellikle teorik ve sayısal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Teorik analizde, yapının davranışı matematiksel denklemler ve mühendislik ilkeleri temel alınarak incelenir ve bu analizler genellikle el hesaplamaları ya da basit bilgisayar programları ile desteklenir. Sayısal analizde ise, daha karmaşık yapılar ve yükleme senaryoları için bilgisayar destekli yazılımlar kullanılır. Bu bağlamda en yaygın yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (SEM), yapının küçük ve sonlu elemanlara bölünerek her bir elemanın davranışının modellenmesini sağlar. Yapısal analizde dikkate alınan temel parametreler arasında gerilme (stres), yapının iç kuvvetlerin etkisiyle maruz kaldığı gerilme yoğunluğu; şekil değiştirme (deformasyon), yapının uygulanan kuvvetler altında meydana gelen fiziksel değişimi ve güvenlik katsayısı,

yapının belirli bir yük altında emniyetli olma derecesini gösteren oran yer alır. Şekil değiştirme, yapısal analizlerde malzemenin veya yapının ne kadar deforme olduğunu ölçmek için kullanılan temel bir parametredir. Şekil değiştirme, bir yapıya uygulanan yükler sonucunda her noktadaki toplam yer değiştirme miktarını ifade eder. Bu değer, X, Y ve Z eksenlerindeki yer değiştirmelerin birleşimi olarak hesaplanır. Şekil değiştirme, yapının en fazla hangi bölgelerinde yer değiştirme meydana geldiğini ve sistemin rijitliğini anlamak için önemlidir. Özellikle elastik şekil değiştirme bölgesinde kalınıp kalınmadığını değerlendirmek için kullanılır. Toplam şekil değiştirme değeri, bir yapının veya malzemenin ne kadar esneyebileceğini gösterir. Bu, tasarımın güvenli ve kullanılabilir olup olmadığını değerlendirmek için kullanılır. Toplam şekil değiştirme, farklı malzemelerin performansını karşılaştırmak için kullanılır. Örneğin, daha rijit bir malzeme daha az deforme olur. Von Mises gerilmesi, çok eksenli yükleme durumlarında malzemenin akma sınırına ne kadar yakın olduğunu belirlemek için plastik şekil değiştirme başlangıcını tahmin etmek üzere kullanılan kriterdir. Eğer von Mises gerilmesi, malzemenin akma dayanımını aşarsa malzeme plastik şekil değiştirmeye uğrar ve yapısal olarak hasar görmeye başlar. Özellikle Çekme-Akma Hipotezi (Distortion Energy Theory) temel alınarak hesaplanır.

- Von Mises gerilmesi, tek eksenli çekme veya basma testinde malzemenin akma sınırına ulaşmasıyla plastik deformasyona uğrayacağını varsayan bir kriterdir.
- Ansys Workbench'te, statik analizler, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme modelleriyle yapılan analizlerde von Mises gerilmesi sonuçları görüntülenebilir.

Emniyet katsayısı, bir yapının veya malzemenin güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için ne kadar güvenlik payı olduğunu gösteren bir değerdir. Bu katsayı, malzemenin maruz kaldığı gerilme ile malzemenin dayanımı arasındaki oranı ifade eder. Eğer emniyet katsayısı 1'den büyükse, malzeme güvenli kabul edilir. Eğer 1'den küçükse, malzeme plastik deformasyona uğrayabilir veya hasar görebilir. Emniyet katsayısı, tasarımın ne kadar güvenli olduğunu gösterir. Örneğin, emniyet katsayısı 2 ise, malzemenin akma dayanımı, uygulanan gerilmenin iki katıdır ve bu da tasarımın oldukça güvenli olduğunu gösterir. Von Mises gerilmesi ve emniyet katsayısı, yapısal analizlerde malzemenin güvenliğini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Ansys Workbench, bu değerleri otomatik olarak hesaplayarak, tasarımcıların ve mühendislerin malzemenin

performansını ve güvenliğini kolayca değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Bu değerler, tasarımın optimize edilmesi ve olası hataların önlenmesi için kullanılır.

Sistemimiz, dört ana bileşenden oluşmakla birlikte, analiz süreçleri için Solidworks programında üç temel bölüme indirgenmiştir: boşaltıcı, gergi ve sarıcı-travers. Bu bölümler, Ansys yazılımı kullanılarak Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile modellenmiştir. Tasarımda kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Sistemin tüm bileşenlerinde (travers mili hariç) düzgün bir mesh dağılımı sağlamak amacıyla, standart olarak 5 mm’lik bir mesh boyutu uygulanmıştır. Ancak, travers milinde vida adımlarının kuvvet aktarımını daha doğru bir şekilde analiz edebilmek için 1 mm’lik daha ince bir mesh boyutu tercih edilmiştir. Bu farklılaştırılmış mesh yapısı, özellikle kritik bölgelerde daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Belirlenen mesh sayıları için farklı boyutlarda denemeler yapılarak mesh bağımsızlığı çalışmaları yapılmıştır. Yapısal analizde dikkate alınan temel parametreler şunlardır:

- Gerilme (Stres): Yapının içindeki kuvvetlerin neden olduğu gerilme yoğunluğudur.
- Şekil Değiştirme (Deformasyon): Yapının kuvvetler altındaki fiziksel değişimi göstermektedir.
- Güvenlik Katsayısı: Yapının, belirli bir yük altında ne kadar emniyetli olduğunu gösteren orandır.

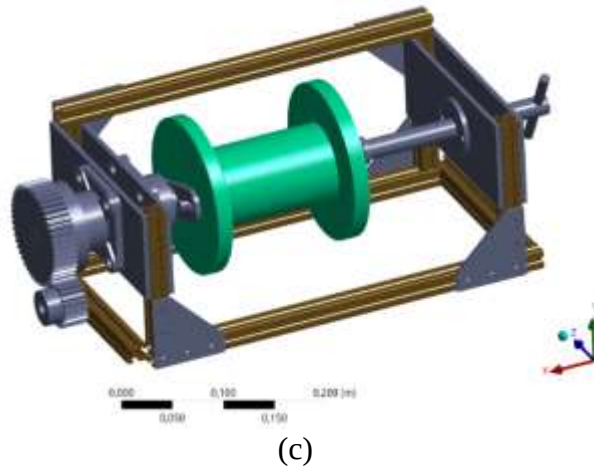
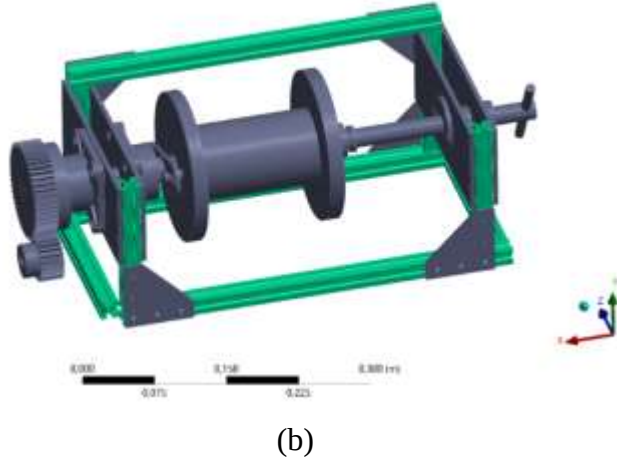
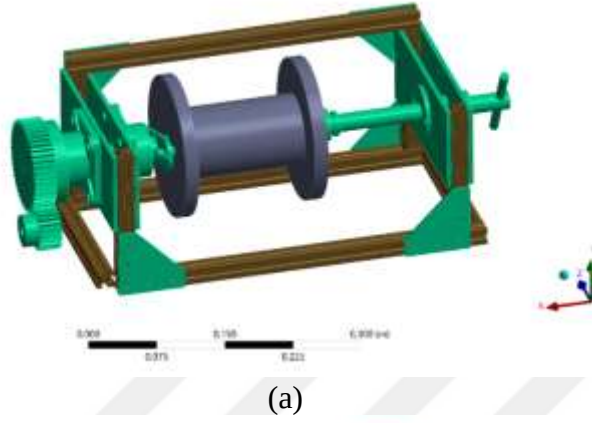
Tablo 1. Yapısal analizde kullanılan malzemeler

Özellik	Yapısal Çelik	Alüminyum Alaşım	ABS
Yoğunluk (kg/m ³)	7780	2770	1040
Elastiklik Modülü(MPa)	200000	710000	230000
Poisson Oranı	0,3	0,33	0,399
Bulk Modülü(MPa)	1,667x10 ⁵	6,960 x10 ⁴	3,943 x10 ³
Shear Modülü(MPa)	7,692x10 ⁴	2,669 x10 ⁴	8,541 x10 ²

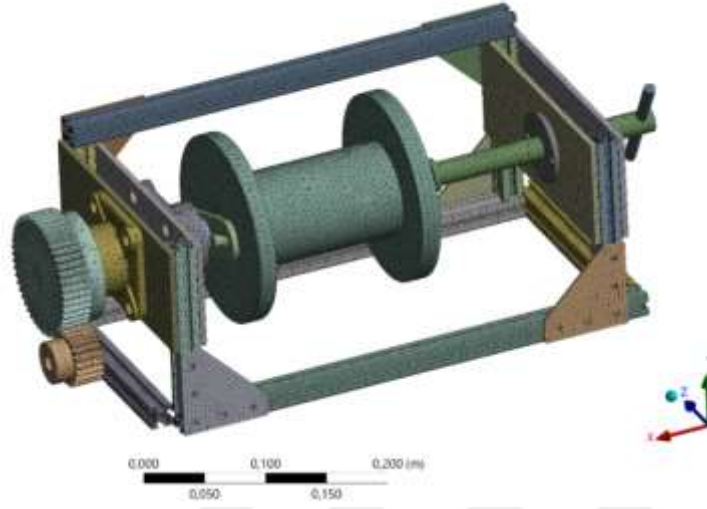
2.2.1. Boşaltıcı Ünitesi Yapısal Analizi

Boşaltıcı bölümünde, model üzerinde oluşabilecek sınır şartları tanımlanmıştır. Oluşturulan modelde Çelik, Alüminyum ve ABS olmak üzere 3 çeşit malzeme

kullanılmıştır. Sistemde kullanılan malzemeler *Şekil 5*'te gösterilmiştir. Oluşturulan boşaltıcı ünitesi modelinin mesh dağılımı *Şekil 6*'da gösterilmiştir.

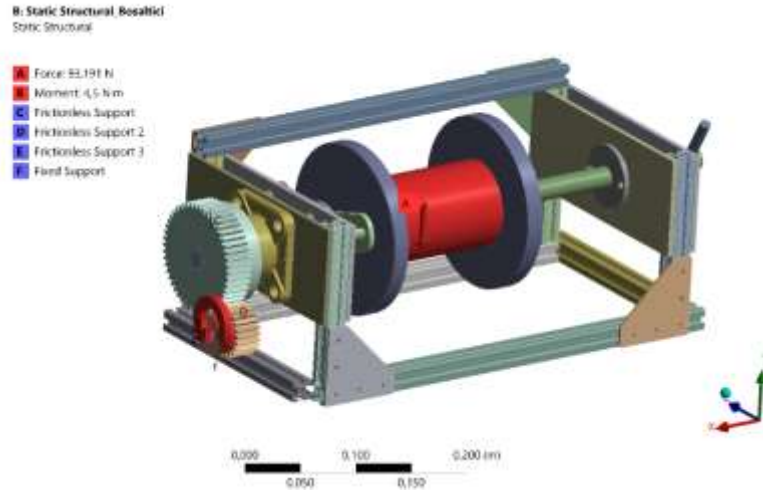


Şekil 5. Boşaltıcı ünitesinde kullanılan malzemeler: (a) Çelik malzeme, (b) Alüminyum malzemeler, (c) ABS olan malzemeler



Şekil 6. Boşaltıcı ünitesi mesh modeli

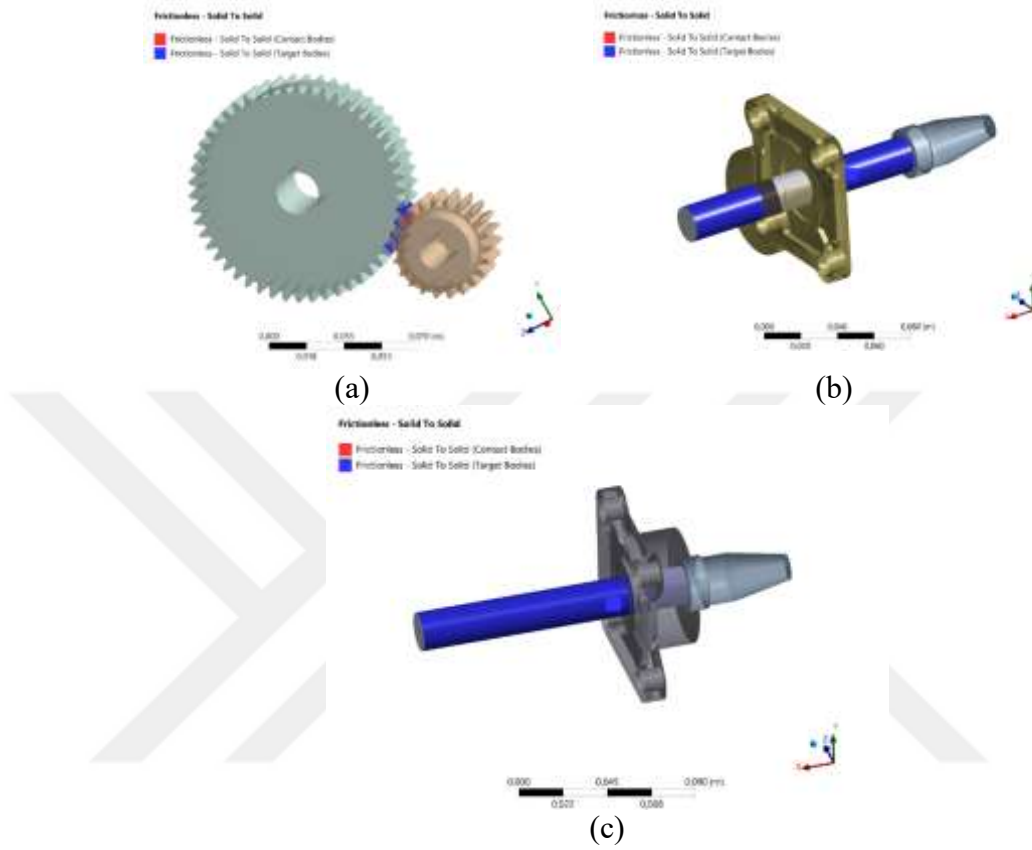
Sınır şartları Şekil 7’de gösterilmiştir. Sisteme etki eden moment, step motor tarafından oluşturulmuş olup, motorun teknik dökümanından elde edilen değer ile modele uygulanmıştır. Sistemde kullanılan makaranın toplam ağırlığı, yerçekimi ivmesi yönünde modele eklenmiştir.



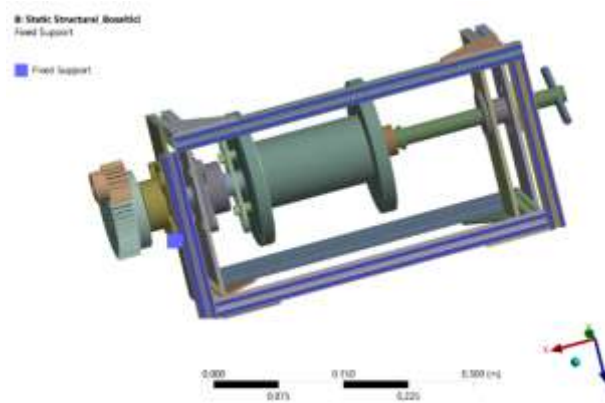
Şekil 7. Boşaltıcı ünitesi sınır şartları

Motor momentinin aktarımı sırasında dişliler arasında oluşabilecek kayma göz önünde bulundurularak, dişliler arasında "Frictionless Support" (sürtünmesiz destek) ve milin dönmesinde oluşan sürtünme şartları Şekil 8’de gösterilmiştir. Ayrıca, sistemin istikrarlı

bir şekilde çözümlenebilmesi için yer yüzeyi "Fixed Support" (sabit destek) olarak modellenmesi Şekil 9'da gösterilmiştir.



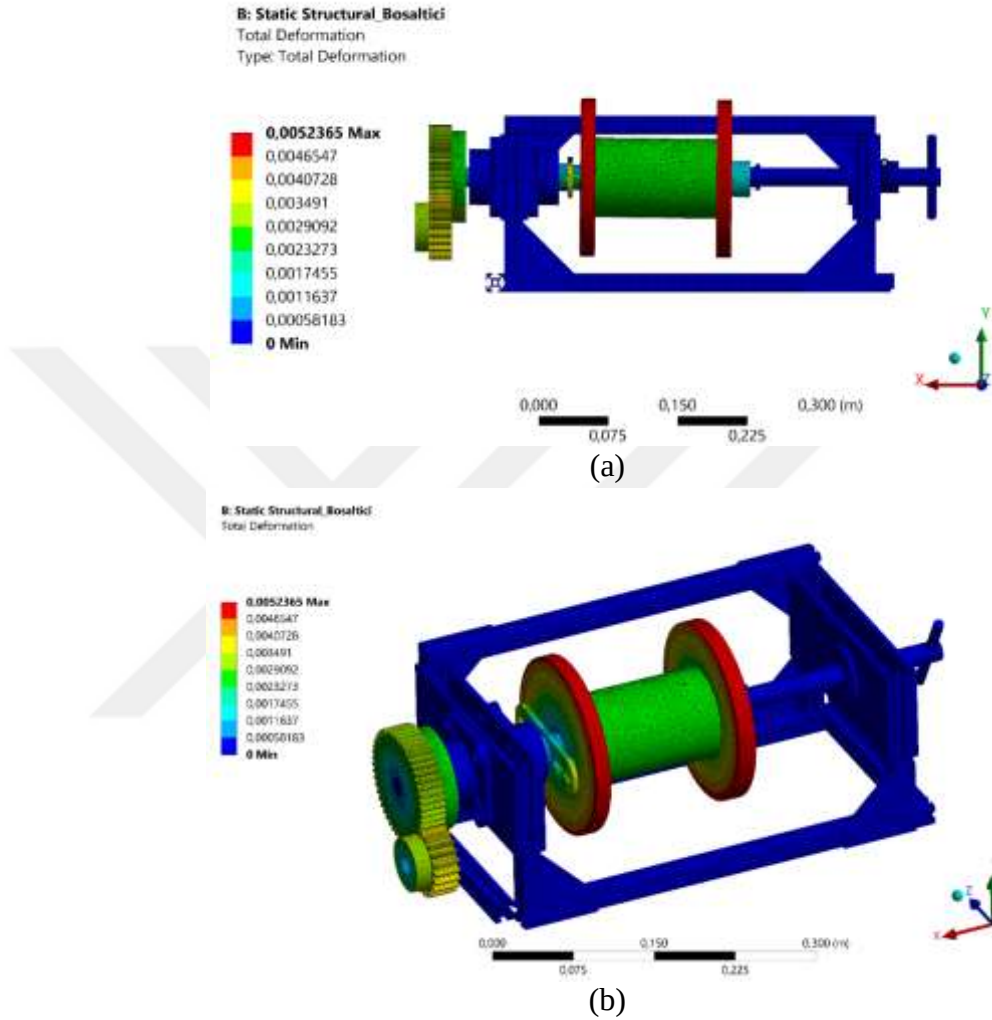
Şekil 8. Boşaltıcı ünitesinin SEM modelindeki kontaktlar: (a) Dişliler arasındaki kontakt yapısı, (b) ve (c) motor milinin döner aksanındaki kontak yapısı



Şekil 9. Boşaltıcı ünitesi sabit yüzeyleri

Bu oluşturulan SEM modeli sonucunda toplam şekil (yer) değiştirme, eş değer gerilme ve emniyet katsayıları elde edilmiştir. Şekil değiştirmesi, dış kuvvetler tarafından maruz

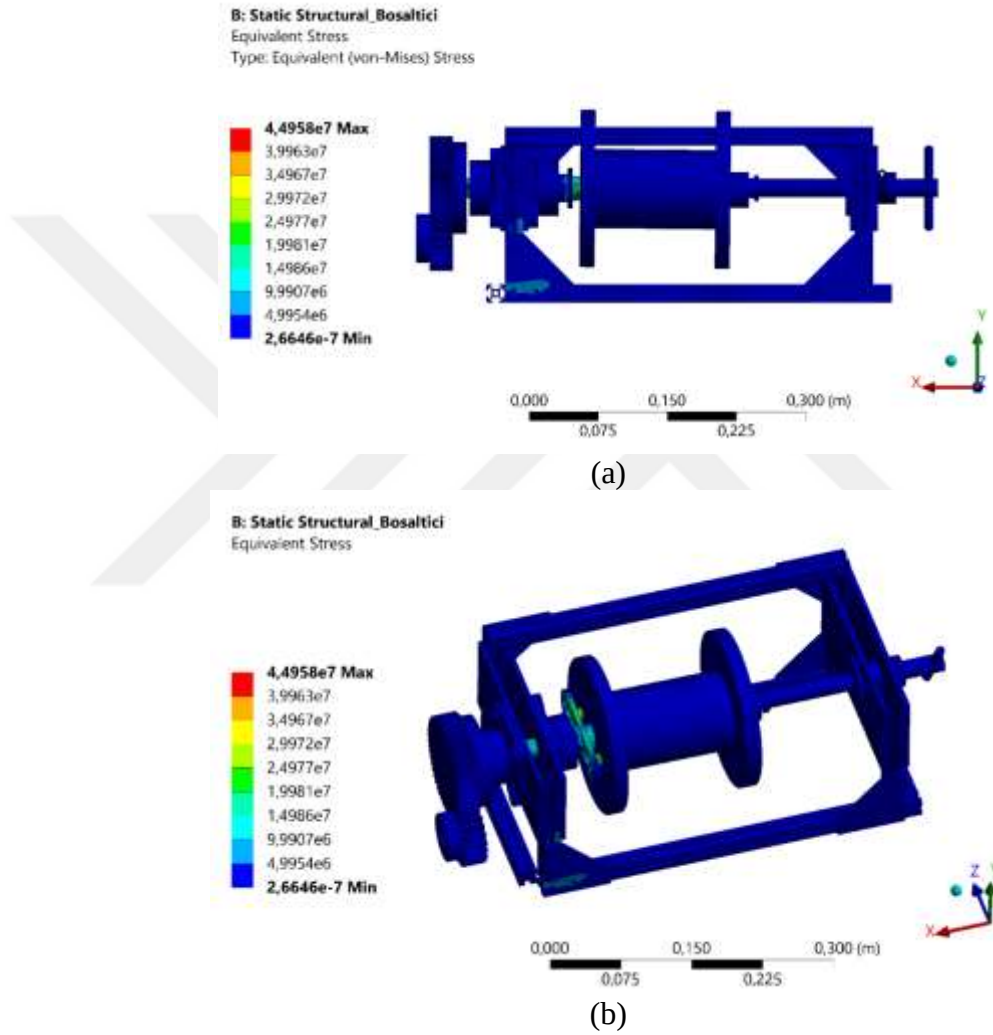
kalınan toplam şekil değişikliğini ifade etmektedir. Bu sınır şartlarında elde edilen deformasyon sonucu *Şekil 10*'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Boşaltıcı ünitesinin şekil değiştirme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü

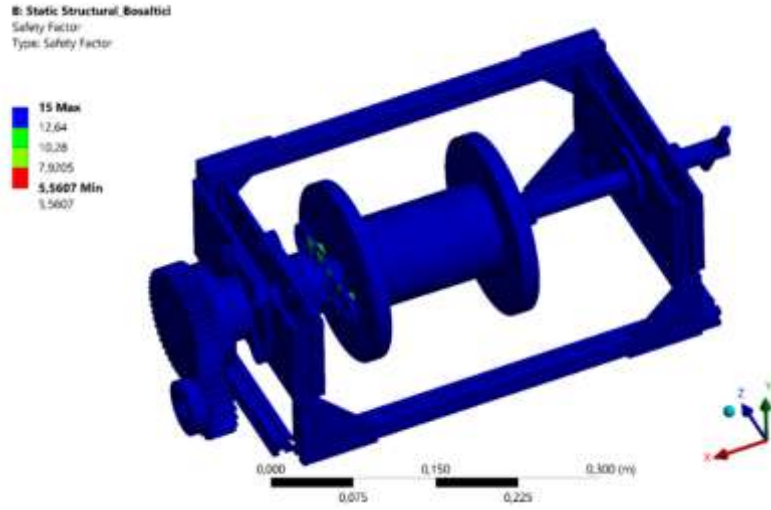
Şekil değiştirme, yapının uygulanan yükler altında dayanıklı olduğunu ve tasarım kriterlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için kullanılmıştır. Aşırı deformasyon, yapının işlevselliğini tehlikeye atabilir ve potansiyel bir yapı çökmesine ya da diğer tehlikeli durumlara yol açabilmektedir. Analiz sonucunda deformasyon sonucu iyi çıkmıştır. Equivalent stress (eşdeğer gerilme), mühendislikte karmaşık gerilme durumlarını daha basit ve anlamlı hale getirmek için kullanılan bir kavramdır. Özellikle Von Mises gerilmesi olarak bilinen türü yaygın olarak kullanılır ve bir malzemenin akma sınırına ulaşp ulaşmadığını belirlemek için kritik bir parametre olarak değerlendirilir. Eşdeğer gerilme, karmaşık üç boyutlu gerilme durumlarını tek bir skaler değerle temsil

ederek, malzemenin deformasyon ve akma davranışını öngörmeye yardımcı olur. Bu sayede yapının taşıma kapasitesini ve güvenliğini değerlendirir. Eşdeğer gerilme analizi, malzemelerin yük altında gösterdiği davranışı anlamak ve uygun malzeme seçiminde kullanılır. Boşaltıcı ünitesinin eş değer gerilme analiz sonucu *Şekil 11*'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Boşaltıcı ünitesi eş değer stress değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü

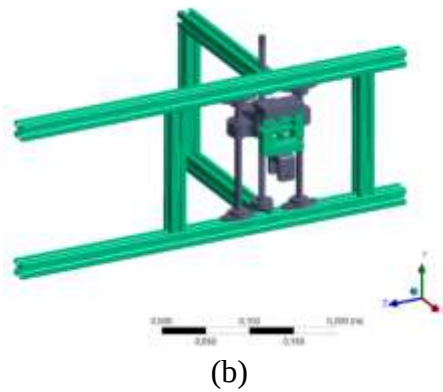
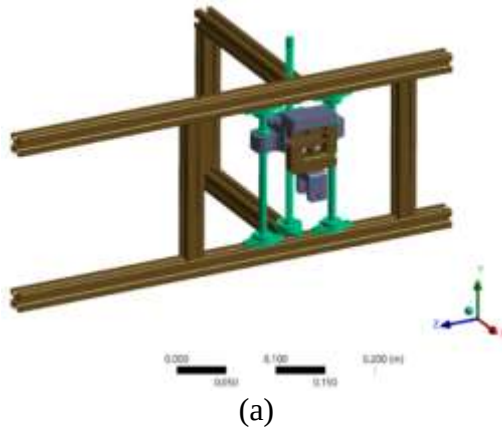
Bu bulgulara dayanarak, boşaltıcı ünitesinin “Emniyet Katsayısı (Safety Factor)” değerleri *Şekil 12*'de gösterilmiştir. Boşaltıcı ünitesinin analiz sonuçları, sistemin güvenlik sınırları içerisinde çalıştığını doğrulamaktadır.

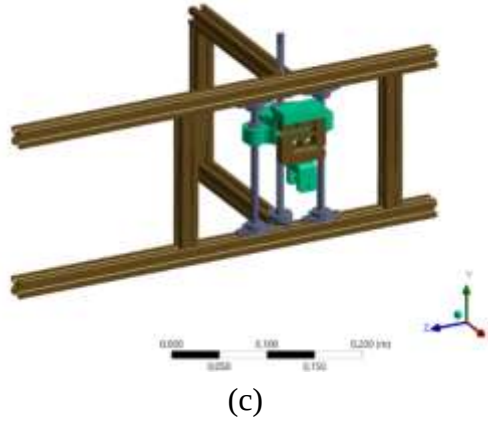


Şekil 12. Boşaltıcı ünitesi Emniyet Katsayısı

2.2.2. Gergi Ünitesi Yapısal Analizi

Gergi bölümünde, model üzerinde oluşabilecek sınır şartları tanımlanmıştır. Oluşturulan modelde Çelik, Alüminyum ve ABS olmak üzere 3 çeşit malzeme kullanılmıştır. Sistemde kullanılan malzemeler Şekil 13'te gösterilmiştir.

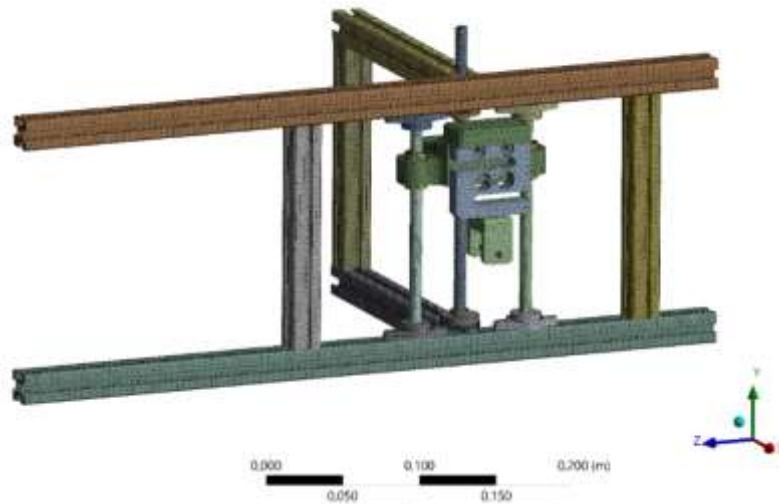




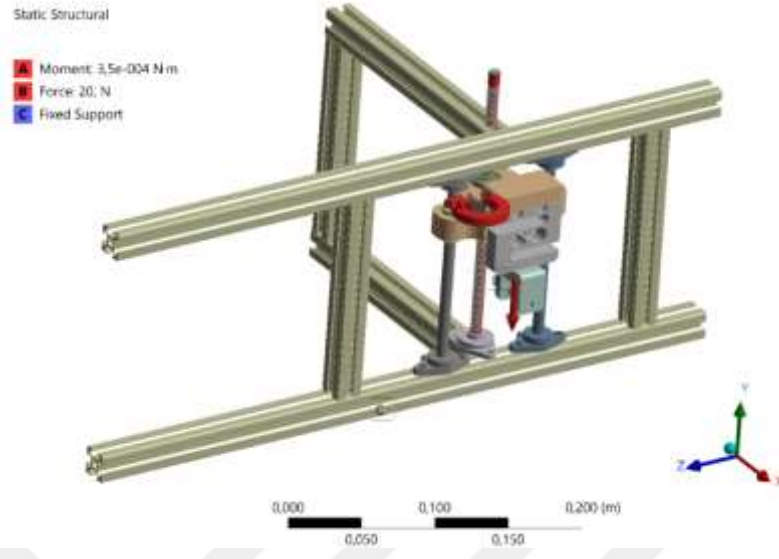
(c)

Şekil 13. Gergi bölümünde kullanılan malzemeler:(a) Çelik malzemeler, (b) Alüminyum malzemeler, (c) ABS olan malzemeler

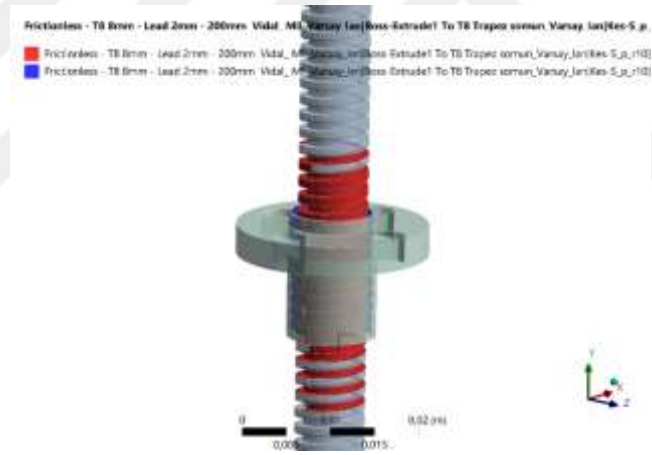
Malzeme ataması yapıldıktan sonra mesh modeli gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen model Şekil 14’de gösterilmiştir. Oluşturulan modelin sınır şartları Şekil 15’te gösterilmiştir. Nema 17 step motor tarafından oluşan moment, vidalı mile uygulanmıştır. Bakır iletkenin 2 kg’lık yani yaklaşık 20 N’luk kuvvet uygulanmıştır. Yere temas eden yüzeylerde “Fixed Support “olacak şekilde sabitlenmiştir. Vidalı milin arabasının hareketinde sürtünme oluşacağı için modelde sınır şartı olarak eklenmiştir. Eklenen sınır şartı Şekil 16’da gösterilmiştir.



