

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KULE VİNÇ SİSTEMLERİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ**  
**OPTİMİZASYONU TABANLI KAYAN KIPLI KONTROL**  
**TASARIMI**

**SELMAN COGAY**

**KOCAELİ 2023**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KULE VİNÇ SİSTEMLERİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ  
OPTİMİZASYONU TABANLI KAYAN KIPLI KONTROL  
TASARIMI**

**SELMAN COGAY**

**Dr. Öğr. Üyesi Banu Ataşlar AYYILDIZ**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

**Doç.Dr. Oğuzhan KARAHAAN**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

**Doç.Dr. Hakkı Ulaş ÜNAL**  
Jüri Üyesi, Eskişehir Teknik Üniv.

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 24.05.2023**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Selman COGAY

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Selman COGAY

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, bir kule vinç sisteminin kontrolü için PID kontrol, Kesir Dereceli PID kontrol ve kayan kipli kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan kontrolörlerin parametrelerinin optimuma yakın değerlerini bulmak amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. Elde edilen kontrolörlerin performanslarının detaylı karşılaştırması sunulmuştur.

Bu çalışmayı yapma fırsatı sunan ve tezimin her aşamasında benden bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Banu ATAŞLAR AYYILDIZ'a ve değerli hocam sayın Doç. Dr. Oğuzhan KARAHAN'a teşekkür eder saygı ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak da bugünlere gelebilmem için beni yetiştiren, gösterdikleri sabır ve her türlü destek için sevgili babama, anneme, kardeşime, eşime ve yıllarca benim yanımda olan bütün dostlarıma en yürekten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Nisan 2023

Selman COGAY

## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI .....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KULE VİNÇ SİSTEMİ .....	8
2.1. Vinç Çeşitleri.....	8
2.1.1. Sabit Vinçler.....	8
2.1.2. Mobil Vinçler .....	9
2.1.3. Sepetli Vinçler .....	9
2.1.4. Kule Vinçler .....	10
2.1.5. Portal Köprülü Vinçler .....	11
2.1.6. Gezer Köprülü Vinçler .....	11
2.2. Kule Vinç Sisteminin Matematiksel Modeli .....	13
3. KONTROL YAPILARI.....	19
3.1. PID Kontrol .....	19
3.2. Kesir Dereceli PID Kontrol .....	20
3.3. Kayan Kipli Kontrol .....	21
4. OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI.....	24
4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	24
4.2. Maliyet Fonksiyonu .....	26
5. KULE VİNÇ SİSTEMİNİN KONTROLÜ .....	27
5.1. Kontrol Parametrelerinin Optimuma Yakın Değerleri .....	27
5.2. Sistem Kontrolü Simülasyon Sonuçları.....	29
5.3. Sağlık Testleri Simülasyon Sonuçları .....	32
5.3.1. Sağlık Testi: Sürekli Gürültü.....	33
5.3.2. Sağlık Testi: Anlık Bozucu Etki.....	34
5.3.3. Sağlık Testi: Motor Parametre Değişimi .....	36
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	38
KAYNAKLAR.....	40
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	42
ÖZGEÇMİŞ.....	44

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sabit Vinç Örneği.....	8
Şekil 2.2. Mobil Vinç Örneği .....	9
Şekil 2.3. Sepetli Vinç Örneği .....	10
Şekil 2.4. Kule Vinç Örneği .....	11
Şekil 2.5. Portal Köprülü Vinç Örneği .....	11
Şekil 2.6. Tek Kirişli Gezer Köprülü Vinç Örneği.....	12
Şekil 2.7. Çift Kirişli Gezer Köprülü Vinç Örneği.....	12
Şekil 2.8. Kule Vinç Modeli.....	14
Şekil 3.1. PID Kontrol Yapısı.....	19
Şekil 3.2. FOPID Kontrol Yapısı .....	20
Şekil 3.3. Kayan Kipli Kontrol Yapısı .....	22
Şekil 4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Akış Şeması .....	25
Şekil 5.1. Konum Kontrolü için Performans Grafiği (x).....	30
Şekil 5.2. Açık Kontrolü için Performans Grafiği ( $\theta$ ) .....	31
Şekil 5.3. x-z Düzlemindeki Salınım için Performans Grafiği ( $\alpha$ ).....	32
Şekil 5.4. y-z Düzlemindeki Salınım için Performans Grafiği ( $\beta$ ).....	32
Şekil 5.5. Sürekli Gürültülü Testi Konum Kontrolü için Performans Grafiği (x).....	33
Şekil 5.6. Sürekli Gürültülü Testi Açık Kontrolü için Performans Grafiği ( $\theta$ ) .....	34
Şekil 5.7. Anlık Bozucu Etki Testi Konum Kontrolü için Performans Grafiği (x).....	35
Şekil 5.8. Anlık Bozucu Etki Testi Açık Kontrolü için Performans Grafiği ( $\theta$ ) .....	35
Şekil 5.9. Motor Parametre Değişimi Testi Konum Kontrolü Performans Grafiği (x).....	36
Şekil 5.10. Motor Parametre Değişimi Testi Açık Kontrolü Performans Grafiği ( $\theta$ ) .....	37

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Model Parametreleri .....	15
Tablo 2.2. Motor Parametreleri .....	15
Tablo 5.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Parametreleri.....	28
Tablo 5.2. PID Kontrolör Optimuma Yakın Parametreleri .....	28
Tablo 5.3. FOPID Kontrolör Optimuma Yakın Parametreleri .....	29
Tablo 5.4. Kayan Kipli Kontrolör Optimuma Yakın Parametreleri .....	29
Tablo 5.5. Maliyet Fonksiyonu Değerleri .....	29
Tablo 5.6. Konum Kontrolü için Kontrolörlerin Performans Analizi .....	30
Tablo 5.7. Açık Kontrolü için Kontrolörlerin Performans Analizi .....	31



# KULE VİNÇ SİSTEMLERİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU TABANLI KAYAN KIPLI KONTROL TASARIMI

## ÖZET

Vinç sistemleri taşınması görece zor olan yüklerin bir noktadan başka bir noktaya taşınması için kullanılan, kullanıldığı yerlere göre farklı çeşitleri bulunan sistemlerdir. Hali hazırda kullanılan vinç sistemleri insan kontrolünde manuel olarak kontrol edilmektedir. Manuel kontrol hem dış etkenlerden etkilenmekte hem de kontrol zorluğu ve salınımdan dolayı kullanım alanında tehlikeler oluşturmaktadır. Dış etkenlerin etkisini azaltmak ve manuel kontrol sebebi ile oluşan tehlikelerin azaltılması için vinç sistemlerinin otonom hale getirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Vinç sistemlerinin otonom hale getirilmesine katkı sağlamak amacı ile yapılan bu çalışmada, bir vinç sisteminin çalışma prensibinden bahsedilmiş, matematiksel modeli oluşturulmuş ve nümerik analiz programı ile PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan kontrolörlerin parametrelerinin optimuma yakın değerlerini bulmak amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. Elde edilmiş olan kontrolörler kullanıldığında ortaya çıkan sistem çıktı performansları karşılaştırılması sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kayan Kipli Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Parçacık Sürü Optimizasyonu, PID Kontrol, Vinç Sistemi.

# **PARTICLE SWARM OPTIMIZATION BASED SLIDING MODE CONTROL DESIGN FOR TOWER CRANE SYSTEMS**

## **ABSTRACT**

Crane systems are systems that are used to move loads that are relatively difficult to transport from one point to another, and have different types according to the places they are used. Crane systems currently used are controlled manually under human control. Manual control is both affected by external factors and creates hazards in the field of use due to control difficulty and oscillation. In order to reduce the effect of external factors and to reduce the dangers caused by manual control, studies have been started to make the crane systems autonomous. In this study, which was carried out to contribute to the automation of crane systems, the working principle of a crane system is mentioned, the mathematical model is explained, and PID Controller, Fractional Order PID Controller, and Sliding Mode Control structures are applied. The optimum values of the parameters of the controllers are found by using the Particle Swarm Optimization algorithm. A comparison of the output performances when using the obtained controllers is presented.

**Keywords:** Sliding Mode Control, Fractional Order PID Control, Particle Swarm Optimization, PID Control, Crane System.

## 1. GİRİŞ

Vinç sistemleri, tersanelerde, fabrikalarda, nükleer tesislerde ve bina inşaatlarında ağır yükleri ve tehlikeli maddeleri taşımak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede daha az insan gücü ile büyük ya da tehlikeli yükler rahatça taşınabilmektedir. Vinç sistemleri eşya, ağaç taşıma işlerinde, ağır araçların taşınması ve kaldırılmasında, oto kurtarma sistemlerinde, ağaç budama işlemlerinde, yüksek binaların inşaatında, yine yüksek binaların boyanması, camlarının silinmesi gibi işlemlerde, kamera çekimlerinde gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Yapılarına göre farklı vinç çeşitleri bulunmaktadır. Çalıştıkları alanlara, taşıdıkları yüklerle, hareket kabiliyetlerine göre farklılıklar göstermektedir. Her vinç tipinin diğerlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Vinçler, üzerindeki yükü minimum düzeyde sallayarak en kısa sürede hareket bir yükü bir noktadan diğerine taşımak için kullanılırlar. Bu hareketten vinç operatörü sorumludur. Vinç operatörü yükü taşıırken yük sarkaç benzeri bir sallanma hareketi yapmakta serbesttir. Eğer bu sallanma hareketi tehlikeli durumlara yol açacak ölçüde artarsa salınımın vinç operatörü tarafından sönmülmesi gerekir ya da salınımın sürtünme kuvvetleri ile durana kadar işlem durdurulmalıdır. Her iki durumda da hem işçilik maliyetini arttırmakta hem vinç kullanım süresini uzatmakta hem de yapılan işin süresini uzatmaktadır. Vincin kullanımının yapıldığı tesis için verim düşer, kullanılabilirlik azalır, iş kazası tehlikesi artar.

Bu sorunlar için vinç operasyonlarının otomatikleştirilmesi için birçok kontrolör geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen kontrolörler çoğu tesis ya da çalışma ortamı için uygun değildir. Bu durumun en büyük nedeni fabrika ya da tersanelerde vincin çalışacağı ortamın doğasıdır. Sadece operatörler değil çevresel faktörlerde vinç kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle endüstriyel ortamlarda kullanılan vinçler otomatik değildir ve operatörlere bağlıdır. Operatörlerin kullandığı vinçlerde de eğer vinci kullanan operatör yeterli eğitime sahip değilse ya da çalışma sırasında sağlık sorunları olduğunda iş kazaları oluşabilmektedir. Hem kişilerde hem tesiste hem de tesis çevresinde zarar ve kayıp oluşabilmektedir.

Vinçler farklı alanlarda yük taşınmasında kolaylık sağlamak için buldukları alan uygun olarak inşa edilirler. Her ne kadar vincin çeşidi kullanıldığı alanda kolaylık sağlasa da vinci kullanabilmek için vincin kontrol yapıları ile kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Vinç kontrolü uzun yıllardır çeşitli kontrol yapıları ile kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmalar farklı tipte vinçler için farklı kontrol yapıları ve farklı optimizasyon teknikleri ile gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Çalışmalara ait sonuçlar ve deneyimler araştırılarak yapılan çalışmada kullanılmıştır.

Dünya üzerinde vinç sistemlerinin kontrolü için yapılan birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların hepsinde temel amaç, vinç yapısı kullanıldığı alan, yük ya da çevresel şartlar değişse de, vincin hareketi esnasında yükün salınım hareketi yapmamasının sağlanmasıdır. Bu bağlamda pek çok kontrol yapıları ve pek çok optimizasyon yöntemleri denenmiştir.

2000 yılında Stefan Lahres ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kule vinçlere yönelik tam sistem vinç otomasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmada ileri besleme kontrol yapısı kullanılmış. Çalışmada matematiksel modelleme, kontrol tasarımı ve tüm sistem için simülasyon çıktıları bulunmaktadır. Simülasyon çıktılarına göre elde edilen sonuçlara göre yapılan çalışma yüksek hassasiyet sunmaktadır. Ayrıca sistemde sensör olarak bir açı sensörü ve bir jiroskop bulunduğundan sistem düşük bir efor ile gerçekleştirilebilmektedir (Lahres ve diğ., 2000).

2001 yılında Janusz Szpytko ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, gezer köprülü vinçlere yönelik sistem kontrolü yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmada, doğrusal olmayan dinamik ve elektromekanik modeller bulunmaktadır. Ayrıca Sugeno-Takagi-Kang denetleyicinin yapısı ve simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre bulanık kontrolörün sistemdeki salınımları minimize ettiği gözlenmiştir. Ayrıca, Sugeno-Takagi-Kang denetleyicinin de benzer bir performans gösterdiği görülmüştür (Szpytko ve diğ., 2001).

2002 yılında Sung-Kun Cho ve arkadaşı tarafından yapılan üç boyutlu bir tavan vinci için salınım önleyici bulanık mantık bir kontrolör tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışmada üç boyutlu bir tavan vincinin prototipi de hazırlanmış ve üzerinde elde edilmiş olan kontrol yapısı denenmiştir. Çevresel etkenler ve sürtünmelerden dolayı

birebir aynı sonuçlar elde edilmese de sistem cevapları benzerlik göstermektedir (Cho ve Lee, 2002).

2004 yılında Masanori Takahashi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bir istifleme vinci için basit uyarlanabilir bir kontrol yöntemi (RSAC) ile kontrolü yapılmıştır. Aynı zamanda sistem laboratuvar ortamında gerçekleştirilerek denenmiştir. Denemeler sonucunda sistemin matematiksel modele çok yakın bir çizgide hareket ettiği gözlemlenmiştir. Yükün hızlı bir şekilde ve sarsılmadan taşınması sağlanmıştır (Takahashi ve diğ., 2004).

2005 yılında Ying Shen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada üç yüz altmış derece dönebilen bir vinç için direkt transfer yöntemi ile minimum zamanda yükün taşınması amacıyla kontrolü sağlanmıştır. Çalışmada minimum zamanda yükün taşınması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yük hızlı bir şekilde yükü A noktasından B noktasına taşımıştır. Ancak, yük hızlı olarak taşındığından yükün salınımı fazla olmaktadır (Shen ve diğ., 2005).

2006 yılında L. F. Mendon ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada bir vinç sistemi için hata toleranslı model öngörülmesi kontrol tabanlı bulanık mantık kontrolörü çalışılmıştır. Yapılan çalışmada çeşitli hataları içeren bir bulanık mantık FTC (Fault Tolerant Control) şeması önermiştir. Konteyner vincine ait normal çalışma ve hatalı çalışma durumundaki bulanık modeller simüle edilmiştir (Mendon ve diğ., 2006).

2007 yılında Kazuhiko Terashima ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada düz transfer dönüşüm yöntemi kullanılarak bir kule vincin modellenmesi ve optimal kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada matematiksel model kullanılarak doğrusal olmayan optimal kontrol, bir kule vincin yük salınımını kontrol etmeye yönelik bir yaklaşım olarak sunulmuştur (Terashima ve diğ., 2007).

