

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



AÇIK DENİZ HAREKET Dengeleyici Transfer  
SİSTEMİNİN (AHC GANGWAY) MEKATRONİK SİSTEM  
TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak ÖZDEMİR

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

MAYIS 2024  
İSTANBUL

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**AÇIK DENİZ HAREKET Dengeleyici Transfer  
SİSTEMİNİN (AHC GANGWAY) MEKATRONİK SİSTEM  
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak ÖZDEMİR**  
**210003002**  
**0009-0002-6681-3736**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL**

**İstanbul 2024**



T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

28.05.2024

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 28.05.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

**Doç. Dr. Savaş DİLİBAL**

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Özgür**

**YURTSEVER**

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Prof. Dr. Aykut KENTLİ**

Üye (İmza)

Marmara Üniversitesi

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum ‘‘Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin (AHC Gangway) Mekatronik Sistem Tasarımı’’ adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya ’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim

Burak ÖZDEMİR

## ÖNSÖZ

Tez sürecimde bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Savaş Dilibal'a, desteklerini her zaman hissettiren saygıdeğer şirket yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma, bilgi birikimi ve deneyimiyle her zaman örnek aldığım Advens Mühendislik Ar-Ge Müdürü Serkan Togay'a ve hayatımın her anında yanımda olan, bana güç veren sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2024

Burak ÖZDEMİR

---

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>iv</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>v</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Açık Deniz Endüstrisi .....	1
1.2 Deniz Dalgalanmalarının Açık Deniz Operasyonlarına Etkisi .....	2
1.3 Batıp-Çıkma Hareketi Telafisi Yöntemleri .....	3
1.4 Tezin Amacı .....	4
1.5 Literatür Araştırması .....	6
<b>2. SİSTEM TASARIMI VE GELİŞTİRME</b> .....	<b>18</b>
2.1 Sistemin Geliştirilmesinde Dikkate Alınan Parametreler .....	19
2.1.1 Dalga durumu.....	19
2.1.2 Sistemin operasyonel çalışma açısı.....	19
2.2 Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Geometrik Modeli .....	20
2.3 Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı.....	22
2.3.1 Kontrol .....	22
2.3.2 Yazılım.....	22
<b>3. GANGWAY PROTOTİP ÜRETİM AŞAMALARI</b> .....	<b>24</b>
3.1 Denizcilik Analizleri .....	24
3.2 Yapısal Analiz.....	26
<b>4. KİNEMATİK MODELLEME</b> .....	<b>30</b>
4.1 İleri Kinematik Modeli.....	31
4.2 Ters Kinematik Modeli .....	32

<b>5. SİSTEM KONTROLÜ .....</b>	<b>36</b>
5.1 Sistem Hareket Analizi .....	39
5.2 DeneY Çalışmalarının Temel Aşamaları .....	43
<b>6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>49</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>52</b>



## KISALTMALAR

<b>AHC</b>	: Aktif Kabarma Telafisi(Active Heave Compansation)
<b>DNV</b>	: Det Norske Veritas
<b>DOF</b>	: Serbestlik Derecesi (Degrees of Freedom)
<b>DP</b>	: Dinamik Pozisyonlama (Dynamic Positioning)
<b>FPSO</b>	: Floating Production Storage and Offloading
<b>HIL</b>	: Donanım içinde döngü (Hardware in Loop)
<b>HOG</b>	: Hizmet Özel Gemisi
<b>HS</b>	: Significant wave height (Önemli dalga yüksekliği)
<b>PHC</b>	: Pasif Kabarma Telafisi(Passive Heave Compansation)
<b>PID</b>	: Oransal İntegral Türevsel Denetleyici Kontrol Döngüsü
<b>PLC</b>	: Programlanabilir Mantıksal Kontrolör(Programmable Logic Controller)
<b>RBF</b>	: Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function)
<b>SOV</b>	: Deniz Servis Operasyon Gemileri ( Service Operation Vessels)
<b>TAS</b>	: Türbin Erişim Sistemi (Turbine Access System)
<b>UDP</b>	: Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları (User Datagram Protocol)