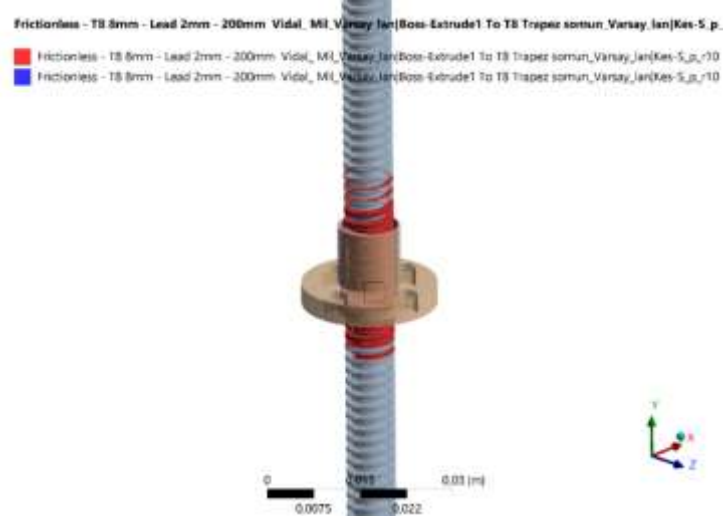
Şekil 14. Gergi ünitesi mesh modeli



Şekil 15. Gergi ünitesi sınır şartları



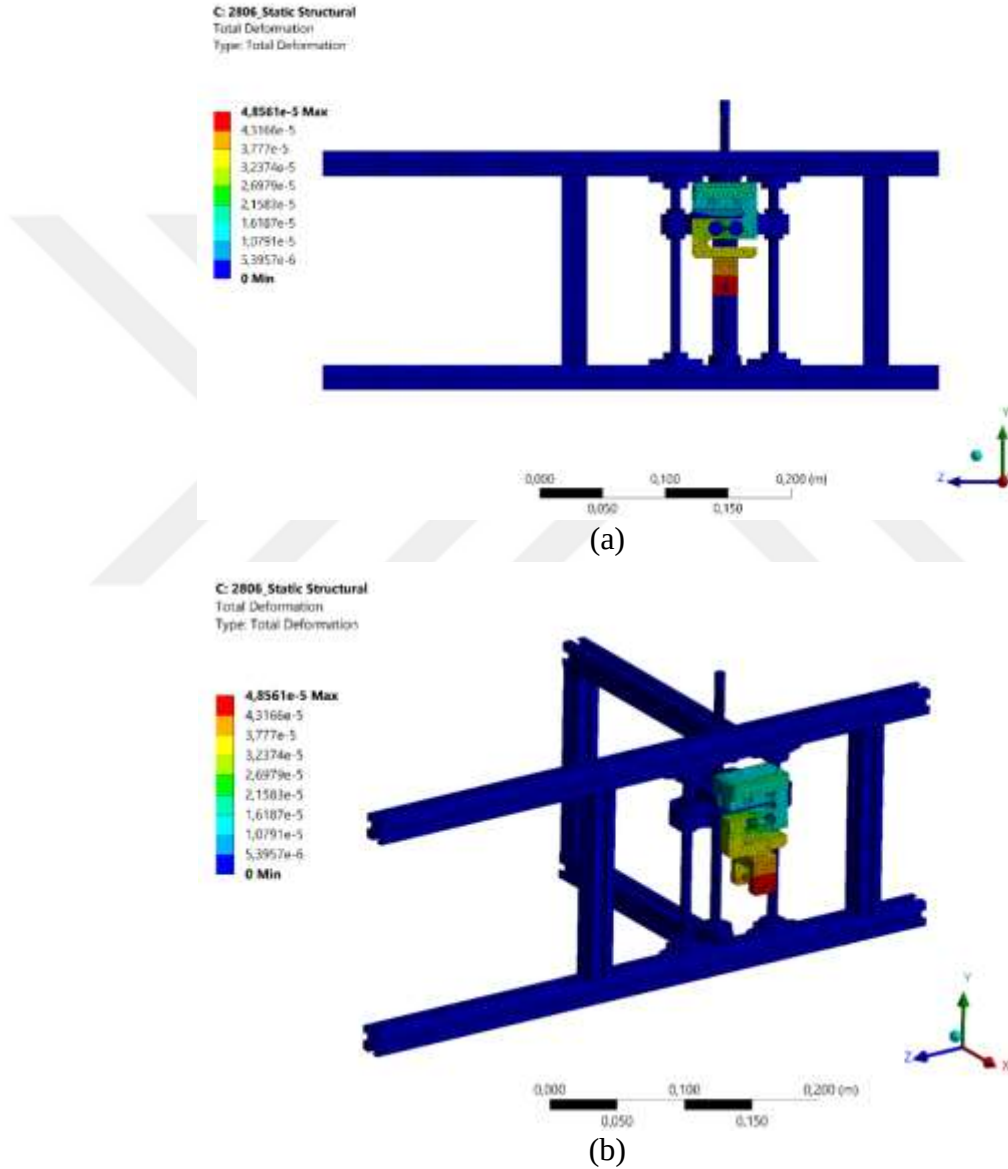
(a)



(b)

Şekil 16. Vidalı mil ve somunu arasındaki kontak yapıları

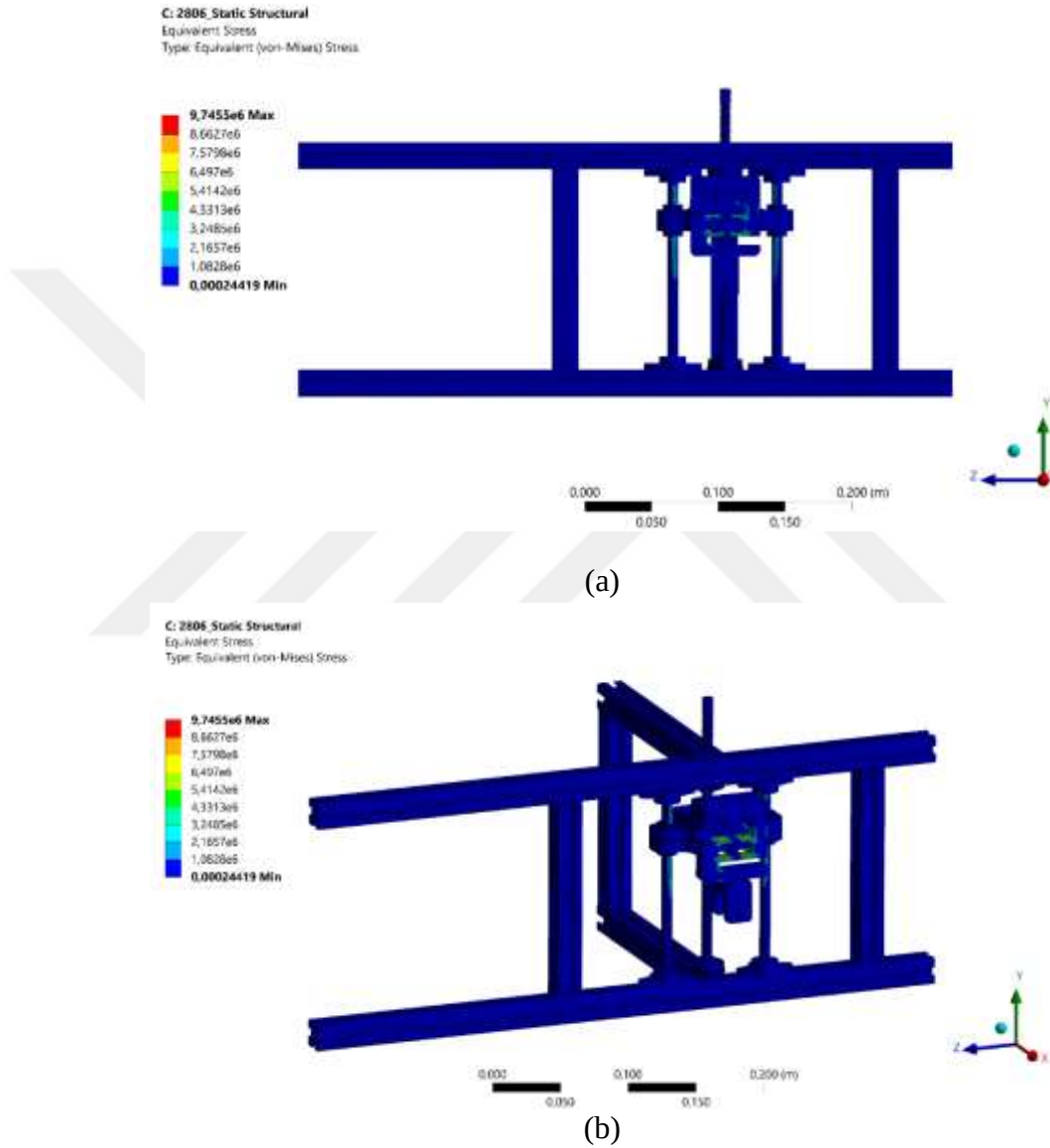
Gergi ünitesi için oluşturulan SEM modeli sonucunda şekil değiştirme, eş değer gerilme ve emniyet katsayıları elde edilmiştir. Bu sınır şartlarında elde edilen deformasyon sonucu *Şekil 17*'de gösterilmektedir. Şekil değiştirmesi, yapının uygulanan yükler altında dayanıklı olduğunu göstermiş ve tasarım kriterlerini karşılamıştır. Analiz sonucunda deformasyon sonucu iyi çıkmıştır.



Şekil 17. Gergi ünitesi şekil değiştirme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü

Von-Mises gerilmesi, bir malzemenin akma sınırına ulaşp ulaşmadığını belirleyen kritik bir parametredir. Boşaltıcı ünitesinde bahsedildiği üzere eşdeğer gerilme, karmaşık üç boyutlu gerilme durumlarını tek bir skaler değerle temsil ederek, malzemenin deformasyon ve akma davranışını öngörmeye yardımcı olur. Gergi ünitesinde, sistem

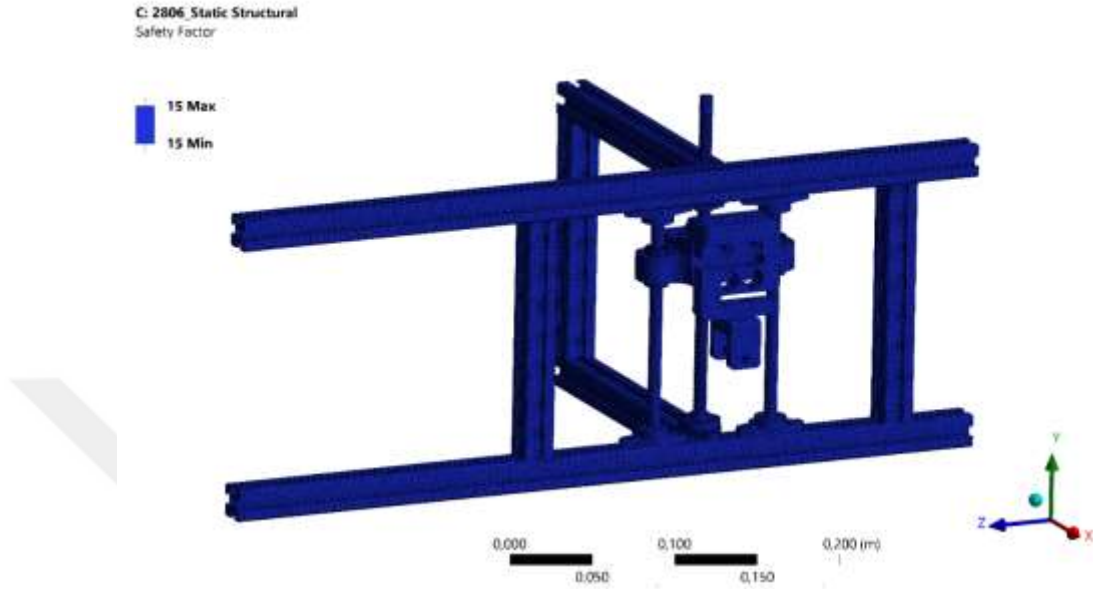
yapısının taşıma kapasitesini ve güvenliğini değerlendirir. Gergi ünitesinin eşdeğer gerilme analizi, malzemelerin yük altında gösterdiği davranışı anlamak ve sistem genelliği açısından bütünlüğü koruyarak malzeme seçiminde kullanılır. Gergi ünitesinin eş değer gerilme analiz sonucu *Şekil 18*'de gösterilmektedir.



Şekil 18. Gergi ünitesinin eş değer gerilme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü

Gergi ünitesine ait toplam deformasyon ve eşdeğer gerilme analiz sonuçlarıyla birlikte elde edilen Emniyet Katsayısı (Safety Factor) değeri, *Şekil 19*'da sunulmaktadır. Analiz sonuçları, sistemin güvenlik sınırları içerisinde çalıştığını doğrulamaktadır. Emniyet Katsayısı değeri, 15 gibi oldukça yüksek bir seviyede bulunmuştur ve bu durum, belirlenen sınır koşulları altında sistemin 15 katına kadar dayanım gösterebildiğini ortaya

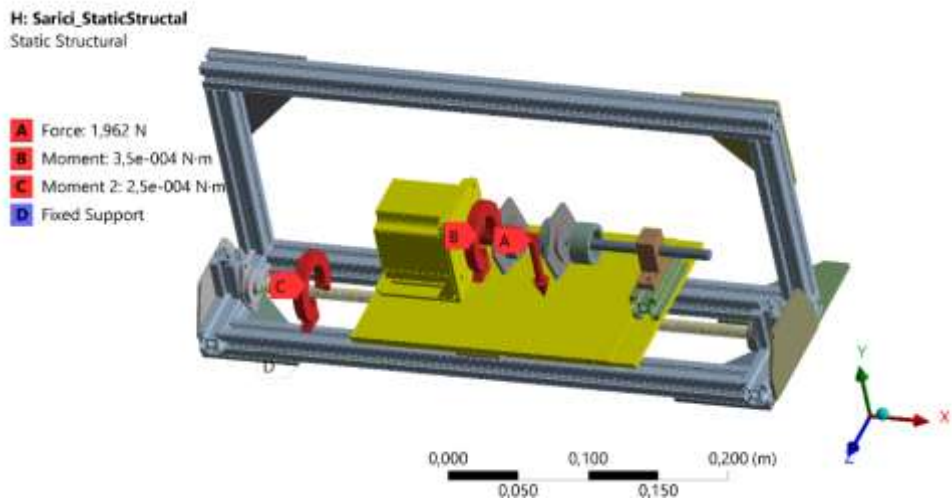
koymaktadır. Sistemin şasisi alüminyum profilden imal edilmiştir ve sistem bütünlüğünün korunması açısından diğer bileşenler de aynı malzeme ile tasarlanmıştır.



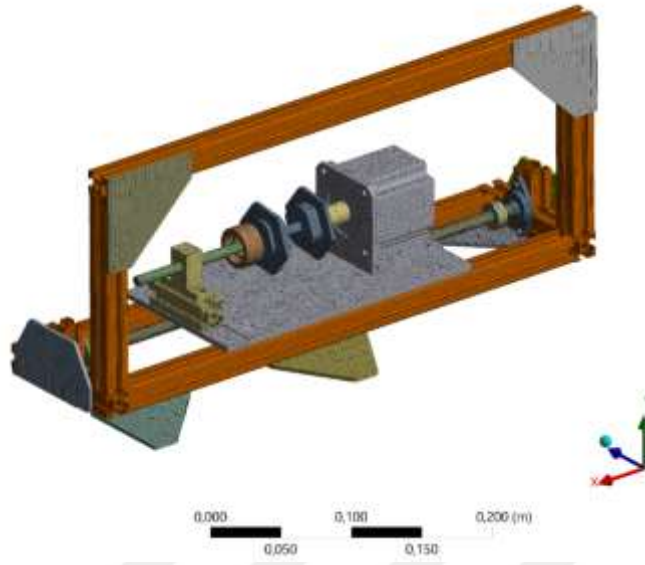
Şekil 19. Gergi ünitesinin emniyet katsayısı değeri

2.2.3. Sarıcı ve Travers Ünitesi Yapısal Analizi

Solidworks programında indirgenmiş olan sarıcı ve travers ünitesinin sınır şartları Şekil 20’de gösterilmiştir. Sarıcı ve Travers ünitesinin mesh yapısı Şekil 21’de gösterilmiştir.

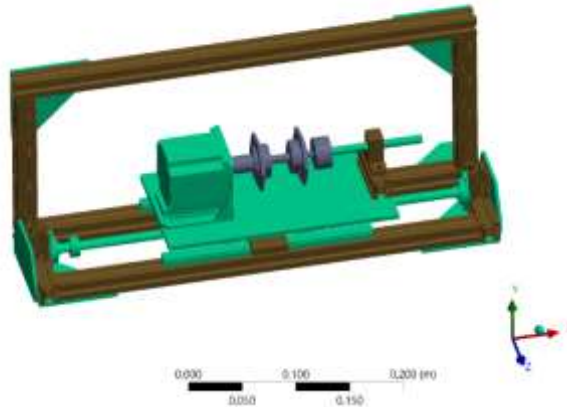


Şekil 20. Sarıcı ve Travers ünitesi sınır şartlarının modeli

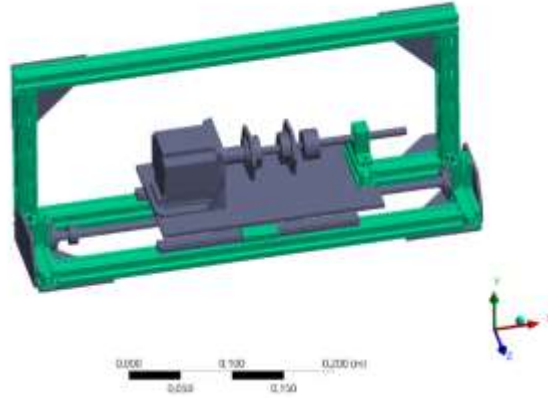


Şekil 21. Sarıcı ve Travers ünitesi mesh modeli

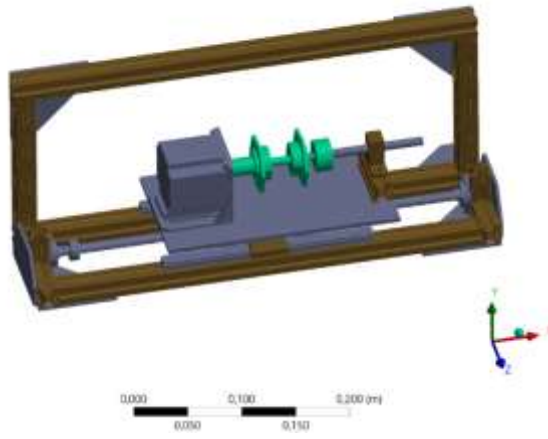
Bu bölümde, model üzerinde oluşabilecek sınır şartları tanımlanmıştır. Bu bölüm üzerinde iki motor bulunduğu için iki adet moment sınır şartları oluşturulmuştur. Modelde, sarılan bobinin ağırlığı da sisteme dâhil edilmiştir. Modelin oluşturulmasında, daha önceki bölümlerde olduğu gibi Çelik, Alüminyum ve ABS olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin model üzerindeki dağılımı ise Şekil 22'de sunulmuştur.



(a)



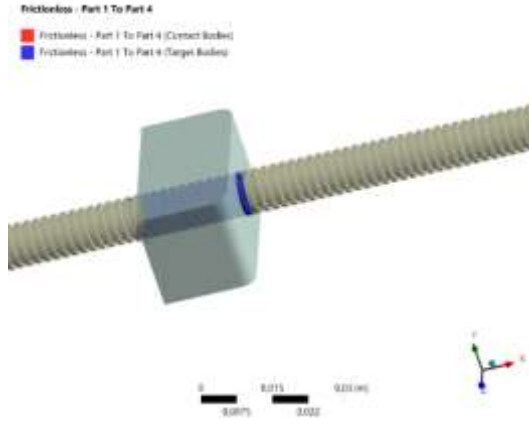
(b)



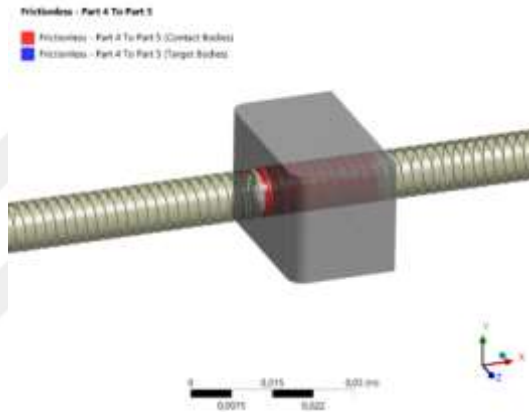
(c)

Şekil 22. Sarıcı ve Travers ünitesi malzeme dağılımı: (a) Çelik malzeme, (b) Alüminyum malzemeler, (c) ABS olan malzemeler

Sarıcı ve Travers ünitesinde, motor momentinin aktarımı sırasında dişliler arasında oluşabilecek kayma göz önünde bulundurularak, dişliler arasında “Frictionless Support” ve milin dönmesinde oluşan sürtünme şartları Şekil 23’te gösterilmiştir. Ayrıca, sistemin yer yüzeyi "Fixed Support" olarak modellenmesi Şekil 24’te gösterilmiştir.

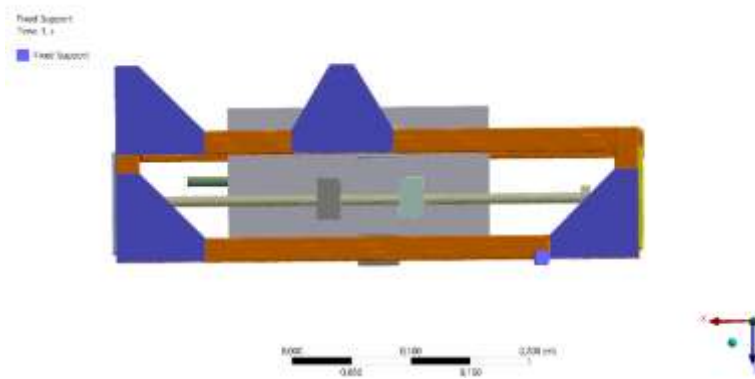


(a)



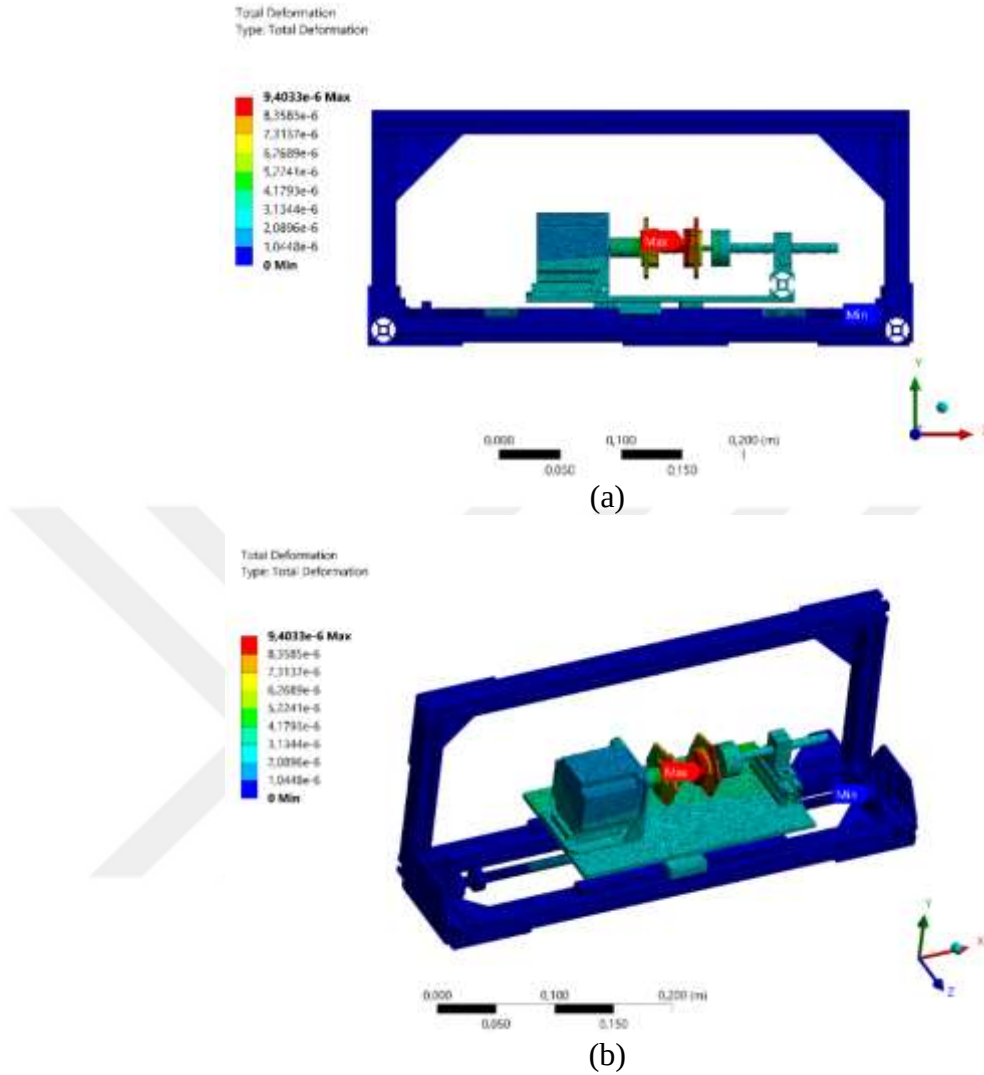
(b)

Şekil 23. Sarıcı ve Travers Ünitesi sürtünme kontakt yapıları



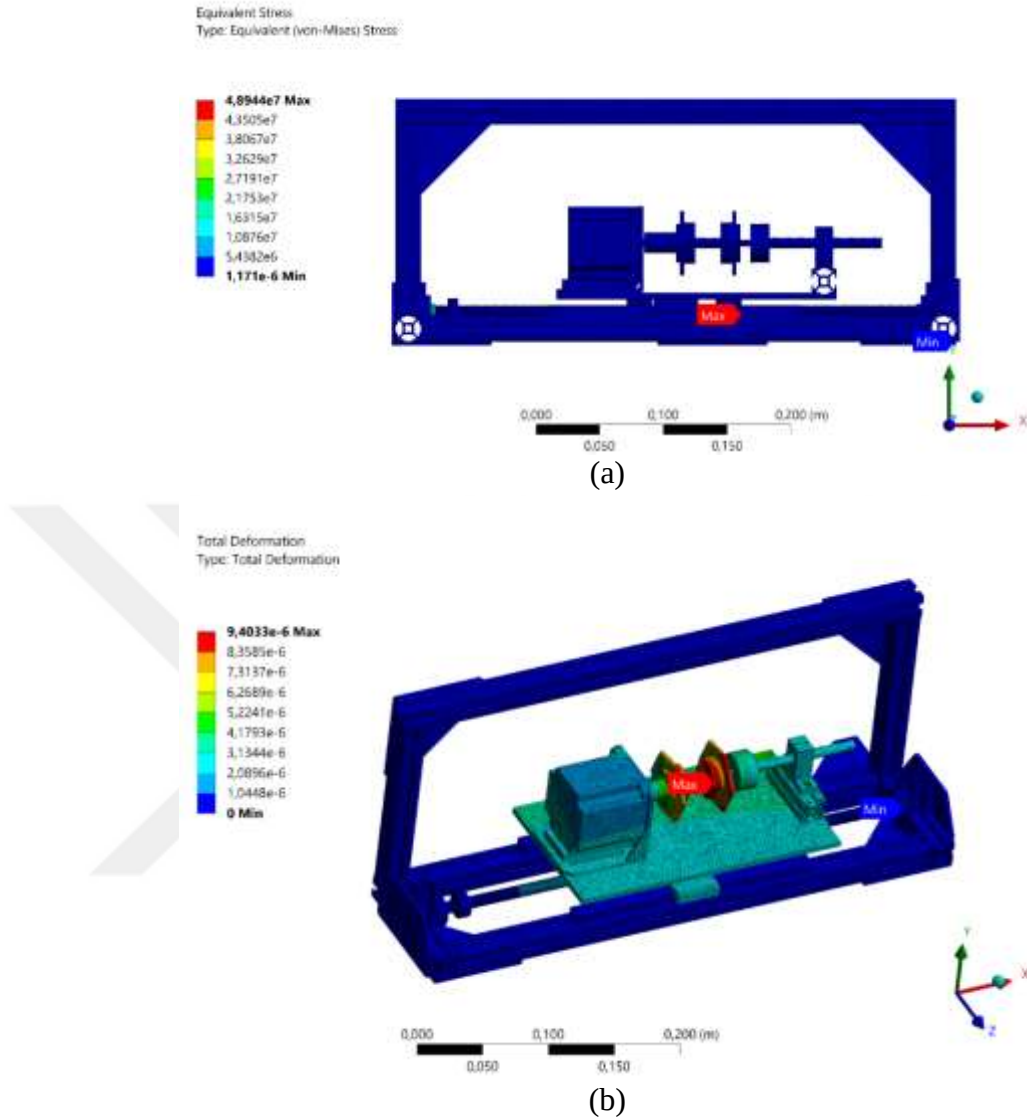
Şekil 24. Sarıcı ve Travers Ünitesi sabit destek kontak yapıları.

Sarıcı ve Travers ünitesi için de oluşturulan SEM modeli sonucunda şekil değiştirme, eş değer gerilme ve emniyet katsayıları elde edilmiştir. Sınır şartlarında elde edilen şekil değiştirme sonucu Şekil 25'te gösterilmektedir.



Şekil 25. Sarıcı ve Travers ünitesi şekil değiştirme değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü

Şekil değiştirme değeri, yapının uygulanan yükler altında dayanıklı olduğunu göstermiş ve tasarım kriterlerini karşılamıştır. Analiz sonucunda şekil değiştirme sonucu iyi çıkmıştır. Bu ünitenin de malzemenin deformasyon ve akma davranışını öngörmek için eş değer gerilme analizi yapılmıştır. Diğer ünitelerde bahsedildiği üzere eşdeğer gerilme malzemenin deformasyon ve akma davranışı, sistem yapısının taşıma kapasitesini ve güvenliğini değerlendirir. Bu ünitenin eş değer gerilme analiz sonucu Şekil 26'da gösterilmektedir.