2008 yılında Khalid Sorensen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bir endüstriyel köprü vinci için salınım önleme ve konumlandırma kontrolü üzerine çalışılmıştır. Yapılan çalışmada kurulan sistemde lazer mesafe sensörleri, açı sensörleri, hareket için bir kumanda kolu ve sallanma/konumlandırma kontrolünden oluşmaktadır. Sallanma/Konumlandırma kontrolörleri ile kanca ucundaki yükün

salınımı %90 oranında azaltılmıştır. Ayrıca dışarıdan gelen ek bozucu etkilere karşı da dirençli hale gelmiştir (Sorensen ve diğ., 2008).

2009 yılında Jaroslaw Smoczek ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada nöro-bulanık uyarlanabilir bir vinç kontrol sistemi tasarlanmıştır. Çalışmadaki amaç halat uzunluğu yük ve çevresel faktörleri dikkate alarak salınımı azaltmak ve vinç sistemini konumlandırabilmektir. Çalışmada yük ve halat uzunluğunun değişmesi sistemi değiştireceğinden öğrenme algoritmaları ile parametrelerin öğrenilerek daha iyi sonuçlar vermesi sağlanmıştır (Smoczek ve Szpytko, 2009).

2010 yılında K. Graichen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada hızlı model öngörülü kontrol mekanizma şeması sunulmuş ve laboratuvar ortamında bir vinçte uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre sunulan hızlı model öngörülü kontrol yapısına ait şema yüksek verimlilik ve hız ile çalışmıştır. Sistemde kullanılan gradyan izdüşüm yöntemi, her örnekleme adımında sabit sayıda yineleme gerçekleştirerek, uzaklaşan ufuk optimal kontrol problemini yaklaşık bir şekilde çözümlenmiştir (Graichen ve diğ., 2010).

2011 yılında Dianwei Qian ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada gezer vinç sistemleri için bulanık düzenleyici ile kayan kipli kontrol yöntemini birleştiren bir yöntem önerilmiştir. Gezer vincin dinamik modeli çıkarılmış ve çıkarılan modele göre kontrol mekanizması yapılmıştır. Kayan kipli kontrol için bir hareket yüzeyi (çizgisi) belirlenerek sistem belirli bir hat değerinde hareket ettirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre yük salınımı azaltılmış ve konum kontrolü sağlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre bir nakliye vincinde denemeler yapılmış ve sonuçların benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir (Qian ve diğ., 2011).

2013 yılında Hazriq Izzuan Jaafar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada doğrusal olmayan bir portal vinç sisteminin dinamik davranışının incelemeleri çalışılmıştır. Çalışmada sistemin lineer olmayan diferansiyel denklemleri Lagrange denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Vinç üzerindeki troyler'in (araba) yer değiştirmesi ve faydalı yük salınımını içeren sistem yanıtları incelenmiştir. Doğrusal olmayan portal vinç sistemine ait çeşitli sistem parametreleri test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, doğrusal olmayan portal vinç sisteminin performans yanıtının, parametre ayarının

değişimine karşı çok duyarlı olduğunu göstermiştir (Jaafar ve diğ., 2013).

2014 yılında Andres Belunce ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Lyapunov Metodu kullanılarak vinç hareketinden dolayı sallanan bir yükün stabilizasyon süresini en aza indirecek kontrol yapısı gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan simülasyon ve deney sonuçlarına göre parametrelerden bağımsız olarak, sistemin Lyapunov kararlılığı sağlandığı gözlenmiştir. Ayrıca, sistemin hızı ve verimliliği de yüksektir (Belunce ve diğ., 2014).

2015 yılında Rui Tang ve arkadaşı Jie Huang tarafından yapılan çalışmada hem insan operatör komutları hem de rüzgâr rahatsızlıklarının neden olduğu dağıtılmış kütleli yükün salınımlarını sınırlamak için bir birleşik kontrol mimarisi sunmaktadır. Sunulan kontrol mimarisinde rüzgâr engelleme komutu şiddetli rüzgarlarda rüzgârın bozucu etkilerini ortadan kaldırmıştır. Ayrıca verilen komutların yumuşatılarak sisteme verilmesi ile operatör kaynaklı bozucu etkileri minimize etmiştir. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar ile yöntemin dinamik vinç sisteminde etkinliği doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar benzerlik göstermiştir (Tang ve Huang, 2015).

2017 yılında Quang Hieu Ngo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada mobil limana monte edilmiş bir konteyner vinci kullanılarak açık denizde yükleme boşaltma yapabilmek için yeni bir kontrol stratejisi sunulmuştur. Yörünge izleme ve sallanma açısını bastırmak için bulanık mantık kayan kipli kontrol, dalga kaynaklı titreşim için yol oluşturma ve mobil limanın yalpalama açısının tahmini için ise kalman filtre kullanılmıştır. Sistem için önerilen kontrol stratejisinin etkinliği simülasyonlar ve deneysel sonuçlar ile gözlenmiştir (Ngo ve diğ., 2017).

2019 yılında Van Trung Nguyen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kayan kipli kontrol (SMC) yöntemi ile bulanık mantık tabanlı gezer vinç sistem modellemesi ve sonlu zamanlı kararlılık/sınırlılık problemi çalışılmıştır. Gezer vincin çalışması sırasında kanca ve yükün sallanması, sürtünme ve hava dirençlerinin kötü etkilerinden dolayı bulanık mantık sistemi stabilize etmek için SMC yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlara göre SMC kontrolörü, PID LQR ve ANN kontrolörlerine göre daha iyi bir performans göstermiştir (Nguyen ve diğ.,2019).

2020 yılında Andrzej Urbas ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kamyonu bağlı bir vinç için PID kontrolörü ile konum kontrolü ve salınım azaltımı yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmada vincin hareketine ait matematiksel model çıkarılmıştır. Sisteme sürtünmelerde sisteme dahil edilmiştir. Yapılan hesaplamalar ile PID kontrolörün kaliteli bir kontrol yapısı oluşturduğu görülmüştür. Sürtünmeler sisteme dahil edilseler de sistemde ki etkilerinin çok küçük olduğu gözlenmiştir. Yapılan sistem üzerine diğer kontrolörler ile çalışmalar öngörülmüştür (Urbas ve diğ.,2020).

2020 yılında Charles Aguiar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bir gezer vinç sistemi için doğrusal olmayan dinamiklerini kompakt kural tabanlı yapıya sahip bir durum uzayı bulanık modeli aracılığıyla modellemiştir. Yapılan çalışmada matematiksel modeller çıkarılmış, bulanık mantık ile bir kontrol tasarımı yapılmıştır. Çalışma hem bilgisayar ortamında nümerik analiz programları ile hem de laboratuvar ortamında denenmiştir. Elde edilen sonuçlarda bulanık kontrol yaklaşımının, optimal bir ikinci dereceden kontrolörden daha etkili ve sağlam olduğu ve kargoyu sorunsuz ve güvenli bir şekilde varış noktasına taşıyabildiği görülmüştür (Aguiar ve diğ.,2020).

2020 yılında Lobna T Aboserre ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bir kule vinç sistem için doğrusal olmayan matematik model çıkarılmış ve kayan kipli kontrolör ile sistem kontrolü sağlamışlardır. Yapılan çalışmada sistem kararlılığı Lyapunov teorisi kullanılarak analiz edilmiştir. Oluşturulan kontrolör ve matematiksel model, laboratuvar ortamında oluşturulan bir vinç sistemi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu kayan kipli kontrolörün kararlı olarak çalıştığı ve sistemin hem simülasyonlarda hem de deneysel çalışmalarda benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. (Aboserre ve El-Badawy, 2020)

2022 yılında Geir Ole Tysse ve arkadaşları tarafından yapılan doğrusal olmayan model öngörülü kontrol (NMPC) ile eklemli bir vincin Lyapunov tabanlı sönümleme kontrolü çalışılmıştır. Çalışmada eklemli bir vincin matematiksel modeli, kinematiği ve kontrol dinamiği anlatılmıştır. Aynı zamanda Lyapunov tabanlı sönümleme kontrolü açıklanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre vincin konum kontrolü  $\pm 1,5$  derece fark ve 11 ile 29.5 sn. süre içerisinde gerçekleşmiştir. Beklenen konum kontrolü ile gerçekleşen konum paralel ilerlemektedir. Konum kontrolü yapılırken yükün sallanması da

engellenmiştir (Tysse ve diğ., 2022).

Bu çalışmada ise, bir kule vinç sisteminin çalışma prensibi ele alınarak, matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sistemin kontrolü için PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan kontrolörlerin parametrelerinin optimuma yakın değerlerini bulmak amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörlerin kontrol performansları simülasyon çalışmaları ile MATLAB / SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde karşılaştırılarak sunulmuştur.

Tezin 2. Bölüm'ünde, vinç sistemlerinin çeşitlerine değinilmiş ve bu çalışmada ele alınan kule vinç sisteminin matematiksel modeli sunulmuştur. 3. Bölüm'de sistemin kontrolü için uygulanan PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol yapıları anlatılmıştır. 4. Bölüm'de optimizasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Bu kapsamda Parçacık Sürü Optimizasyonu anlatılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada tanımlanmış olan maliyet fonksiyonu da aynı bölümde sunulmuştur. Kontrolörlerin Parçacık Sürü Optimizasyonu kullanılarak elde edilmiş olan optimuma yakın değerlerine ve bu kontrolörlerle gerçekleştirilen sistem simülasyon çalışmalarına 5. Bölüm'de yer verilmiştir. 6. Bölüm'de ise, elde edilmiş olan sonuçlar doğrultusunda yorumlama ve öneriler yapılmıştır.

## 2. KULE VİNÇ SİSTEMİ

Çok fazla kullanım alanı olan vinç sistemleri kullanıldıkları görev, ortam ve gereklilikler açısından değişik yapılarda üretilmektedir. Bu bölümde, öncelikle vinç sistemlerinin çeşitleri tanıtılmış ve ardından bir kule vinç sisteminin matematiksel modeli çıkarılmıştır.

### 2.1. Vinç Çeşitleri

Konfigürasyonlarına göre altı farklı vinç çeşidi bulunmaktadır. Bu vinç çeşitleri çalıştıkları alanlara, taşıdıkları yüklere, hareket kabiliyetlerine göre farklılık göstermektedir. Her vincin farklı özellikleri ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Vinç çeşitleri sabit vinçler, mobil vinçler, sepetli vinçler, kule vinçler, portal köprülü vinçler ve gezer köprülü vinçler olarak ayrılırlar.

#### 2.1.1. Sabit Vinçler

Sabit vinçler adından anlaşılacağı gibi bir noktaya sabitlenerek çalışırlar. Bu çalışma sisteminde sabitlenen yapının üzerinde bulunan bir araba (troyler) bulunur. Bu araba sayesinde yük aşağı yukarı ve ileri geri hareket ettirilebilir. Yük büyük bir alanda hareket etmez yalnızca bir çizgi üzerinde bazı durumlarda çok az miktarda sağa ve sola hareket eder. Şekil 2.1’de limanda kullanılan sabit bir vinç örneği görülmektedir.



Şekil 2.1. Sabit Vinç Örneği

### 2.1.2. Mobil Vinçler

Mobil vinçler bir aracın üzerine monte edilerek kullanılan vinçlerdir. Araç üzerine monte edilmiş olmasından dolayı hızlı şekilde farklı noktalara hareket edebilirler. Bu vinçlerin kullanılabilmesi için monte edildikleri aracın yan taraflarında, araç ile birlikte tüm vinç sistemini yere sabitleyen ve bu noktalardan destek alan dört adet sabitleme kolunun bulunması gerekir. Vincin kumanda odası aracın üzerindedir. Kumanda odası üç yüz altmış derece dönebildiğinden vincin hareket kabiliyeti oldukça yüksektir. Çok uzun olmayan bu vinçlerin destek noktaları aracın yanında bulunan dört kolda olduğundan çok ağır yükleri taşıyamazlar. Dar alanlarda rahatlıkla kullanılabilen bu vinçler eğimli alanlarda çok verimli değildir. Şekil 2.2’de mobil vinç örneği görülmektedir.



Şekil 2.2. Mobil Vinç Örneği

### 2.1.3. Sepetli Vinçler

Sepetli vinçler, vinçlerinin ucunda sepet bulunduran vinçlerdir. Diğer vinçlere göre en büyük farklılıkları bir ağırlık taşımaktan çok insanları erişilmesi zor olan noktalara taşımalarıdır. Diğer vinçlerde olduğu gibi bir kumanda odasından kontrol edilirler. Vincin sepetine giren bir ya da birden fazla insan ise gerekli noktaya taşınır. Birçok farklı sektörde kullanılan sepetli vinçler acil durumlarda can kurtarma görevlerinde aktif rol oynarlar. Şekil 2.3’de sepetli bir vinç örneği görülmektedir.



Şekil 2.3. Sepetli Vinç Örneği

#### 2.1.4. Kule Vinçler

Vinç denildiğinde en çok akla gelen ve çevremizde en çok görebileceğimiz vinç çeşidi kule vinçlerdir. Kule vinçler, yüksek ağırlıktaki nesnelere güvenle kaldırabilmektedir. Bu vinçlerin boyu ihtiyaca göre uzayıp kısa bilmektedir. Bu özelliği sayesinde inşaat sektöründe çokça kullanılmaktadır. Bu vinçin yatayda bulunan kolunun bir noktasında kulenin montajının yapıldığı yer bulunmaktadır. Kulenin bağlı olduğu noktadan kısa bir kol arkaya doğru uzun bir kol ise ileriye doğru uzar. Kısa olan kolun ucunda büyük bir ağırlık bulunmaktadır. Uzun olan kısımda ise araba (troyler) bulunmaktadır. Kısa kolda bulunan büyük ağırlık ile uzun koldaki araba üzerinde yük taşınabilmektedir. Yük ileri geri gidebildiği gibi kule üzerindeki kol 360 derece hareket sağlayabilmektedir. Bu vinçlerin dezavantajı ise kötü hava koşullarında kullanılamamasıdır. Aynı zamanda çok uzun olduklarında yükteki salınım hareketi çok fazla olmaktadır. Bu durum eğer önlem alınmazsa kazalara ve iş sağlığı güvenliğinde sorunlar oluşturmaktadır. Şekil 2.4'de kule vinç örneği görülmektedir.



Şekil 2.4. Kule Vinç Örneği

### 2.1.5. Portal Köprülü Vinçler

Portal köprülü vinçler iki hareketli ayak arasına yerleştirilmiş bir uzun kol üzerinde hareket eden bir arabadan (troyler) oluşur. Yükler hareketli ayaklar ile ileri geri araba sayesinde de sağa sola hareket ederek taşınır. Daha çok sanayide dış alanlarda ağır yükleri taşımak için kullanılırlar. Şekil 2.5’de portal köprülü vinç örneği görülmektedir.