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 1.1:</b> AHC ve PHC Karşılaştırması.....	4
<b>Çizelge 1.2:</b> Seri ve Paralel Manipülatör Karşılaştırması.....	6
<b>Çizelge 1.3:</b> Kontrolör Karşılaştırması.....	17
<b>Çizelge 2.1:</b> Deniz Durumları.....	19
<b>Çizelge 4.1:</b> Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi D-H Parametreleri	32
<b>Çizelge 4.2:</b> Hareket Platformunun Tasarım Parametreleri.....	35
<b>Çizelge 6.1:</b> Test Sonuçları.....	48

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: 2000-2025 Yılları Arasında Küresel Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Gelişimi 1	
Şekil 1.2: Açık Denizde Sektörel İş Güvenliği Risk Profili .....	2
Şekil 1.3: Manipülator Sistemlerinin Sınıflandırılması .....	5
Şekil 1.4: Kinematik Yapısına Göre Manipülator Sistemlerinin Sınıflandırılması .....	5
Şekil 1.5: Ters Dinamik Kontrolör Şeması.....	6
Şekil 1.6: Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi Şeması.....	7
Şekil 1.7: Paralel AHC Gangway Sistem Kontrolü Akış Şeması.....	7
Şekil 1.8: Paralel AHC Gangway Sistem Algoritma Tasarımı.....	8
Şekil 1.9: Stewart-Gangway Sistem Genel Yapısı .....	9
Şekil 1.10: Stewart-Gangway Kontrolör Mimarisi.....	9
Şekil 1.11: Duba Ve FPSO(Yüzer Üretim Depolama Ve Boşaltma Birimi) Yerleşimi .....	10
Şekil 1.12: Dalga Kondisyonu 1 İskele Hareket Davranışı .....	10
Şekil 1.13: Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi Yapısı.....	11
Şekil 1.14: Simülasyon Kompanzasyon Aktif Mod .....	11
Şekil 1.15: Döner Eklemin İleri Beslemeli Kompanzasyon Şeması .....	12
Şekil 1.16: TAS Uç Eftöründeki Dengeleme Tepkisi.....	13
Şekil 1.17: Açık/Yer Değıştirme İzleme Grafiğı .....	14
Şekil 1.18: Eklem Torku Bozulma Uyum Hata Grafiğı .....	14
Şekil 1.19: Stewart-Gangway Hibrit Sistemi .....	15
Şekil 1.20: Stewart-Gangway Kontrol Algoritması .....	16
Şekil 1.21: Stewart Platform Sistemi.....	16
Şekil 1.22: Kontrolör Blok Diyagramı .....	17
Şekil 2.1: Sistem Akış Diyagramı .....	18
Şekil 2.2: Operasyonel Çalışma Sınırları .....	20
Şekil 2.3: Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Geometrik Modeli	20

<b>Şekil 2.4:</b> Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı Diyagramı.....	22
<b>Şekil 3.1:</b> Geminin Dalgalarda İlerlemesinin Zaman İçindeki Gösterimi .....	24
<b>Şekil 3.2:</b> Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi Serbest Cisim Diyagramı.....	27
<b>Şekil 3.3:</b> Halat Reaksiyon Kuvveti.....	27
<b>Şekil 3.4:</b> 1 t Yükleme Altında Oluşan Yer Değişirme Sonuçları.....	28
<b>Şekil 3.5:</b> İç Kafes Gerilme Sonuçları .....	28
<b>Şekil 3.6:</b> Dış Kafes Gerilme Sonuçları.....	29
<b>Şekil 3.7:</b> Kule Yapısı Gerilme Sonuçları .....	29
<b>Şekil 4.1:</b> Matematiksel Model.....	30
<b>Şekil 4.2:</b> Kinematik Yönelim .....	30
<b>Şekil 4.3:</b> Denklem Doğrulama Simülasyon Yazılımı .....	35
<b>Şekil 5.1:</b> Sistem Kontrol Şeması .....	36
<b>Şekil 5.2:</b> Başlangıç İşlemleri Akış Şeması.....	37
<b>Şekil 5.3:</b> PCMM ile UDP Bağlantı İşlemleri Akış Şeması .....	37
<b>Şekil 5.4:</b> Çalışma Başlangıcı Akış Şeması.....	38
<b>Şekil 5.5:</b> Dalga Masası Akış Şeması.....	39
<b>Şekil 5.6:</b> Dalga Durumu -1 Hareketleri.....	40
<b>Şekil 5.7:</b> Dalga Durumu -2 Hareketleri.....	41
<b>Şekil 5.8:</b> Uç Konum Hedefi .....	42
<b>Şekil 5.9:</b> Sistem Doğrulama Düzeneği.....	43
<b>Şekil 5.10:</b> Sistem Test Düzeneği.....	44
<b>Şekil 6.1:</b> Dalga Durumu-1 Test Sonuçları .....	46
<b>Şekil 6.2:</b> Dalga Durumu-2 Test Sonuçları .....	47