Şekil 26. Sarıcı ve Travers ünitesinin eş değer gerilme analiz değeri: (a) önden görünüşü, (b) perspektif görünüşü

Sarıcı ve travers ünitesine ait Emniyet Katsayısı (Safety Factor) değeri, Şekil 27’de sunulmaktadır. Analiz bulguları, ünitenin güvenli çalışma sınırları içerisinde faaliyet gösterdiğini doğrulamaktadır. Emniyet katsayısı değeri, sistemin yapısal bütünlük açısından güvenilir bir performans sergilediğini ve öngörülen yükler altında emniyetli bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir. Bu analiz, sistem tasarımının güvenlik standartlarına uygun olduğunu ve potansiyel yük durumlarında herhangi bir yapısal risk taşımadığını ifade etmektedir.



Şekil 27. Sarıcı ve Travers ünitesinin emniyet katsayısı

3. BÖLÜM

GERGİ KONTROL SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ VE KULLANILAN KONTROL YÖNTEMLERİ

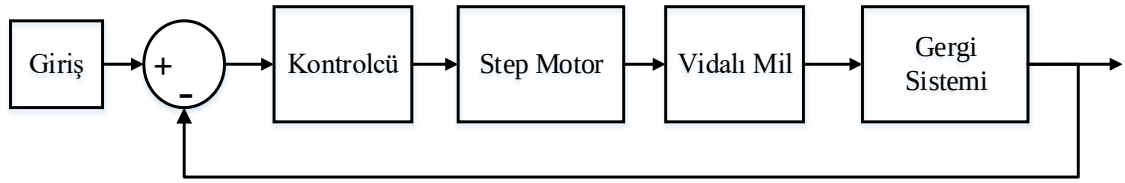
Step motorlar, modern endüstriyel otomasyon sistemlerinde dijital kontrol teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, hassasiyet gerektiren karmaşık süreçlerde hareket kontrolü sağlama kapasitesiyle önemli bir bileşen haline gelmiştir. Sabit adımlarla dönme hareketini yüksek doğrulukla gerçekleştirebilme yeteneği, bu motorların hassas pozisyonlama gerektiren uygulamalarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, yük değişimlerine duyarlılık gibi sınırlamalar, açık çevrim kontrol sistemlerinde motorun hedeflenen konumdan sapmasına yol açabilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, kapalı çevrim kontrol sistemleri devreye girmekte ve motorun mevcut konumunu sürekli izleyerek hata düzeltme mekanizmaları ile doğruluğu artırmaktadır. Bu üstünlükleri sayesinde step motorlar, 3D yazıcılar, lazer kesiciler, robotik sistemler ve otomatik montaj hatları gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyet ve tork gereksinimi duyulan uygulamalarda, step motorlar genellikle vidalı millerle entegre edilerek sistem performansı artırılmaktadır. Vidalı miller, motorun dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürerek mekanik doğruluğu optimize eden ve düşük hızlarda yüksek tork üretme kapasitesine sahip bileşenlerdir. Bu kombinasyon, özellikle doğrusal hareket hassasiyetinin kritik öneme sahip olduğu pozisyonlama sistemlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu tür bütünleşmiş sistemlerin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi, kullanılan kontrol algoritmalarının doğruluğu ve etkinliği ile doğrudan bağlantılıdır. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol algoritmaları, sistemin istenen konuma hızlı ve hassas bir şekilde ulaşmasını sağlayarak etkili ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte, bulanık mantık ve genetik algoritmalar gibi ileri düzey kontrol yöntemleri, özellikle dinamik yapısı karmaşık veya belirsizlik içeren sistemlerde üstün performans

sergileyebilmektedir. Bu algoritmalar, sistem dinamiklerini analiz ederek motor hareketini optimize etmekte ve bu sayede hem hassasiyetin hem de operasyonel verimliliğin artırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmada, step motor ve vidalı mil entegrasyonuna dayalı konum kontrollü sistemlerde kullanılan çeşitli kontrol algoritmalarının performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin transfer fonksiyonları temel alınarak gerçekleştirilen analizlerde, klasik PID kontrolcüler ile bulanık mantık ve genetik algoritma tabanlı ileri düzey kontrol yöntemlerinin avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, endüstriyel otomasyon süreçlerinde hassasiyet ve verimliliği artırmaya yönelik daha etkin kontrol stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, özellikle kapalı çevrim kontrol sistemlerinin, hassasiyet ve doğruluk gerektiren uygulamalarda sağladığı performans iyileştirmelerine odaklanılmıştır.

Bu çalışmada, adım motoruna seri olarak bağlanmış bir vidalı mil sistemi kullanılarak hassas pozisyon kontrolü sağlanması amaçlanmaktadır. Vidalı mil, adım motorunun döner hareketini doğrusal harekete dönüştürerek belirli bir yükün istenen pozisyona taşınmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Sistemin yüksek hassasiyet gereksinimi nedeniyle, kullanılan kontrol yöntemlerinin doğruluk ve kararlılık performanslarının karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, MATLAB PID Tuner ile optimize edilmiş PID parametreleri, bulanık mantık tabanlı PID parametreleri, parçacık sürüşü optimizasyonu ile PID parametreleri, genetik algoritma optimizasyonu ile PID parametreleri kullanılarak sistem performansı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

3.1. Sistemin Matematiksel Modeli

Pozisyon kontrolünün etkin bir şekilde sağlanabilmesi için, sistemin doğru bir şekilde modellenmesi ve bu modele dayalı olarak kontrol parametrelerinin belirlenmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, step motor ve vidalı milin etkileşimini içeren mekanik sistemin dinamik modeli oluşturulmuş ve buna bağlı olarak sistemin transfer fonksiyonu türetilmiştir. Elde edilen bu model, kontrol yöntemlerinin uygulanabilirliğini değerlendirmek ve sistemin optimum performansını sağlayacak parametrelerin tespit edilmesi amacıyla bir referans olarak kullanılmaktadır. Çalışmaya konu olan sistemin kapalı çevrim modeli, *Şekil 28*'de sunulmuştur.



Şekil 28. Sistemin kapalı çevrim modeli

Step motorun dinamik denklemi, referans alınan çalışmada tanımlanmış olup Denklem 6’de sunulmuştur. Bu sistem modeline dayanarak, step motorun hareketini takip eden vidalı milin konumundaki değişim matematiksel olarak analiz edilmiş ve sonuçlar sırasıyla Denklem 8 ve Denklem 9’da ifade edilmiştir [14, 25].

$$J \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} + D \frac{d \theta_2}{dt} + \frac{p L_a i_a^2}{2} \theta_2 - \frac{p L_a i_a^2}{2} \theta_1 = 0 \quad (6)$$

Denklem 6’ya Laplace Dönüşümü uygulandığında, Denklem 7’de gösterildiği gibi elde edilir.

$$\left(J s^2 + D s + \frac{p L_a i_a^2}{2} \right) \theta_2(s) = \frac{p L_a i_a^2}{2} \theta_1(s) \quad (7)$$

Böylelikle, step motorun transfer fonksiyonu Denklem 8 ile ifade edilmektedir.

$$G(s) = \frac{\text{Çıkış}}{\text{Giriş}} = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = \frac{\frac{p L_a i_a^2}{2}}{J s^2 + D s + \frac{p L_a i_a^2}{2}} \quad (8)$$

Vidalı milin transfer fonksiyonu, mile bağlı olan motorun doğrusal yer değiştirmesi üzerindeki etkisini modelleyen ikinci dereceden bir sistem davranışdır. Vidalı milin dinamik denkleminde elde edilen transfer fonksiyonu Denklem 9’da verilmiştir [26-28]. Sistemde salınım hareketi olmadığından yay katsayısı sıfır olarak alınmıştır. Sistemdeki tüm parametrelerin değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

$$\frac{X(s)}{\theta_2(s)} = \frac{1}{J_v s^2 + B s} \quad (9)$$

Vidalı milin çıkışı sistemin eksenel yer değiştirmesi olarak elde edilmiştir. Gergi kontrolünün yapılabilmesi için Newton denklemini kullanarak çıkışı kuvvet birimine

dönüştürülmüştür. Denklem 10’da verilen ifadenin Laplace dönüşümü alındığında Denklem 11 elde edilmektedir. Sistem çıkışı kuvvet olacak şekilde oluşturulan model Denklem 12’de gösterilmiştir [29, 30].

$$F = m \ddot{X} \quad (10)$$

$$F(s) = m s^2 X(s) \quad (11)$$

$$\frac{F(s)}{X(s)} = m s^2 \quad (12)$$

Tablo 2. Sistem parametrelerini değerleri

Step motorun parametre değerleri		Vidalı milin parametre değerleri	
p	2	A:	4
L_a	1.02E-3	m:	0.3
i_a	2	b:	4.40E-3
J_m :	0.000002	D:	0.00013
J_v :	2.1e-3		

Belirtilen parametreler kullanılarak oluşturulan sistem modeli, modern kontrol tekniklerinde tanımlandığı şekilde bir sistem olarak ele alınmıştır.

3.2. Sistemin kontrolü ve kullanılan yöntemler

Bir kontrolörün temel görevi, sistemi istenen duruma minimum hata ile sorunsuz bir şekilde yönlendirecek uygun komut dizilerini tasarlamaktır. Karmaşık sistemlerde yönetim denklemleri genellikle doğrusal olmayan yapıya sahiptir ve farklı sönümler etkilere maruz kalır. Bu durum, kontrol edilen sistem denklemlerinin analitik olarak çözülmesini zorlaştırmakta ve kontrolör tasarımında doğrusal olmayan özelliklerin etkin bir şekilde dikkate alınmasını gerektirmektedir [31, 32]. Sistemin matematiksel modellemesi tamamlandıktan sonra, farklı kontrol algoritmalarının performanslarını değerlendirmek amacıyla yedi farklı yöntem uygulanmıştır. İlk olarak, standart PID (Oransal, Tümler, Türevsel) kontrol algoritması kullanılarak sistem davranışı incelenmiştir. MATLAB yazılımındaki PID Tuner aracı ile optimize edilmiş PID parametreleri kullanılarak kontrol gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntem olarak, parçacık sürü optimizasyonu ile belirlenen PID parametreleri uygulanmıştır. Üçüncü yöntem genetik algoritma ile optimize edilmiş PID parametrelerini içermektedir. Dördüncü

yöntem, sliding mode kontrol tekniğiyle sistemi kontrol etmeye odaklanmıştır. Beşinci olarak, bulanık mantık tabanlı (Fuzzy Logic) kontrol yöntemi uygulanmıştır. Son olarak, Fuzzy Logic ve PID algoritmalarını birleştiren hibrit bir kontrol yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemlerin her biri, step motorun ve vidalı milin transfer fonksiyonları kullanarak geliştirilen konum kontrollü sistemde dinamik performansını iyileştirme potansiyeli açısından karşılaştırılmıştır.

3.2.1. PID Kontrol

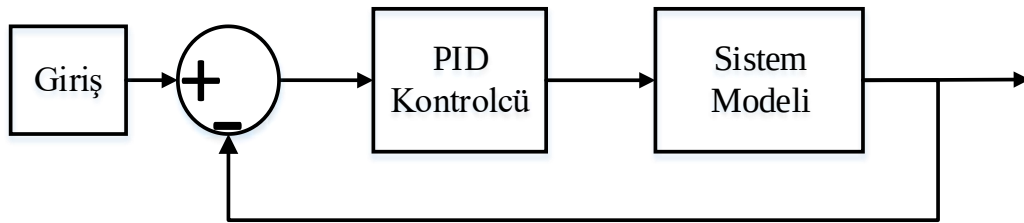
PID kontrol (Proportional-Integral-Derivative) algoritması, modern kontrol teorisinin en temel ve en yaygın uygulama alanlarından birini teşkil eden, sistemlerin kararlı ve hassas bir şekilde çalışmasını sağlayan klasik bir yöntemdir [33]. Bu algoritma, bir sistemin kontrol edilebilirliğini artırmak ve hedeflenen referans değerine ulaşmasını sağlamak amacıyla, geribesleme mekanizmasıyla hata sinyalini minimize edecek bir kontrol fonksiyonu sağlar [34, 35]. PID kontrolörler, oransal, integral ve türev bileşenlerinin kombinasyonlarıyla kontrol sinyalini oluşturur. Bu yapı, yalnızca sistem dinamiklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda sürekli durum hatalarını azaltarak sistem performansını artırır [36, 37].

PID kontrolörün üç temel bileşeni şu şekilde tanımlanabilir:

1. **Oransal (P):** Hatanın büyüklüğüne orantılı bir tepki üreterek hızlı bir dinamik yanıt sağlar. Oransal kazanç arttıkça sistemin tepkisi hızlanır; ancak, yalnızca oransal kontrol kullanımı genellikle sistemde sürekli hata bırakır ve yüksek kazanç durumunda kararsızlığa yol açabilir.
2. **İntegral (I):** Zaman içerisinde hatanın birikimini hesaplayarak sürekli durum hatasını sıfırlamayı hedefler. Bu bileşen, sistemin uzun vadeli doğruluğunu artırır; ancak, aşırı integral kazancı durumunda salınımlar artabilir ve kararlılık tehlikeye girebilir.
3. **Türev (D):** Hatanın değişim hızına yanıt vererek, sistemin ani değişikliklere karşı duyarlılığını artırır ve geçici durum yanıtını iyileştirir. Türev etkisi, sistemin aşırı salınım yapmasını engeller ve daha düzgün bir kontrol sağlar; ancak, bu bileşen sistem gürültüsüne karşı duyarlıdır ve dikkatli bir tasarım gerektirir.

PID kontrol algoritması, lineer kontrol problemlerinde etkili bir çözüm sağlayan, uygulama kolaylığı ve genişletilebilirliği nedeniyle hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir [36]. Oransal, integral ve türev bileşenlerinin çeşitli kombinasyonlarıyla (P, PI, PD, PID) farklı kontrolcü tipleri elde edilebilir ve bu kombinasyonlar sistem dinamiklerine uygun şekilde ayarlanarak optimize edilebilir [38-40].

PID kontrolörün tasarımı, özellikle dinamik sistemlerin kararlılık ve geçici yanıt parametrelerinin iyileştirilmesi açısından, hassas bir ayar süreci gerektirir. Parametrelerin (oransal kazanç K_P , integral kazanç K_I , türev kazanç K_D) doğru belirlenmesi, sistem performansının istenen hedeflere uygun bir şekilde optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir [41, 42]. Bu bağlamda, PID kontrolörler hem teorik analizler hem de gerçek zamanlı uygulamalar için güçlü bir araç sunar. Endüstriyel süreçlerden otonom sistemlere, robotik uygulamalardan enerji yönetim sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanına sahip olan PID kontrolörler, kontrol mühendisliğinde etkili, güvenilir ve esnek çözümler sağlamaya devam etmektedir. Bu tez kapsamında, PID kontrol algoritmasının temel dinamikleri incelenmiş ve farklı uygulamalarda performans iyileştirme süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. *Şekil 29*'da PID kontrolcü ile kontrol edilen kapalı döngü geri beslemeli sistem gösterilmiştir. Giriş fonksiyonu olarak, birim basamak fonksiyonu seçilmiştir. Hata sinyali ($E(s)$), referans alınan (Giriş sinyali) ile çıkış sinyalinde oluşan farktır.

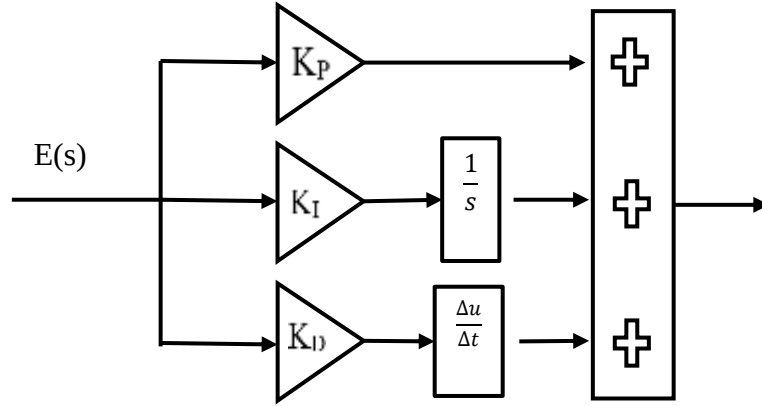


Şekil 29. PID kontrolcüsünün çalışma modeli

PID'nin genel matematiksel bağıntısı Denklem 13 ve Denklem 14'te gösterilmiştir [43-45]. Denklem 13'e göre modellenen PID bloğu *Şekil 30*'da gösterilmiştir.

$$G(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (13)$$

$$G(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (14)$$



Şekil 30. PID bloğu modeli

3.2.2. PID Tuner

MATLAB programının PID Tuner modülü, modern kontrol mühendisliğinde sıkça başvurulan güçlü bir araç olarak, özellikle PID kontrol parametrelerinin optimize edilmesi sürecinde kritik bir rol üstlenmektedir. PID Tuner, sezgisel bir kullanıcı ara yüzü ve güçlü algoritmalar sunarak, karmaşık dinamik sistemlerde etkili bir PID kontrolcü tasarımı mümkün kılmaktadır [46]. Bu araç, kontrol mühendislerinin sistem dinamiklerini anlamasına ve kontrol performansını optimize etmesine yardımcı olan kapsamlı bir platform sağlamaktadır [47]. PID Tuner modülünün temel işlevlerinden biri, bir sistemin frekans yanıtı gibi dinamik özelliklerini analiz ederek, sistemin performansına ilişkin belirli kriterlere göre başlangıç PID parametrelerini otomatik olarak belirlemektir. Örneğin, geçici durum cevabı (Transient Response) ve tepki süresi (Response Time) gibi ölçütler bu analiz sürecinde önemli bir rol oynar. Tepki süresi, kontrol edilen sistemin referans bir set değerine ne kadar hızlı ulaştığını ifade ederken; geçici durum cevabı, sistemin aşım, sönüm oranı ve dinamik hız gibi özelliklerini incelemektedir [48]. PID Tuner, bu tür performans parametrelerini dikkate alarak başlangıç ayarlarını belirler ve kontrol tasarım sürecini önemli ölçüde hızlandırır. PID Tuner'ın bir diğer avantajı, kullanıcı dostu bir ayarlama esnekliği sunmasıdır [49]. Kullanıcı ara yüzünde, hız, doğruluk ve kararlılık gibi performans özellikleri arasında bir denge kurmak için modül tarafından sağlanan ayar kaydırıcılarını ve grafik tabanlı araçları kullanabilir [50]. Bu sayede, kontrolcü tasarımı süreci yalnızca daha verimli hale gelmekle kalmaz, aynı zamanda farklı çalışma koşullarına göre yeniden uyarlanabilirlik

imkânı da sağlar [46]. Geleneksel deneme-yanılma yöntemlerine veya karmaşık teorik hesaplamalara dayalı yaklaşımlara kıyasla, PID Tuner, otomasyon ve süreç kontrolü gibi uygulama alanlarında mühendislerin işini büyük ölçüde kolaylaştırır [51]. Endüstriyel otomasyon, robotik, süreç kontrolü ve akademik çalışmalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan PID Tuner, aynı zamanda araştırma ve geliştirme süreçlerinde de sıklıkla tercih edilmektedir. Araç, kontrol sistemleri tasarımındaki çok boyutlu gereksinimleri karşılamak için etkili bir çözüm sunarak, mühendislerin sistem davranışını hem analitik hem de deneysel yöntemlerle iyileştirmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, MATLAB PID Tuner modülü, kontrol sistemleri mühendisliğinde yalnızca bir tasarım ve optimizasyon aracı değil, aynı zamanda kullanıcıların kontrol performansını daha hızlı ve etkili bir şekilde artırmasına yardımcı olan kapsamlı bir destek platformu olarak değerlendirilmektedir [52]. Bu özellikler, PID Tuner'ın günümüzde modern kontrol sistemlerinin vazgeçilmez bileşenlerinden biri haline getirmiştir.

3.2.3. Fuzzy Logic (Bulanık Mantık) Kontrolü

Bulanık mantık, insan düşünme ve karar verme süreçlerinin bilgi tabanlı sistemlerde uygulanabilmesine olanak sağlayan bir çıkarım yöntemidir. Bu yaklaşım, 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından önerilmiş ve belirsizliklerin veya eksik bilgilerin olduğu durumlarda etkili bir şekilde çalışmasıyla geniş bir uygulama alanı bulmuştur [53, 54]. Bulanık mantık, modern bilgisayarların dayandığı ikili "doğru veya yanlış" (1 veya 0) Boolean mantığından farklı olarak, "doğruluk dereceleri" temelinde hesaplama yapar. Klasik mantıkta, "Her önerme ya doğrudur ya da yanlıştır" varsayımı geçerlidir [55]. Hâlbuki ölçümlerin temel sınırlamalarından dolayı, bazı önermelerin doğruluk değerleri belirsiz olabilmektedir [56]. Bu durumda bulanık mantık, iki önerme arasında belirsizlik adı verilen bir önerme ortaya koymuştur. Böylece, klasik mantıkta doğru ve yanlış olan doğruluk değerleri, bulanık mantıkta daha esnek hale getirilmiştir [57]. Bulanık mantık kontrolcüsü, dilsel kontrol kuralları ve kesin verilere dayalı olarak çalışan bir sistemdir [58]. Bu sistem, bilgiyi bulanık kümelerle dönüştüren bir bulanıklaştırma ara yüzü, uzman bilgisi ve kontrol kurallarını içeren bir bilgi tabanı, bilgi tabanından elde edilen sonuçları işleyen bir çıkarım mekanizması ve elde edilen bulanık kontrol sinyalinin sayısal bir değere dönüştüren bir durulaştırma ara yüzü gibi birimlerden oluşur. Bulanık mantık, nesnelerin bir kümeye belirli bir üyelik derecesiyle ait olmasını sağlar. Örneğin, bir hava sıcaklığı aynı anda hem "serin" hem de "ılık" olarak değerlendirilebilir ve bu durum, üyelik

dereceleriyle ifade edilir [59]. Bu yaklaşım, klasik mantığın yetersiz kaldığı insan zekâsı gerektiren problemler için etkili bir çözüm sunar.

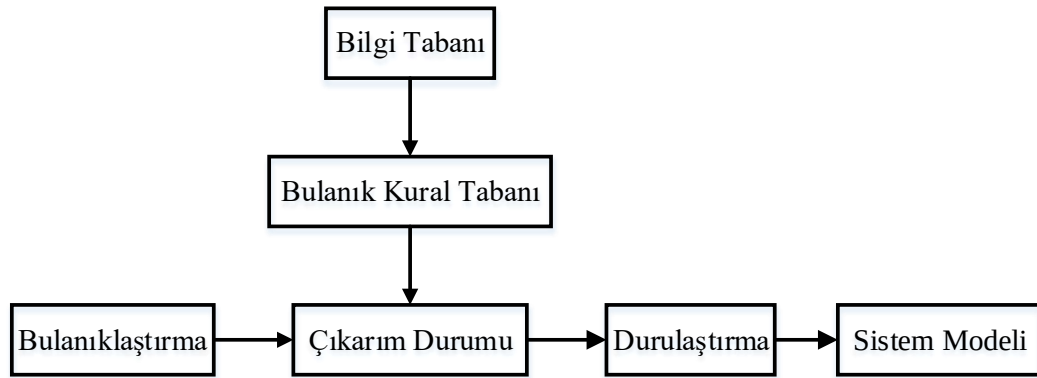
Bulanık Sistemler ve Çıkarım Süreci:

Bulanık sistemler, giriş değişkenlerinden çıktı değişkenlerini elde etmek için bulanık küme ilkelerini kullanır. İnsan deneyimlerinin ve dilsel ifadelerin modele dahil edilmesiyle çözüm sağlanır. Bu sistemler, "Eğer... ise..." kuralları temelinde çalışır ve bu kuralların öncül kısmı, giriş değişkenlerinin tanımladığı koşulları ifade ederken, sonucun bağlı olduğu çıkış değişkenlerini içerir.

Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcünün Birimleri:

1. **Bilgi Tabanı:** Girdi değişkenlerini ve bu değişkenlerle ilgili tüm bilgileri içerir. Veriler sayısal veya dilsel olabilir. Bu bileşen, uzman bilgilerini ve kontrol kurallarını içerir. Kurallar, sistemin davranışını tanımlayan "Eğer ... ise ..." yapılarını kullanır. Örneğin, "Eğer sıcaklık çok yüksekse, soğutmayı artır" gibi bir kural, sıcaklık ve soğutma arasındaki ilişkiyi ifade eder.
2. **Bulanıklaştırma Ara yüzü:** Sayısal giriş değerlerini bulanık kümelerle dönüştürür ve bu kümelerdeki üyelik derecelerini belirler. Örneğin, bir sıcaklık değeri (örneğin 35°C), "ılık" ve "sıcak" kümelerine farklı üyelik dereceleriyle atanabilir.
3. **Bulanık Kural Tabanı:** Girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkileri "Eğer... ise..." kurallarıyla tanımlar. Bu kurallar, girdi uzayını çıktı uzayına bağlar. Bu bileşen, giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişkileri tanımlayan tüm bulanık kuralları içerir. Bu kurallar, giriş uzayını çıktı uzayına bağlayan bir köprü görevi görür.
4. **Çıkarım Mekanizması:** Bulanık kural tabanındaki ilişkileri birleştirerek sistemin nasıl bir davranış göstereceğini belirler. Bu mekanizma, sistemin dinamik bir şekilde karar almasını sağlar.
5. **Durulaştırma Ara yüzü:** Bulanık sonuçları sayısal değerlere dönüştürerek sistemin somut bir çıktı üretmesini sağlar.

Bulanık mantık kontrolcüsünün işlem adımları *Şekil 31*'de gösterilmiştir [60].



Şekil 31. Bulanık mantık akış diyagramı

Bulanık mantık tabanlı kontrol sistemleri, belirsizliklerin yönetiminde, karmaşık sistemlerin modellenmesinde ve dilsel ifadelerle dayalı kontrol gereksinimlerinde önemli avantajlar sunar [61].

3.2.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO), 1995 yılında Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından geliştirilmiş, popülasyon tabanlı sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır [62]. Algoritma, kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek tasarlanmıştır. Özellikle düşük bellek gereksinimi, basit yapısı ve uygulanabilirliği, PSO'nun diğer evrimsel ve matematiksel yöntemler arasında öne çıkmasını sağlamaktadır. Algoritma, az sayıda parametre gereksinimi ile hızlı bir şekilde çözüm üretme kapasitesine sahip olup, global arama yeteneği sayesinde çok boyutlu optimizasyon problemlerinde etkili sonuçlar elde edebilmektedir. Bu özellikleri PSO'yu mühendislik, yapay zekâ, kontrol sistemleri ve veri madenciliği gibi birçok alanda popüler bir araç haline getirmiştir[63, 64].

PSO algoritmasının temel dinamikleri, sürü içindeki bireylerin (parçacıkların) sosyal davranışları üzerine kuruludur [65]. Bu davranışlar üç ana prensipten oluşmaktadır:

1. **Kendi en iyisine yönelim:** Her bir parçacık, geçmişteki deneyimleri doğrultusunda elde ettiği en iyi konuma (personal best, p_{best}) doğru hareket eder.
2. **Sürünün liderini takip:** Parçacıklar, sürüdeki en iyi çözümü temsil eden parçacığın (global best, g_{best}) konumunu izler.

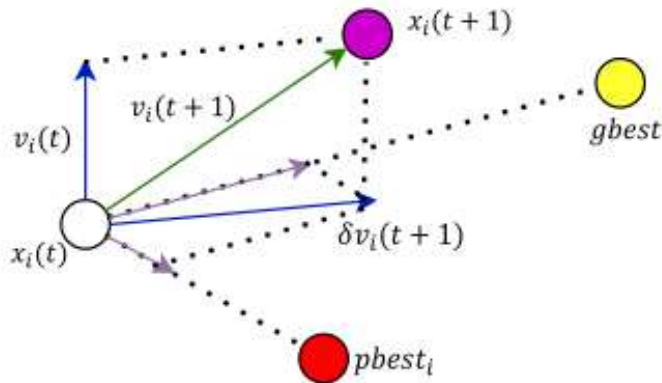
3. **Hareket devamlılığı:** Parçacıklar, önceki hız değerlerine dayalı olarak hareketlerini sürdürür ve bu sayede geniş bir çözüm alanını tarayabilir.

Bu davranışlar, PSO algoritmasının keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) arasında dengeli bir şekilde çalışmasını sağlar. Algoritmada, her parçacık hız (v) ve konum (x) değerleri ile tanımlanır [66]. Hız değerleri, sürü içindeki bireylerin birbirleriyle etkileşimlerini ve çevresel koşullara adaptasyonunu temsil eder [67, 68]. PSO algoritmasının uygulama süreci, rastgele belirlenmiş bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlar. Popülasyondaki her birey, problem uzayındaki bir çözümü temsil eder. Algoritma, her iterasyonda parçacıkların hız ve konumlarını güncelleyerek global optimuma ulaşmayı hedefler. Hız ve konum güncellemeleri, Denklem 15 ve Denklem 16'da gösterilmiştir [69, 70].

$$v_i(t+1) = w * v_i(t) + c_1 r_1 (p_{best,i} - x_i(t)) + c_2 r_2 (g_{best,i} - x_i(t)) \quad (15)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (16)$$

Burada w , ataleti temsil eder ve algoritmanın keşif ile sömürü arasındaki dengesini sağlar. C_1 ve C_2 , sırasıyla bireysel ve sosyal öğrenme faktörleridir. r_1 ve r_2 ise rastgele sayı jeneratörlerinden elde edilen değerlerdir. Şekil 32'de PSO algoritmasında denklemlerin dağılımı gösterilmiştir [71].