Şekil 2.5. Portal Köprülü Vinç Örneği

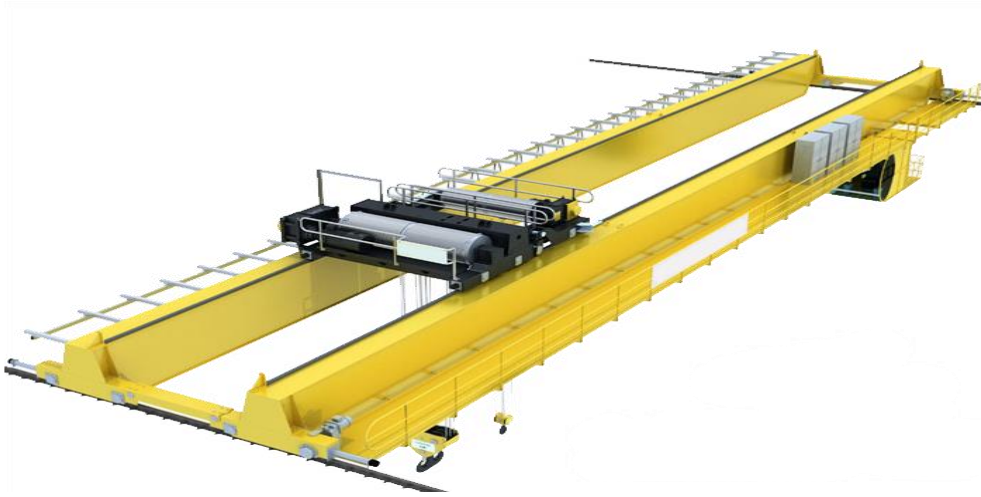
### 2.1.6. Gezer Köprülü Vinçler

Gezer köprülü vinçler, portal köprülü vinçlere çok benzemektedir. Gezer köprülü vinçler sanayilerin kapalı alanlarına kurularak çalışırlar. Tavan bulunan duvarlara vincin

hareket etmesi için bir ray sistemi kurulur. İki ray sistemi arasına ise kiriş/kirişler kurulur. Kurulan kirişler üzerinde bulunan araba (troyler) ile yükü sağa sola ve kirişlerin hareketi ile ileri geri hareket ettirilir. Kiriş sayısına göre çift kirişli ve tek kirişli modelleri bulunur. Kiriş sayısının farkı arabanın bağlantı şeklini değiştirerek taşınacak olan yükün ağırlığını değiştirir. Çift kirişli sistemlerde daha büyük ve ağır yükler taşınabilmektedir. Şekil 2.6’da tek kirişli ve Şekil 2.7’de ise çift kirişli gezer köprülü vinç örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.6. Tek Kirişli Gezer Köprülü Vinç Örneği



Şekil 2.7. Çift Kirişli Gezer Köprülü Vinç Örneği

Bu çalışmada, inşaat alanlarında çokça kullanılmakta olan kule vinç sistemi ele alınmış ve kontrolü için çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2.4’de örneği sunulmuş olan bir kule vincin görevi, bir yükün A noktasından B noktasına hızlı ve mümkün olduğunca

sarsıntısız şekilde taşınmasını sağlamaktır. Sistemde bir vinç gövdesi, bir vinç gövdesine bağlı vinç kolu ve bir adet vinç kolu üzerinde hareket eden yük arabası bulunmaktadır.

Kule vinç sisteminde gövde üzerinde, yükü vinç gövdesi merkez olacak şekilde döndürebilen bir motor ve vinç kolunda yük arabasını vinç kolu üzerinde hareket ettiren ikinci bir motor bulunmaktadır. Yükün taşınması sırasında iki adet motor sisteme kuvvet uygulayarak yükü hareket ettirmektedir. Ele alınan bu kule vinç sisteminin matematiksel modeline bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

## 2.2. Kule Vinç Sisteminin Matematiksel Modeli

Bu çalışmada, Aboserre ve El-Badawy (2020) tarafından kullanılmış olan kule vinç sistemi ele alınmıştır. Ele alınan bu sistemin matematiksel modeli Euler-Lagrange denklemi kullanılarak çıkarılmıştır (Aboserre ve El-Badawy, 2020):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}} \right) - \frac{\delta L}{\delta q} = \vec{u} - (B_{\vec{q}} \dot{\vec{q}} + \mu_{\vec{q}} \text{sgn}(\dot{\vec{q}})) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de bulunan 'q' vektörü Denklem (2.2)'deki gibidir.

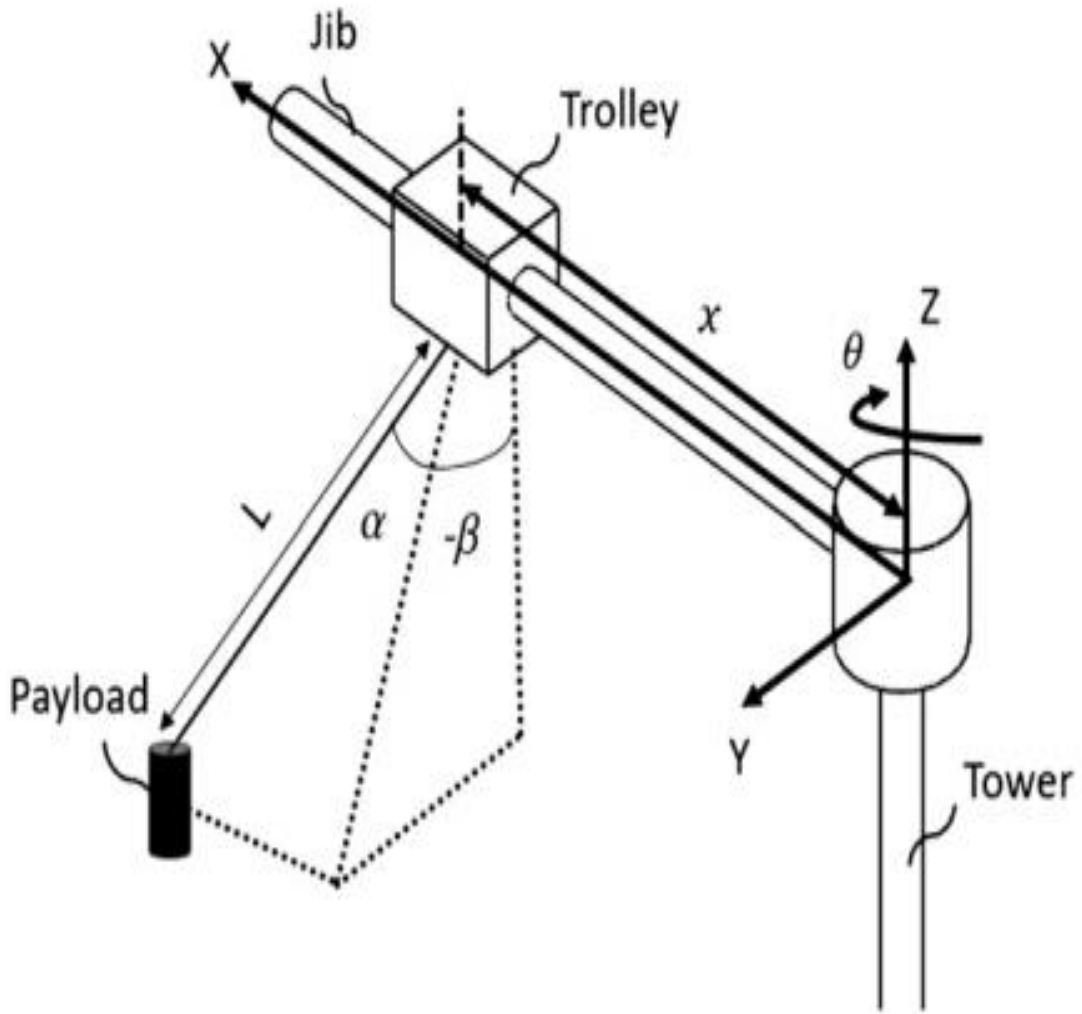
$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'de eşitliğin sağında bulunan ifadelerdeki  $x$  kule vincin kolu üzerinde hareket eden ve yükü taşıyan arabanın (trolley) konumunu,  $\theta$  kule vincin kolunun açısını,  $\alpha$  yükün kule vinç kolunun doğrultusundaki sallama açısını (düzlemsel salınım),  $\beta$  ise, kule vinç koluna dik doğrultudaki sallanma açısını (düzlem dışı salınım) ifade etmektedir.

Denklem (2.1)'deki  $B_{\vec{q}} \dot{\vec{q}}$  ifadesi viskoz sürtünmeyi, ' $\mu_{\vec{q}} \text{sgn}(\dot{\vec{q}})$ ' ifadesi ise coulomb sürtünmesini ifade etmektedir. ' $\vec{u}$ ' vektörü giriş vektörü olup Denklem (2.3)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'deki  $u_1$  arabayı hareket ettiren kuvveti,  $u_2$  ise kulenin dönme torkunu ifade etmektedir. Şekil 2.8'de görülen vinç modelinde Denklem (2.1) - (2.3)'de yer alan tanımlar gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kule Vinç Modeli (Aboserre ve El-Badawy, 2020)

Sisteme ait parametreler (motor parametreleri, sistem ağırlıkları sürtünme katsayıları vb.) (Aboserre ve El-Badawy (2020)) çalışmasından alınmıştır. Sisteme ait model parametreleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Kullanılan motorlara ait parametreler ise Tablo 2.2'de yer almaktadır.

Tablo 2.1. Model Parametreleri (Aboserre ve El-Badawy, 2020)

Tanım	Değeri
Araba ağırlığı	$m_1 = 0.7 \text{ kg}$
Yük ağırlığı	$m_2 = 0.32 \text{ kg}$
x yönündeki Coulomb sürtünme katsayısı	$\mu_x = 0.36 \text{ Nm/s}$
$\theta$ yönündeki Coulomb sürtünme katsayısı	$\mu_\theta = 0.9 \text{ Nm/s}$
x yönündeki Viskoz sürtünme katsayısı	$B_x = 34 \text{ Nm/s}$
$\theta$ yönündeki Viskoz sürtünme katsayısı	$B_\theta = 18 \text{ Nm/s}$
$\alpha$ yönündeki Viskoz sürtünme katsayısı	$B_\alpha = 0.0015 \text{ Nm/s}$
$\beta$ yönündeki Viskoz sürtünme katsayısı	$B_\beta = 0.0015 \text{ Nm/s}$
Vinç kolunun atalet momenti	$J_1 = 4 \text{ kgm}^2$
Yükün atalet momenti	$J_2 = 0.02 \text{ kgm}^2$
Yer çekimi sabiti	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Tablo 2.2. Motor Parametreleri (Aboserre ve El-Badawy, 2020)

Tanım	x yönündeki motor değerleri	$\theta$ yönündeki motor değerleri
Dişli oranı	$K_{gx} = 76.84$	$K_{g\theta} = 275$
Motor dişli kutusu oranı	$n_x = 0.36$	$n_\theta = 0.24$
Tork sabiti	$k_{mx} = 0.032$	$k_{m\theta} = 0.0195$
Kasnak yarıçapı	$r_x = 0.0375 \text{ m}$	-----
Armatür direnci	$R_{ax} = 25 \text{ ohm}$	$R_{a\theta} = 0.5 \text{ ohm}$
Amplifikatör kazancı	$G_{ax} = 15$	$G_{a\theta} = 12$

$u_1$  giriş kuvveti ve  $u_2$  giriş torku, motor parametrelerine göre Denklem (2.4) ve Denklem (2.5) ile hesaplanır.

$$u_1 = \frac{n_x K_{gx} K_{mx} G_{ax} U_x}{R_{ax} r_x} - \frac{n_x k_{gx}^2 k_{mx}^2 \dot{x}}{R_{ax} r_x^2} \quad (2.4)$$

$$u_2 = \frac{n_\theta K_{g\theta} K_{m\theta} G_{a\theta} U_\theta}{R_{a\theta}} - \frac{n_\theta k_{g\theta}^2 k_{m\theta}^2 \dot{\theta}}{R_{a\theta}} \quad (2.5)$$

Denklem (2.4) ve Denklem (2.5)'de geçen  $u_x$  ve  $u_\theta$  ifadeleri sırasıyla x ve  $\theta$  yönünde verilen darbe genişlik modülasyon (PWM) sinyalleridir. Bu sinyallerin genişlik değerleri ile motorların hızları ve kuvvetleri kontrol edilebilmektedir.

$$M(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q) = u \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da vinç sistemine ait dinamik model denklemi verilmiştir. Denklemden yer alan  $M(q)$  matrisi  $L>0$  şartının sağlandığı her konumda sistemin eylemsizlik matrisidir.  $B(q, \dot{q})$  Sistemin sürtünme kuvvetini, koriolis kuvvetini ve merkezci kuvvetini ifade eder.  $G(q)$  ise yerçekimi kuvvet vektörüdür. (Aboserre ve El-Badawy, 2020)

Sistemde iki farklı durum vektör bulunmaktadır.  $q_a$  vektörü kontrol edilebilen değişkenleri yani troyler mesafesi ve vincin dönme açısı değişkenlerini,  $q_u$  vektörü ise, kontrol edilemeyen değişkenleri yani yükün salınımından oluşan  $\alpha$  ve açılarını içermektedir.

$$q_a = \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$q_u = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Bu durumda Denklem (2.6)'da Denklem (2.7) ve Denklem (2.8) yerine yazılırsa:

$$M_{11}(q)\ddot{q}_a + M_{12}(q)\ddot{q}_u + B_{11}(q, \dot{q}) = u_a \quad (2.9)$$

$$M_{21}(q)\ddot{q}_a + M_{22}(q)\ddot{q}_u + B_{21}(q, \dot{q}) + G_2(q) = 0 \quad (2.10)$$