## AÇIK DENİZ HAREKET Dengeleyici Transfer Sisteminin (AHC GANGWAY) Mekatronik Sistem Tasarımı

### ÖZET

Açık deniz endüstrisi; enerji üretimi, turizm, bilimsel araştırmalar, ulaşım ve lojistik gibi çeşitli alanlardaki faaliyetleri kapsayan geniş bir sektördür. Bu endüstrinin gelişimindeki temel güç ise, karasal kaynakların giderek azalması ve enerji ihtiyacının artmasıdır. Bu sebeple açık deniz endüstrisi son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Deniz dalgalanmaları, açık deniz operasyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Deniz üzerinde gerçekleştirilen bu operasyonlar, dalga boyu, belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga yönü gibi faktörlerden doğrudan etkilenir. Bu değişkenler; platformların, gemilerin ve diğer açık deniz yapılarının stabilitesini ve güvenliğini etkileyebilir, dolayısıyla operasyon verimliliğini ve çalışma koşullarını doğrudan etkiler.

Yapılan bu çalışma kapsamında, sert deniz koşullarında malzeme ve insan transferini güvenli, hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirebilecek bir platformun geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla, platformun 1/10 ölçekli bir modeli üzerinde çalışılarak, ileri ve ters kinematik denklemler kullanılarak dalgaların yarattığı hareketlere karşıt hareketler üreterek köprü ucunun sabit kalması hedeflenmiştir. Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin ileri ve ters kinematik denklemleri analitik yöntem ile hesaplanarak uç noktanın kesin denklemi üretilmiştir. C# ile yapılan simülasyon ve ANSYS ile yapılan simülasyonlarla ile simülasyon ortamında denklemlerin doğruluğu kanıtlanmıştır. Ayrıca açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin test edilmesi amacı ile 3 eksenli bir hareket platformu üretilerek, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin test düzeneği oluşturulmuştur. Tez kapsamında üretilen deney düzeneği kullanılarak, sistem testleri gerçekleştirilmiştir. Sistem testleri deniz durumu -1 ve deniz durumu -2'yi temsil eden roll (yalpa), pitch(baş-kıç vurma) ve heave (dalıp-çıkma) hareketleri tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde deniz durumu-1 ve deniz durumu-2 için açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin kompanzasyon sağladığı tespit edilmiştir. Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin çalışma alanını oluşturan servis gemileri, yük ve insan transferi gerçekleştirirken pozisyonunu korumaktadır. Bu koşullar altında gemide meydana gelen düşey ivme, testlerde köprünün uç noktasında ölçülen düşey ivmeye göre daha düşük mertebelerde olması beklenmektedir. Dolayısıyla deniz durumu-1 testlerinde köprü uç noktasında ölçülen  $4.49 \text{ m/s}^2$  ve deniz durumu-2 testlerinde köprü uç noktasında ölçülen  $8.92 \text{ m/s}^2$  hareket kaynaklı dinamik ivmeler altında sistemin kompanzasyon sağlaması; açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin operasyonu başarı ile gerçekleştirebileceğini göstermektedir.

Deniz durumu-1 ve deniz durumu-2 testleri 300 s boyunca gerçekleştirilmiştir. Test süresince ölçülen maksimum genliklerin harmonik olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir ve test sürelerinin yeterli olduğuna karar verilmiştir. Test süreleri boyunca deniz durumu-1 koşulları altında meydana gelen sapma büyüklüklerinin mekanik boşluk kaynaklı sapma bandının %100 oranında, deniz

durumu-2 koşulları altında meydana gelen sapma büyüklüklerinin ise mekanik boşluk kaynaklı sapma bandının %98,4 oranında altında kaldığı ölçülmüştür. Bu değerler açık deniz hareket dengeleyici sistemlerin operasyonu başarı ile gerçekleştirebileceğini göstermektedir. 1/10 ölçekli modelde meydana gelen mekanik boşluk kaynaklı sapsmalar, hareket platformuna deniz hareketlerinin aktarılmasını sağlayan mafsallar kaynaklı meydana gelmektedir. 1/1 ölçekli açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin gemiye yerleştirilmesi durumunda, bu sistem geminin mukavim açık güvertesine yerleştirilecektir ve deniz hareketleri direkt olarak sistemin kule yapısına etki edecektir. Böylelikle test düzeneğinde meydana gelen mekanik sapsmaların 1/1 ölçekli sistemde meydana gelmeyeceği öngörülmektedir.