Şekil 32. PSO algoritması için evrimsel denklemlerin gösterimi

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), başlangıçta rastgele oluşturulmuş bir çözüm kümesinden hareketle çalışan popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Bu çözüm kümesi, optimizasyon yapılacak problem için potansiyel çözüm değerlerini içerir. Algoritma, her iterasyonda parçacıkların konumlarını ve hızlarını güncelleyerek, sürü içerisindeki en iyi bireysel çözüm (*pbest*) ile tüm sürünün en iyi çözümü (*gbest*) üzerinden iyileştirme gerçekleştirir. PSO'da popülasyon, “n” adet parçacıktan ve her bir parçacığın “D” boyutlu bir parametre vektöründen oluşur. Bu bağlamda, popülasyon matrisi Denklem 17’deki gibi ifade edilir [72].

$$X = \begin{matrix} & X_{11} & X_{12} & X_{1,D} \\ X = & X_{2,1} & X_{2,2} & X_{2,D} \\ & X_{n,1} & X_{n,2} & X_{n,D} \end{matrix} \quad (17)$$

Bu matris içerisinde, $X_{i,j}$, i-inci parçacığın j-inci boyuttaki değerini temsil eder. İlgili optimizasyon problemine uygulanan bu değerler, denetleyici parametreleri olan K_p , K_i ve K_D gibi denetleyici katsayıları için rastgele başlatılmış başlangıç değerleridir. Her bir parçacığın hareketi, hız vektörü (V) ile tanımlanır. Bu hız vektörü, parçacıkların mevcut konumlarının iyileştirilmesi için yapılan güncellemeleri Denklem 18’deki gibi ifade eder [72].

$$V = \begin{matrix} & V_{11} & V_{12} & V_{1,D} \\ V = & V_{2,1} & V_{2,2} & V_{2,D} \\ & V_{n,1} & V_{n,2} & V_{n,D} \end{matrix} \quad (18)$$

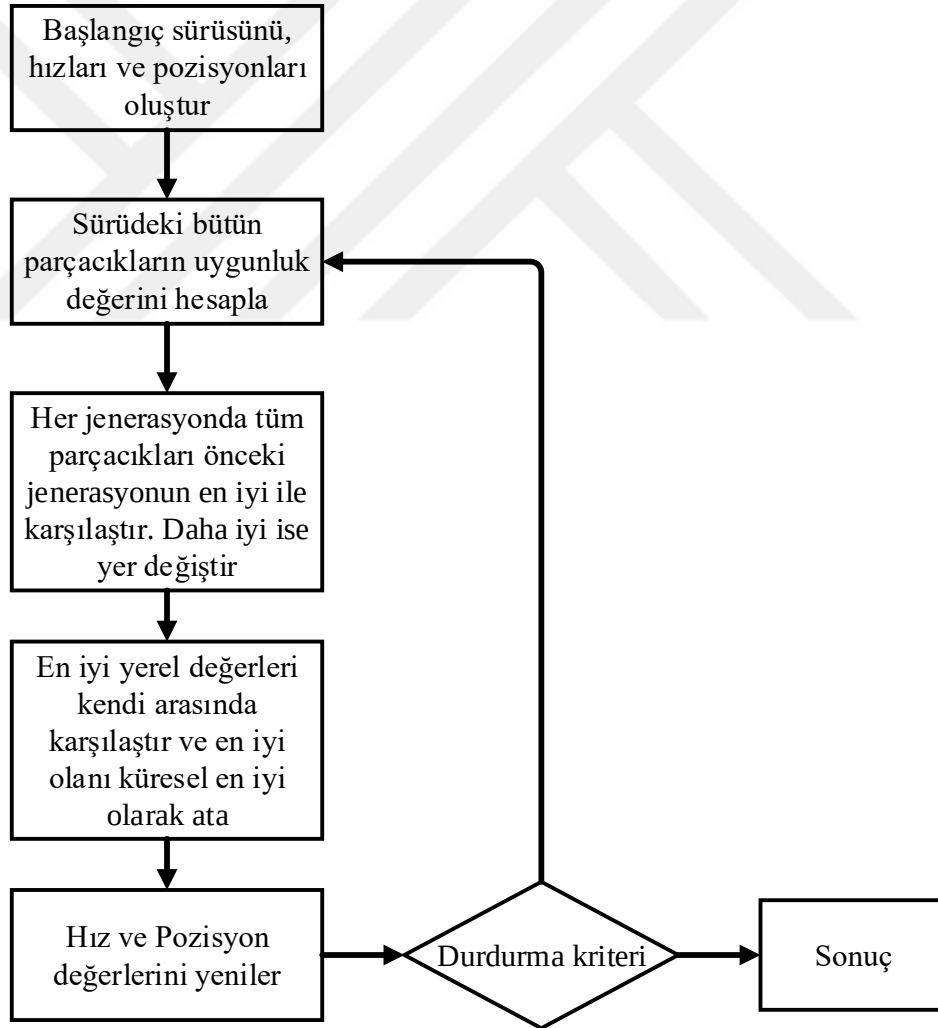
Bu hız vektörü, her bir iterasyonda algoritmanın hem bireysel en iyi konumunu (P_i) hem de sürünün genel en iyi konumunu (g_i) dikkate alarak güncellenir. En iyi konum, her parçacık için D- boyutlu bir dizisi Denklem 19’da gösterilirken tüm parçacıklar içinse $n \times D$ boyutunda Denklem 20’deki matris oluşmaktadır [73]. Bu süreç, algoritmanın global ve lokal optimizasyon yeteneklerini birleştirmesine olanak tanır. PSO'nun bu mekanizması, denetim sistemlerinde PID parametrelerinin optimizasyonu gibi uygulamalar için oldukça etkilidir [67].

$$p_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iD}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (19)$$

$$p = \begin{matrix} p_{11} & p_{12} & p_{1,D} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,D} \\ p_{n,1} & p_{n,2} & p_{n,D} \end{matrix} \quad (20)$$

P matrisi, parçacıkların o ana kadar elde ettikleri en iyi konum bilgilerini içerir ve optimize edilecek parametrelerin her biri için en iyi konum bilgisi ise tüm sürünün global en iyi konumunu oluşturur ve sürünün önceki deneyimini ifade eder. Global en iyi konum D-boyutlu bir dizi ile Denklem 21’de olduğu gibi gösterilir. Denklemler sonucun PSO algoritmasının akış diyagramı Şekil 33’te gösterilmiştir.

$$g_i = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_D) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (21)$$



Şekil 33. PSO Algoritması akış diyagramı

3.2.5. Genetik Algoritmayla PID Optimizasyonu

Genetik algoritmalar (GA), biyolojik evrim süreçlerini taklit ederek geniş ve karmaşık çözüm uzaylarında optimizasyon gerçekleştiren, evrimsel hesaplama yöntemlerinin en popüler türlerinden biridir [65]. İlk olarak John Holland tarafından önerilen bu algoritma, mühendislik, yapay zekâ ve kontrol sistemleri gibi çok sayıda disiplinde uygulanmaktadır [74, 75]. PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörleri, endüstride geniş kullanım alanına sahip bir kontrol yöntemidir ve doğru parametrelerle optimize edildiklerinde sistem performansını belirgin ölçüde artırır. Geleneksel PID parametre ayar yöntemleri, karmaşık sistemlerde genellikle yetersiz kalmakta ve optimizasyon süreçleri yerel minimumlara sıkışabilmektedir [76, 77]. Bu nedenle, küresel bir arama kabiliyeti sunan genetik algoritmalar, PID kontrolör optimizasyonunda etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [78].

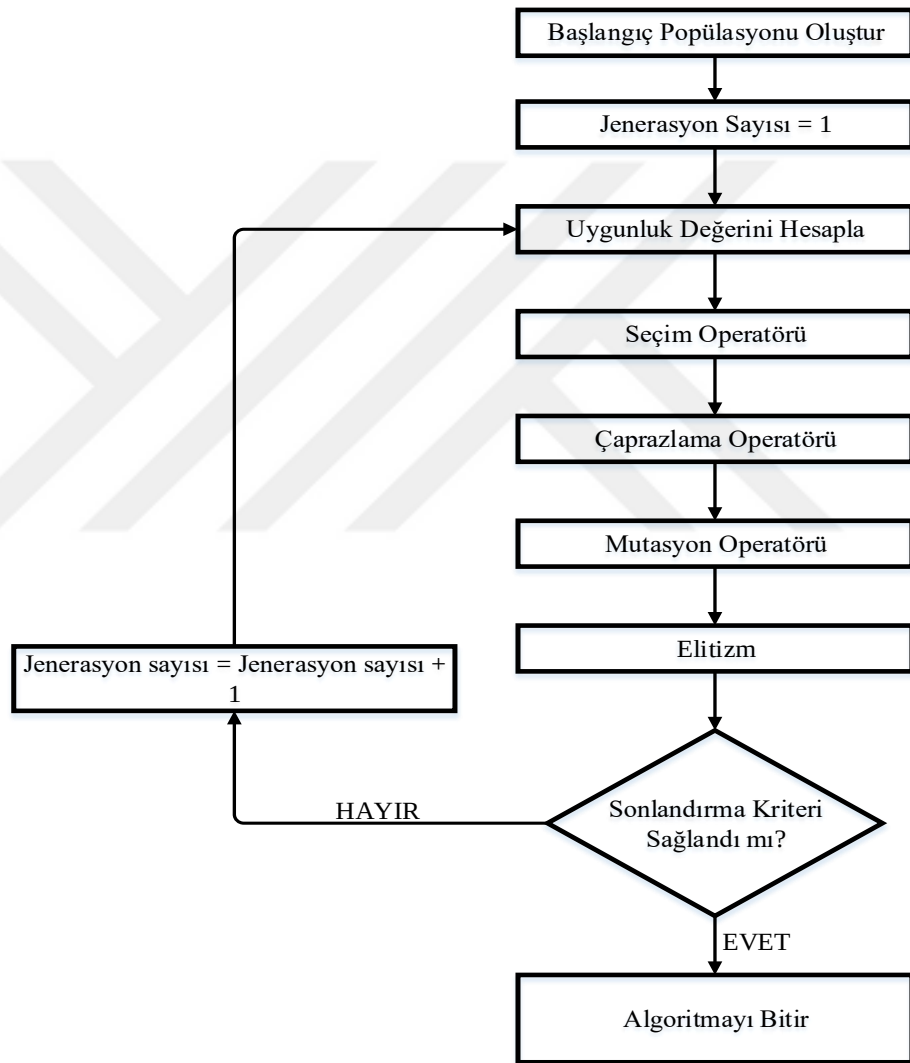
Evrimsel algoritmaların bir alt kolu olan genetik algoritmalar, biyolojideki gen çaprazlaması ile yeni bireylerin oluşmasından esinlenilerek kurulmuş bir optimizasyon metodudur. Temel olarak, bir başlangıç popülasyonundaki elemanların çaprazlanması sonucunda, oluşan bireylerin önceki popülasyondaki en iyi özellikleri kendinde toplaması sayesinde en iyi değerin elde edilmesi amaçlanır. Bu çaprazlama süreci birden fazla kez gerçekleştirilir. Sonuçların istenen kriterleri sağlayıp sağlamadığı değerlendirilir. Eğer sağlamıyorsa popülasyonun seçilen elemanlarıyla çaprazlama devam eder. Çaprazlama sırasında sonuçların belirli bir alanda yığılıp kalmasının önüne geçmek ve popülasyonun çeşitliliğini sürdürmek için mutasyon işlemine başvurulur. Mutasyonun sürekli ya da sıklıkla kullanılması, bireylerin yapısını rastgele değiştirdiği için, sonuç değerlerinin kötüleşmesine sebep olabilir. Bunun için mutasyon her iterasyonda gerçekleştirilen bir aşama değildir. GA'nın bir diğer önemli özelliği de tek bir çözüm ile uğraşmayıp bir grup çözümle uğraşmasıdır. Bu sayede çok sayıda elde edilen çözüm içinden iyiler seçilip kötüler elenmektedir [79]. Genetik algoritmanın en büyük avantajlarından biri, en iyiyi arama sürecini farklı noktalardan başlatması sayesinde yerel minimum noktalarına takılmamasıdır [80]. Bu sayede hedef fonksiyon yüzeyindeki en düşük değere ulaşmak mümkün olmaktadır. Evrimsel hesaplama yöntemlerinin en etkili türlerinden biri olan genetik algoritmalar (GA), biyolojik evrim mekanizmalarını taklit ederek optimizasyon problemlerine çözüm sunar. John Holland tarafından temelleri atılan bu yöntem, geniş ve karmaşık çözüm uzaylarında küresel arama kabiliyeti sağlayarak mühendislik, yapay zekâ ve kontrol sistemleri gibi alanlarda

yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstride sıklıkla tercih edilen PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörleri, sistemlerin dinamik davranışlarını iyileştirmede kritik bir rol oynar. Ancak, geleneksel PID ayar yöntemleri, özellikle karmaşık sistemlerde yerel minimumlara takılma eğiliminde olduğu için yetersiz kalabilir. Genetik algoritmaların sunduğu rastgele ve çok yönlü arama kabiliyeti, bu sorunların üstesinden gelerek PID parametrelerinin hassas bir şekilde optimize edilmesini mümkün kılar. GA'nın işleyişi biyolojik süreçlerden esinlenir: başlangıç popülasyonunda bulunan bireyler, çaprazlama ve mutasyon gibi işlemlerle yeni bireyler oluşturur. Çaprazlama, üstün özelliklere sahip bireylerin genetik materyallerini birleştirerek daha iyi çözümler üretmeyi hedefler. Ancak, popülasyonun çözüm uzayının belirli bölgelerine sıkışmasını engellemek için mutasyon işlemi kullanılır. Bu süreç, bireylerin genetik çeşitliliğini artırarak küresel minimuma ulaşma olasılığını yükseltir. Bununla birlikte, mutasyon oranı dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır; çünkü aşırı mutasyon, çözüm kalitesini olumsuz etkileyebilir. Genetik algoritmaların en önemli avantajlarından biri, optimizasyon sürecini farklı başlangıç noktalarından başlatması sayesinde yerel minimumlara sıkışmamasıdır. Bu sayede, hedef fonksiyonun küresel optimum noktasına ulaşmak mümkün olur. PID kontrolör optimizasyonunda, genetik algoritmalar hata ölçütlerini (örneğin ITAE, ISE) minimize ederek sistem performansını artırmada etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır [81]. Genetik algoritmanın işlem adımları şu şekildedir [82]:

- Arama uzayındaki tüm olası çözümler birer dizi halinde ifade edilir.
- Genellikle, başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulan bir çözüm kümesinden meydana gelir.
- Her bir dizi için uygunluk değeri hesaplanır ve bu değerler, dizilerin çözüm kalitesini yansıtır.
- Belirli bir olasılıkla seçilen diziler üzerinde çaprazlama işlemi uygulanarak yeni bireyler oluşturulur.
- Oluşturulan bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır ve bu bireyler üzerinde çaprazlama işleminden sonra mutasyon işlemleri gerçekleştirilir.
- Belirlenen kuşak sayısı boyunca bu süreçler tekrarlanır.

- İterasyonlar için belirlenen kuşak sayısına ulaşıldığında veya durdurma kriteri karşılandığında işlem sonlandırılır.
- En uygun çözüm, amaç fonksiyonuna göre belirlenir ve optimal sonuç olarak seçilir.

Bu işlem adımlarına uygun genetik algoritmanın akış diyagramı Şekil 34'te verilmiştir.



Şekil 34. Genetik algoritmanın akış diyagramı

3.2.5.1. Genetik Algoritmaların Temelleri

Genetik algoritmalar, biyolojik evrimi model alan ve çözüm uzayında küresel bir tarama sağlayan popülasyon tabanlı algoritmalarlardır [83]. Şekil 34'te gösterilen akış diyagramında kullanılan temel bileşenleri şunlardır [76, 84]:

- **Popülasyon:** Genetik algoritmaların (GA) bir optimizasyon problemine uygulanmasında ilk adım, çözüm uzayındaki her bir olası çözümü belirli bir kodlama sistemi ile ifade etmektir. Genellikle, çözümler sabit uzunlukta elemanlardan oluşan diziler şeklinde temsil edilir ve her bir dizi, problem uzayında rastgele bir noktayı işaret eder. Kodlama yöntemleri, çözümün problemle olan ilişkisini etkilediği için büyük önem taşır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri ikili kodlama olup, bu yöntem çözümleri 0 ve 1 bitleri ile ifade eder [77]. Bununla birlikte, bazı durumlarda ikili kodlama doğal bir temsil sağlamaz veya yetersiz olabilir. Bu nedenle, gri kodlama, kayan nokta gösterimi ve dizi temelli kodlama gibi alternatif yöntemler de tercih edilmektedir. GA'nın etkili bir şekilde çalışabilmesi için başlangıç popülasyonunun dikkatli bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Başlangıç popülasyonu, çözüm uzayında rastgele seçilen ve problemi temsil edebilecek yeterlilikte olan bireylerden oluşur. Her bir birey, problemdeki değişkenlerin bir kombinasyonunu temsil eden genlerden meydana gelir. Genlerin birleşimi bir kromozomu (veya bireyi), kromozomların bir araya gelmesi ise popülasyonu oluşturur. Başlangıç popülasyonunun, çözüm uzayında homojen bir şekilde dağılmış olması, daha geniş bir arama alanını kapsayarak çözüm sürecini hızlandırabilir. Popülasyon genellikle rastgele oluşturulsa da bazı durumlarda belirli bir strateji izlenerek çözüm uzayında daha etkin bir dağılım sağlanabilir. Kodlama sürecinde, problemdeki değişkenler farklı yöntemlerle temsil edilebilir. Ancak, karmaşık problemlerde kayan nokta gösterimi veya dizi temelli yaklaşımlar gibi daha gelişmiş kodlama yöntemleri de kullanılabilir. Kodlama yöntemi seçimi, algoritmanın performansı üzerinde doğrudan etkili olduğundan problem özelliklerine uygun bir strateji belirlenmesi önemlidir.

- **Uygunluk Fonksiyonu:** Genetik algoritmaların (GA) temel işleyişinde, başlangıç popülasyonunda bulunan her bir kromozom için belirlenen amaç fonksiyonuna dayalı olarak bir uygunluk değeri, yani $f(x)$, hesaplanır. Bu uygunluk değeri, kromozomun temsil ettiği çözümün etkinliğini veya problemin çözümüne olan katkısını ifade eden bir sayısal ölçüttür. Uygunluk fonksiyonu, her problem için özel olarak tasarlanmalı ve kromozomun temsil ettiği çözümün başarımını değerlendirmelidir. Bu değerler, popülasyonda hangi çözümlerin daha avantajlı olduğunu belirlemede ve daha iyi çözümlerin bir sonraki nesilde seçilmesine rehberlik etmede kritik bir rol oynar. Uygunluk fonksiyonu, her nesilde daha başarılı bireylerin seçilmesini sağlar ve evrimsel sürecin temel taşıdır. Bir kromozomun uygunluk değeri ne kadar yüksekse, o bireyin

yaşama, çoğalma ve bir sonraki nesilde temsil edilme olasılığı da o kadar artar. Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler, sonraki kuşaklarda daha büyük oranda temsil edilir ve bu durum, algoritmanın çözüm arayışını optimize ederek daha kaliteli sonuçlar elde etmesine olanak tanır. Sonuç olarak, uygunluk fonksiyonu, genetik algoritmaların çözüm kalitesini artıran ve evrimsel süreci yönlendiren bir mekanizmadır. Her bir bireyin faydasını değerlendirerek popülasyonun genel yapısını etkiler ve genetik algoritmaların belirlenen hedeflere ulaşmasında kilit bir araç olarak işlev görür. Her bireyin performansını ölçen bir kriter (örneğin, PID parametreleri için hata ölçütleri: ITAE, ISE).

- **Seçim Operatörü** Popülasyondaki tüm bireyler değerlendirildikten sonra, her bir bireyin uygunluk değeri, seçilme olasılığını belirlemek için kullanılır. Seçim işlemi, başarılı bireylerin gelecekteki nesillere aktarılmasına ve düşük uygunluk değerine sahip bireylerin dışlanmasına olanak tanır. Bir bireyin kopyalanma olasılığı, o bireyin uygunluk fonksiyonundan elde edilen değeriyle orantılıdır. Seçim sürecinin amacı, daha yüksek uygunluk değerine sahip bireylere daha fazla kopyalama şansı tanıyarak, popülasyonda genetik çeşitliliği artırmaktır. Bu süreç, genetik algoritmalarda seçim operatörü olarak adlandırılır ve genellikle başarılı bireylerin korunmasını sağlayarak, düşük uygunluk değerine sahip bireylerin elenmesini amaçlar. Daha yüksek uygunluk değerine sahip bireyler bir sonraki nesle aktarılır. Seçim operatörleri, çeşitli yöntemlerle uygulanabilir; en yaygın kullanılan yöntemler arasında rulet çarkı, turnuva seçimi ve sıralı seçim bulunmaktadır. Bu operatörler, bireylerin uygunluk değerlerine göre nesil değişimini yönlendirir ve evrimsel sürecin etkinliğini artırır.
- **Çaprazlama ve Mutasyon:** Genetik algoritmalarda çaprazlama yöntemi, ebeveyn bireylerin özelliklerini taşıyan yeni bireylerin oluşturulmasını amaçlayan temel mekanizmalardan biridir ve bu işlem genellikle "gen takası" olarak da adlandırılır. Çaprazlamanın amacı, popülasyon içindeki bireylerin daha iyi çözümler bulmasına olanak sağlayacak yeni bireylerin yaratılmasına olanak tanımadır[85]. Uygulamada birçok farklı çaprazlama yöntemi bulunmaktadır, ancak hepsinde ebeveyn kromozomları arasında gen alışverişi yapılarak yeni bireyler oluşturulur. Bu süreç, popülasyonun genetik çeşitliliğini artırarak daha iyi çözümlerin evrimsel olarak ortaya çıkmasını sağlar. GA'da, çaprazlama işleminden sonra mutasyon operatörü kullanılarak bireylerin genetik çeşitliliği

daha da artırılır. Mutasyon oranı genellikle düşük tutulur ve problemin türüne göre değişiklik gösterebilir. Bireyler birbirlerine çok yakın hale geldiğinde, popülasyonun çeşitliliği azalır, bu da yerel optimumlarda sıkışmaya neden olabilir. Çeşitliliği korumak için mutasyon işlemi, genellikle çaprazlama işleminden sonra uygulanır. Bu sayede, popülasyon içindeki bireylerin yerel optimumlara takılma olasılığı azaltılır ve çözüm alanında daha geniş bir arama yapılabilir. Seçim ve çaprazlama işlemleri, yeni bir çözüm üretmez; bunun yerine, daha iyi çözümler bulabilmek için genetik operatörlerle önceki adımlarda seçilen bireyler üzerinde değişiklikler yapılır. Yaygın olarak kullanılan çaprazlama yöntemleri arasında tek noktalı, iki noktalı, çok noktalı ve düzgün çaprazlama yer alır. Çaprazlama, mevcut iyi bireylerin özelliklerini birleştirerek daha iyi çözümler üretmeyi amaçlar. Ancak, bu işlemler tek başına tüm popülasyon alanını etkili bir şekilde taramak için yeterli olmayabilir. Mutasyon, bu noktada devreye girerek, popülasyon içindeki çeşitliliği korur ve genetik bilgi kaybına karşı bir sigorta işlevi görür. Özellikle, popülasyondaki her çözümde belirli bir bitin değeri 0 ise, çaprazlama bu bitin değerini değiştiremez, bu da mutasyonun önemli bir işlev olduğunu gösterir. Yeni nesillerin oluşturulması için genetik materyal karıştırılır ve çeşitlilik sağlanır [86].

- **Elitizm:** GAPID kontrol sistemlerinde elitizm, genetik algoritmaların bir optimizasyon sürecinde kullanılan önemli bir stratejidir. Elitizm, her nesilden en iyi bireylerin (çözümlerin) bir sonraki nesle doğrudan aktarılması ilkesine dayanır. Bu, genetik algoritmaların evrimsel sürecinde, en iyi çözümün kaybolmamasını sağlamak amacıyla kullanılır. Elitizmde, genetik algoritma çaprazlama ve mutasyon işlemleri yaparak yeni bireyler (çözümler) oluşturduğunda, en iyi birey (yani, en yüksek uygunluk değerine sahip çözüm) bir sonraki nesle herhangi bir değişiklik yapılmadan doğrudan kopyalanır. Böylece, en iyi çözümün kaybolması engellenmiş olur ve bu, algoritmanın hızlı bir şekilde daha iyi çözümlere yaklaşmasını sağlar. GAPID algoritmasında elitizm, PID kontrol parametrelerinin optimize edilmesinde özellikle faydalıdır çünkü en iyi çözümün her kuşakta korunması, sistemin daha verimli ve stabil bir şekilde kontrol edilmesine yardımcı olur. Bu yöntem, yerel minimumlarda sıkışmayı engellemeye ve daha küresel optimuma ulaşmaya yardımcı olabilir.

- **Durma Kriteri:** Evrimsel süreç, seçim, çaprazlama, mutasyon ve uygunluk evrimi gibi aşamaların bir arada yürütülmesiyle birçok nesil boyunca tekrarlanır. Bu süreç, popülasyonun genel uygunluğunun zamanla artmasına ve bireylerin daha iyi çözümleri temsil etmelerine olanak tanır. Evrim döngüsünün durdurulması, genellikle evrimsel süreçteki nesil sayısı, farklı nesiller arasındaki bireysel varyasyonun miktarı veya önceden belirlenmiş bir uygunluk değerine ulaşılması gibi kriterlerle sağlanır. Genellikle belirli bir nesil sayısına ulaşılması veya uygunluk değerinin yeterince iyileşmesi ile işlem sonlandırılır.

3.2.6. Kayan Kipli Kontrol

İstenilen kararlılığını sağlamak ve dinamik değişkenlere karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla kayma modu kontrolü (Sliding Mode Control, SMC) uygulanmıştır [87]. SMC, sistemin ani değişimlere verdiği yanıtın hızlanması ve doğruluğun artırılması gibi özellikleriyle doğrusal olmayan sistemlerdeki yüksek performans sergileyerek sistemin durum değişkenlerini belirli bir kayma yüzeyine (sliding surface) boyunca yönlendirme kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Bu yönlendirmeye, sistemin geçici durum yanıt süresinin hızlandırılması ve yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamaktadır [88]. SMC'nin temel özelliği, sistemin kontrol girişinde oluşabilecek gürültü, belirsiz ve dış bozuculara karşı direnç gösterme yeteneğidir [89]. Bu çalışmada, SMC stratejisinin uygulaması konumlandırma doğruluğunun artırılması ve sistem kararlılığını iyileştirmesi amaçlanmıştır. Kontrol stratejisi, sistemin belirlenen kayma yüzeyine yönlendirilmesi ve bu yüzeyde kararlı bir şekilde sürdürülmesi ile performans ölçütlerine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Kayma modlu kontrolü sağlanırken ilk adımı kayan yüzeyi tanımlamak gerekmektedir.

$$s = \left(\frac{de(t)}{dt} + C e(t) \right)^{n-1} \quad (22)$$

Kayma yüzeyinin davranışı Denklem 23'te gösterilmiştir. Bu ifade sistemin kayma yüzeyindeki davranışını tanımlar.

$$s \dot{s} > 0 \quad (23)$$

Bu eşitsizlik s ve $\dot{s}$ değerlerinin çarpımının pozitif olduğunu belirtir. Ayrıca kayma yüzeyinin sistemin durumu ile aynı işaretli olduğu anlamına gelir. Bu doğrultuda

sistemin kayma kontrolü sağlanırken Denklem 24'deki denklem uygulanır. Denklem 24'deki işaret fonksiyonu (sgn) yapısı “s” için Denklem 25'da gösterilmiştir[23, 90].

$$u = K \times \text{sgn}(s) \quad (24)$$

$$s = \begin{cases} -1, & s < 0 \\ 1, & s \geq 0 \end{cases} \quad (25)$$

Burada işaret fonksiyonu, s'nin işaretine göre sinyalin yönünü belirler (Hata pozitifse kontrol pozitif, hata negatifse kontrol negatif yönlü). Ancak bu kontrol yasası titreşim gibi istenilmeyen durumlara yol açabilir. Bu durumu engellemek için Denklem 26'daki gibi revizyon edilmiş hali kullanılır [23, 91].

$$u = K \frac{s}{|s| + \delta} \quad (26)$$

Denklem 11'de tanımlanan δ küçük ve pozitif bir sabittir [92]. Bu sabit, kayma yüzeyine yakın bölgelerde meydana gelebilecek titreşim etkilerini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Böylelikle, kontrol sinyalinin sürekliliği sağlanarak sistemin kayma yüzeyine daha yumuşak bir şekilde yaklaşması mümkün olur. Bu düzenleme, sistemin kayma yüzeyine hızlı bir şekilde ulaşmasını desteklerken, ani değişimlerin ve yüksek frekanslı titreşimlerin oluşmasını engeller [93, 94]. Sonuç olarak, kontrol sinyalinin daha kararlı ve etkin bir şekilde çalışması temin edilir.

3.2.7. Fuzzy – PID Hibrit Model Kontrol // Bulanık Mantık Esaslı Adaptif PID Denetim Organı

Geleneksel PID (Oransal, Tümlüsel, Türevsel) denetim yapıları, birçok mühendislik uygulamasında etkinliği kanıtlanmış denetim teknikleridir. Ancak, sistem parametrelerinin zamana bağlı olarak değişkenlik gösterdiği veya doğrusal olmayan karmaşık süreçlerin kontrolünde yetersiz kaldığı durumlarda, adaptif ve akıllı denetim stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, bulanık mantık tabanlı adaptif PID denetleyiciler, belirsizlik ve doğrusal olmayanlık içeren sistemlerin kontrolünde güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık mantık denetleyicileri, sistem dinamiklerinin tam olarak anlaşılamadığı ve matematiksel olarak tam anlamıyla tanımlanamadığı durumlarda etkili bir çözüm sunar [95, 96]. Bu tür durumlarda, kontrol

stratejileri genellikle sistem davranışına ilişkin yaklaşık bilgilerle şekillenir. Bulanık mantık denetleyicilerinin, bu belirsizlik koşullarında genellikle başarılı bir performans gösterdiğini ifade etmiştir. Bulanık mantık denetleyicilerinde kullanılan bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemleri, istenen sistem yanıt özelliklerini ve denetleyici dinamiklerini kodlamak için sezgisel kurallara ve üyelik fonksiyonlarına dayanır. Bununla birlikte, bu dönüşümlerin fiziksel sistemle nasıl bir temele dayandığı açık değildir. Bu belirsizlik, bulanık mantık denetleyicilerinin tasarımında önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu bağlamda, iyi bilinen PID (Oransal, Tümlensel, Türevsel) denetim yapısının, bulanık mantık tabanlı yeni bir tasarım için temel alınması mantıklı bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır [97]. Bulanık mantık tabanlı adaptif PID denetleyiciler, özellikle doğrusal olmayan sistemlerde, karmaşık süreçlerin kontrolünde ve robotik uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır. Bu denetleyiciler, sistem performansını optimize ederken, klasik PID denetleyicilere göre daha esnek ve uyarlanabilir bir yapı sunmaktadır [98]. Örneğin, bir endüstriyel sıcaklık kontrol sisteminde, bulanık mantık adaptif PID denetimi, sistemin geçici ve kararlı durum performansını iyileştirmiştir. Bulanık kural tabanı, sıcaklık sapmalarını minimize edecek şekilde tasarlanmış, PID parametrelerinin dinamik olarak ayarlanmasını sağlamıştır [99]. Benzer şekilde, robot manipülatör kontrolünde doğrusal olmayan dinamiklerin üstesinden gelmek için adaptif PID kontrol yapısı uygulanmıştır ve sonuçlar, konum ve hız kontrolünde yüksek doğruluk sağlamıştır [100, 101]. Bu çalışmada kullanılan PID denetim organının kullanılan parametreler, bulanık mantık denetleyicisi tarafından hata ve hata değişimi oranına bağlı olarak ayarlanmıştır. Bu parametrelerin hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifade Denklem 27, Denklem 28 ve Denklem 29’da verilmiştir [102-104].

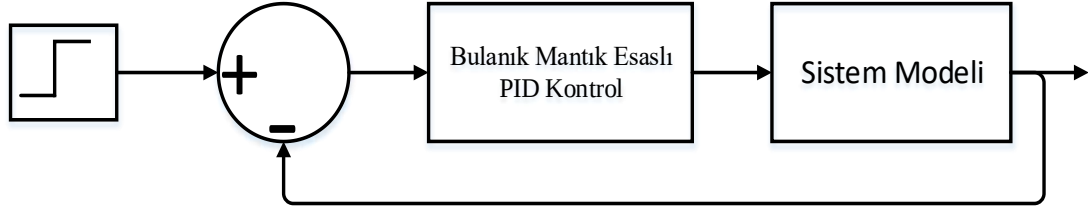
$$K_P = K_P + (K_{PF} \times K_P) \quad (27)$$

$$K_I = K_I + (K_{IF} \times K_I) \quad (28)$$

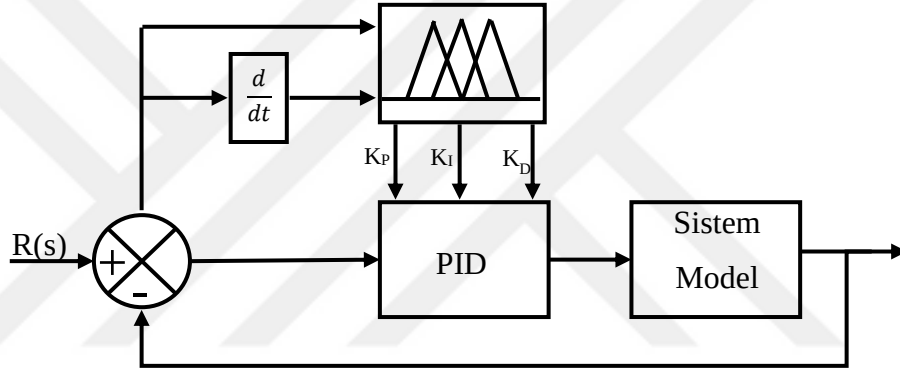
$$K_D = K_D + (K_{DF} \times K_D) \quad (29)$$

Eşitliklerdeki K_P, K_I ve K_D parametreleri, bulanık mantık ile birleştirilmiş PID denetleyicisinin başlangıç değerlerini oluşturmaktadır. Bulanık mantık denetleyicisi, bu başlangıç parametrelerini kullanarak PID değerlerini güncellemektedir. K_{PF}, K_{IF} ve K_{DF} Parametreleri ise bulanık denetleyici tarafından PID kontrolü için

hesaplanan yeni kazanç değeridir [105, 106]. Bulanık Mantık Esaslı PID Kontrol modeli *Şekil 35* ve *Şekil 36*'da gösterilmiştir [107, 108].