Dinamik denklemleri elde edilmektedir. Buradaki matrislerin tanımları aşağıda verilmiştir (Aboserre ve El-Badawy, 2020):

$$M_{11} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, M_{12} = \begin{bmatrix} m_{13} & m_{14} \\ m_{23} & m_{24} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$M_{21} = \begin{bmatrix} m_{31} & m_{32} \\ m_{41} & m_{42} \end{bmatrix}, M_{22} = \begin{bmatrix} m_{33} & m_{34} \\ m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix}, B_{21} = \begin{bmatrix} b_{31} \\ b_{41} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$u_a = \begin{bmatrix} F_x \\ F_\theta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Bu matrislerdeki tanımlamalar aşağıda sunulmuştur:

$$m_{11} = m_1 + m_2 \quad (2.16)$$

$$m_{12} = m_{13} = m_{14} = m_{21} = 0 \quad (2.17)$$

$$m_{22} = J_1 + \frac{3}{4}L^2m_2 + m_1x^2 + m_2x^2 - \frac{1}{4}L^2m_2 \cos(2\alpha) - \frac{1}{2}L^2m_2 \cos(\alpha)^2 \cos(2\beta) \quad (2.18)$$

$$m_{23} = m_{32} = m_{34} = m_{41} = m_{43} = 0 \quad (2.19)$$

$$m_{24} = Lm_2x\cos(\alpha)\cos(\beta) \quad (2.20)$$

$$m_{31} = Lm_2\cos(\alpha) \quad (2.21)$$

$$m_{33} = J_2 + L^2m_2 \quad (2.22)$$

$$m_{42} = Lm_2x\cos(\alpha)\cos(\beta) \quad (2.23)$$

$$m_{33} = J_2 + L^2m_2\cos(\alpha)^2 \quad (2.24)$$

$$b_{11} = B_x\dot{x} + \mu_x\text{sgn}(\dot{x}) \quad (2.25)$$

$$b_{21} = B_\theta\dot{\theta} + \mu_\theta\text{sgn}(\dot{\theta}) + 2m_1x\dot{x}\dot{\theta} + 2m_2x\dot{x}\dot{\theta} + 2Lm_2x\dot{\theta}\dot{\alpha}\cos(\alpha) \quad (2.26)$$

$$b_{31} = B_\alpha\dot{\alpha} - Lm_2x\dot{\theta}^2\cos(\alpha) - 2L^2m_2\dot{\theta}\dot{\beta}\cos(\alpha)^2\cos(\beta) \quad (2.27)$$

$$b_{41} = B_\beta\dot{\beta} + 2Lm_2\dot{x}\dot{\theta}\cos(\alpha)\cos(\beta) + 2L^2m_2\dot{\theta}\dot{\alpha}\cos(\alpha)^2\cos(\beta) \quad (2.28)$$

$$g_1 = gLm_2\cos(\beta)\sin(\alpha) \quad (2.29)$$

$$g_1 = gLm_2\cos(\alpha)\sin(\beta) \quad (2.30)$$

Sistemi kontrol etmek için uygulanan girişlerin Denklem (2.9)'da etkisi görülürken Denklem (2.10)'da herhangi bir etkisi görülmemektedir. Denklemler üzerinde gerekli düzenlemeler yapılarak girişlerin tüm dinamiğe olan etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla, Denklem (2.9) ve (2.10) üzerinde yukarıda verilen tanımlamalar yerleştirilip ve bazı matematiksel düzenlemeler yapıldığında sistem dinamik modeline ait iki matematiksel ifade denklem (2.31) ve (2.32)'deki gibi elde edilmektedir:

$$\overline{M}_1(q)\ddot{q}_a + \overline{B}_{11}(q, \dot{q}) + G_1(q) = u_a \quad (2.31)$$

$$\overline{M}_2(q)\ddot{q}_u + \overline{B}_{21}(q, \dot{q}) + G_2(q) = u_u \quad (2.32)$$

Buradaki tanımlamalar:

$$\overline{M}_1(q) = M_{11}(q) - M_{12}(q)M_{22}(q)^{-1}M_{21}(q) \quad (2.33)$$

$$\overline{M}_2(q) = M_{22}(q) - M_{21}(q)M_{11}(q)^{-1}M_{12}(q) \quad (2.34)$$

$$\overline{B}_{11}(q, \dot{q}) = -M_{12}(q)M_{22}(q)^{-1}B_{21}(q, \dot{q}) + B_{11}(q, \dot{q}) \quad (2.35)$$

$$\overline{B}_{21}(q) = -M_{21}(q)M_{11}(q)^{-1}B_{11}(q, \dot{q}) + B_{21}(q, \dot{q}) \quad (2.36)$$

$$G_1 = -M_{12}(q)M_{22}(q)^{-1}G_2(q) \quad (2.37)$$

$$u_u = -M_{21}(q)M_{11}(q)^{-1}u_a \quad (2.38)$$

### 3. KONTROL YAPILARI

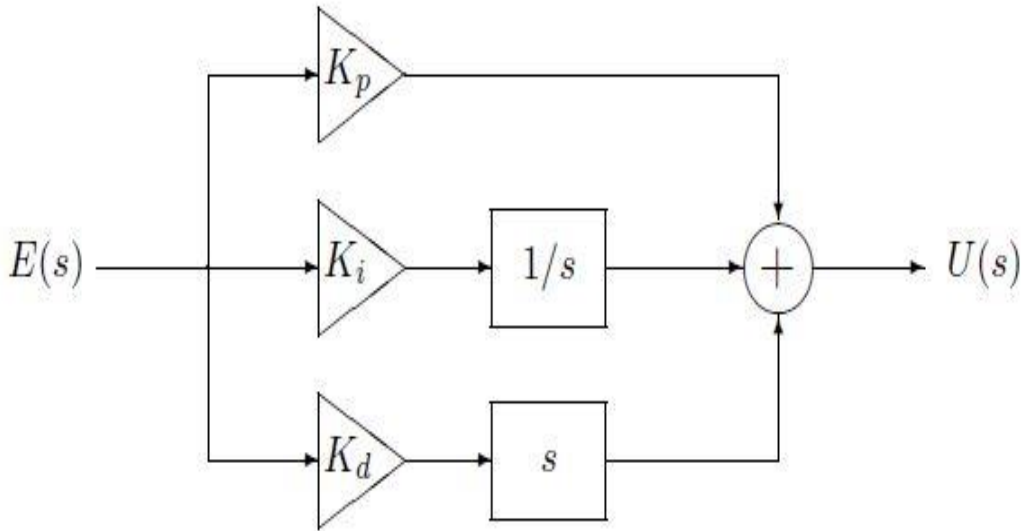
#### 3.1. PID Kontrol

PID (Oransal-İntegral-Türevsel) denetleyici kontrol döngüsü yöntemi, endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir geri besleme denetleyicisi yöntemidir. PID kontrolöre ait transfer fonksiyonu denklem (3.1)'deki gibidir:

$$C_{PID}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (3.1)$$

Buradaki  $K_p$  oransal kazanç,  $K_i$  integral kazanç,  $K_d$  türev kazancıdır. Sistem kontrol tasarımında,  $e(t)$  hata sinyali, yani amaçlanan sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı hesaplanarak, PID kontrolörün girişine verilir. Denetleyici süreç kontrol girdisini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. PID kontrolörün çıkışındaki kontrol sinyali  $u(t)$  olarak tanımlanırsa, PID kontrolörüne ait blok yapısı Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir.

PID kontrolörü, optimizasyon algoritmaları ile optimize edilebilir. Optimizasyon algoritmaları ile  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  değerleri farklı sistemler için ayrı ayrı hesaplanarak sistemin hem kararsız durum süresi hem hata miktarı hem de sistemlerin ani ve kararsız yükselişleri azaltılabilir.



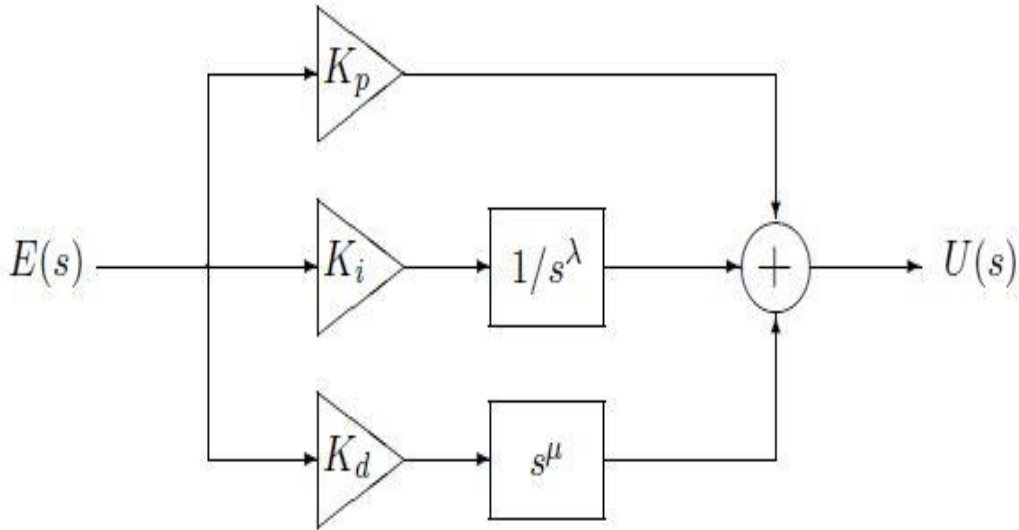
Şekil 3.1. PID Kontrol Yapısı

### 3.2 Kesir Dereceli PID Kontrol

Kesir dereceli PID (Fractional Order PID (FOPID)) kontrolör, PID kontrolörden farklı olarak iki ilave ayarlanabilir parametre  $\lambda$  ve  $\mu$  sunar. Bu parametreler, sırasıyla integral ve türevin tamsayı olmayan, yani kesirli derecelerdir. FOPID kontrolörünün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$C_{FOPID}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (3.2)$$

Eşitlikten de kolayca görüldüğü gibi  $\lambda$  ve  $\mu$  değerlerine 0 veya 1'e eşitleyerek PID, PD ve PI kontrolör elde etmek mümkündür. Şekil 3.2'de FOPID kontrolörüne ait şema verilmiştir.



Şekil 3.2. FOPID Kontrol Yapısı

Kesir dereceli integral ve türev işlemleri için matematiksel olarak birçok yaklaşım bulunmaktadır. Literatürde yaygın olarak kabul görmüş üç farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar Caputo yaklaşımı, Grunwald-Letnikov yaklaşımı ve Laplace kuvvet fonksiyonu yaklaşımıdır. Laplace kuvvet fonksiyonu yaklaşımına göre kesir dereceli integral ve türev hesaplamaları yapıldığında elde edilen sonuçlardaki hata miktarı diğer yaklaşımlara göre daha düşük olduğundan, çalışmada Laplace kuvvet fonksiyonu tanımı kullanılmıştır. MATLAB/SIMULINK programında kullanılmak üzere FOMCON araç kutusu indirilerek kullanılmıştır.

### 3.3 Kayan Kipli Kontrol

Dinamik sistemlerde, modelleme hataları, istenmeyen sıcaklık, basınç veya gerilim değişimleri, titreşim ve bozucu girişler gibi çeşitli çevresel faktörlerden kaynaklanan belirsizliklerden kaçınmak mümkün değildir. Endüstride kullanılan klasik doğrusal kontrolörler (PID, FOPID, LQR vb.) genellikle parametre değişimlerine, modellenmemiş dinamiklere ve bozucu girişlere karşı uygun sonuçlar verememektedir. Bu nedenle, bozucuların ve belirsizliklerin sistem cevabı üzerindeki etkisini yok edebilen Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control (SMC)) tekniği tercih edilmektedir. Bu yöntemin eşleşen dış bozuculara ve belirsiz parametre değişimlerine karşı dayanıklılığı gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır.

Değişken yapıli kontrol sistemlerinin davranışları, uygun bir geri besleme kontrol kuralı ve bir karar kuralı tarafından karakterize edilir. Anahtarlama fonksiyonu olarak adlandırılan karar kuralı, sistemin davranışını oluşturan fonksiyon seçer. Kayan kipli kontrolde, değişken yapıli kontrol sisteminin durumları, faz uzayında, faz değişkenlerinden oluşan kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzey üzerinde tutacak şekilde tasarlanır. Tasarlanan sistemin davranışı, sistemin durumlarının bu yüzey üzerine gelmesi ve bu yüzey üzerinde kalmasına yöneliktir.

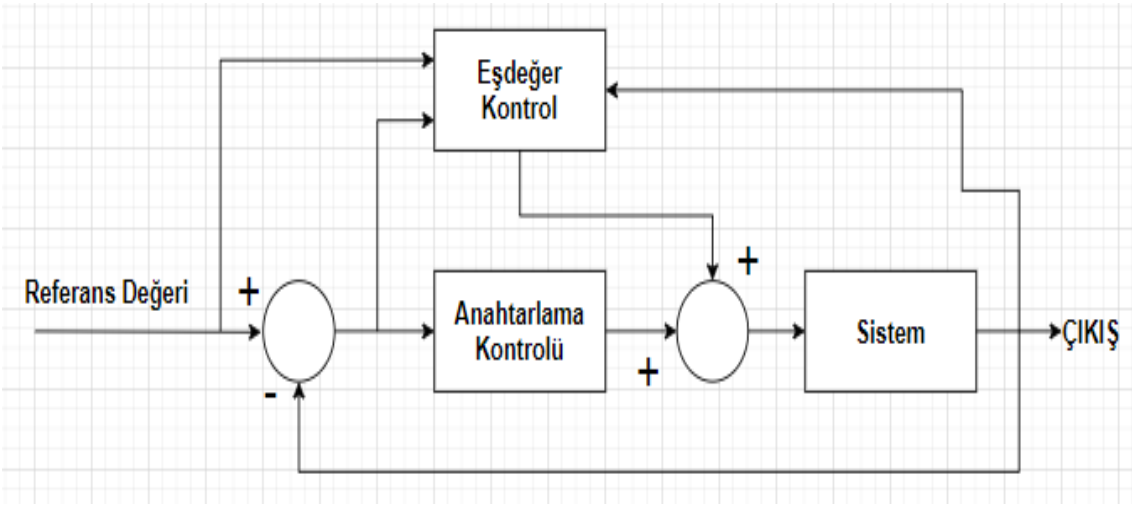
Kayan kipli kontrolde, sistem durumları kayma yüzeyine ulaştıktan sonra, sistem durumlarının kayma yüzeyinin dışına çıkma durumu gerçekleşirse, ani bir kontrol işareti üretilerek durumlar tekrar yüzey üzerine getirilmeye çalışılır. Böyle bir kontrolde sistem çok kısa zamanda çok fazla yön değiştirir. Sistem durumlarını kayan yüzey üzerinde tutmak için ani yön değiştiren sınırsız frekanslı bu işarete çatırtı (chattering) denir. Bu durum, uygulamada bazı problemlere sebep olur. Çatırtı, hızlı hareket eden mekanik sistemlere uygulandığında, sistemi oluşturan hızlı hareket eden parçalara zarar verebilir. Bu yüzden hızlı değişen sistemlerde, kayan kipli kontrol tavsiye edilebilecek bir kontrol yöntemi değildir. Literatürde, çatırdama problemini aşmak için bazı yaklaşımlar önerilmiştir. Çatırtı sorunu filtreleme, süreksiz yaklaşım, doyma fonksiyonu, bulanık kontrol gibi çeşitli fonksiyon ve yöntemler kullanılarak azaltılabilir. Ancak bu durumda kayan kipli kontrol gürbüzlük özelliğini kaybeder.

Kayan kipli kontrolörün diğer kontrolörlerden en büyük farkı, kontrolörün dinamik

denklemlerin içinde yer alarak sisteme daha fazla etki etmesidir. Bu sayede dinamik bir kontrolör yapısı elde edilmiş olur.