Şekil 35. Bulanık Mantık Esaslı PID Kontrol



Şekil 36. Fuzzy Logic Adaptif PID Kontrolcü

3.2.8. Mikro Adım Denetim Organı

Step motorlar, diğer adıyla adım motorları, açısal konumlarını belirli adımlar halinde değiştiren ve bu sayede hassas bir şekilde kontrol edilebilen elektrik motorlarıdır. Bu motorlar, genellikle rotor pozisyonunun sabitlenmesi veya kontrollü bir şekilde hareket ettirilmesi gereken uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Adım motorlarının hareketi, motorun sargılarına gönderilen uygun faz dizilimleri ile sağlanır ve her bir fazın uygulanması rotorun belirli bir açısal mesafe ilerlemesine neden olur. Adım motorlarında adım açısı, motorun mekanik ve manyetik tasarımına bağlı olarak belirlenir ve genellikle 90° , 45° , 18° , 7.5° veya 1.8° gibi değerler alabilir [109]. Bununla birlikte, mikro adım yöntemi kullanılarak bu açılar daha küçük birimlere bölünebilir ve böylece motorun hassasiyeti artırılır. Mikro adım kontrolü, sargılara gönderilen akımın sinüzoidal bir dalga formuna dönüştürülmesini içerir. Bu yöntem, rotor hareketini yumuşatarak titreşimleri

azaltır ve düşük hızlarda daha kararlı bir performans sunar. Mikro adım kontrolü, dijital sürücüler veya mikro denetleyiciler yardımıyla sargılara uygulanacak akımların genliği ve faz dizilimlerinin hassas bir şekilde ayarlanmasını gerektirir. Özellikle yüksek hassasiyet, düşük gürültü ve pürüzsüz hareket gerektiren uygulamalarda mikro adım kontrolü büyük avantajlar sağlar [110]. Ayrıca, step motorların geri beslemeye ihtiyaç duymayan açık döngü kontrol yapısı, düşük bakım gereksinimi ve basit mekanik tasarımı, onları endüstriyel otomasyon, robotik, tıbbi cihazlar ve 3D yazıcılar gibi geniş bir uygulama alanında popüler kılmaktadır. Step motorların matematiksel modelleri, Denklem 30 ile Denklem 37 arasında verilmiş olup, bu denklemler motorun dinamik davranışlarını ve mikro adım kontrolündeki performansını anlamak için temel teşkil eder [111-114].

$$V_q = -V_\alpha \sin(p\theta) + V_\beta \cos(p\theta) \quad (30)$$

$$V_d = V_\beta \sin(p\theta) + V_\alpha \cos(p\theta) \quad (31)$$

$$i_d = \frac{1}{L_s} \int (V_d - R_s i_d + p\omega L_s i_q) dt \quad (32)$$

$$i_q = \frac{1}{L_s} \int (V_q - R_s i_q - p\omega L_s i_d - p\phi_m \omega) dt \quad (33)$$

$$i_\alpha = i_d \sin(p\theta) - i_q \cos(p\theta) \quad (34)$$

$$i_\beta = i_d \cos(p\theta) + i_q \sin(p\theta) \quad (35)$$

$$T_e = p \phi_m i_q \quad (36)$$

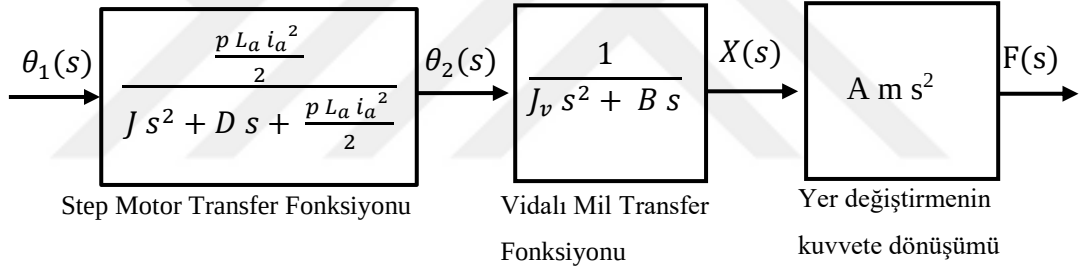
$$\omega = \frac{1}{J} \int (T_e - B \omega - T_L) dt \quad (37)$$

Denklem 30 ile Denklem 37 arasında verilen ifadeler, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve bu model üzerinden step motorun mikro adım yöntemi ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Mikro adım kontrolü, motorun faz bobinlerine uygulanan voltaj ile üretilen akımların hassas bir şekilde ayarlanmasını içerir. Bu yöntemde kullanılan “d-q eksen dönüşümü” (Park dönüşümü), faz akımlarını daha basit ve kontrol edilebilir bileşenlere ayırarak modelin matematiksel olarak daha anlaşılır ve kontrol edilebilir bir yapıya dönüşmesini sağlar. Faz akımları doğrudan kontrol edilemediği için, bu akımlar d (doğrudan bileşen) ve q (kuadratik bileşen) eksenlerine dönüştürülür. Motorun elektriksel ve mekanik özelliklerini modellemek için diferansiyel denklem çözücüler (Integrator blokları) kullanılır.

4. BÖLÜM

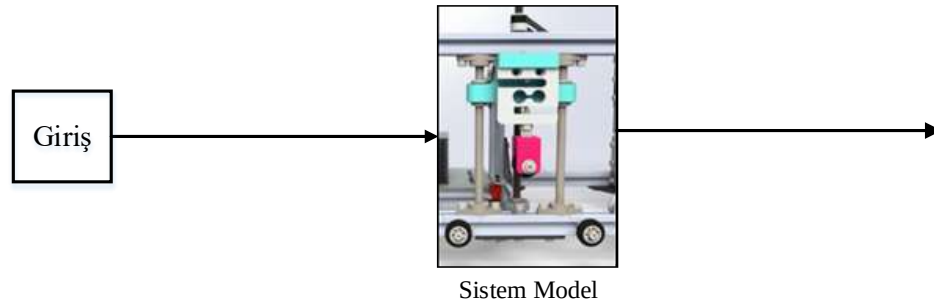
SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Model sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sistem, çalışmada açıklanan yedi farklı kontrol yöntemiyle analiz edilmiştir. Her bir kontrol tekniğinin sistem performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Modelin giriş-çıkış ilişkisini temsil eden sistem modelinin şematik gösterim Şekil 37’de sunulmaktadır.



Şekil 37. Sistemin Modellenmesi

Model, giriş değişkeni olarak tanımlanan $\theta(s)$ 'nin eksenel yer değiştirme olarak ifade edilen $X(s)$ 'ye dönüşümünü temsil etmektedir. Bu dönüşüm, sistem dinamiklerinin matematiksel bir temsili olup, kontrol stratejilerinin tasarımında ve performans değerlendirmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 37'e göre sistem modeli, MATLAB/ Simulink programı üzerinde modellenmiştir. Modelde herhangi bir kontrolcü etkisi bulunmadığı modelin cevabını gözlemlemek için girişte birim basamak fonksiyonuyla çalıştırılmıştır. Kontrolcüsüz olarak modellenen sistem Şekil 38' de gösterilmektedir.

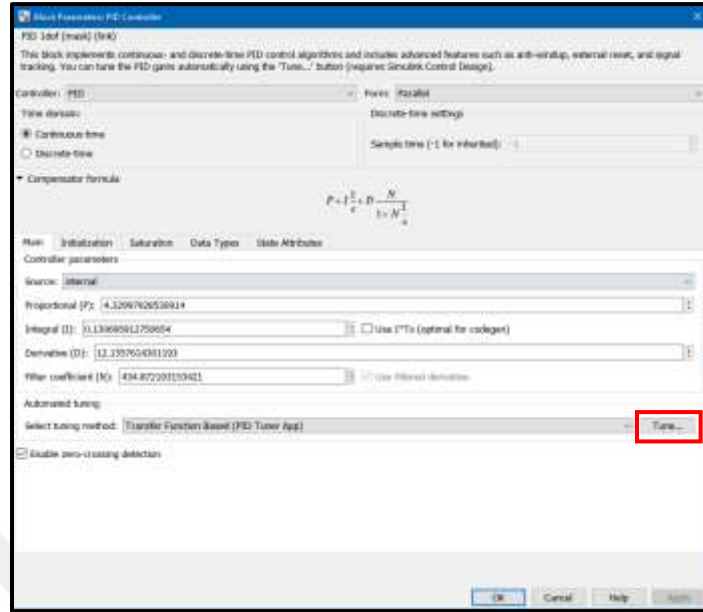


Şekil 38. Kontrolcüsüz Sistem Modeli

4.1. PID Tuner

PID denetleyicisinin blok diyagrama eklenmesiyle, kontrol edilecek sistemin en uygun kazanç, integral ve türev elemanı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla “PID Tuner” aracı kullanılmaktadır. Şekil 39’da yer alan “Tune” butonuna basılarak transfer fonksiyonu tabanlı ayarlama süreci başlatılmıştır. Daha sonra, “Response Time” ve “Transient Behaviour” ayar parametreleri değiştirilerek, ilgili grafiğin elde edilmesi sağlanmıştır. “Response Time” parametresinin artırılması, sistemdeki aşım miktarını azaltmaktadır. “Transient Behaviour” ise referans sinyalinin takibi ile gürültü bastırma arasında bir denge sağlayan bir ayar mekanizmasıdır. Bu ayar, “Response Time” için daha yavaş (“slower”) veya daha hızlı (“faster”) aralığında yapılabilirken, “Transient Behaviour” için agresif (“aggressive”) ve gürbüz (“robust”) ayarı arasında gerçekleştirilmektedir. Sistem yanıtının yerleşme zamanını azaltmak için kontrol yanıtını hızlandırmak ve aşım miktarını minimize etmek için gürbüzlük parametresinin artırılması gerekmektedir. Bu ayarlamaların tamamlanmasının ardından, “Update Block” butonuna basılarak PID denetleyicisinin parametreleri güncellenmektedir. Güncellenen parametreler, kazancı (“P - Proportional”), integral sabitini (“I - Integral”), türev sabitini (“D - Derivative”) ve filtre sabitini (“N”) kapsamaktadır. MATLAB, türev elemanının doğrudan kullanılmasına izin vermemektedir, zira bu durum stabil olmayan bir yanıtı neden olabilmektedir. Bu sorunu gidermek için MATLAB programının filtre sabiti, PID denetleyicisinin transfer fonksiyonuna, Denklem 38’de belirtildiği şekilde entegre edilmektedir.

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{1}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (38)$$



Şekil 39. PID Tuner ayarları

Yapılan “Tune” sonucunda elde edilen PID ve Filtre değerleri Tablo 3’te gösterilmiştir.

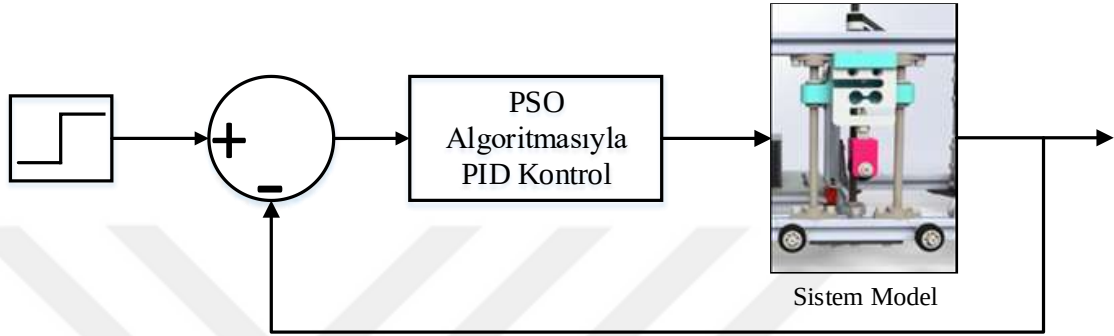
Tablo 3. PID Tuner bloğunda ayarlanan PID değerleri

	P (Kazanç)	I (İntegral)	D (Türev)	N (Filtre Sabiti)
Sistem	0.12907	4.995	0.0008	103080.967

4.2. PSO algoritmasıyla optimize edilen PID değerleri

Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO) algoritması, kuş sürülerinin yiyecek arama davranışını taklit ederek tasarlanmıştır. PSO, belirli bir problemin çözümüne ulaşmak için başlangıçta rastgele bir aday çözümle başlayarak, çözümü yinelemeli olarak iyileştiren bir optimizasyon yöntemidir. Algoritmanın başlangıç aşamalarında, büyük adım büyüklükleri daha etkili sonuçlar elde edilmesini sağlarken, son aşamalarda bu adımların küçültülmesi, uygun değer değere daha hassas bir şekilde yaklaşılmasına olanak tanır. Bu sebeple, son yıllarda farklı PSO varyasyonları geliştirilmiş ve öne çıkmıştır. Şekil 33’te sunulan PSO algoritmasında, parçacıkların başlangıç konumları ilgili arama alanında rastgele belirlenir ve genellikle parçacıkların başlangıç hızları sıfır olarak kabul edilir. Rastgele oluşturulan bu konumların uygunluk değerleri, problemin amaç fonksiyonuna dayalı olarak hesaplanır.

Bu uygunluk değerlerine göre, her bir parçacığın o zamana kadarki en iyi konumu (x_{best} , i) ve popülasyondaki en iyi çözümün konumu (g_{best}) belirlenir. Parçacıkların hız vektörleri, bu konum bilgileri kullanılarak güncellenir ve böylece parçacıklar arama alanında yönlendirilir. PSO algoritması için geliştirilen model, *Şekil 40*'da detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 40. PSO - PID modeli

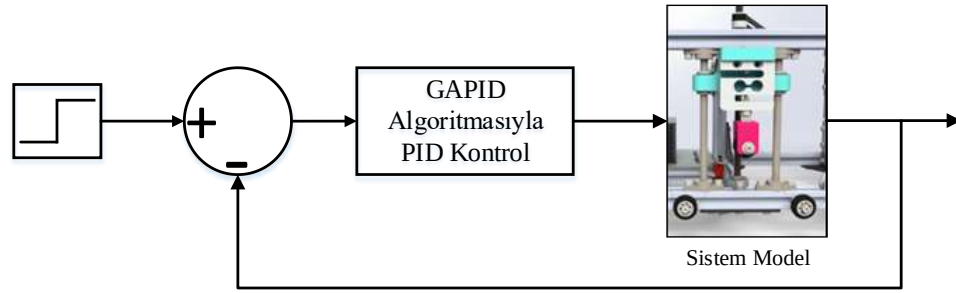
Şekil 40' da sunulan modelde, PSO algoritması kullanılarak PID parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Literatürde sıkça karşılaşılan 10, 50 ve 100 parçacık sayıları, sistemin dinamik cevabı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla incelenmiştir. Farklı parçacık sayılarıyla optimize edilen PID parametreleri, Tablo 4' te detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 4. Farklı parçacık sayılarıyla optimize edilen PID değerleri

Partikül Sayısı (n)	P	I	D
n = 10	3.5656	4.4055	10.0000
n = 50	4.8519	4.4056	10.0000
n = 100	4.4560	4.4056	10.0000

4.3. GAPID algoritmasıyla optimize edilen PID değerleri

Genetik Algoritma (GA) tabanlı PID optimizasyonu, *Şekil 41*'de gösterilen model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon süreci, genetik algoritma modelinin toplam 1000 iterasyonla yapılandırılmıştır.



Şekil 41. GAPID Modeli

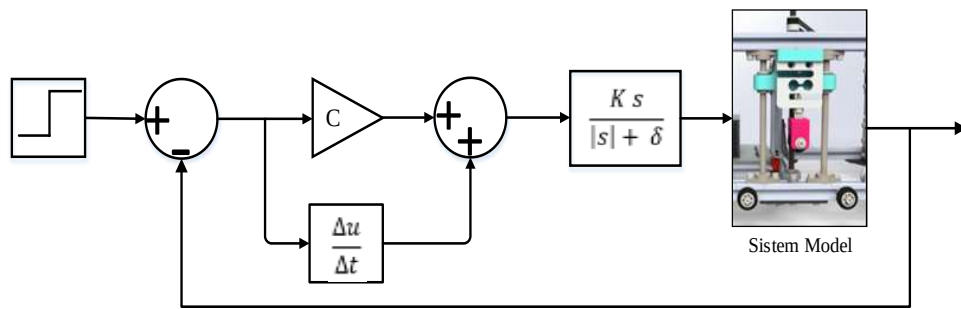
Genetik algoritma tabanlı PID (GAPID) denetleyicisinin sistem modeline entegrasyonu, büyük ölçüde MATLAB® ortamında gerçekleştirilmiş ve bu süreçte genetik algoritma kullanılarak sistemin kontrol performansını iyileştirmeye yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. MATLAB Simulink® yazılımında GAPID denetleyicisine özgü bir blok bulunmadığı için genetik algoritma, MATLAB® editöründe bir fonksiyon olarak yazılmış ve bu fonksiyondan elde edilen PID parametreleri, sistemin kontrol performansını analiz etmek için kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem, genetik algoritmanın sistemin transfer fonksiyonları doğrultusunda en uygun kazanç (K_p), integral (K_i) ve türev (K_d) sabitlerini optimize etmesini ve bu değerlerin GAPID denetleyicisine otomatik olarak entegre edilmesini sağlamaktadır. Sistemin matematiksel modeline dayalı olarak, GAPID denetleyicisi ile kontrol edilen transfer fonksiyonlarının performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu süreçte, genetik algoritmanın, başlangıç popülasyonu, çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi temel mekanizmaları, PID parametrelerini en iyi şekilde optimize edecek şekilde yapılandırılmıştır. Kodlama sürecinde, uygunluk fonksiyonu (fitness function), sistemin hata kriterlerini (örneğin, zaman alanında ISE, ITAE) minimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde, genetik algoritmanın her iterasyonda en uygun PID parametre setini üretmesi sağlanmıştır. Algoritma, çalıştırıldığında PID parametrelerini anlık olarak güncelleyerek sistemin performansını değerlendirme imkânı tanımaktadır. Farklı birey sayıları (N) ve iterasyon sayıları kullanılarak yapılan optimizasyon sonuçları Tablo 5' te özetlenmiştir. Ayrıca, her bir birey sayısı için elde edilen K_p , K_i ve K_d parametreleri, genetik algoritmanın sistem kontrol performansı üzerindeki etkisini anlamak için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, GAPID denetleyicisinin sistem modeline entegrasyonu için yenilikçi bir yaklaşım sunmak ve genetik algoritmanın dinamik sistemlerde PID parametre optimizasyonu üzerindeki etkinliğini göstermektedir.

Tablo 5. Genetik algoritmaya göre optimize edilmiş PID değerleri

Birey Sayısı (N)	P	I	D
N = 10	341.0163	10.8869	993.1885
N = 50	981.0202	70.6717	999.9650
N = 100	853.0182	64.2625	999.9573

4.4. Kayan Kipli Kontrol (SMC)

Kayan kipli kontrol, sistemin ani değişimlere verdiği yanıtın hızlanması ve doğruluğun artırılması gibi özellikleriyle doğrusal olmayan sistemlerdeki yüksek performans sergileyerek sistemin durum değişkenlerini belirli bir kayma yüzeyine (sliding surface) boyunca yönlendirme kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Bu yönlendirmeye, sistemin geçici durum yanıt süresinin hızlandırılması ve yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamaktadır. SMC'nin temel özelliği, sistemin kontrol girişinde oluşabilecek gürültü, belirsiz ve dış bozuculara karşı direnç gösterme yeteneğidir. Bu çalışmada, SMC stratejisinin uygulaması konumlandırma doğruluğunun artırılması ve sistem kararlılığını iyileştirmesi amaçlanmıştır. Kontrol stratejisi, sistemin belirlenen kayma yüzeyine yönlendirilmesi ve bu yüzeyde düzenli bir şekilde sürdürülmesi ile performans ölçütlerine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Kontrol edilecek sisteme Denklem 26'daki model uygulanmıştır. SMC model için uygulanan sistem Şekil 42'de gösterilmiştir.

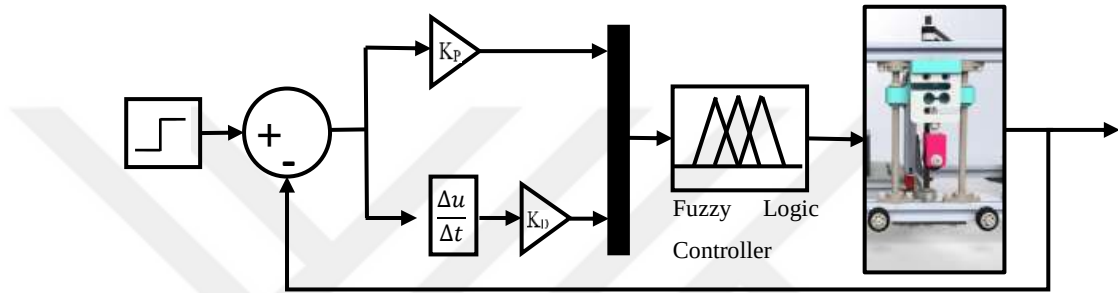


Şekil 42. SMC Modeli

4.5. Fuzzy Logic

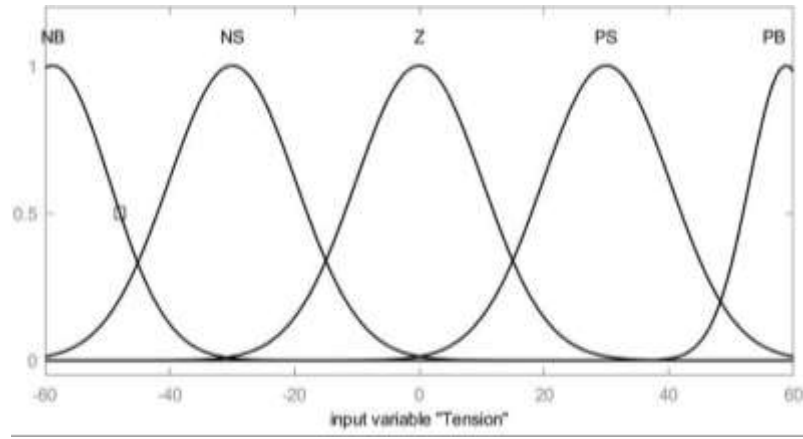
MATLAB/Simulink kütüphanesinde bulunan "Fuzzy Logic Controller" aracı, bulanık mantık tabanlı kontrol sistemlerinin tasarımı için kullanılmıştır. Bu araç, kullanıcıya üyelik fonksiyonlarını ve kural tabanını özelleştirme olanağı sunmaktadır. Çalışmada,

öncelikle giriş ve çıkış değişkenleri için bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemlerini gerçekleştiren üyelik fonksiyonları eklenmiş ve bu fonksiyonların şekilleri tanımlanmıştır. Daha sonra, giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan kural tabanı oluşturulmuştur. Üyelik fonksiyonlarının ve kural tabanının tasarımı, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Tasarlanan bulanık mantık kontrolcüsü, MATLAB Simulink blok diyagramına entegre edilmiş ve düzenlenerek sistem modeli *Şekil 43*'te ki gibi modellenmiştir.

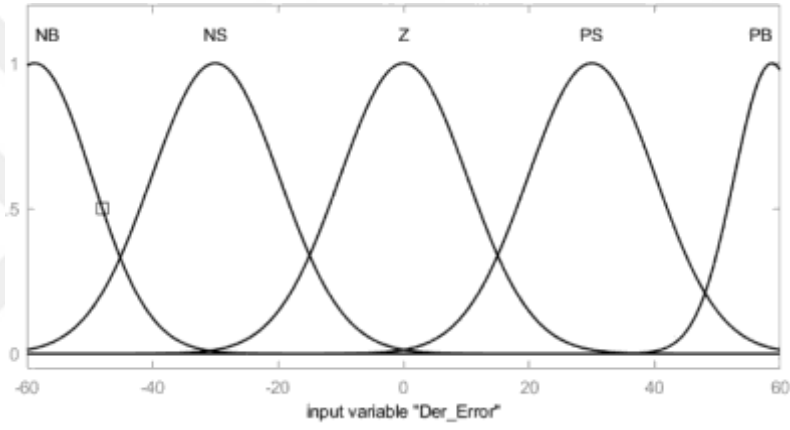


Şekil 43. Bulanık Mantık Kontrol Modeli

Bulanık mantık tabanlı denetim organının kullanıldığı kontrol sistemi, *Şekil 43*'te gösterilen model üzerinden tasarlanmıştır. Bu modelde, bulanık mantık denetleyicisinin girişleri hata ve hata değişimi modelleyerek kural tabanı belirlenmiştir. Denetleyicinin çıkışı ise kuvvet olarak tanımlanmıştır. Daha sonra, elde edilen kuvvet değeri, sistem modeline step motorun referans açısı olarak giriş yapılmıştır. Bu referans açısına bağlı olarak vidalı milin eksenel yer değiştirmesi incelenmiş ve bu yer değiştirme, kuvvete dönüştürülerek geri besleme sinyali olarak sisteme geri iletilmiştir. MATLAB programında Fuzzy Logic modelinin simülasyonu sırasında "refresh rate" değeri 2.5 ms olarak ayarlanmıştır. Bu ayar, sistemin uyarı mesajı göstermesini ve hata vererek simülasyonun durdurulmasını önlemek amacıyla yapılmıştır. Bulanık mantık yapısı tasarlanırken, hata girişi ve hatadaki değişim $[-60, 60]$ Aralığında bulanıklaştırılmıştır. Çıkış değişkeni ise $[-20, 20]$ Aralığında, beş üyelik fonksiyonu kullanılarak durulaştırılmıştır. Üyelik fonksiyonları Gauss eğrisi ile modellenmiş ve şu bulanık kümeler tanımlanmıştır: NB (Negatif Büyük), NS (Negatif Küçük), Z (Sıfır), PS (Pozitif Küçük) ve PB (Pozitif Büyük). Giriş sinyallerine ait üyelik fonksiyonu *Şekil 44*'te gösterilmektedir. Çıkış sinyaline ait üyelik fonksiyonu *Şekil 45*'te gösterilmiştir.

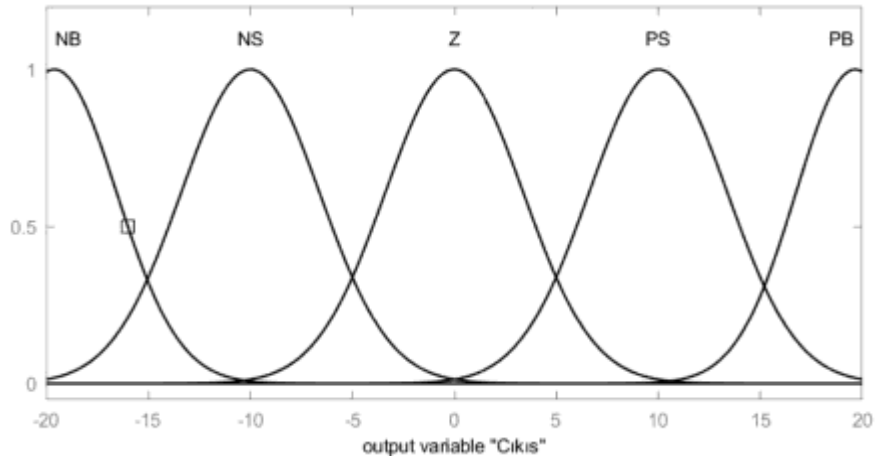


(a)



(b)

Şekil 44. Giriş sinyallerinin üyelik fonksiyonları: (a) gerginlik değeri, (b) gerginliğin türev değeri



Şekil 45. Çıkış Sinyali üyelik fonksiyonu

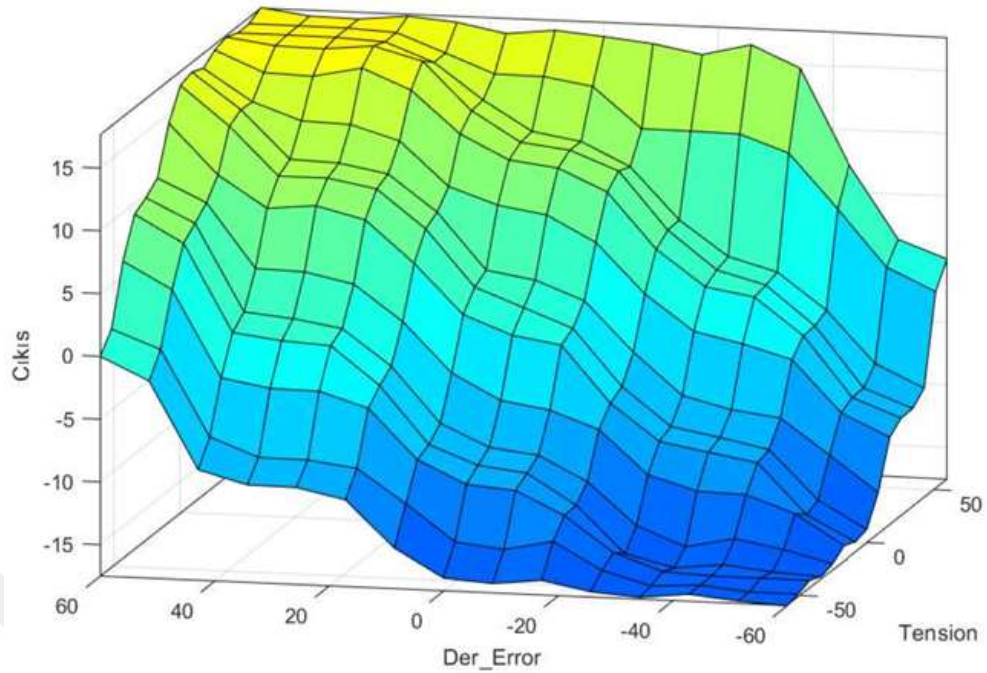
Bulanık mantık kontrollü sistemde, kontrolcüye giren hata ve hata değişimi değerleri ile çıkışta istenen parametreler arasındaki ilişki, Tablo 6’da sunulan kural tabanı ile tanımlanmıştır. İki giriş değişkenine karşılık, bu değişkenlerin bulanık kümelerine dayalı olarak çıkışın belirlenmesi için toplam 25 adet kural oluşturulmuştur. Bu kural tabanı, sistemin dinamik tepkisini optimize etmek ve istenen performansı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Şekil 46’da, Tablo 6’da gösterilen kuralların MATLAB ortamında “ rule editor “ bulanık mantık kontrolcüsünde tanımlanmıştır. Kuralların yüzeyleri Şekil 47’de gösterilmiştir.

Tablo 6. Bulanık mantık denetleyici sistemin kural tablosu

Error	Change of Error					
		PB	PS	Z	NS	NB
	PB	PB	PB	PB	PB	Z
	PS	PB	PB	PS	Z	NS
	Z	PB	PS	Z	NS	NB
	NS	PS	Z	NS	NB	NB
	NB	Z	NS	NB	NB	NB

The screenshot shows the MATLAB Rule Editor window for a fuzzy inference system named 'Fuzzy3_3'. The top pane lists 10 rules. The bottom pane shows the configuration for the first rule: 'If (Tension is PB) and (Der_Error is PB) then (Cikis is PB) (1)'. The 'If' section has two inputs: 'Tension is' and 'Der_Error is', both with 'PB' selected from a list of fuzzy sets (NB, Z, PB, NS, PS, none). The 'Then' section has 'Cikis is' with 'PB' selected. The 'Connection' is set to 'and' and the 'Weight' is '1'. Buttons for 'Delete rule', 'Add rule', and 'Change rule' are visible at the bottom.

Şekil 46. Rule editor'de tanımlanan kurallar



Şekil 47. Kuralların Yüzeyi

Bulanık mantık kontrolcüsünün yüzey grafiğinde, dikey eksen çıkış değerini, diğer iki eksen ise giriş parametreleri olan hata ve hatanın değişimini temsil etmektedir. Yüzey üzerindeki renk dağılımı, parametrelerin büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir; koyu mavi renkler negatif değerleri, sarı renkler ise pozitif değerleri ifade etmektedir. Ayrıca, yüzey boyunca renklerin tonlarının açık ve koyu arasında geçiş yaptığı, bu geçişin parametrelerin büyüklüğüne bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsünden istenen çıkış parametresi, negatif hata değerlerinde negatif, pozitif hata değerlerinde ise pozitif bir değer üretmektir. Ayrıca, hata değeri sıfıra yaklaştığında, kontrol kazancının sıfıra yakın olması hedeflenmiştir. Bu tasarım, sistemin kararlılığı ve doğruluğunu artırmaya yönelik bir kontrol stratejisi sunmaktadır.

4.6. Bulanık Mantık tabanlı Adaptif PID Control

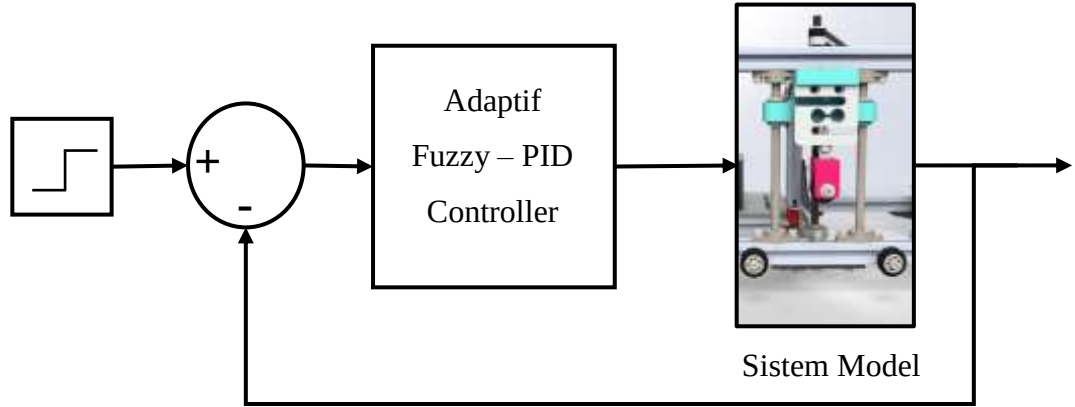
Hibrit (Bulanık Mantık tabanlı Adaptif PID Control) modelinde, bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan bulanık mantık denetleyicisi kullanılmıştır. Hibrit kontrol yapısı, Denklem 27, Denklem 28 ve Denklem 29 üzerinden modellenerek, sistemin karmaşık kontrol ihtiyaçlarına yanıt verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu modelde, PID denetim organı ve bulanık mantık kontrolcüsü birlikte kullanılarak hibrit bir yapı elde edilmiştir. PID denetim organı, MATLAB Simulink® ortamında manuel olarak tasarlanmış ve bu

tasarım sürecinde hazır bir kontrol aracı kullanılmamıştır. PID kontrolcünün özellikleri, sistem gereksinimlerine uygun olarak ayrıntılı bir şekilde elle modellenmiştir. PID denetleyicinin tasarımında hata, integral ve türev sinyallerine dayalı klasik kontrol yapısının esnek bir şekilde uygulanması hedeflenmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsü, MATLAB Simulink kütüphanesinde bulunan “Fuzzy Logic Controller” aracı kullanılarak tasarlanmış ve bu süreçte üyelik fonksiyonları ile kural tabanı, kontrol sisteminin gereksinimlerine uygun bir şekilde özelleştirilmiştir. Bulanık mantık kontrolcüsü tasarlanırken, giriş parametreleri olarak hata ve hata değişimine dayalı bir yapı benimsenmiştir. Bu parametreler, belirli aralıklarda bulanıklaştırılmış ve kontrol sistemi çıkışını belirleyen kural tabanı, bu aralıklara uygun olarak oluşturulmuştur. Kural tabanı, çıkış değerlerinin hassasiyetini ve sistem kararlılığını sağlamak üzere 25 adet kural üzerine şekillendirilmiştir. Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra hem bulanık mantık kontrolcüsü hem de PID denetim organı MATLAB Simulink blok diyagramına entegre edilmiş ve hibrit bir yapı olarak düzenlenmiştir. Bu hibrit model, adaptif PID kontrolcüsü üzerinden sistem modelinin etkin bir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır. Bulanık mantık tabanlı adaptif PID kontrol yapısı, sistemin hata ve hata değişimine duyarlı çıkışlar üreterek kontrol performansını optimize etmektedir. Sistemde referans olarak kullanılan PID değerleri ampirik ayarlamalar ile yapılmıştır. Ayarlana PID değerleri Tablo 7’de sunulmuştur. Bu yapı, sistemin kararlılığını ve doğruluğunu artırırken aynı zamanda hata değerlerini minimize etmektedir.

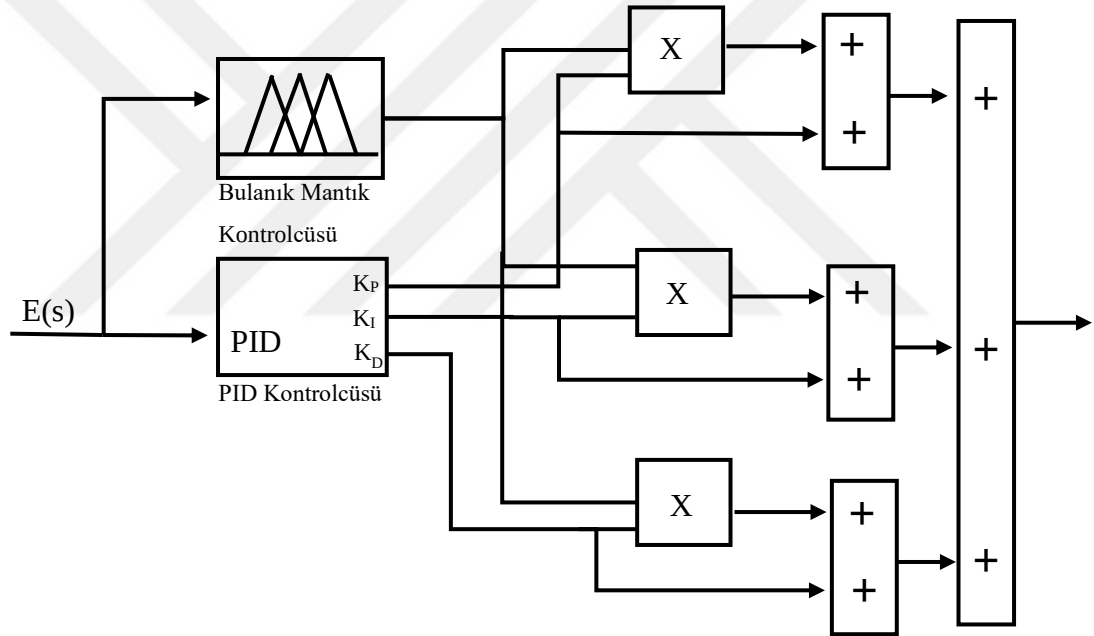
Tablo 7. Hibrit modelde kullanılan PID değerleri

	Referans K_P	Referans K_I	Referans K_D
Sistem	20	0	0,3

Hibrit model sistemin tasarımı Şekil 48’de gösterilmiştir. Şekil 48’de gösterilen Adaptif Fuzzy – PID kontrolcüsün içeriği Şekil 49’da gösterilmiştir. Referans sinyali ile oluşan çıktı sinyali arasında oluşan hata sinyali ($E(s)$) kontrol bloklarına dağılmaktadır.

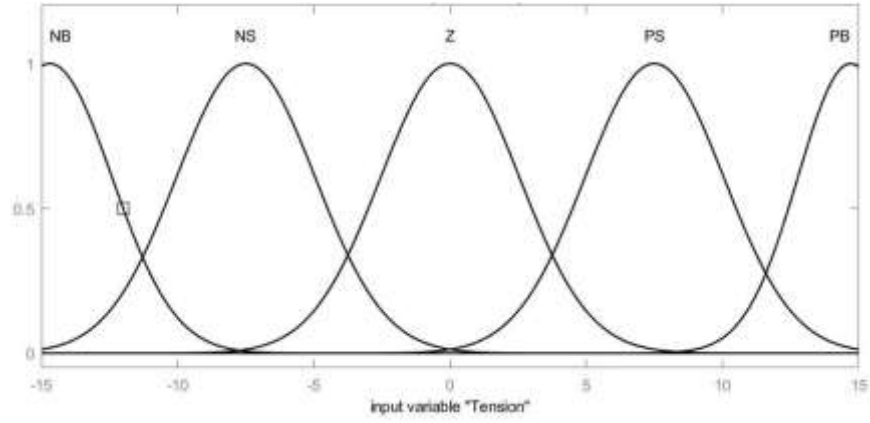


Şekil 48. Hibrit Model Sistem Tasarımı

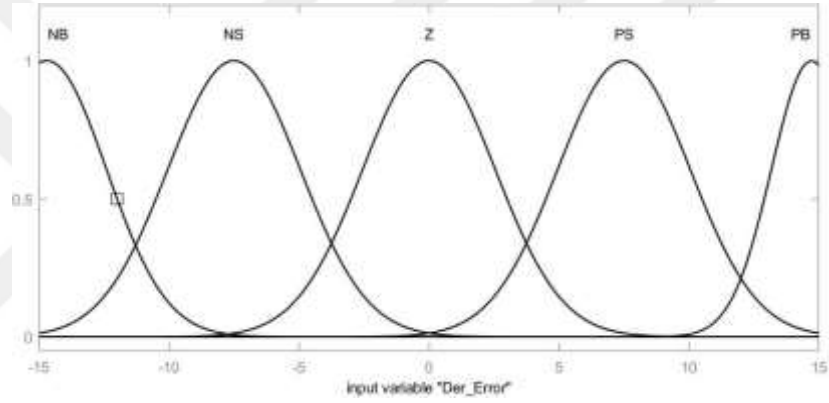


Şekil 49. Adaptif Fuzzy - PID Kontrolcüsü Modeli

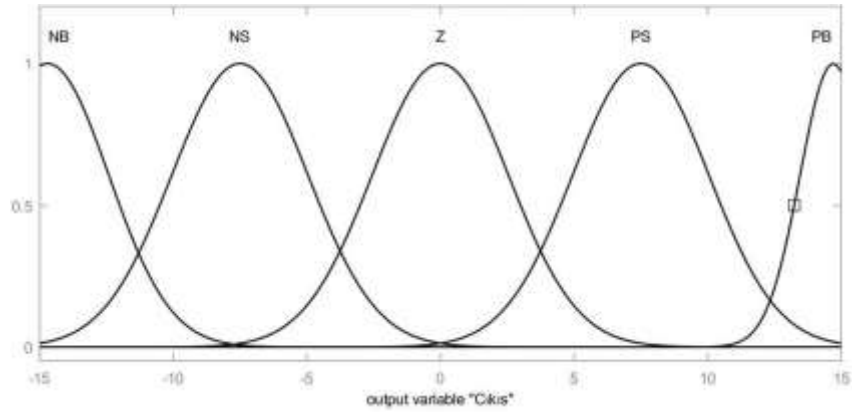
Oluşturulan hibrit modelde bulanık mantık model kısmında üyelik fonksiyonlarının sınırları değişmektedir. Hatadaki üyelik fonksiyon sınırı Şekil 50'de gösterilmektedir. Hata değişimi sınırları ise Şekil 51'de gösterilmektedir. Bulanık mantık bloğunun çıkışı ise Şekil 52'de gösterilmektedir.



Şekil 50. Hata üyelik fonksiyon sınırı



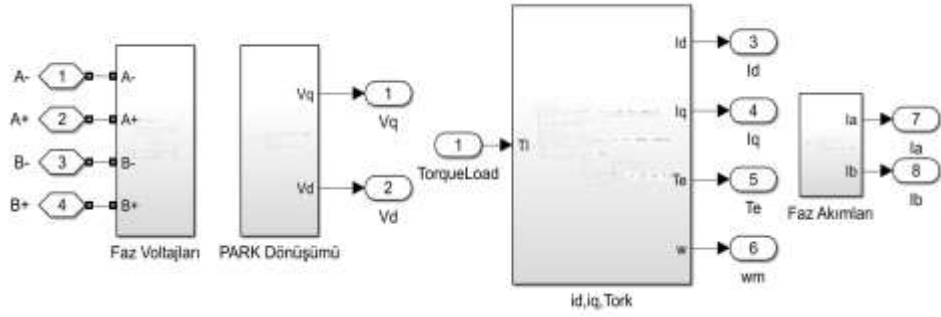
Şekil 51. Hata değişiminin sınırları



Şekil 52. Çıkış üyelik fonksiyonun sınırları

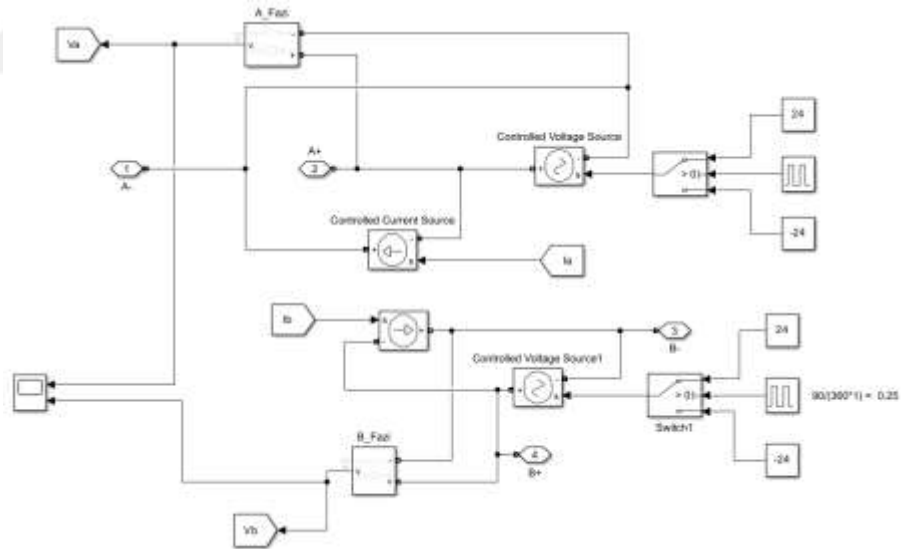
4.7. Mikro adım yöntemi ile step motorun kontrolü

Denklem 31 ile Denklem 37 arasında verilen ifadeler Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen model Şekil 53'te gösterilmiştir [115].



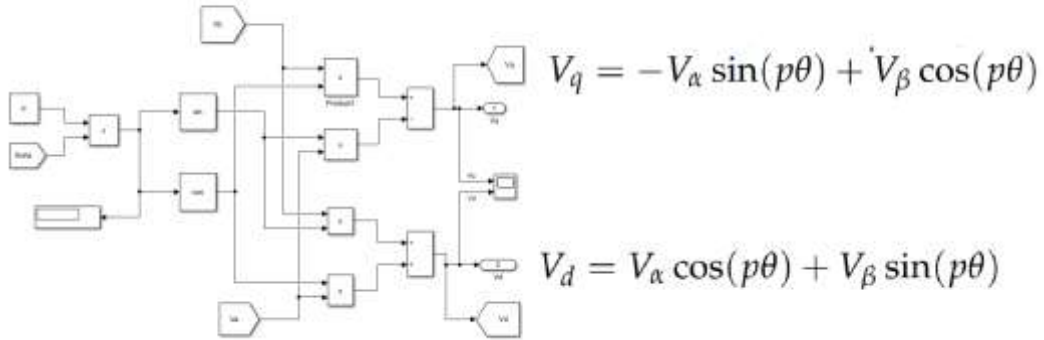
Şekil 53. Step Motor Dinamik Denklemleri

Şekil 53'te step motorun dinamik davranışını modelleyen temel denklemleri göstermektedir. Bu denklemler, step motorun elektriksel ve mekanik davranışlarını açıklar. Step motorun farklı fazlarına uygulanan voltajların nasıl modellendiğini gösterir. Step motorlar genellikle çok fazlıdır (örneğin, iki fazlı veya üç fazlı) ve her bir faza uygulanan voltaj, motorun dönme hareketini kontrol eder. Şekil 54'te her bir fazdaki voltajın akım ve manyetik alan üzerindeki etkisini açıklar.



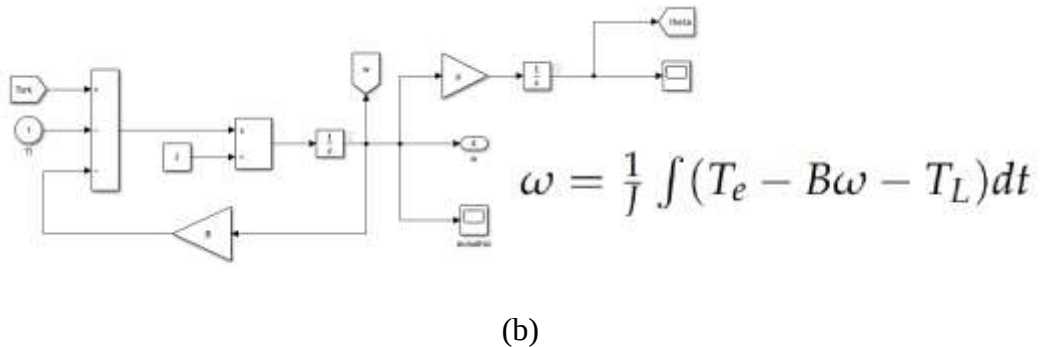
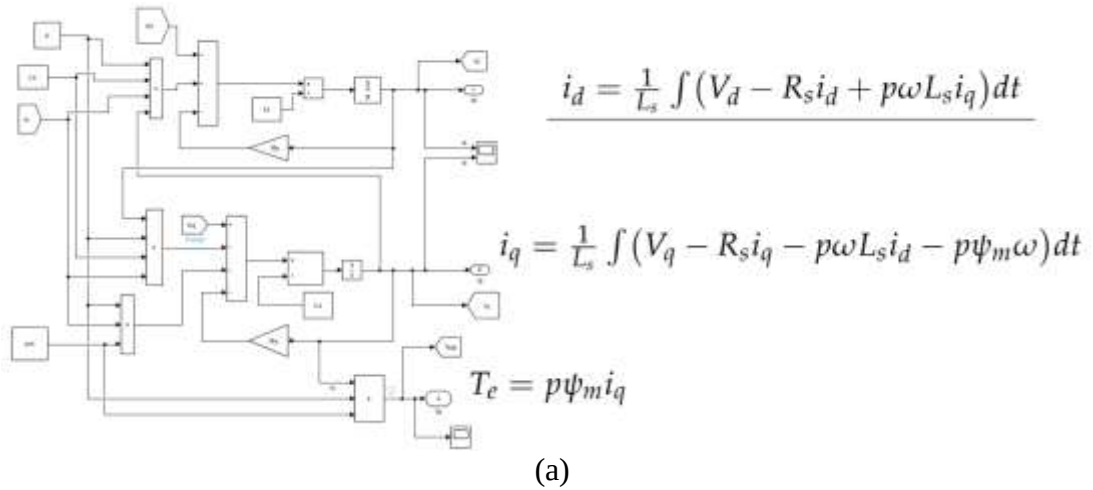
Şekil 54. Fazların voltaj değerlerinin modellenmesi

Park dönüşümü, step motorun faz voltajlarını ve akımlarını daha basit bir referans çerçevesine dönüştürmek için kullanılan bir matematiksel tekniktir. Bu dönüşüm, motorun dinamik davranışını analiz etmeyi kolaylaştırır ve kontrol sistemlerinde kullanılır. Şekil 55'te Park dönüşümdeki voltaj değerleri gösterilmiştir. Park dönüşümü sonucunda elde edilen voltaj değerlerini gösterir.



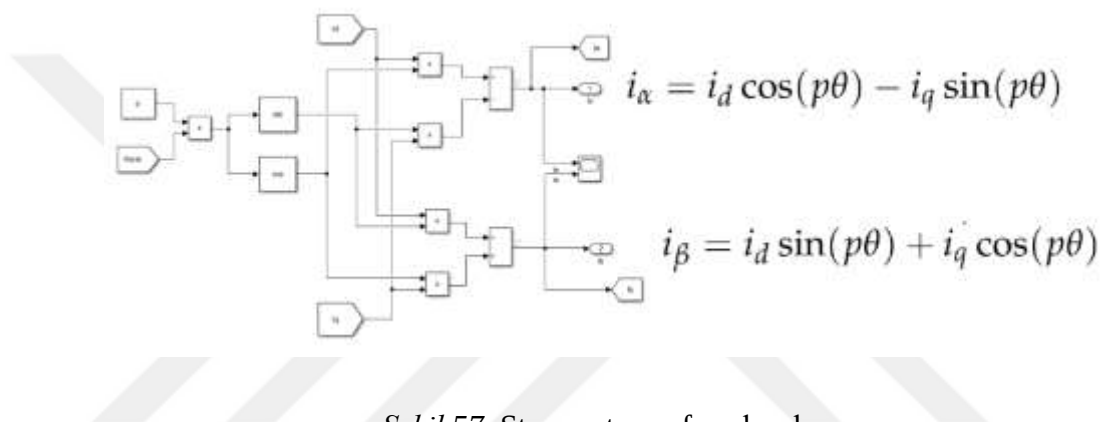
Şekil 55. Park dönüşümdeki voltaj değeri

Şekil 56'da, Park dönüşümü sonucunda elde edilen akımlar gösterilmiştir. Bu akımlar, motorun tork üretimini doğrudan etkiler. Bu bölüm, akımların tork üzerindeki etkisini ve motorun dönme hareketini nasıl sağladığını açıklar. Tork, motorun dış yüklerle karşı koyma yeteneğini belirler. Üretilen elektriksel tork motorun dönme hızı (ω) ve açısal pozisyonu (θ) arasındaki ilişkiyi gösterir. Açısal hız, motorun ne kadar hızlı döndüğünü belirlerken, açısal pozisyon, motorun dönme açısını ifade eder. Bu değerler, motorun dinamik davranışını ve kontrol edilebilirliğini belirler.

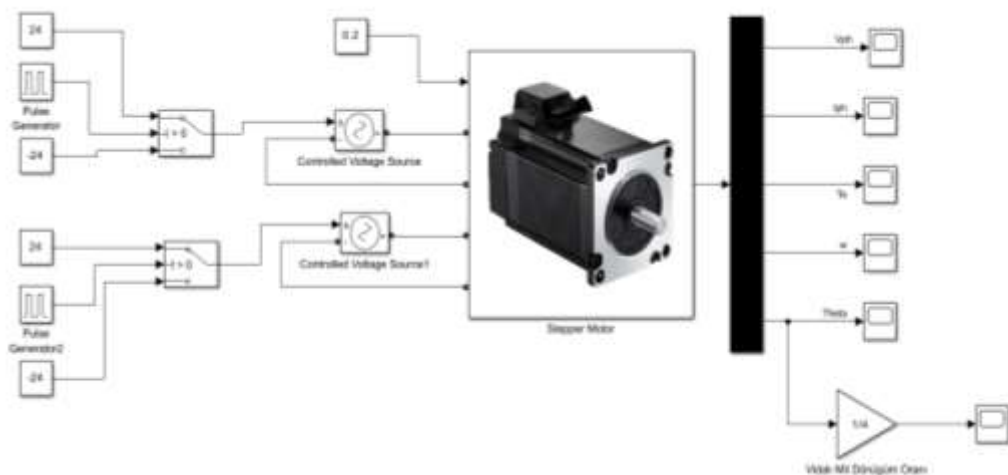


Şekil 56. Üretilen tork, açısal hız ve dönme açısı değerleri

Step motorun farklı fazlarındaki akımların zaman içinde nasıl değiştiğini gösterir. Faz akımları, motorun tork üretimini ve dönme hareketini doğrudan etkiler. Bu akımların kontrolü, motorun performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. *Şekil 57*'de gösterilen Faz akımları, motorun stator bobinlerinde (fazlarında) akan akımlardır. Örneğin, iki fazlı bir step motorda, A fazı ve B fazı olmak üzere iki farklı akım bulunur. Bu akımlar, motorun stator bobinlerine uygulanan voltajların bir sonucu olarak oluşur. Faz akımları, statorun sabit referans çerçevesinde ölçülür. Yani, bu akımlar motorun sabit duran stator bobinlerinde akan akımlardır.



MathWorks şirketi tarafından step motor için gerçekleştirilen model denklemlerle oluşturulan modelin kütüphaneyi hazır hale getirmiştir. Bundan dolayı sistem modellenmesi kolaylığı açısından MATLAB 'deki kütüphane kullanılmıştır. Kullanılan model *Şekil 58*'de gösterilmiştir [32, 116].



Sekil 58. MATLAB ortamındaki Step Motor Modeli

Mikro adım yöntemi ile step motorun kontrolü ile sistemde gergi kontrolü için yapılmamıştır. Bu kontrol yöntemi sistemdeki travers ve sarıcı kısımlarında kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise sistem step motorun atacağı tur sayısının, adım sayısı ve katman sayısı gibi parametrelerin sabit olup kontrolü matematiksel denklemlerle hesaplanmaktadır. Bu değişkenlerin kontrolü için sistem üzerinde mikro adım yönteminin kullanılması gerekmektedir. Matlab programında motor bloğunun 5 farklı çıktısı bulunmaktadır. Çıkışlar, bobinlerin voltajı, bobinlere giren akım, motorun üretmiş olduğu tork, açısal hız ve açısal yer değiştirme. Sistem çıkışındaki 1/4 ise vidalı milin bir tam tur döndüğünde eksenel yer değiştirmesidir. Bu yöntem genel mantığı, motor sürücülerinin beslemesi olan 24V ile bir anahtarlama elemanı ile her bir fazın iki uçlarını sırasıyla tetiklemektedir. Modellenen “ Pulse Generator ”ler arasında 0.25 ile faz farkı oluşacak şekilde ayarlanmıştır.

5. BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde, endüstriyel tip bobin sarma makinasının gergi kontrol ünitesinin matematiksel modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları detaylı bir şekilde sunulmakta, elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve uygulanan kontrol tekniklerinin performans karşılaştırması yapılmaktadır. Çalışmalar sırasında kullanılan sistem özellikleri, kontrol algoritmaları ve analiz yöntemleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

5.1. Simülasyon Ortamı ve Teknik Detaylar

Simülasyon çalışmaları, 32 GB RAM kapasitesine sahip, INTEL Core i7 işlemci ve Windows 10 işletim sistemi ile donatılmış bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon yazılımı olarak MATLAB R2023a versiyonu kullanılmıştır. Bu donanım ve yazılım konfigürasyonu, yüksek hesaplama kapasitesi ve doğruluk gerektiren kontrol algoritmalarının simülasyonu için uygun bir ortam sağlamıştır. Gergi kontrol ünitesinin simülasyonunda, sistemin matematiksel modeli transfer fonksiyonu ile ifade edilmiştir. Bu model üzerinde, sistem çıkışında meydana gelen kuvvet değişimleri farklı kontrol algoritmaları ile incelenmiştir. Kullanılan kontrol algoritmaları arasında PID, bulanık mantık tabanlı kontrol, Bulanık Mantık Esaslı Adaptif PID kontrol, parçacık sürü optimizasyonu ile PID kontrol, genetik algoritma (GA) optimizasyonu ile PID ve kayan kipli kontrol (Sliding Mode Control) yer almaktadır. Simülasyon 5 saniye çalıştırılmıştır. Grafiğin dikey eksenini kuvvet cinsinden N değerini göstermektedir.

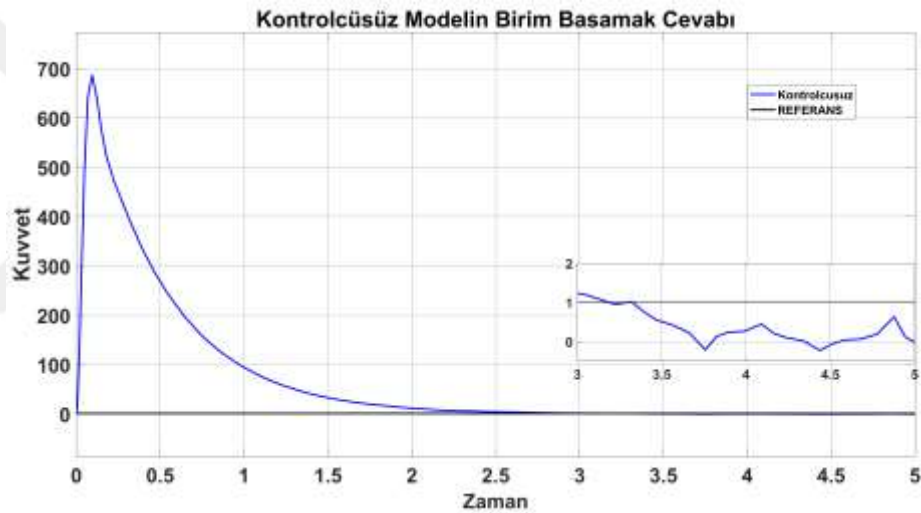
5.2. Çalışma Yöntemi ve Uygulanan Kontrol Teknikleri

Simülasyon çalışmaları kapsamında, her bir kontrol algoritması, belirli bir referans kuvvet değerine ulaşma ve sistem dinamiklerine uyum sağlama yeteneği açısından test

edilmiştir. Kontrol algoritmaları, sistemin kararlılığı, hızlı yanıt süresi ve referans takibi performansına göre değerlendirilmiştir. Sistem çıkışında elde edilen kuvvet, her bir kontrol metodu için alt başlıklar halinde verilmiş, algoritmaların avantajları ve dezavantajları ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır. Bunun yanı sıra, simülasyon sonuçları grafikler ve tablolar ile desteklenerek açıklanmıştır.

5.2.1. Kontrolcüsüz sistem modeli

Sistem modelinde, girişinde birim basamak sinyali uygulanmıştır. Çıkışında ise sistemin hatasında oluşan sinyaller karşılaştırılmıştır. Modelin birim basamak cevabı *Şekil 59*'da gösterilmiştir. *Şekil 59*'da verilen modelin parametreleri Tablo 8'de gösterilmiştir.