Kayan Kipli Kontrol için blok diyagram gösterimi Şekil 3.3’de sunulmuştur. Burada sisteme uygulanan sinyal  $u(t)$  olarak tanımlandığında,  $u_{eq}(t)$  eşdeğer kontrol (equivalent input) ve  $u_{sw}(t)$  anahtarlama kontrolü (switching input) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (3.3)$$



Şekil 3.3. Kayan Kipli Kontrol Yapısı

Bu çalışmada,  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}^+$  olmak üzere, kayma yüzeyi (sliding surface) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S(t) = \dot{e}_a + \lambda_1 e_a + \dot{e}_u + \lambda_2 e_u \quad (3.4)$$

Burada  $e_a$ , kontrol edilen değişkenler olan  $x$  ve  $\theta$  ya ait takip hatalarını içermektedir.  $e_u$  ise, kontrol edilemeyen değişkenler olan  $\alpha$  ve  $\beta$  ya ait takip hatasını içermektedir.

Bu çalışmada, Kayan Kipli Kontrol için erişme kuralı ise, Denklem (3.4)’deki gibi seçilmiştir:

$$\dot{S}(t) = -\omega * \frac{S(t)}{|S(t)| + \gamma} \quad (3.5)$$

Bu erişme kuralı Kayan Kipli Kontrol kuramında kayma yüzeyinden dışarı çıkıldığında

sisteme verilecek olan ani giriş sinyaline karşılık gelmektedir. Dolayısıyla,  $u_{sw}(t)$  anahtarlama kontrolü aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$u_{sw}(t) = -\omega * \frac{S(t)}{|S(t)|+\gamma} \quad (3.6)$$

Kayma yüzeyinin birinci dereceden türevi sıfıra eşitlenerek  $u_{eq}(t)$  eşdeğer kontrol elde edilip Denklem (3.3) de verildiği gibi Denklem (3.5) de elde edilmiş olan anahtarlama kontrolü ile toplandığında,  $x$  ve  $\theta$  için kontrol sinyalleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$u_x(t) = m_{11} * \left( -\omega_1 * \frac{S(t)}{|S(t)|+\gamma_1} - \lambda_{11} * \dot{x} + \ddot{a} + \lambda_{12} * \dot{a} \right) + b_{11} \quad (3.7)$$

$$u_\theta(t) = \left( m_{22} - \frac{m_{24} * m_{42}}{m_{44}} \right) * \left( -\omega_2 * \frac{S(t)}{|S(t)|+\gamma_2} - \lambda_{21} * \dot{\theta} + \ddot{\beta} + \lambda_{22} * \dot{\beta} \right) + b_{21} - \frac{b_{41} * m_{24}}{m_{44}} - g_2 * \frac{m_{24}}{m_{44}} \quad (3.8)$$

## 4. OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Sistemde kullanılan kontrolörlerin optimum parametrelerle çalışabilmesi için kontrolör parametrelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu noktada deneme yanılma yöntemi ile parametreler seçilebileceği gibi optimizasyon yöntemleri de kullanılabilir.

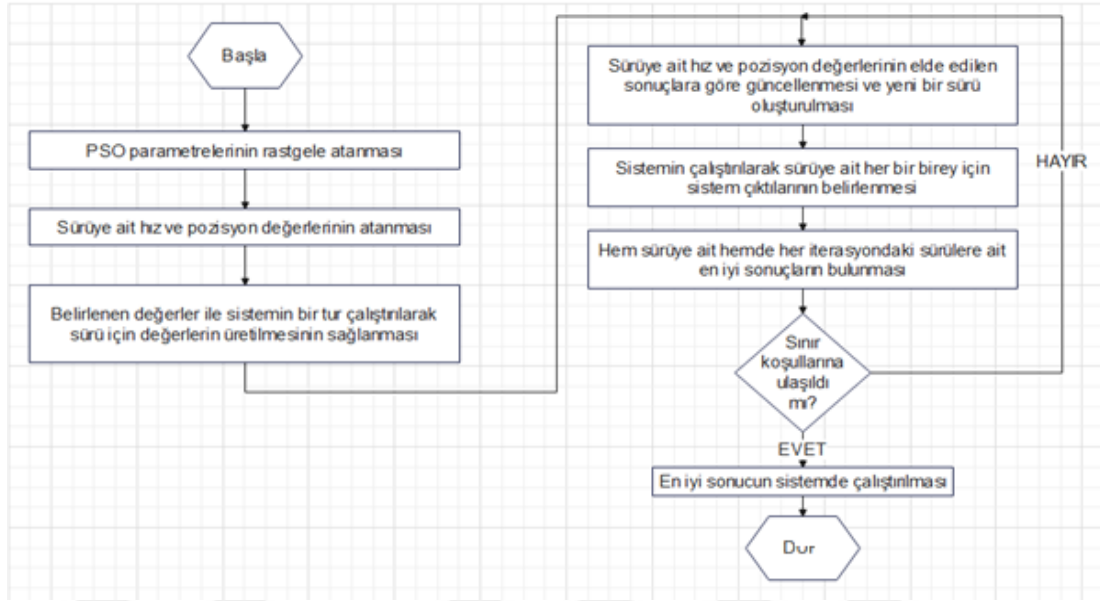
### 4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) sürülerle ilgili problemleri çözmek için yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. 1995 yılında James Kennedy ve Russell C. Eberhart tarafından bir olasılıksal arama süreci olarak geliştirilmiş ve ilk olarak sürü halinde hareket eden kuş ve balık türlerinin yiyecek bulmak, avcılardan kaçmak gibi temel ihtiyaçlarını ne şekilde yaptıklarını, sürü içindeki sosyal davranışlarını ve sürünün bir bütün olarak koreografisini izlemeleri sonucu yapılan simülasyonları matematiksel olarak açıklamak amacıyla kullanılmıştır.

Problemlere maliyeti düşük tutarak en optimal çözümleri arayan optimizasyon algoritmalarından birisi olan PSO yönteminin esinlenme kaynağı doğada sürü halinde yaşayan hayvan türleri olmuştur.

Sürü içindeki bireyler hem bireysel tecrübelerinden hem de sürünün tecrübelerinden öğrenerek amaca göre en optimal bir sonraki gidecekleri yeri ve yönü seçmektedirler. PSO algoritması ile çözüm modelleri üretmek diğer optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırıldığında ayarlanması gereken parametre sayısının az olması, doğrulanmasının daha mümkün olması gibi sebepler dolayısıyla daha kolaydır. PSO arama algoritmaları, fonksiyon optimizasyonları, yapay sinir ağı modellerinin eğitimi, bulanık mantık sistemleri ve görüntü işleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Kontrol yapılarındaki parametreler sistemi tasarlayanlar tarafından verildiğinden ve her sistem için farklı parametreler gerektiğinden kullanılan kontrol yapıları hatalı olabilmektedir. Bu hataları engellemek ve her sistem için parametreleri hızlıca belirleyebilmek için optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır.



Şekil 4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Akış Şeması

Algoritma parçacıkların ilk değerlerini sisteme girdi olarak vererek sistemden sonuçları toplar. Toplanan sonuçlara göre sürüdeki parçacıklara yeni değerler verilmelidir. Yeni değerler Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'deki matematiksel ifadeler ile elde edilir. Elde edilen yeni değerler yeniden sisteme girdi olarak verilir. Tekrar sonuçlar toplanır ve yine Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'deki matematiksel ifadelere göre sürüdeki parçacıklar güncellenir. Sınır koşullarına gelindiğinde en iyi değerler toplanır ve çalıştırılan sistemde kullanılan kontrolöre ait parametrelerin en iyi değerleri bulunmuş olur.

Parçacık Sürü Optimizasyonunda kritik olan iki farklı denklem bulunmaktadır. Bu denklemler sistemdeki cevapların ilk sonuçlarına göre sistem ki parçacıkların hız ve konum güncellemelerini yapmamızı sağlayan denklemlerdir. Hız denklemi Denklem (4.1)'de konum denklemi ise Denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$v_i^{k+1} = w * v_i^k + c_1 * rand_1(pbest_i - p_i^k) + c_2 * rand_2(gbest - p_i^k) \quad (4.1)$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde,  $v_i^k$   $i$  inci parçacığın  $k$  inci iterasyondaki hızını,  $p_i^k$   $i$  inci parçacığın  $k$  ninci iterasyondaki pozisyonunu,  $w$  eylemsizlik ağırlık fonksiyonunu,  $c_{1,2}$  öğrenme

faktörlerini  $rand_{1,2} [0,1]$  aralığında atanan rastgele sayı değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca,  $pbest_i$ ,  $i$  inci parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi çözümü sağlayan koordinatlardır.  $gbest$  ise, tüm parçacıklar tarafından elde edilen en iyi çözümü sağlayan koordinatlardır.

## 4.2 Maliyet Fonksiyonu

Optimizasyonda kullanılmak üzere, zaman ağırlıklı mutlak hata (ITAE) temeline dayanan bir maliyet fonksiyonu seçilmiştir. Denklem (4.3)'de sunulmuş olan bu maliyet fonksiyonunda her bir sistem değişkeni için hata sinyali oluşturulmuş ve bu hata sinyallerinin ağırlıklı toplamı alınmıştır.

$$J = \int_0^t t |\omega_x e_x(t) + \omega_\theta e_\theta(t) + \omega_\alpha e_\alpha(t) + \omega_\beta e_\beta(t) + \omega_{u_x} u_x(t) + \omega_{u_\theta} u_\theta(t)| dt \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'de,  $e_x(t)$  konum için hata sinyalini,  $e_\theta(t)$  açı için hata sinyalini,  $e_\alpha(t)$   $\alpha$  salınımı için hata sinyalini,  $e_\beta(t)$   $\beta$  salınımı için hata sinyalini ifade etmektedir.  $u_x(t)$  ve  $u_\theta(t)$  değişkenleri ise, sırasıyla, her bir kontrolör için kontrol çıkış sinyaline karşılık gelmektedir. Denklemde yer alan  $\omega$  değişkenleri ise her bir hata sinyaline ait ağırlıklardır. Bu çalışmada,  $\omega_x = \omega_\alpha = \omega_\beta = 1$ ,  $\omega_\theta = 0.5$  ve  $\omega_{u_x} = \omega_{u_\theta} = 1/15$  olarak seçilmiştir.

## 5. KULE VİNÇ SİSTEMİNİN KONTROLÜ

Bu çalışmada ele alınmış olan kule vinç sisteminin kontrolü için PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol (SMC) yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan kontrolörlerin parametrelerinin optimuma yakın değerlerini bulmak amacıyla, bir önceki bölümde anlatılmış olan Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. Elde edilen kontrolörlerin performanslarını gözlemlemek amacıyla MATLAB/ SIMULINK programında simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Bu amaçla, öncelikle sistemin matematiksel modeli ve parametreleri MATLAB/SIMULINK'e aktarılmıştır. Ardından, yine MATLAB/SIMULINK'de PID, FOPID ve SMC kontrolörlerine ait kontrol yapıları oluşturularak üç farklı kontrol sistemi hazırlanmıştır. Her bir kontrol sisteminde biri konuma ( $x$ ) ve diğeri açığa ( $\theta$ ) ait olmak üzere ikişer adet kontrolör yer almaktadır. Kontrolörlerin parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılacak olan Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması için MATLAB üzerinde kodlar hazırlanmıştır.

### 5.1 Kontrol Parametrelerinin Optimuma Yakın Değerleri

Yapılmış olan simülasyon çalışmalarında, araç pozisyon referans değeri 0.3 m., vinç açısı referans değeri 135 derece olarak seçilmiştir. Salınım açıları ise, maksimum 1 derece olacak şekilde sistemin kontrolü sağlanmıştır.

Hazırlanmış olan kodlar kullanılarak PID, FOPID ve SMC kontrolörlerinin her biri için parametrelerinin en iyi değerleri bulunmuştur ve bu parametre değerleri kullanılarak, her bir kontrolör için sistem kontrolü simülasyonları yapılmıştır.

Yukarıda bahsedildiği gibi, bu çalışmada tasarlanmış üç farklı kontrol sisteminin içerisinde biri konuma ( $x$ ) ve diğeri açığa ( $\theta$ ) için olmak üzere ikişer adet kontrolör yer almaktadır. Denklem (4.3)'de verilmiş olan maliyet fonksiyonu kullanılarak, MATLAB'de hazırlanmış olan PSO algoritması çalıştırılmıştır. PSO algoritmasına ait parametre değerleri Tablo 5.1'de sunulmuştur. Ayrıca, optimizasyon aşamasında kullanılan parametrelerin alt ve üst değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\text{PID: } \{K_p, K_i, K_d\} \in [0, 200]$$

$$\text{FOPID: } \{K_p, K_i, K_d\} \in [0, 200], \{\lambda, \mu\} \in [0, 2] \quad (5.1)$$

$$\text{SMC: } \{\lambda\} \in [0, 200], \{\omega, \gamma\} \in [0, 10]$$

Tablo 5.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Parametreleri

Parametre	Değeri
Maksimum İterasyon Sayısı	iter = 200
Sürü Boyutu	n = 50
Simülasyon Süresi (s.)	SimTime = 10
Örnekleme Süresi (s.)	SampleTime = 0.001
Eylemsizlik Ağırlığı	$w_1 = 0.8$
Eylemsizlik Ağırlığı Sönümlenme Oranı	$w_2 = 1.2$
Öğrenme Faktörleri	$c_1=1.2, c_2=1.2$

PSO algoritması kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapıldığında, elde edilen PID, FOPID ve SMC kontrolörlerinin parametreleri sırasıyla Tablo 5.2, 5.3 ve 5.4’de sunulmuştur. Bu tablolardaki parametrelerde yer alan  $x$  ve  $\theta$  değişkenleri ilgili kontrolörü temsil etmektedir. Her bir kontrol sistemi için elde edilmiş olan maliyet fonksiyonu değerleri ise Tablo 5.5.’de verilmiştir.