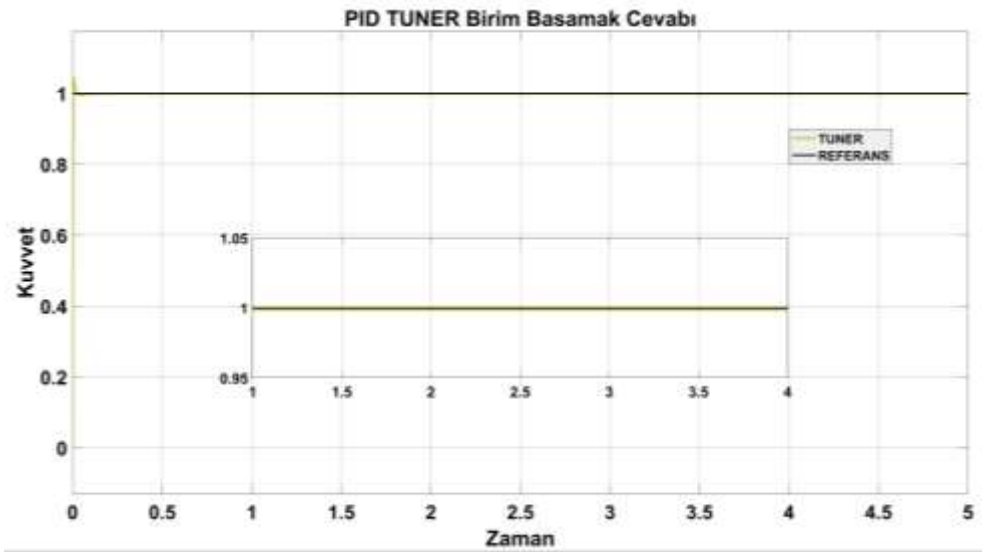
Şekil 59. Kontrolcüsüz Modelin Birim Basamak Cevabı

Tablo 8. Kontrolcü bloğu olmayan sistemin birim basamak cevabı

Kontrol Algoritmaları	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı durum hatası
Kontrolcüsüz Model	0.0031	4.9999	0.0942	1.1978e03	687.224	1.0173

5.2.2. PID Tuner Modeli

MATLAB programında ayarlana PID değerleri sistem modeline uygulanmıştır. Uygulanan PID değerleri sonucunda birim basamak cevabı *Şekil 60*'ta gösterilmektedir. *Şekil 60*'ta gösterilen modelin parametreleri Tablo 9'da gösterilmiştir.



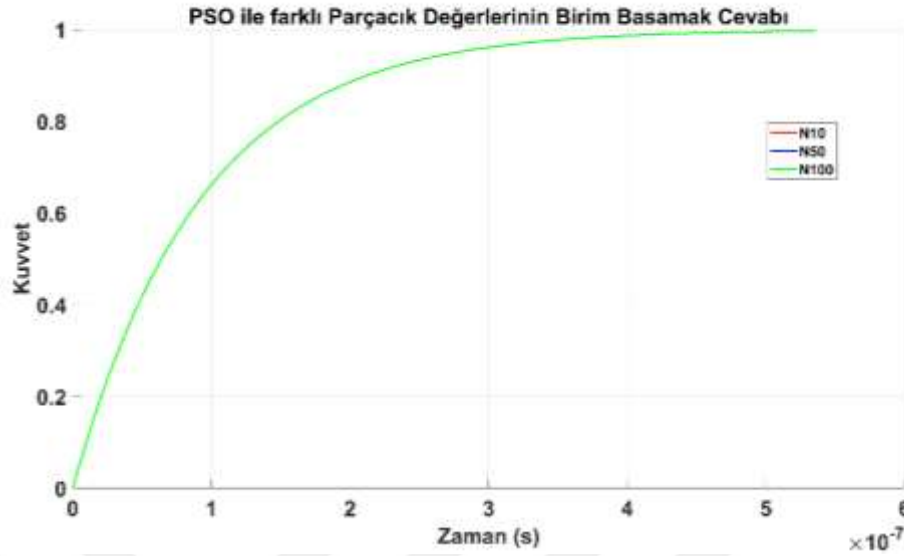
Şekil 60. PID Tuner ile Kontrol Edilen Sistemin Birim Basamak Cevabı

Tablo 9. PID Tuner sisteminin birim basamak cevabı

Kontrol Algoritmaları	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
PID Tuner	0.0019	0.0157	0.0055	7.6817	1.0762	-0.0006

5.2.3. PSO Algoritması ile PID Optimizasyonu

Farklı parçacık sayıları ile 1000 iterasyon boyunca simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların birim basamak cevapları Şekil 61’de verilmiştir. Şekil 61’de yer alan modellerin parametre değerleri ise ayrıntılı olarak Tablo 10’da sunulmuştur.



Şekil 61. Farklı Parçacık Sayılarındaki Modellerin Birim Basamak Cevabı

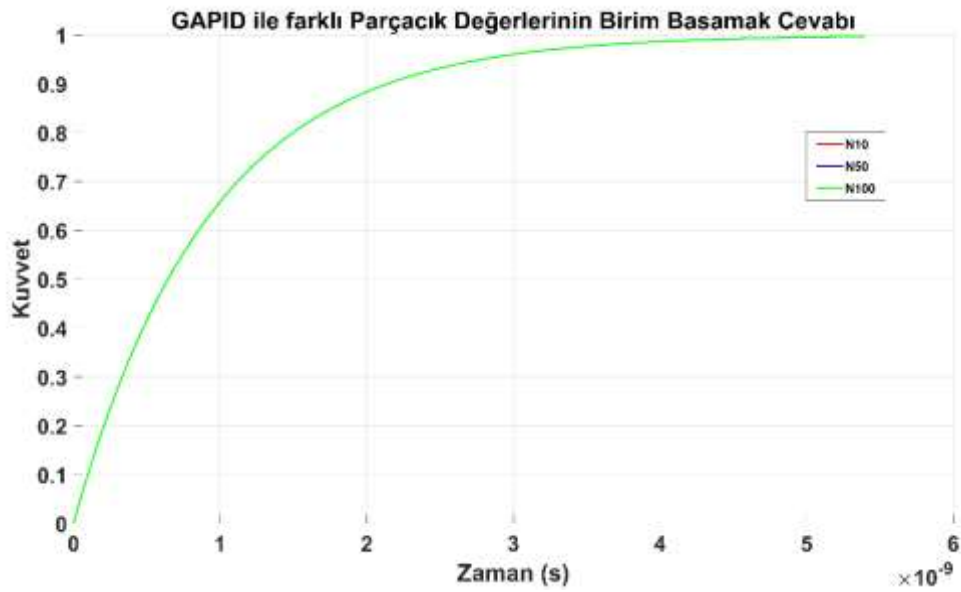
Tablo 10. PSO da kullanılan farklı parçacık sayılarındaki parametre tablosu

Parçacık Sayıları (N)	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
N = 10	2.0226 e-07	3.5817 e-07	6.7587 e-07	0	0.9993	-0.0030
N = 50	2.0226 e-07	3.5817 e-07	6.7587 e-07	0	0.9993	-0.0030
N = 100	2.0226 e-07	3.5817 e-07	6.7587 e-07	0	0.9993	-0.0030

Tablo 10'da Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasında kullanılan farklı parçacık sayılarına ait sistem performans parametreleri özetlenmiştir. Tabloya göre, parçacık sayısı arttıkça sistem kontrol performansında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir; tüm durumlarda sistem benzer dinamik özellikler sergilemiştir. Bu sonuçlar, farklı parçacık sayılarının sistem dinamiklerine herhangi bir anlamlı etki oluşturmadığını göstermektedir. Özellikle yükselme süresi, yerleşme süresi, tepe zamanı, aşım, tepe değeri ve kalıcı durum hatası gibi temel performans metriklerinin her birinde aynı değerlere ulaşılmıştır. Bu durum, PSO algoritmasının parçacık sayısından bağımsız olarak kararlı bir kontrol performansı sunduğunu göstermektedir.

5.2.4. GAPID ile PID Optimizasyonu

Farklı hücre sayılarıyla ile 1000 iterasyon boyunca simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların birim basamak cevapları *Şekil 62*'de verilmiştir. *Şekil 62*'de yer alan modellerin parametre değerleri ise ayrıntılı olarak Tablo 11'de sunulmuştur.



Şekil 62. Farklı Hücre Sayıları ile Optimize Edilen PID Modelleri

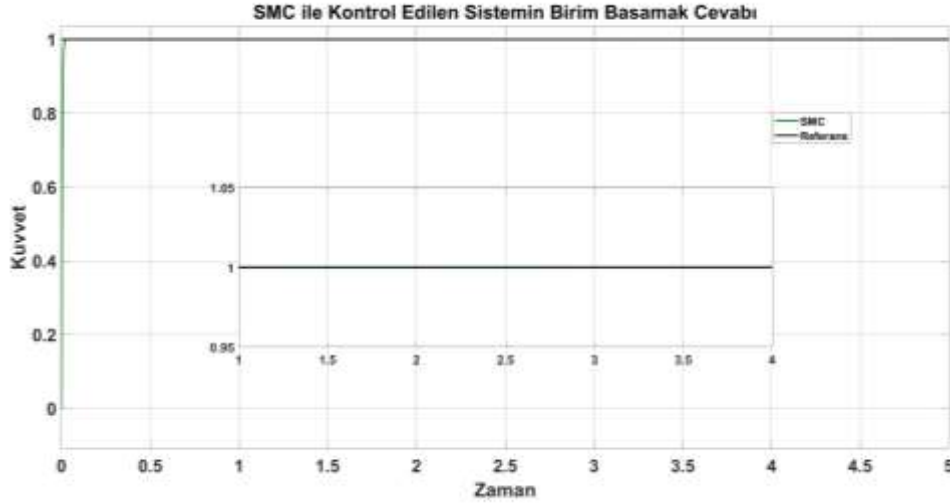
Tablo 11. GAPID de kullanılan farklı parçacık sayılarındaki parametre tablosu

Parçacık Sayıları (N)	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
N = 10	2.0197 e-09	3.5114 e-09	5.3987 e-09	0	0.9970	0.0030
N = 50	2.0040 e-09	3.4841 e-09	5.3567 e-09	0	0.9970	0.0030
N = 100	2.0037 e-09	3.4836 e-09	5.3560 e-09	0	0.9970	0.0030

5.2.5. Kayan Kipli Kontrol Modeli

Kayan yüzey kontrolü (Sliding Mode Control, SMC) ile modellenen sistemin simülasyonu 5 saniyelik bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu süre zarfında, sistemin birim basamak cevabı *Şekil 63*'te sunulmuştur. Tablo 12'de SMC kontrol algoritmasının

temel performans parametrelerini detaylandırmaktadır. Yükselme süresi, yerleşme süresi, tepe zamanı, aşım, tepe değeri ve kalıcı durum hatası gibi parametreler kullanılarak kontrol performansı değerlendirilmiştir.



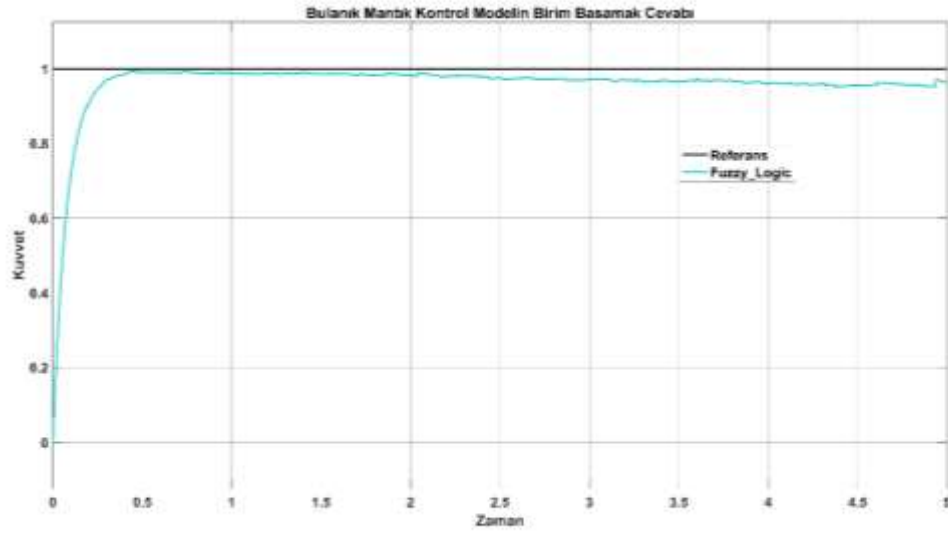
Şekil 63. SMC kontrollü modelin birim basamak cevabı

Tablo 12. SMC kontrollü sistemin parametreleri

Kontrol Algoritmaları	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
SMC	0.0410	0.0659	0.1664	1.6576	0.9978	0.0003

5.2.6. Fuzzy Logic ile Kontrol

Şekil 43'te gösterilen Bulanık mantık kontrol organlı sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tablo 6'da gösterilen kurallar çerçevesinde Şekil 44 ve Şekil 45'te gösterilen üyelik fonksiyonları ile kontrol modeli sağlanmıştır. Bu oluşturulan modelin birim basamak cevabı Şekil 64'te gösterilmiştir. Şekil 64'te verilen modelin parametreleri Tablo 13'te gösterilmiştir.



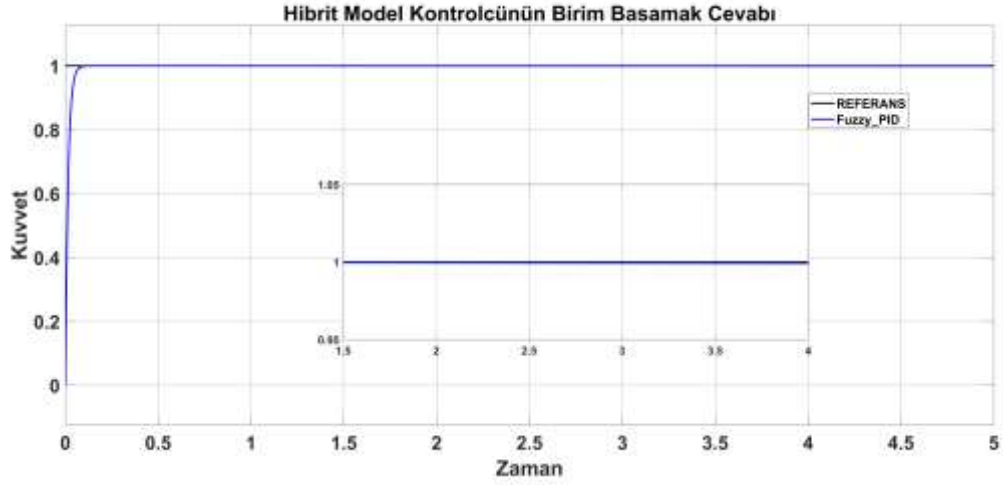
Şekil 64. Bulanık Mantık Kontrollü Modelin Birim Basamak Cevabı

Tablo 13. Bulanık Mantık Modelli Sistemin Parametreleri

Kontrol Algoritmaları	Yükse lme süresi	Yerleşm e süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
Bulanık Mantık	0.1721	0.2992	0.4503	0.4630	0.9932	-0.0114

5.2.7. Fuzzy Logic Adaptif PID Hibrit Model

Bulanık mantık esaslı adaptif PID denetim organı kontrolündeki sistemde kontrolcü, önceden belirlenmiş olan PID değerlerini güncelleyerek en iyi sonucu aramaktadır. Denetim organlarının sistem modeline uyguladığı kontrol sinyalleri neticesinde alınan salınım açısı çıkışları referans sinyalin de bulunduğu grafikler halinde sunulmuştur. Fuzzy Logic adaptif PID hibrit modelin birim basamak cevabı Şekil 65'te gösterilmiştir. Şekil 65'te gösterilen modelin parametreleri Tablo 14'te gösterilmiştir.



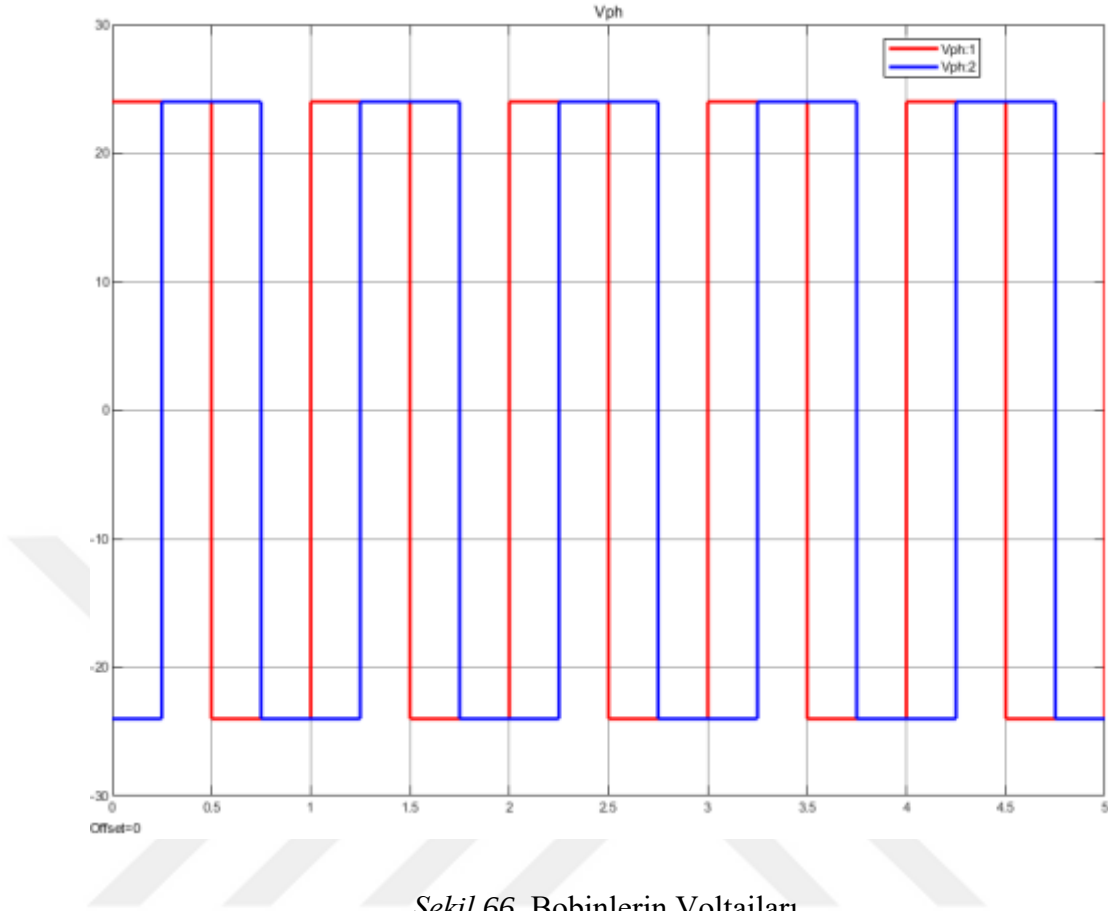
Şekil 65. Hibrit Model Kontrolcünün Birim Basamak Cevabı

Tablo 14. Bulanık Mantık Adaptif PID Modelli Sistemin Parametreleri

Kontrol Algoritmaları	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
Bulanık Mantık Adaptif PID	0.0329	0.0582	0.1954	0.0701	0.999	-8.1542 e-04

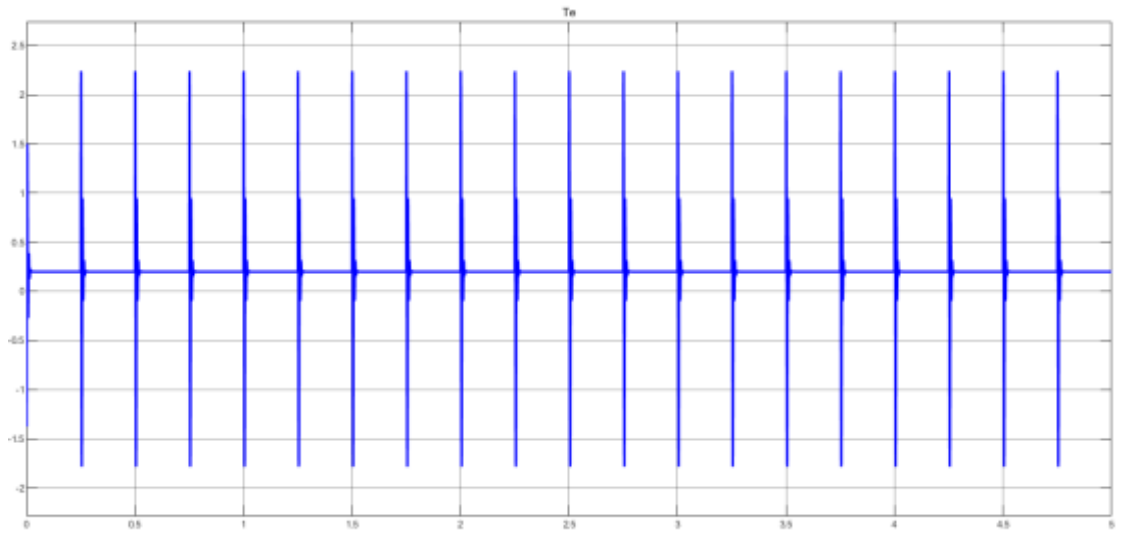
5.2.8. Mikro adım yöntemi ile step motor kontrolü

Şekil 58'te sunulan step motor kütüphanesi kullanılarak oluşturulan model, motor kontrolünün sağlanması amacıyla tasarlanmıştır. Sarıcı ve travers bölümlerinde kullanılan bu yöntem, motorun hız değişimini fazlar arasında sabit tutarak, her adımda hedeflenen açısal hareketin hassas bir şekilde kontrol edilmesini hedeflemektedir. Bu yaklaşım, motorun hassas pozisyonlama gereksinimlerini karşılamayı ve her bir adımda doğru açısal ilerleme sağlamayı amaçlamaktadır. Şekil 66'da Fazlarını besleyen voltaj değerlerini göstermektedir.

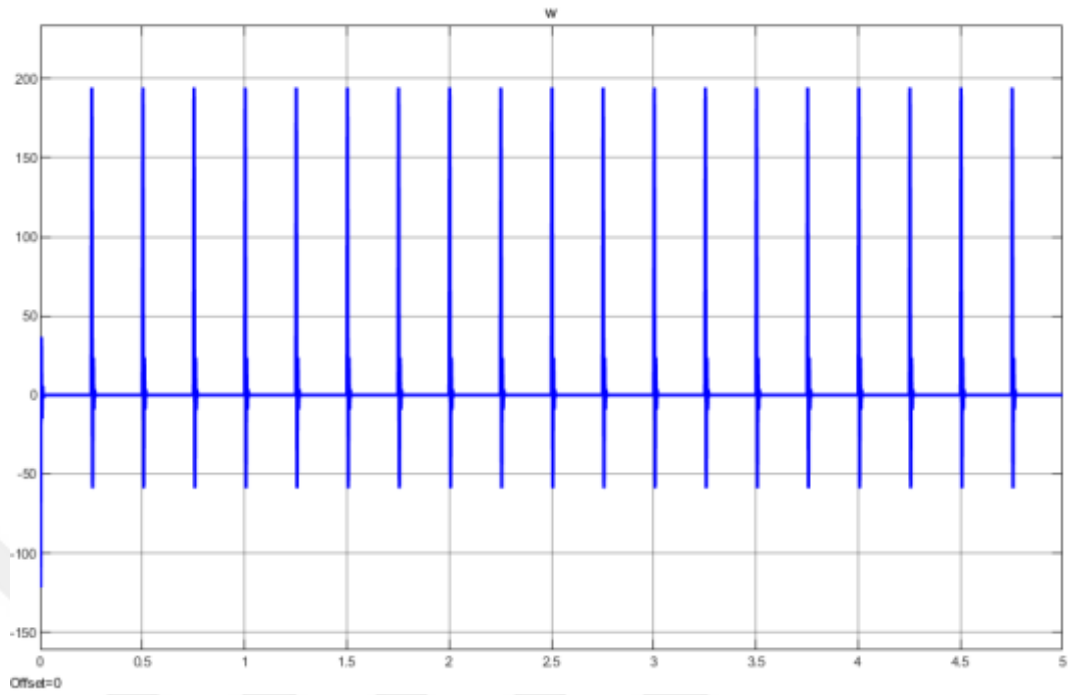


Şekil 66. Bobinlerin Voltajları

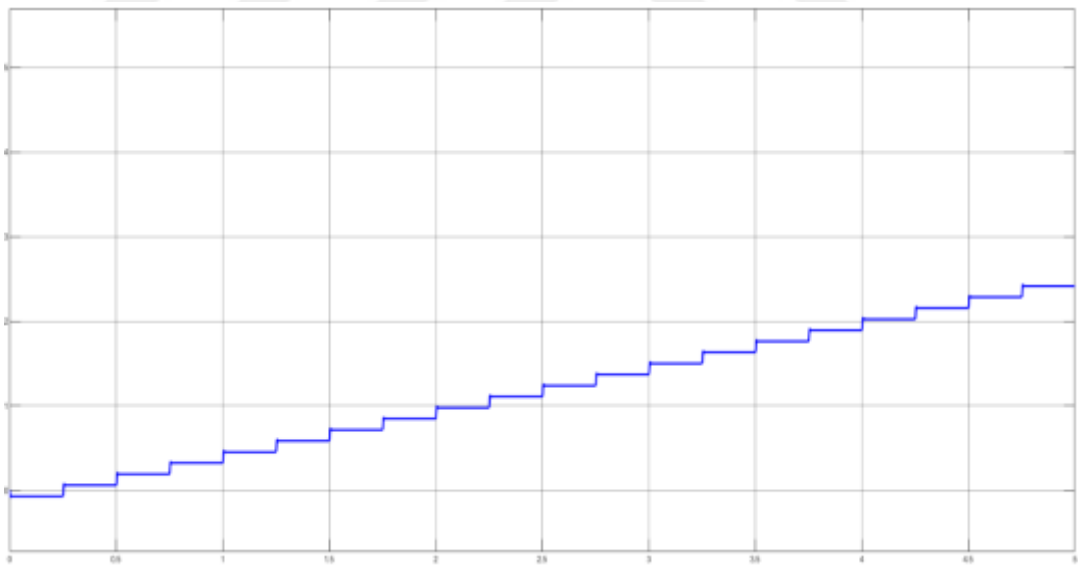
Şekil 67’de üretilen elektriksel tork gösterilmektedir. Motorun hızı ve Konum değişimini ise Şekil 68 ve Şekil 69’da gösterilmektedir.



Şekil 67. Üretilen Elektriksel Tork



Şekil 68. Motorun hızı



Şekil 69. Motorun yer değiştirmesi

5.3. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Karşılaştırma

Bu çalışmada, gerji kontrolü amacıyla step motorun hareketi ile vidalı milin konumunun değiştirilmesi temel alınmıştır. Gerji kontrol mekanizması, vidalı milin doğrusal hareketi sayesinde gerilim kuvvetinin hassas bir şekilde ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu

mekanizmanın performansını optimize etmek ve farklı kontrol yöntemlerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla altı farklı kontrol algoritması incelenmiştir. Ayrıca, kontrol algoritmalarının sisteme etkisini net bir şekilde gözlemlemek için kontrolcüsüz modelin performansı da analiz edilerek karşılaştırmaya dâhil edilmiştir. Değerlendirme kapsamında; sistemin Yükselme süresi, Yerleşme süresi, Tepe zamanı, aşım, Tepe değeri ve kalıcı durum hatası gibi temel performans parametreleri dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin her biri, sistemin dinamik davranışını ve kararlılığını karakterize etmek için önem taşımaktadır. Tablo 15'te, kontrol algoritmaları ile kontrolcüsüz modelin karşılaştırmalı performans sonuçları verilmiştir.

Tablo 15. Kontrol algoritmalarının performans sonuçları

Kontrol Algoritmaları	Yükselme süresi	Yerleşme süresi	Tepe zamanı	Aşım	Tepe değeri	Kalıcı Durum Hatası
Kontrolcüsüz	0.0031	4.9999	0.0942	1.1978e03	687.224	1.0173
PID Tuner	0.0018	0.9020	0.0053	46.071	10.447	-0.0013
PSO	2.0226 e-07	3.5817 e-07	6.7587 e-07	0	0.9993	-0.0030
GAPID	2.0037 e-09	3.4836 e-09	5.3560 e-09	0	0.9970	0.0030
SMC	0.0410	0.0659	0.1664	16.576	0.9978	0.0003
Bulanık Mantık	0.1721	0.2992	0.4503	0.4630	0.9932	-0.0114
Hibrit Kontrol	0.0329	0.0582	0.1954	0.0701	0.999	-8.1542 e-04

Tablo 15 incelendiğinde, kontrolcüsüz modelin dinamik performansının son derece düşük olduğu ve sistemin dengesiz bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Kontrolcüsüz model sistemin ciddi bir kararsızlık sergilediğini ve kontrolsüz bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sistemin aşırı yüksek aşım (%1197.8) değerine sahiptir. Ayrıca, sistemin yerleşme süresinin uzun olması (4.9999 saniye) ve kararlı hal hatasının sıfırdan farklı olması (1.0173), sistemin performansının büyük oranda düzensiz davrandığını göstermektedir. Bu olumsuzluklar, bir kontrol algoritması uygulanmasının sistem performansını iyileştirmek için zorunlu olduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Kontrol algoritmalarının uygulanması ile sistem performansında gözle görülür iyileşmeler elde edilmiştir. PID Tuner algoritması, kontrolcüsüz modele kıyasla hızlı bir

Yükselme süresi (0.0018 s) ve kısa bir Yerleşme süresi (0.9020 s) sunmuş; ancak, %46.071 gibi görece yüksek bir aşım değerine sahip olması, PID tabanlı kontrolün hızlı fakat aşırı geçici tepkiler sergileyebileceğini göstermiştir. PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) ve GAPID (Genetik Algoritma PID) algoritmaları, aşım değerini sıfıra indirerek geçici tepkilerin minimize edilmesinde önemli bir başarı elde etmiştir. Özellikle GAPID algoritması, 0.0030 gibi düşük bir kalıcı durum hatası değeri ile en kararlı kontrol performansını sunmuştur. Bununla birlikte, bu algoritmaların çok düşük zaman parametreleri (PSO için 2.0226e-07 s gibi) sistem simülasyonlarının ideal koşullarda gerçekleştirildiğini ve fiziksel sistemlerde bu değerlerin doğrulanması gerektiğini ortaya koymaktadır. PSO ve GAPID algoritmaları, optimize edilen değerlerin farklı parçacık ve jenerasyon sayılarına rağmen aynı olduğunu göstermiş ve bu durum, sistemin az sayıdaki parçacık ve jenerasyonla bile çözüm üretebileceğini ortaya koymuştur. Kayan Yüzey Kontrolü (SMC) algoritması ise, kısa bir Yerleşme süresi (0.0659 s) ve düşük bir aşım (%16.576) sunarak etkili bir kontrol performansı sağlamış; ancak, Tepe zamanı (0.1664 s) değerinin optimizasyon temelli algoritmalarla kıyasla daha uzun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kayan yüzey kontrolünün kararlılık sağlamadaki başarısına rağmen hız açısından diğer algoritmalarla rekabet edemeyebileceğini göstermiştir. Bulanık Mantık Kontrolü, diğer algoritmalarla kıyasla daha uzun bir Yükselme süresi (0.1721 s) ve Yerleşme süresi (0.2992 s) sergilemiştir. Bununla birlikte, düşük bir aşım (%0.463) değeri sunarak, kontrolcüsüz modele kıyasla sistem kararlılığında önemli bir iyileşme sağlamıştır. Bu durum, bulanık mantık kontrolünün yumuşak geçişler ve düşük kararlı hata gereksinimleri için özellikle uygun olduğunu göstermiştir. Hibrit kontrol algoritması ise, düşük aşım (%0.0701), kısa bir Yerleşme süresi (0.0582 s) ve dengeli bir kontrol performansı sunarak dikkat çekmiştir. Bu sonuçlar, hibrit kontrol stratejilerinin farklı algoritmaların avantajlarını bir araya getirerek sistemin hem hızlı hem de kararlı bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanıdığını göstermiştir. Bu değerlendirmeler, kontrol algoritmalarının seçimi ve optimizasyonunun, sistemin performans gereksinimlerine ve uygulama koşullarına göre dikkatlice yapılmasının önemini vurgulamaktadır. Özellikle, algoritmaların teorik başarılarının pratik uygulamalarla desteklenmesi, kontrol sistemlerinin güvenilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Kontrol algoritmaları üzerine yapılan analizler, her bir yaklaşımın sistem performansı üzerindeki etkilerini mühendislik bağlamında anlamlandırmayı mümkün kılmıştır. GAPID algoritmasının düşük kalıcı durum hatası ile öne çıkması, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda önemli bir

avantaj sağlarken, SMC algoritmasının daha hızlı geçici tepkisi, yüksek dinamik gereksinimleri olan sistemler için uygunluğunu göstermektedir. Simülasyon ortamında elde edilen PSO ve GAPID algoritmalarının sıfır aşım sağlaması, teorik olarak bu algoritmaların hassas dengeleme gerektiren sistemler için ideal olduğunu ortaya koysa da, fiziksel sistemlerde doğrulama gerekliliği dikkat çekmektedir. Ayrıca, PSO ve GAPID algoritmalarının az sayıda parçacık ve jenerasyon ile benzer sonuçlar üretmesi, optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini ve sistem parametrelerine duyarlılığını vurgulamaktadır. Hibrit kontrol algoritmasının dengeli performansı, farklı algoritmaların güçlü yönlerini birleştirerek kararlılık ve hız arasında en uygun bir denge sunduğunu göstermekte ve performans ile maliyet gereksinimleri arasında bir denge arayan uygulamalar için tercih edilebilirliğini artırmaktadır. Bu bulgular, simülasyon ortamında elde edilen sonuçların gerçek dünya koşullarında test edilmesinin ve algoritmaların uygulama bağlamında seçiminin, yalnızca performans açısından değil, maliyet ve uygulama kolaylığı bakımından da dikkatle ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

6. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Tartışma

Bu çalışmada, endüstriyel bobin sarma makinelerine yönelik olarak gerçekleştirilen tasarım, yapısal analiz ve kontrol çalışmaları, literatürdeki mevcut yöntemlerle karşılaştırılarak önemli bulgular elde edilmiştir. Bobin sarma makinelerinin tasarımında, dört temel bileşen olan boşaltıcı, gergi kontrol ünitesi, sarıcı ve travers üniteleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bileşenler, hem mekanik dayanıklılık hem de kontrol hassasiyeti açısından incelenmiştir.