Tablo 5.2. PID Kontrolör Optimuma Yakın Parametreleri

$K_{p_x}$	$K_{i_x}$	$K_{d_x}$	$K_{p_\theta}$	$K_{i_\theta}$	$K_{d_\theta}$
97.2631	2.1866	0.0194	98.1453	0.0245	68.2338

Tablo 5.3. FOPID Kontrolör Optimuma Yakın Parametreleri

$K_{p_x}$	$K_{i_x}$	$\lambda_x$	$K_{d_x}$	$\mu_x$
196.4537	199.4691	0.0156	192.736	0.0312
$K_{p_\theta}$	$K_{i_\theta}$	$\lambda_\theta$	$K_{d_\theta}$	$\mu_\theta$
1.1654	7.3747	0,0171	59.3373	0,0121

Tablo 5.4. Kayan Kipli Kontrolör Optimuma Yakın Parametreleri

$\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$	$\omega_1$	$\gamma_1$
113.6784	97.3560	-2.5258	6.6142
$\lambda_{21}$	$\lambda_{22}$	$\omega_2$	$\gamma_2$
49.5376	100.2755	-1.2749	17.4346

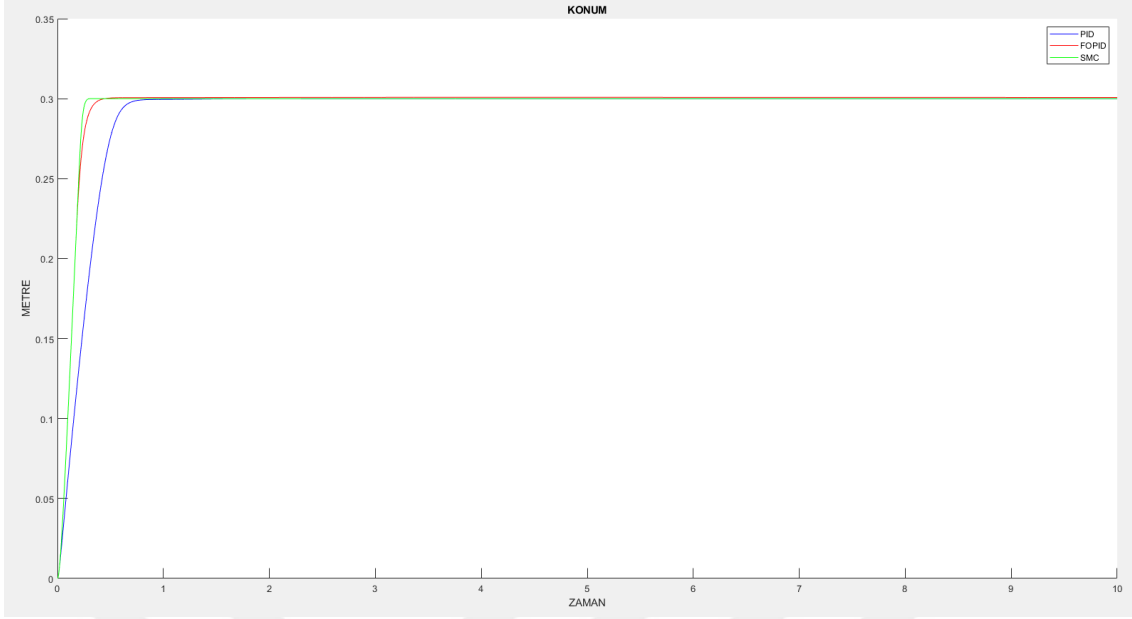
Tablo 5.5. Maliyet Fonksiyonu Değerleri

	<b>PID</b>	<b>FOPID</b>	<b>SMC</b>
$J$	13.7491	12.9404	8.7259

## 5.2 Sistem Kontrolü Simülasyon Sonuçları

PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol (SMC) kontrolörlerin performanslarını gözlemek amacıyla MATLAB/SIMULINK programında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sistem çıktılarına ait grafikler Şekil 5.1-5.2’de sunulmuştur.

Araç konum grafikleri Şekil 5.1’de yer almaktadır. Grafiklere ait zaman bölgesi performans kriterleri ise Tablo 5.6’da sunulmuştur. Grafikler ve tablodaki değerler incelendiğinde, SMC kontrolörün diğer kontrolörlerden daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. SMC kontrolör FOPID kontrolörüne göre %16.11, PID kontrolörüne göre %30.24 oranında daha hızlı referans değere yakınsamıştır. Ayrıca, SMC kontrolör sonucunda üst aşım ve kalıcı hal hatası bulunmamaktadır.

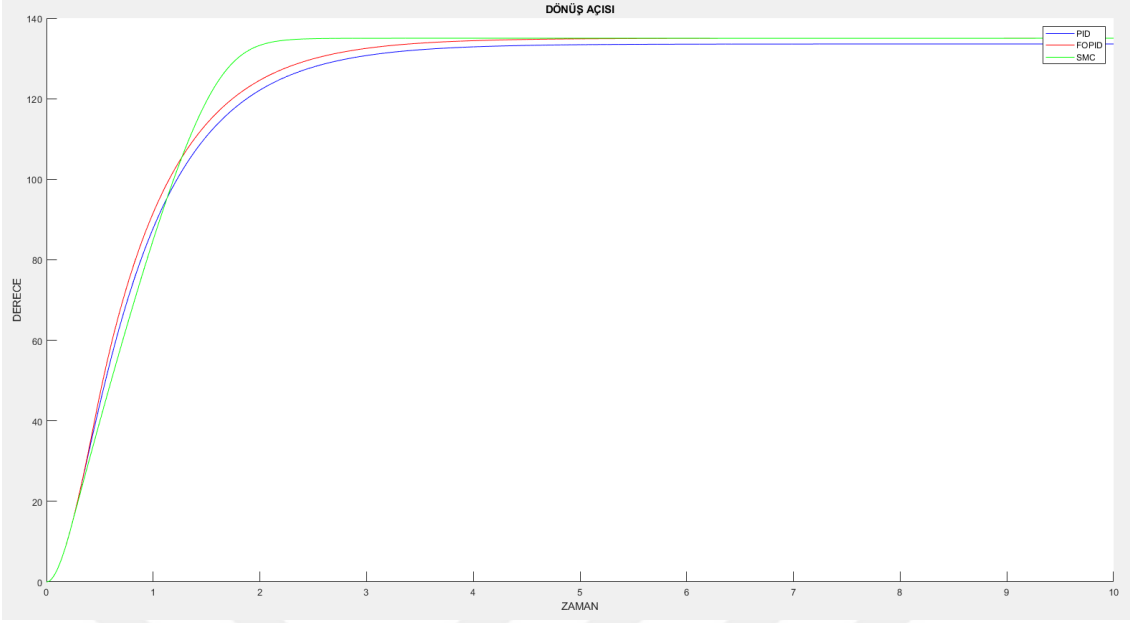


Şekil 5.1. Konum Kontrolü için Performans Grafiği (x)

Tablo 5.6. Konum Kontrolü için Kontrolörlerin Performans Analizi

	Maksimum Üst Aşım $M_p$ (%)	Kalıcı D. Erişim Süresi $t_s$ (s.)	Kalıcı Durum Hatası $e_{ss}$ (m.)
PID	0	0.291	$10^{-4}$
FOPID	2.6	0.242	$10^{-10}$
SMC	0	0.203	$10^{-10}$

Sistemin kontrolü sonucunda elde edilen açılı grafikleri ise Şekil 5.2’de yer almaktadır. Ayrıca, Tablo 5.7’de grafiklere ait zaman bölgesi performans kriterleri sunulmuştur. Grafikler ve tablodaki değerler incelendiğinde, SMC kontrolörünün genel olarak diğer kontrolörlerden daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. SMC kontrolör, FOPID kontrolöre göre %31.09, PID kontrolöre göre %40.48 oranında daha hızlı istenen değere yakınsamıştır. Ayrıca, SMC kontrolör sonucunda üst aşım ve kalıcı hal hatası bulunmamaktadır.



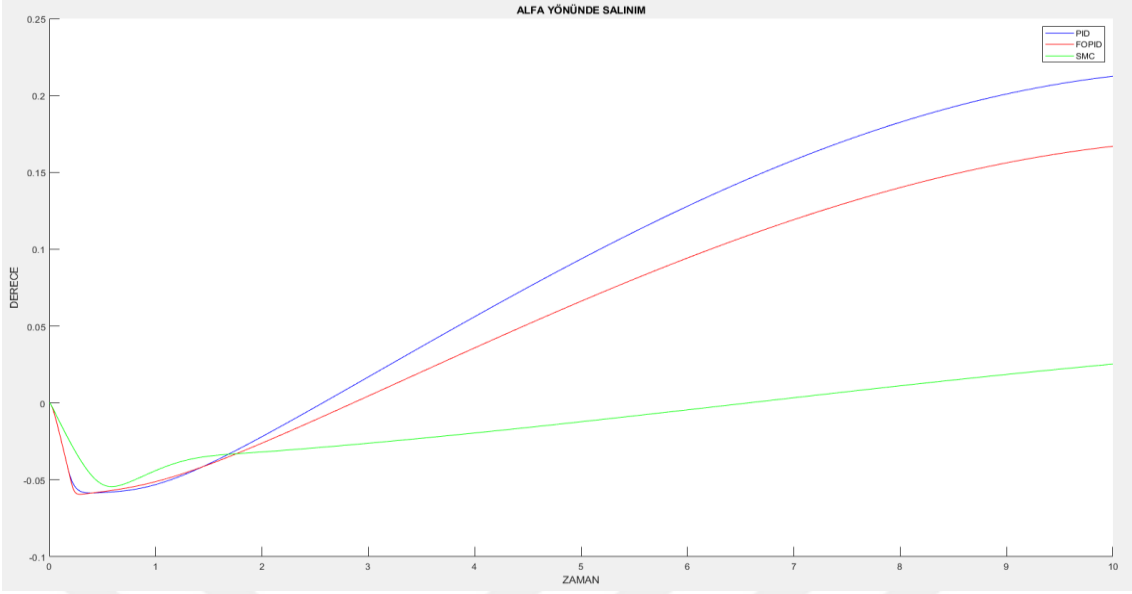
Şekil 5.2. Açık Kontrolü için Performans Grafiği ( $\theta$ )

Tablo 5.7. Açık Kontrolü için Kontrolörlerin Performans Analizi

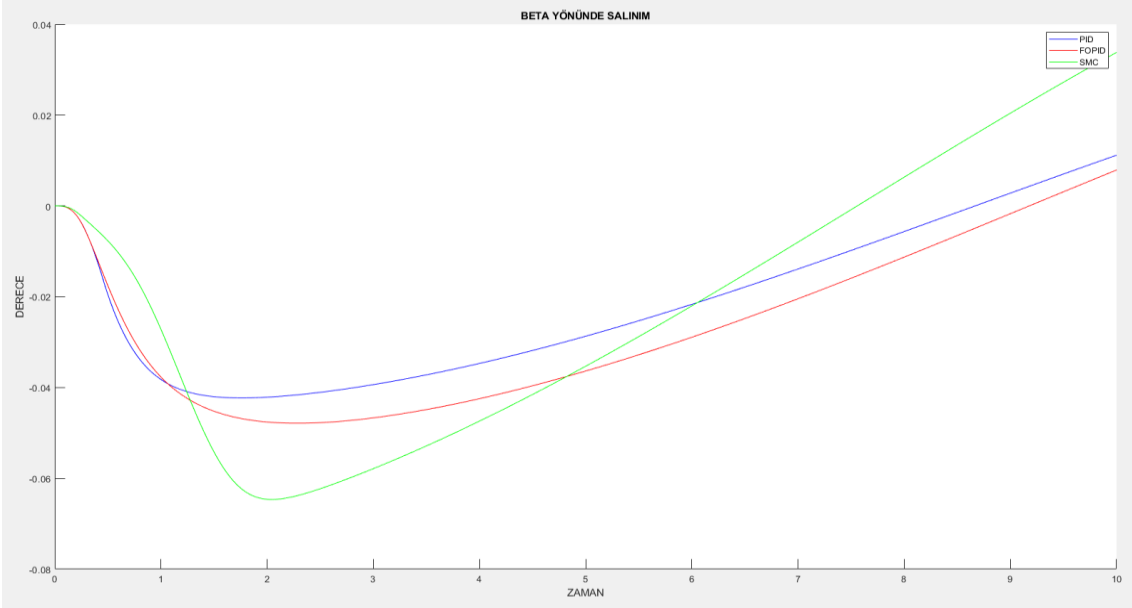
	Maksimum Üst Aşım $M_p$ (%)	Kalıcı D. Erişim Süresi $t_s$ (s.)	Kararlı Durum Hatası $e_{ss}$ (derece)
PID	0	3.083	1.5
FOPID	0	2.663	0
SMC	0	1.835	0

Kullanılan kontrolörlerin sistemde oluşturdukları hareket sonucunda, Bölüm 2’de sunulmuş olan sistem dinamiğine bağlı olarak, vinç sistemine bağlı bulunan yük hareket etmektedir. Yük hareket ederken  $x-z$  ve  $y-z$  düzlemleri boyunca salınım yapmaktadır. Kontrolörlere göre salınım performans grafikleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de sunulmuştur.

Sistemde,  $\alpha$  ve  $\beta$  yönünde oluşabilecek maksimum salınım 1 derece olacak şekilde hedeflenmiştir. Tüm kontrolörlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, salınımların maksimum salınım kriterini aşmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3.  $x$ - $z$  Düzlemindeki Salınım için Performans Grafiği ( $\alpha$ )



Şekil 5.4.  $y$ - $z$  Düzlemindeki Salınım için Performans Grafiği ( $\beta$ )

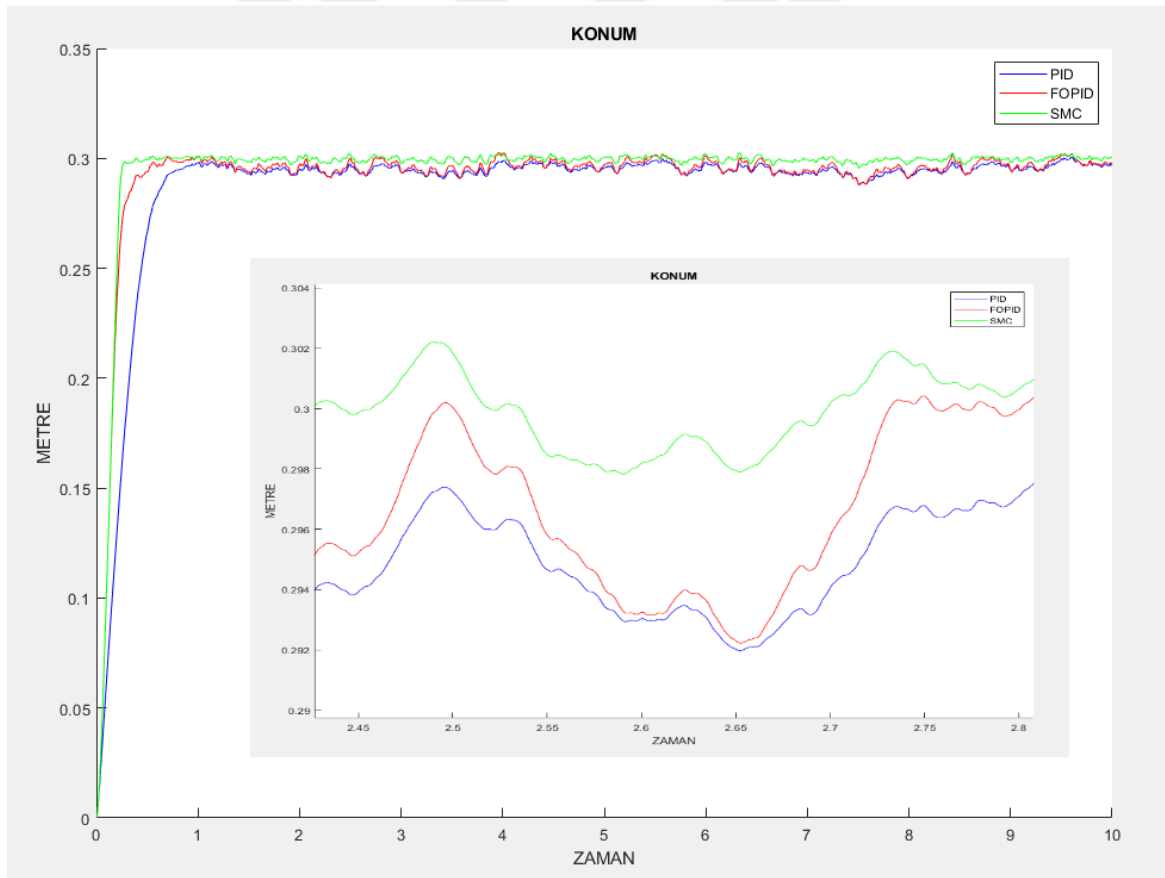
### 5.3. Sağlık Testleri Simülasyon Sonuçları

Kule vinç sisteminin kontrolü için optimuma yakın parametre değerleri elde edilmiş olan PID, FOPID ve SMC kontrolörlerinin, sistemin çalışmasını etkileyecek olan bozucu etkenlere karşı sağlamlığını test etmek amacıyla simülasyon çalışmaları da yapılmıştır. Bu kapsamda üç farklı senaryo ele alınmıştır.

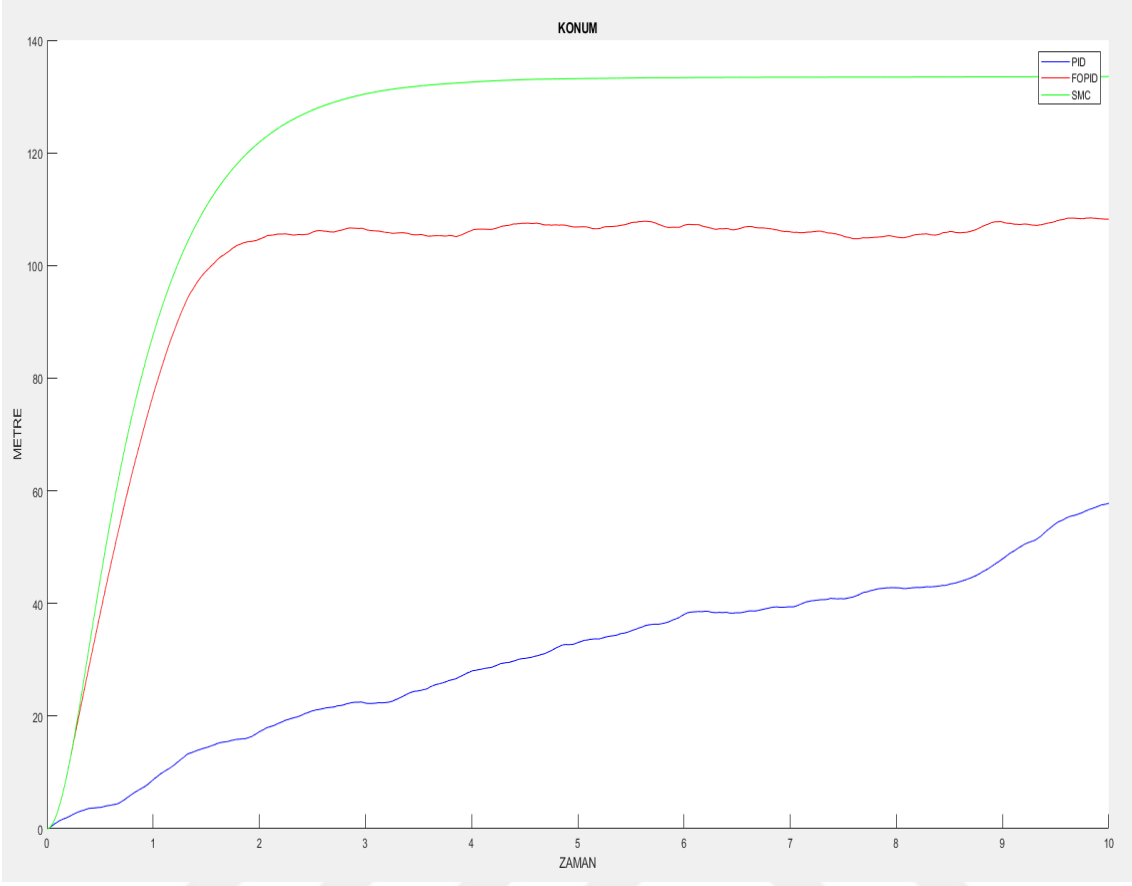
### 5.3.1. Sağlamlık Testi: Sürekli Gürültü

İlk sağlamlık testinde, dışarıdan gelen bozucu etki ele alınmıştır. Kule vinç sisteminin çalışma ortamında karşılaşılabileceği rüzgâr gibi bozucu etkenlerin kontrol üzerindeki etkisini gözlemlenmek amaçlanmıştır. Sisteme eklenecek rastgele bozucu etkiler ile çevresel koşullardan gelen bozucu sinyaller simüle edilebilmektedir. Gürültüler rastgele olduğundan çevresel koşullardaki ani değişimler de gözlenebilmiştir. Bu amaçla, sistemdeki konum çıktısına  $\pm 0.05 m.$ , açı çıktısına  $\pm 5^\circ$  gürültü eklenmiştir.

Sistemde yapılan sürekli gürültülü sağlamlık testine göre kontrolörlerden elde edilen konum grafikleri Şekil 5.5’de açı grafikleri Şekil 5.6’da sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, SMC kontrolörünün diğer kontrolörlerden daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Özellikle açı çıktısında SMC kontrolör istenilen referans değerine çok diğer iki kontrolöre göre çok daha iyi yakınsamıştır.



Şekil 5.5. Sürekli Gürültülü Testi Konum Kontrolü için Performans Grafiği (x)



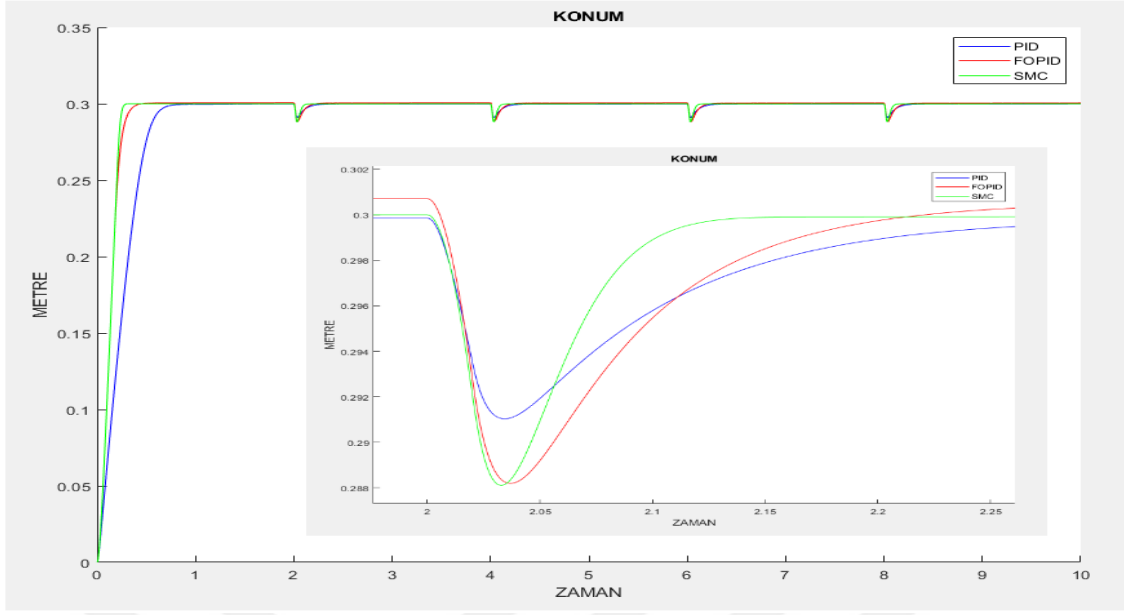
Şekil 5.6. Sürekli Gürültülü Testi Açık Kontrolü için Performans Grafiği ( $\theta$ )

### 5.3.2 Sağlamlık Testi: Anlık Bozucu Etki

Bu sağlamlık testinde, bir önceki bölümde sürekli olarak verilen gürültülerin yerine anlık bozucu etkiler kullanılmış, ancak daha büyük genlikte olacak şekilde verilmiştir. Bu amaçla, sistemdeki konum çıktısına her iki saniyede bir  $-0.1m.$ , ve açı çıktısına da her iki saniyede bir  $-15^\circ$  anlık bozucu etki eklenmiştir.

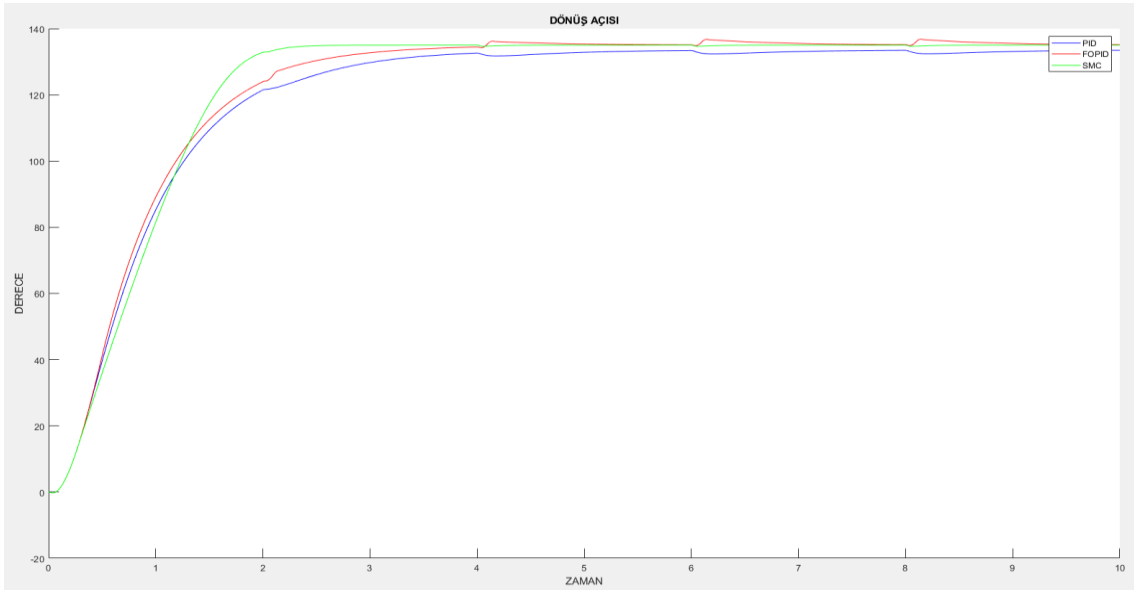
Sistemde yapılan anlık bozucu etki sağlamlık testine göre kontrolörlerden elde edilen konum grafikleri Şekil 5.7’de, açı grafikleri ise Şekil 5.8’de sunulmuştur.

Konum grafiklerinden görüldüğü üzere, her üç kontrolör de anlık bozucu etkiyi kompanse ederek, referans değerine ulaşmaktadır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, SMC kontrolör diğer kontrolörlerden daha iyi performans göstermektedir. SMC kontrolör FOPID kontrolöre göre %1, PID kontrolöre göre %1.1 oranında daha hızlı sonuç vermiştir.



Şekil 5.7. Anlık Bozucu Etki Testi Konum Kontrolü için Performans Grafiği ( $x$ )

Açı grafiklerinden görüldüğü üzere de, SMC kontrolör diğer kontrolörlerden daha iyi sonuç vermiştir. SMC kontrolör FOPID kontrolöre göre %30.48, PID kontrolöre göre %31.83 daha hızlı sonuç vermiştir. FOPID kontrolör SMC kontrolöre göre %0.07, PID kontrolör SMC kontrolöre göre %1.26 daha fazla kalıcı hal hatasına sahiptir. SMC kontrolörde kalıcı hal hatası bulunmamaktadır.



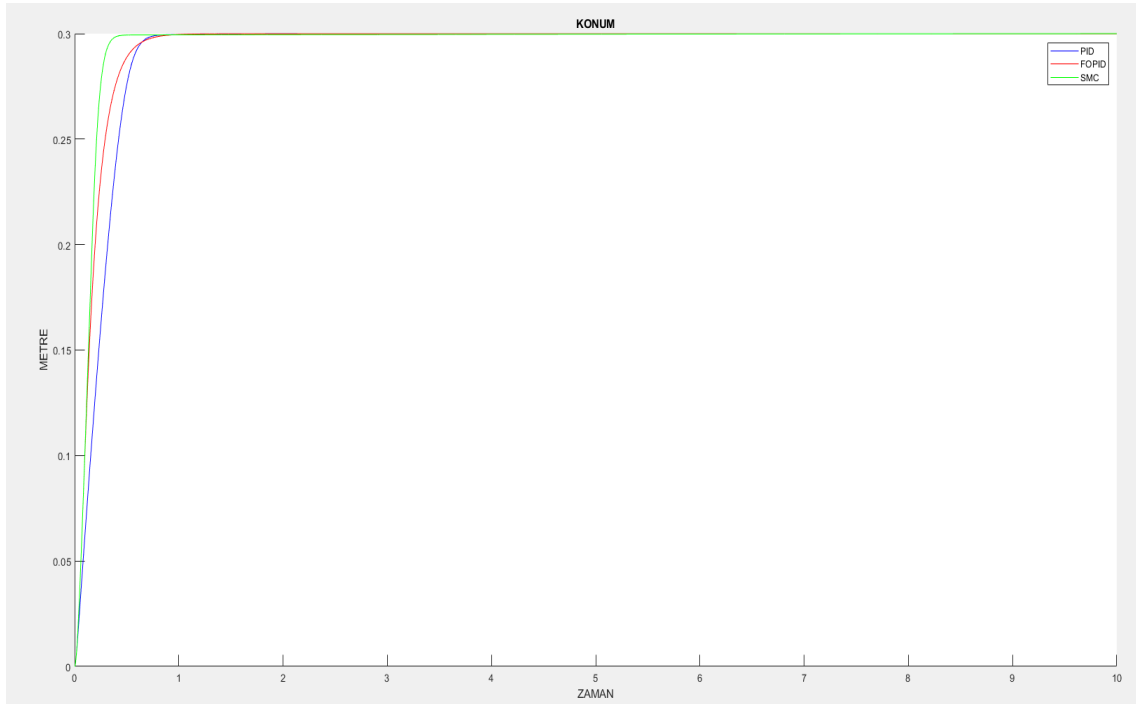
Şekil 5.8. Anlık Bozucu Etki Testi Açık Kontrolü için Performans Grafiği ( $\theta$ )

### 5.3.3 Sağlamlık Testi: Motor Parametre Değişimi

Bu sağlamlık testinde, sistem içi bozucu etkiler ele alınmıştır. Kule vinç sisteminin uzun süre kullanıldığında motorların aşınmasından kaynaklı oluşabilecek motor parametrelerindeki değişimlerin sisteme olan etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Bu sebeple simülasyonlardaki motor parametreleri değiştirilerek, optimize edilmiş kontrolörlerin sistem kontrolündeki sağlamlığı incelenmiştir. Bu amaçla, motor parametreleri içerisinde bulunan armatr dirençleri beş katına çıkarılmıştır.