Boşaltıcı ünitesi analizlerinde, çelik destek yapıların kullanımı, hem maliyet hem de dayanıklılık açısından avantaj sağlamıştır. Bununla birlikte, motor momentinin aktarımı sırasında dişliler arasındaki kayma ve sürtünme etkilerinin optimize edilmesi, sistemin genel performansını artırmıştır. Elde edilen toplam deformasyon ve eşdeğer gerilme sonuçları, tasarımın aşırı yük koşullarında bile güvenli olduğunu kanıtlamıştır. Gergi kontrol ünitesinde ise yük hücresi (loadcell) ve step motor entegrasyonu, sistemin dinamik değişimlere hızlı bir şekilde adapte olmasını sağlamıştır. Bu sistem, telin gerginliğini anlık olarak kontrol ederek deformasyon ve malzeme hasarını minimize etmiştir. Ayrıca, alüminyum profillerin kullanımı, sistemin hafifliğini artırırken yüksek emniyet katsayıları ile güvenli bir çalışma ortamı sunmuştur. Sarıcı ve travers ünitesinde gerçekleştirilen analizler, düzgün ve homojen bir sarımın elde edilmesi için gerekli olan mekanik ve elektronik uyumu vurgulamaktadır. Özellikle travers ünitesindeki hassas hareket kontrolü, sarım işlemi sırasında telin eşit şekilde dağılmasını sağlamış ve kaliteyi artırmıştır. Tüm bu bulgular, sistemin endüstriyel uygulamalarda yüksek performans gösterebileceğini ve uzun ömürlü bir kullanım sunabileceğini göstermektedir.

Kontrol algoritmalarına yönelik yapılan karşılaştırmalı analizler, klasik PID kontrolün düşük karmaşıklığı ve hızlı tepki süresi ile avantaj sağladığını, ancak değişken koşullara adaptasyon açısından yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Gelişmiş algoritmalar arasında yer alan Fuzzy-PID ve GAPID, yüksek doğruluk ve kararlılık sağlamış, özellikle dinamik koşullarda üstün bir performans sergilemiştir. PSO ve GAPID algoritmalarının optimizasyon yetenekleri, sarım işlemi sırasında oluşabilecek hata oranlarını minimuma indirmiştir. Bununla birlikte, bu algoritmaların gerçek zamanlı uygulamalarda dikkate alınması gereken bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

6.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, endüstriyel bobin sarma makineleri için yenilikçi bir tasarım geliştirilmiş ve detaylı yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen tasarımda boşaltıcı, gergi ve sarıcı-travers üniteleri, ayrı ayrı analiz edilerek sistemin bütünsel performansı değerlendirilmiştir. Bu analizlerde elde edilen bulgular şunlardır:

- **Boşaltıcı Ünitesi:** Boşaltıcı ünitesinde kullanılan çelik destek yapılar ve motor tork artırıcı dişli sistemi, yüksek dayanıklılık ve düşük deformasyon sağlamıştır. Bu bölümde elde edilen emniyet katsayısı değerleri, sistemin aşırı yük koşullarında bile güvenli çalışabileceğini göstermiştir.
- **Gergi Kontrol Ünitesi:** Yük hücresi ve step motorun entegrasyonu, dinamik yük değişimlerine hızlı bir şekilde adapte olabilen bir kontrol mekanizması sunmuştur. Alüminyum profillerin kullanımı, sistemin hafifliğini artırmış ve deformasyon miktarını minimize etmiştir.
- **Sarıcı ve Travers Ünitesi:** Bu üniteye gerçekleştirilen analizler, motor ve mekanik elemanların doğru bir şekilde senkronize edildiğini ve düzgün bir sarım işlemi sağlandığını ortaya koymuştur. Travers ünitesinin hassas kontrolü, telin düzenli bir şekilde sarılmasını mümkün kılmıştır.

Kontrol algoritmaları simülasyonlarında ise şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. **Klasik PID Kontrol:** Hızlı tepki süresi ve basit uygulanabilirlik sağlamış, ancak adaptasyon gerektiren dinamik durumlarda yetersiz kalmıştır.
2. **Fuzzy, Fuzzy-PID ve SMC:** Dinamik koşullara adaptasyon yeteneği ile yüksek doğruluk ve kararlılık sağlamıştır.

3. **PSO ve GAPID:** Optimizasyon kabiliyeti ile hata oranlarını minimize etmiş, ancak gerçek zamanlı uygulamalarda dinamik durumları dikkate alınmalıdır.

6.3. Öneriler

Bu çalışmanın bulgularına dayanarak gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- **Malzeme Seçimi:** Gergi kontrol ünitesinde kullanılan alüminyum profiller yerine, karbon fiber gibi daha dayanıklı ve hafif malzemeler tercih edilebilir. Karbon fiberin kullanımı, sistemin genel dayanıklılığını artırırken uzun vadede bakım ve onarım maliyetlerini düşürebilir.
- **Kontrol Algoritmaları:** Gelişmiş kontrol algoritmalarının gerçek zamanlı uygulamalarda daha etkin kullanılabilmesi için optimize edilmiş versiyonlarının geliştirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca, bu algoritmaların donanım hızlandırma (hardware acceleration) teknolojileriyle birleştirilmesi, daha hızlı ve verimli kontrol imkanı sağlayabilir.
- **Sensör Teknolojisi:** Daha yüksek hassasiyete sahip yük hücreleri ve gelişmiş sensörlerin entegrasyonu, gergi kontrolü sırasında daha hassas ölçüm ve kontrol imkânı sağlayabilir. Bunun yanında, çoklu sensör füzyon teknolojilerinin kullanılması, sistemin daha kapsamlı veri analizi yapmasına olanak tanıyabilir.
- **Yapay Zekâ Entegrasyonu:** Makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı algoritmaların sarım sürecine entegrasyonu, adaptif kontrol mekanizmalarının geliştirilmesini mümkün kılabilir. Bu tür algoritmalar, sarım sırasında oluşabilecek anomalileri öngörerek proaktif bir şekilde müdahale edebilir ve üretim süreçlerinde hata oranını azaltabilir.
- **Enerji Verimliliği:** Enerji tüketimini minimize edecek daha verimli motor ve güç sistemlerinin kullanımı, çevresel ve ekonomik açıdan önemli faydalar sağlayabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan sistemlerin tasarlanması, sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilir.
- **Endüstriyel Uygulamalar:** Geliştirilen sistemin daha büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda test edilmesi, bu tür sistemlerin yaygınlaşmasına katkı sağlayabilir. Sektörde yaygın olarak kullanılan bakır ve türevlerinden üretilen iletkenler ile kablolar, uygun kesit alanına ve çapa sahip durumlarda sarım

işlemlerinin deneysel olarak gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu testler sırasında elde edilecek veriler, sistemin performansını daha da optimize etmek için kullanılabilir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın bulguları, endüstriyel bobin sarma makinelerinin tasarımı ve kontrolü için önemli bir referans sunmaktadır. Gelecekte, burada önerilen yöntemlerin daha geniş kapsamlı sistemlerde uygulanması, bu alandaki yeniliklere katkıda bulunacaktır.



KAYNAKÇA

1. Delis, J. S., 1993. Design considerations, machinery and control options in coil winding. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, **9**: (4): 16-22.
2. Yeung, M. F., Falkner, A. H., Gergely, S., 1995. The control of tension in textile filament winding. **Mechatronics**, **5**: (2): 117-131.
3. Ku Chin, L., Ming-Ching, T., Kung-Yi, C., 2001. Web tension control of a start-up process using observer techniques with friction and inertia compensation. **IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)**, **1**: 529-534 vol.1.
4. Manning, T. A., 2003. Tension control during the coil winding process. **Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480)**, 527-530.
5. Ebler, N. A., Arnason, R., Michaelis, G., Sa, N. D., 1992. Tension control: dancer rolls or load cells. **Conference Record on Pulp and Paper Industry Technical Conference**, 61-72.
6. Voss, G., Hefti, K., 1997. Importance and methods of tension control [coil winding process]. **Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference**, 517-523.
7. Mcdow, B. C., Rahn, C. D., 1998. Adaptive web-tension control using a dancer arm. **Tappi Journal**, **81**: 197-205.
8. Seung-Ho, S., Sul, S. K., 1998. A new tension controller for continuous strip processing line. **Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)**, **3**: 2225-2230 vol.3.
9. Yan, M.-T., Huang, P.-H., 2004. Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **44**: (7): 807-814.
10. Ando, Y., Tsubaki, T., Saito, T., Murakami, I., Kogure, S., Yamada, K., 2009. Control of tension device for coil winding. **2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**, 2749-2754.
11. Chul-Goo, K., Bong-Ju, L., 2007. Stability analysis for design parameters of a roll-to-roll printing machine. **2007 International Conference on Control, Automation and Systems**, 1460-1465.

12. Yuqiu, S., Jibin, Z., Jianxin, S., 2012. The Analysis and Simulation of Closed-loop Paper Tension Control System Based on MATLAB in the Web Offset. **2012 Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation**, 881-883.
13. Pan, J., Wang, X. Y., Chen, W. H., Xu, S. W., Shen, H. B., Ren, K., Zhang, M. M., 2011. Electronic Tension Control of High-Speed and Active Sending Line Based on Fuzzy PID Control. **Advanced Materials Research**, **338**: 677-684.
14. Shi, J., Chen, J., Qi, W., 2020. Research on Stepper Motor Servo Controller Based on Pan-Boolean PID Control. **2020 39th Chinese Control Conference (CCC)**, 2686-2690.
15. Ofosu, R. A., Zhu, H., 2024. Tension control algorithms used in electrical wire manufacturing processes: a systematic review. **Cogent Engineering**, **11**: (1): 2322837.
16. Han, S., Wang, W., Wang, Y., Liu, G., 2022. Opening and Closing Positioning Control of the Seedling Picking-Up Mechanism Based on Fuzzy-PID Control Algorithm. **Processes**, **10**: (7):
17. Huang, Y. L., Liang, C. H., Chen, B. H., Lan, C. C., 2021. Torque-Sensorless Control of Stepper Motors for Low-Cost Compliant Motion Generation. **IEEE Access**, **9**: 94495-94504.
18. Dodds, S. J., Sooriyakumar, G., 2011. Observer based robust tension control for a segmented stator coil winding machine. **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 1925-1930.
19. Mao, G. Y., Wu, M., Liu, H. K., 2013. Based on the Application of Self-Learning Fuzzy PID Control in Tension Control System. **Advanced Materials Research**, **655-657**: 1505-1509.
20. Van Tu, D., Doan, P. T., Min, J. H., Kim, H. K., Kim, S. B., Jeong, J. H., Oh, S. J., 2014. Active real-time tension control for coil winding machine of BLDC motors. **2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)**, 765-770.
21. Duong, V., Nguyen Huy, H., Jeong, J., Kim, H.-K., Kim, S., 2015. Implementation of an Active Wire Tensioner Using a Cascade Fuzzy Logical Controller for a Brush-Less Direct Current Coil Winding Machine. **International Journal of Fuzzy Systems**, **19**:

22. Alhinqari, A., Alhengari, A., 2021. Simulation of Stepper Motor Motion and Control. **2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA**, 573-578.
23. Kiss, J. M., Szemes, P. T., Aradi, P., 2021. Sliding mode control of a servo system in LabVIEW: Comparing different control methods. **International Review of Applied Sciences and Engineering**, **12**: (2): 201-210.
24. Marquez-Garcia, C. E., Lopez-Gomez, J., Martinez-Solis, F., Vargas-Treviño, M. A. D., Vergara-Limon, S., Velazquez-Aguilar, V. M., 2021. FPGA-based accuracy mechatronics of a feed-drive system with ball screw. **2021 18th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)**, 1-6.
- 25.
26. Zhang, C., Chen, Y., 2016. Tracking Control of Ball Screw Drives Using ADRC and Equivalent-Error-Model-Based Feedforward Control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, **63**: (12): 7682-7692.
27. Zhong, T., Tang, W., 2020. Robust Controller Design for Ball Screw Drives with Varying Resonant Mode via μ -synthesis. **2020 IEEE 16th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)**, 113-118.
28. Deng, P., Zhang, J., Zhou, R., Xie, Z., Chen, C., Huang, T., 2023. LPV Modeling and Gain Scheduling H Infinity Control of Ball Screw with Varying Dynamics. **2023 China Automation Congress (CAC)**, 1972-1976.
29. Xiangrong, X., Xianchun, S., Zuoying, Z., Hongkui, J., 2009. A novel design method to reduce the impact between ball and re-circulating mechanism in ball screws. **2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design**, 682-685.
30. Xiang, H., Qiu, Z., Li, X., 2009. Simulation and experimental research of non-linear friction compensation for high-precision ball screw drive system. **2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments**, 3-604-3-609.
31. Wonhee, K., Induk, C., Chung, C. C., 2009. Microstepping with PI feedback and feedforward for permanent magnet stepper motors. **2009 ICCAS-SICE**, 603-607.

32. Jirasuwankul, N., Manop, C., 2017. A lab-scale heliostat positioning control using fuzzy logic based stepper motor drive with micro step and multi-frequency mode. **2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)**, 1-6.
33. Rithirun, C., Charean, A., Sawaengsinkasikit, W., 2021. Comparison Between PID Control and Fuzzy PID Control on Invert Pendulum System. **2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON)**, 337-340.
34. Lai, C. K., Ciou, J. S., Tsai, C. C., 2017. FPGA-based stepper motor vector control system design. **2017 International Automatic Control Conference (CACCS)**, 1-5.
35. Lixian, S., Rahiman, W., 2023. Performance Analysis of Close-Loop Control Strategies for Hybrid Stepper Motors. **2023 IEEE 21st Student Conference on Research and Development (SCOREd)**, 539-544.
36. Wang, T. Y., Chang, C. D., 2018. Hybrid Fuzzy PID Controller Design for a Mobile Robot. **2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)**, 650-653.
37. Rayeen, Z., Tiwari, S., Hanif, O., 2019. Fractional Order PID controller for tuning Interleaved Cuk Converter. **2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)**, 1-6.
38. Kantawong, S., 2015. Smart men tailoring dummy robot using DC stepper motor with RFID and fuzzy-PID control system. **2015 2nd International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications (ICAICTA)**, 1-6.
39. Han, X., Liu, X., Wu, W., Wang, B., 2023. Research on the Control Method of Stepper Motor for the Trajectory Correction Mechanism of the Diversion Trench. **2023 7th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE)**, 343-348.
40. Bingi, K., Kulkarni, R. R., Mantri, R., 2021. Design and Analysis of Complex Fractional-order PID Controllers. **2021 IEEE Madras Section Conference (MASCON)**, 1-6.
41. Dagher, K., 2013. Design of an Auto-Tuning PID Controller for Systems based on Slice Genetic Algorithm. **IJCCCE**, **13**: 1-9.
42. Liu, C., Feng, X., Xu, L., Guo, C., 2021. Constant Current Water Supply System Design Based on Fuzzy PID Control. **2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP)**, 8-12.

43. Ang, K., Chong, G., Li, Y., 2005. PID Control System Analysis, Design, and Technology. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, **13**: 559-576.
44. Yun, L., Kiam Heong, A., Chong, G. C. Y., 2006. PID control system analysis and design. **IEEE Control Systems Magazine**, **26**: (1): 32-41.
45. Meshram, P. M., Kanojiya, R. G., 2012. Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor. **IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)**, 117-122.
46. Yadav, V., Tayal, V. K., 2018. Optimal Controller Design for a DC Motor using PID Tuner. **2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)**, 442-445.
47. Maurya, A. K., Singh, D., Khan, H., Kumar, P., 2024. Application of PID Controller Tuning Method for Load Frequency Control in Multi Area Power System at Different Load Conditions. **2024 International Conference on Integrated Circuits, Communication, and Computing Systems (ICIC3S)**, **1**: 1-6.
48. Goud, V., Swarnkar, P., Goud, H., Verma, A., 2023. A Comparative Evaluation of GA PID and PID Tuner Approaches for Chemical Batch Reactor. **2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)**, 1-4.
49. Maurya, A. K., Kumar, P., Khan, H., Singh, D., Gupta, A., Kumar, G., 2024. Analysis of Load Frequency Control in Two Area Power System by Using PID Controller at Different Load Conditions. **2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)**, 1-6.
50. Wu, H., Su, W., Liu, Z., 2014. PID controllers: Design and tuning methods. **2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**, 808-813.
51. Maurya, A. K., Dwivedi, M. D., Khan, H., 2024. Implementation of PID Controller Tuning Method for Load Frequency Control in Multi Area Power System. **2024 4th International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM)**, 1-6.
52. Morales, G. R., Canto, S. E., Hernandez, V. G., 2023. Speed Control of DC Servo Motor Under Comparison with PID Tuner Control and Neural Network Control Using Simulink and ESP32. **2023 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)**, 1-8.

53. Tao, T., Huang, C. Y., 2007. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Schemes for Tracking Time-various Trajectories. **2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference**, 1-5.
54. Purwar, S., Kar, I. N., Jha, A. N., 2004. Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints. **2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No.04CH37542)**, 3: 1449-1454 vol.3.
55. Kayışlı, K., Uğur, M., 2017. Fuzzy Logic and PID control of a 3 DOF Robotic Arm. **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji**, 5: (4): 223-233.
56. Kovacs, S., Koczy, L. T., 2004. Application of interpolation-based fuzzy logic reasoning in behaviour-based control structures. **2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No.04CH37542)**, 3: 1543-1548 vol.3.
57. E. E. R, S., Karthi, C. H., Ramya, R., Anuradha, T., 2022. Load based Fuzzy Controller for Bipolar Stepper Motor. **2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)**, 141-145.
58. Xu, Y., Liu, Q., Wang, F., Zhang, K., 2005. Research on substation reactive power control with the fuzzy logic method. **2005 International Power Engineering Conference**, 1-66.
59. Ping-Zong, L., Chun-Fei, H., Tsu-Tian, L., 2005. Type-2 Fuzzy Logic Controller Design for Buck DC-DC Converters. **The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05.**, 365-370.
60. Postalçioğlu, S., Çelik, T. E., 2019. BULANIK MANTIK TABANLI SICAKLIK DENETİM GERÇEKLEMESİ. **İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi**, 8: (2): 51-59.
61. Khaehintung, N., Kunakorn, A., Aorpimai, M., Sirisuk, P., 2005. An Adaptive Fuzzy Logic Controller by Sliding Mode Control Method for DC/DC Converter. **2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems**, 1: 136-139.
62. Aboura, F., 2019. Tuning PID Controller Using Hybrid Genetic Algorithm Particle Swarm Optimization Method for AVR System. **2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**, 570-574.

63. Shi-Cheng, J., Wen-Bo, X., 2011. Application of a Modified PSO Algorithm in PID Controller Optimization. **2011 10th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science**, 343-346.
64. Valle, Y. d., Venayagamoorthy, G. K., Mohagheghi, S., Hernandez, J. C., Harley, R. G., 2008. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, **12**: (2): 171-195.
65. Ou, C., Lin, W., 2006. Comparison between PSO and GA for Parameters Optimization of PID Controller. **2006 International Conference on Mechatronics and Automation**, 2471-2475.
66. Águila-León, J., Chiñas-Palacios, C. D., Vargas-Salgado, C., Hurtado-Perez, E., García, E. X. M., 2020. Optimal PID Parameters Tuning for a DC-DC Boost Converter: A Performance Comparative Using Grey Wolf Optimizer, Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms. **2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)**, 1-6.
67. Shami, T. M., El-Saleh, A. A., Alswaitti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, M. A., Mirjalili, S., 2022. Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey. **IEEE Access**, **10**: 10031-10061.
68. Aziz, M. A. A., Taib, M. N., Adnan, R., 2016. The functionality validation of PSO algorithm in optimizing PID controller's parameters using multi-dimensional test functions. **2016 7th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)**, 203-208.
69. Banerjee, T., Choudhuri, S., Bera, J., Maity, A., 2010. Off-line optimization of PI and PID controller for a vector controlled induction motor drive using PSO. **International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE 2010)**, 74-77.
70. Aziz, M. A. A., Taib, M. N., Adnan, R., 2012. The effect of varying inertia weight on Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm in optimizing PID controller of temperature control system. **2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications**, 545-547.
71. Xu, J., Bhattacharyya, S. P., 2021. Efficient Tuning of PID Controllers using Swarm-based Optimization Algorithms. **2021 9th International Conference on Systems and Control (ICSC)**, 572-579.

72. Zhu, J., Liu, J., Wang, Z., Chen, Y., 2022. Restructuring Particle Swarm Optimization algorithm based on linear system theory. **2022 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**, 1-7.
73. Liqing, X., Chengchun, H., Xiaojun, X., Weiyong, H., 2010. Hybrid genetic algorithm and application to PID controllers. **2010 Chinese Control and Decision Conference**, 586-590.
74. Baruah, S., Dewan, L., 2017. A comparative study of PID based temperature control of CSTR using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization. **2017 International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT)**, 1-6.
75. Lin, F., Duan, H., Qu, X., 2014. PID control strategy for UAV flight control system based on improved genetic algorithm optimization. **The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)**, 92-97.
76. Li, J., Fan, D., Guo, B., 2009. Parameters Optimization of Aeroengine PID Controller Based on Genetic Algorithms. **2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications**, 1: 418-421.
77. Qu, B., Qi, J., 2023. Research on speed control algorithm of stepper motor with fuzzy PID optimization based on genetic algorithm. **2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)**, 11: 682-686.
78. Lin, H., Changlin, M., Li, F., 2007. Study of Adaptive PID Controller Based on Single Neuron and Genetic Optimization. **2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments**, 1-240-1-243.
79. Ding, Y. M., Wang, X. Y., 2008. Real-Coded Adaptive Genetic Algorithm Applied to PID Parameter Optimization on a 6R Manipulators. **2008 Fourth International Conference on Natural Computation**, 1: 635-639.
80. Wu, T., Cheng, Y., Tan, J., Zhou, T., 2008. The application of chaos genetic algorithm in the pid parameter optimization. **2008 3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering**, 1: 230-234.
81. Mantri, G., 2013. DESIGN AND OPTIMIZATION OF PID CONTROLLER USING GENETIC ALGORITHM. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, 02: 926-930.

82. Mohamed, M. I., El-Saady, G., Yousef, A. M., 2021. Performance Analysis of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Dependent on PID Controller for Matrix Converter. **2021 International Conference on Electronic Engineering (ICEEM)**, 1-6.
83. Jaen-Cuellar, A. Y., de J. Romero-Troncoso, R., Morales-Velazquez, L., Osornio-Rios, R. A., 2013. PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, **10**: (9): 324.
84. Shao, X. g., Xiao, L. q., Han, C. c., 2009. Optimization of PID parameters based on genetic algorithm and interval algorithm. **2009 Chinese Control and Decision Conference**, 741-745.
85. Meng, X., Song, B., 2007. Fast Genetic Algorithms Used for PID Parameter Optimization. **2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics**, 2144-2148.
86. Hung-Cheng, C., 2008. Optimal fuzzy pid controller design of an active magnetic bearing system based on adaptive genetic algorithms. **2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, **4**: 2054-2060.
87. Xu, Q., 2015. Discrete-time integral terminal sliding mode control of a precision micro-motion system. **2015 International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM)**, 1-6.
88. Hou, P., Wang, X., Sheng, Y., 2019. Research on Flux-Weakening Control System of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fuzzy Sliding Mode Control. **2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)**, 3151-3156.
89. Kamal, S., Chalanga, A., Ramesh Kumar, P., Bandyopadhyay, B., 2015. Multivariable continuous integral sliding mode control. **2015 International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM)**, 1-5.
90. Bao, D., Tang, W., 2016. Adaptive sliding mode control of ball screw drive system with extended state observer. **2016 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)**, 133-138.
91. Ma'arif, A., Çakan, A., 2021. Simulation and Arduino Hardware Implementation of DC Motor Control Using Sliding Mode Controller. **Journal of Robotics and Control (JRC)**, **2**:

92. Maghfiroh, H., Sujono, A., Ahmad, M., Brillianto Apribowo, C. H., 2020. Basic Tutorial on Sliding Mode Control in Speed Control of DC-motor. **Journal of Electrical, Electronic, Information, and Communication Technology**, **2**:
93. Maheswararao, C., Yadlapati, S., Amaresh, K., 2011. Sliding Mode Speed Control of a DC Motor.
94. Dursun, E., Durdu, A., 2016. Speed Control of a DC Motor with Variable Load Using Sliding Mode Control. **International Journal of Computer and Electrical Engineering**, **8**: 219-226.
95. Pedrycz, W., 1993. Fuzzy control and fuzzy systems.
96. Pedrycz, W., 1993. Fuzzy control and fuzzy systems (2nd, extended ed.).
97. Carvajal, J., Chen, G., Öğmen, H., 2000. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. **Inf. Sci.**, **123**: 249-270.
98. Zeng, S., Hu, H., Xu, L., Li, G., 2012. Nonlinear Adaptive PID Control for Greenhouse Environment Based on RBF Network. **Sensors**, **12**: (5): 5328-5348.
99. Xin, H., Huang, T., Liu, X., Tang, X., 2009. Temperature Control System Based on Fuzzy Self-Adaptive PID Controller. 537-540.
100. Anavatti, S. G., Salman, S., Choi, J., 2006. Fuzzy + PID Controller for Robot Manipulator. 75.
101. El-samahy, A. A., Shamseldin, M. A., 2018. Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control. **Ain Shams Engineering Journal**, **9**: (3): 341-352.
102. Gördebil, A., Gezer köprü krende genetik algoritma kullanarak salınım optimizasyonu.
103. Baburajan, S., 2017. Pitch Control of Wind Turbine through PID, Fuzzy and adaptive Fuzzy-PID controllers.
104. Ali, M. M. M., Youssef, A. R., Abdel-Gaber, G., Ali, A. S., 2018. Adaptive Fuzzy-PID Based Pitch Angle Control of Wind Turbine. **2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)**, 1110-1114.
105. Rong, P., Li, C., Han, L., 2011. The research on the draught fan system of the power plant boiler based on fuzzy adaptive PID control. **Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology**, **2**: 979-982.

106. Wang, S., Xu, S., 2020. Improvement of Fuzzy PID Algorithm Based on Variable Domain Theory. **2020 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA)**, 363-368.
107. Xin, H., Huang, T., Liu, X., Tang, X., 2009. Temperature Control System Based on Fuzzy Self-Adaptive PID Controller. **2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing**, 537-540.
108. Sharma, K., Palwalia, D. K., 2017. A modified PID control with adaptive fuzzy controller applied to DC motor. **2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)**, 1-6.
109. Demirtaş, M., 2006. **Politeknik Dergisi**, **9**: (4): 247-253.
110. Ahmadi, A., Mahdi Tousizadeh, S., Yazdani, A. M., Mohamad Fadzli, H., Buyamin, S., Rahim, H. A., 2012. Designing an optimal Fuzzy-PID controller for speed tracking of stepper motor. **2012 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications**, 193-198.
111. Bodson, M., Novotnak, R. T., Rekowski, R., 1992. High performance nonlinear control of a permanent magnet stepper motor. **1**: 510-515 vol.1.
112. Bodson, M., Chiasson, J. N., Novotnak, R. T., Rekowski, R. B., 1993. High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, **1**: (1): 5-14.
113. Iqteit, N. A., Yahya, K., Makahleh, F. M., Attar, H., Amer, A., Solyman, A. A., Qudaimat, A., Tamizi, K., 2022. Simple Mathematical and Simulink Model of Stepper Motor. **Energies**, **15**: (17):
114. Trunov, A., Skoroid, M., 2023. Analysis of the Adequacy of the Simulink Stepper Motor Model in the Environment of Matlab. 665-673.
115. Iqteit, N., Yahya, K., Makahleh, F., Attar, H., Amer, A., Solyman, A., Qudaimat, A., Tamizi, K., 2022. Simple Mathematical and Simulink Model of Stepper Motor. **Energies**, **15**: 6159.
116. Lara-Padilla, H., Rodriguez, C. A., 2017. Design, simulation and analysis of a positive displacement pump controller for biomedical applications requiring pulsatile flow. **2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)**, 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı:	Serhat KARACA
Uyruğu:	Türkiye (T.C.)
Doğum Tarihi ve Yeri:	
Medeni Durum:	
e-mail:	
Yazışma Adresi:	

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh.	2025
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik - Elektronik Müh.	2024
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mekatronik Müh.	2022
Lise	Bayraktar Anadolu Lisesi	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2023-Halen	Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş.	Ar-Ge Merkezi/ Araştırmacı

YAPILAN YAYINLAR

S. Karaca And E. Esim, "Structural Analysis Of Industrial Type Coil Winding Machine," 12th International Zeugma Congress On Scientific Research , Gaziantep, Turkey, pp.94, 2024

YABANCI DİL

İngilizce