Sistemde yapılan motor parametre değişimi ile sağlamlık testi sonucunda elde edilen konum grafikleri Şekil 5.9'da aı grafikleri ise Şekil 5.10'da sunulmuştur. Şekil 5.9'da görüldüğü üzere SMC kontrolörü diğer kontrolörlere karşı konum kontrolünde daha iyi sonuç vermiştir.

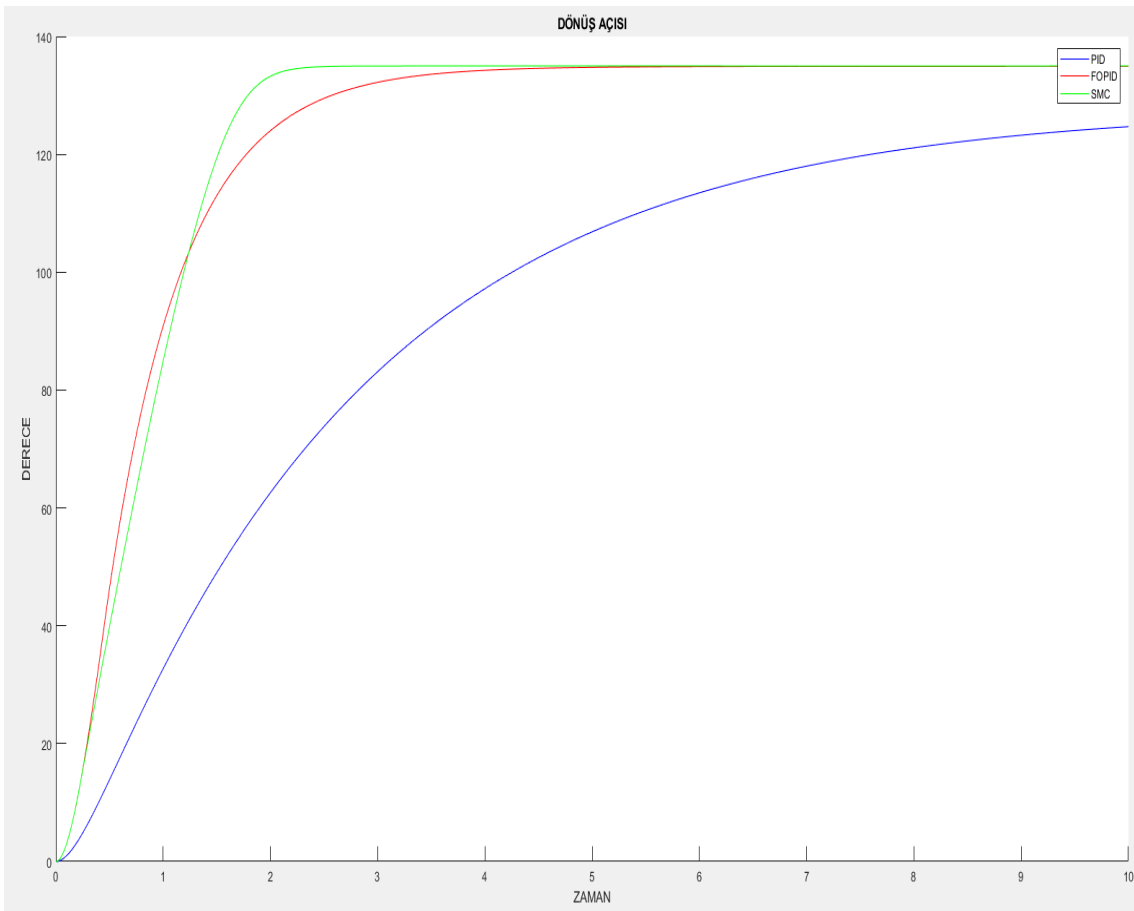
Armatür direnci arttığı için akım değeri düşmüş ve böylece üretilen tork miktarı azalmıştır. Buna bağlı olarak tüm kontrolörlerin kalıcı durum erişim süresi gerçek sistem sonuçlarına oranla artmıştır. Motor parametre değişimi testi sonuçları incelendiğinde hız açısından gerçek sistem sonuçlarına oranla SMC kontrolör %24.79, FOPID kontrolör %39.27, ve PID kontrolör %48.37 daha geç kalıcı duruma erişmiştir.



Şekil 5.9. Motor Parametre Değişimi Testi Konum Kontrolü Performans Grafiği (x)

Şekil 5.10’da görüldüğü üzere SMC kontrolör aç kontrolünde de diğer kontrolörlere göre daha iyi sonuç vermiştir. SMC kontrolör 1.957 saniye içerisinde kararlı duruma geçerken FOPID kontrolöre göre %47.18 oranda daha hızlı sonuç vermiştir. PID kontrolör ise, 10 saniyeden daha uzun süre sonucunda kararlı hal değerine ulaşmıştır.

Tüm kontrolörler armatür direncinin artmasından kaynaklı olarak yaşanan tork düşüşünden dolayı gerçek sistem sonuçlarına oranla daha geç kararlı duruma geçmişlerdir. Parametre değişimi sonucunda SMC kontrolör %6.88, FOPID kontrolör ise %8.17 daha geç yanıt vermiştir.



Şekil 5.10. Motor Parametre Değişimi Testi Aç Kontrolü Performans Grafiği ( $\theta$ )

Yapılmış olan simülasyon çalışmalarında, her üç kontrolör için de başarılı kontrol sonuçları elde edilmiştir. Her bir kontrolör için elde edilmiş olan sonuçlar, sisteme ait dört değişkene ait grafikler bazında, diğer kontrolörlerinkine karşılaştırıldığında ise, genel olarak Kayan Kipli kontrolörün diğer iki kontrolöre göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Vinç sistemleri taşınması görece zor olan yüklerin bir noktadan başka bir noktaya taşınması için kullanılan, kullanıldığı yerlere göre farklı çeşitleri bulunan sistemlerdir. Hali hazırda kullanılan vinç sistemleri insan kontrolünde manuel olarak kontrol edilmektedir. Dış etkenlerin etkisini azaltmak ve manuel kontrol sebebi ile oluşması olası tehlikelerin azaltılması için vinç sistemlerinin otonom hale getirilmesi önemlidir. Vinç sistemlerinin otonom hale getirilmesine katkı sağlamak amacı ile yapılan bu çalışmada, bir kule vinç sisteminin kontrolü çalışılmıştır.

Bu amaçla, öncelikle bir kule vinç sisteminin çalışma prensibi ele alınarak, matematiksel modeli oluşturulmuştur. Ele alınan modele sahip vinç sisteminin kontrolü için PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol yöntemleri önerilmiştir.

Bir sistemin kontrolünde uygulanan kontrolörlerin parametrelerinin optimum değerlerde belirlenmesi çok önemlidir. Bu amaçla, bu çalışmada, Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasından yararlanılmıştır. Optimizasyon çalışması için, kapsamında hatanın yanı sıra, zamanın ve ayrıca kontrolörlere ait kontrol çıktılarının da yer aldığı ağırlıklı toplamdan oluşan bir maliyet fonksiyonu önerilmiştir. Bu maliyet fonksiyonunun da kullanılması ile PID Kontrol, Kesir Dereceli PID Kontrol, Kayan Kipli Kontrol yapılarına ait parametre değerleri elde edilmiştir.

Parametreleri optimizasyon çalışması ile elde edilmiş olan PID, Kesir Dereceli PID, Kayan Kipli kontrolör için MATLAB / SIMULINK’de sistemin simülasyonu yapılmış ve ortaya çıkan sistem çıktı performansları karşılaştırılması sunulmuştur.

Yapılmış olan simülasyon çalışmalarında, her üç kontrolör için de başarılı kontrol sonuçları elde edilmiştir. Her bir kontrolör için elde edilmiş olan sonuçlar, sisteme ait dört değişkene ait grafikler bazında, diğer kontrolörlerinki ile karşılaştırıldığında ise, genel olarak Kayan Kipli kontrolörün diğer iki kontrolöre göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Gerçek hayatta sistemi etkileyecek olan rüzgâr gibi bozucu sinyallerin olma olasılığı

dikkate alınarak, elde edilmiş olan kontrolörler için üç farklı sağlamlık testleri yapılmıştır. Bu amaçla, sistem çıkışına ilk olarak sürekli rastgele gürültü eklenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan sürekli gürültülü sağlamlık testinde de kayan kipli kontrolör diğer kontrolörlere üstünlük sağlamış ve hepsinden daha iyi performans ile sistemin kontrolünü sağlamıştır.

Çalışma alanlarında karşılaşılabilecek anlık bozucu etkiler için anlık bozucu etkili sağlamlık testleri yapılmıştır. Bu amaçla, sistem çıkışına her iki saniyede bir anlık yüksek darbe sinyali, uygulanmıştır. Yapılmış olan anlık bozucu etki sağlamlık testinde de kayan kipli kontrolör diğer kontrolörlere üstünlük sağlamış ve daha iyi performans sergilemiştir.

Sistemde kullanılan motorların yıpranmasından kaynaklı oluşan verimsizlikler dikkate alınarak motor parametrelerinde yaşanabilecek değişimler için sağlamlık testi de yapılmıştır. Bu amaçla, motorların armatür dirençleri beş katına çıkarılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Yapılan testlerde kayan kipli kontrolör diğer kontrolörlere göre çok daha iyi sonuç vermiştir.

Bu çalışma otonom vinç sistemlerinin gelişmesine katkı sağlamak için yapılmıştır. Çalışmanın devamı olarak integral kayan kipli kontrolör, bulanık mantık kayan kipli kontrolör gibi farklı kontrolörler denenerek daha iyi sonuç verebilecek kontrol yapıları araştırılabilir; Simülasyonlar yapılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- Aboserre, L. T., El-Badawy, A. A. (2020). Robust integral sliding mode control of tower cranes. *Journal of Vibration and Control*, 0, 1-13.
- Aguiar, C., Leite, D., Andonovski, G., Skrjanc, I., (2020). Nonlinear Modeling and Robust LMI Fuzzy Control of Overhead Crane Systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 1-27.
- Andres, B., Pandolfo, V., Roozbahani, D., Handroos, H., (2014). Novel control method for overhead crane's load stability. *Dynamics and Vibroacoustics of Machines*, 2014, 108-125
- Andrzej, U., Klosinski, J., Augustynek, K., (2020). The influence of the PID controller settings on the motion of a truck-mounted crane with a flexible boom and friction on joints. *Control Engineering Practice*, 103 (2020), 1-13.
- Cho, S.-K., Lee, H.-H. (2002). A fuzzy-logic antishwing controller for three-dimensional overhead cranes. *ISA Transactions*, 41, 235–243.
- Graichen, K., Egretzberger, M., Kugi, A. (2010). Suboptimal model predictive control of a laboratory crane. *12th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Bologna, September 1-3 2010.
- Jaafar, H., Mohamed Z., Jamian, J., Abidin A., Kassim A., Ghani Z., (2013). Dynamic Behaviour of a Nonlinear Gantry rane System. *The 4th International Conference on electrical Engineering and Informatics*, 2013, 419-425.
- Lahres, S., Aschemann, H., Sawodny, O., Hofer, E. P. (2000). Observer and Control Design for the Rotation of Crane Loads. *IFAC Proceedings Volumes*, 33, 619-624.
- Mendonça, L. F., Sousa, J. M. C., Sá da Costa, J. M. G. (2006). FAULT TOLERANT CONTROL USING FUZZY MPC. *IFAC Proceedings Volumes*, 39, 1425-1430.
- Ngo, Q. H., Nguyen, N. P., Nguyen, C. N., Tran, T. H., Ha, Q. P. (2017). Fuzzy sliding mode control of an offshore container crane. *Ocean Engineering*, 140, 125–134.
- Qian, D., Yi, J., Zhao, D., (2011). Control of Overhead Crane systems by Combining Sliding Mode with Fuzzy Regulator. *The International Federation of Automatic Control*, Milano, August 28 - September 2 2011
- Shen, Y., Terashima, K., Yano, K. (2005). MINIMUM TIME CONTROL USING STRAIGHT TRANSFER FOR A ROTARY CRANE. *IFAC Proceedings Volumes*, 38, 43–48.

- Sorensen, K., Fisch, H., Dickerson, S., Singhose, W., Glauser, U. (2008). A Multi-Operational-Mode Anti-Sway and Positioning Control for an Industrial Bridge Crane. *17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, July 6-11 2008.
- Szpytko, J., Smoczek J., (2009). The neuro fuzzy adaptive anti-sway crane control system. *12th IFAC Symposium on Transportation Systems, CA*, September 2-4 2009.
- Szpytko, J., Smoczek J., (2013). Investigation of Intelligent Fuzzy based Control System of Overhead Crane, *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Poznan, August 26 - August 29 2013
- Takahashi, M., Kinoshita, S., Kato, H., Kawasaki, Y., Iwai, Z. (2004). Positioning control of a stacker crane using a robust simple adaptive control method. *IFAC Proceedings Volumes, 37*, Yokohama, August 30 - September 1 2004.
- Tang, R., Huang, J. (2016). Control of bridge cranes with distributed-mass payloads under windy conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing, 72*, 409-419.
- Terashima, K., Shen, Y., Yano, K. (2007). Modeling and optimal control of a rotary crane using the straight transfer transformation method. *Control Engineering Practice, 15*, 1179-1192.
- Tysse, G., Cibicik A., Tingelstad L., Egeland O., (2022). Lyapunov-based damping controller with nonlinear MPC control of payload position for a knuckle boom crane. *Automotica, 140* (2022), 1-11.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Cogay, S.**, Akarçay, E. (2019). Kayar Kapı Oransal İntegratif Türevsel (PID) Kontrol Algoritmasının Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile Optimizasyonu, *3rd International Engineering Research Symposium (INERS)*, Düzce, Türkiye, 05-07 Eylül 2019.
- Cogay, S.**, Ataşlar-Ayyıldız, B. (2022). Vinç Sistemlerinin Optimal Kontrolü, *9. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi (IMASCON)*, Kocaeli, Türkiye, 9-10 Aralık 2022.
- Cogay, S.**, Kandilli, İ., Kuncan, M. (2020). Akıllı Toprak Sulama Sistemi, *4th International Zeugma Conference*, Gaziantep, Türkiye, 29-31 Mayıs 2020.
- Cogay, S.**, Tümer, C., Ataşlar-Ayyıldız, B. (2021). Elektrikli ve Kademesiz Araç Kapı Gergi Kolu Tasarımı ve PID Kontrolü, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Konferansı (ASYU)*, İstanbul, Türkiye, 6-8 Ekim 2021.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk orta ve lise öğretimini Bursa'da tamamladı. 2010 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 1 sene İngilizce hazırlık okuduktan sonra 2015 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Mesleki hayatının bundan sonraki döneminde akademik çalışmalarına doktora programı ile devam etmek ve araştırma geliştirme faaliyetlerinde yer almak üzerine planlamaktadır.