Servis gemilerinde kullanılan açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin başarılı olarak operasyonlarını gerçekleştirmesiyle kaza vakalarının önlenmesi, işçi sağlığının korunması ve servis gemilerine güvenli teknik personel ve yük transferinin gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** *Aktif Dalga Telafisi, Açık Deniz Dalga Kompanzasyonu, Aktif Hareket Dengeleyici Sistem, Açık Deniz Endüstrisi*

# **MECHATRONIC SYSTEM DESIGN OF THE OFFSHORE ACTIVE HEAVE COMPENSATION TRANSFER SYSTEM (AHC GANGWAY)**

## **ABSTRACT**

The offshore industry is a wide sector covering activities in various fields such as energy production, tourism, scientific research, transportation and logistics. The main driving force behind the development of this industry is the diminishing availability of terrestrial resources and the increasing need for energy. For this reason, the offshore industry has gained great importance in recent years. Sea fluctuations have a significant impact on offshore operations. These offshore operations are directly affected by factors such as wave height, significant wave height, wave period and wave direction. These variables can affect the stability and safety of platforms, vessels and other offshore structures, thus directly affecting operational efficiency and working conditions.

This study focuses on the development of a platform that can safely, quickly and efficiently transfer materials and people in rough sea conditions. For this purpose, a 1/10 scale model of the platform was studied, and by using forward and inverse kinematic equations, it was aimed to keep the end of the bridge stationary by generating motions opposite to the motions created by the waves. The forward and inverse kinematic equations of the offshore motion compensating transfer system were calculated analytically and the exact equation of the endpoint was generated. The accuracy of the equations in the simulation environment was proved by simulation with C# and simulation with ANSYS. In addition, in order to test the offshore motion stabilizer transfer system, a 3-axis motion platform was produced and a test setup of the offshore motion stabilizer transfer system was created. System tests were carried out using the experimental setup produced within the scope of the thesis. System tests were performed by defining roll, pitch and heave motions representing sea state -1 and sea state -2. Within the framework of the results obtained, it has been determined that the offshore motion compensator transfer system provides compensation for sea state-1 and sea state-2. Service vessels, which constitute the working area of the offshore motion compensator transfer system, maintain their position while transferring cargo and people. Under these conditions, the vertical acceleration occurring on the ship is expected to be lower than the vertical acceleration measured at the end point of the bridge in the tests. Therefore, the fact that the system provides compensation under the motion-induced dynamic accelerations of 4.49 m/s<sup>2</sup> measured at the bridge endpoint in sea state-1 tests and 8.92 m/s<sup>2</sup> measured at the bridge endpoint in sea state-2 tests indicates that the offshore motion compensator transfer system can successfully perform the operation.

Sea state-1 and sea state-2 tests were performed for 300 s. It was observed that the maximum amplitudes measured during the tests were realized harmonically and it was decided that the test durations were sufficient. During the test periods, it was measured that the deflection magnitudes occurring under sea state-1 conditions were 100% below the mechanical gap-induced deflection band and the deflection magnitudes occurring under sea state-2 conditions were 98.4% below the mechanical gap-induced deflection band. These values show that offshore motion stabilizer systems can successfully perform the operation. The mechanical backlash-induced deflections occurring in the 1/10 scale model are caused by the joints that transfer the sea motions to the motion platform. If the 1/1 scale offshore motion stabilizer transfer system is placed on the ship, this system will be placed on the resistant open deck of the ship and the sea motions will directly affect the tower structure of

the system. Thus, it is foreseen that the mechanical deviations occurring in the test rig will not occur in the 1/1 scale system.

The successful operation of the offshore motion compensating transfer system used in service vessels ensures the prevention of accidents, protection of worker health and safe transfer of technical personnel and cargo to service vessels.

Keywords: *Active Wave Compensation, Offshore Wave Compensation, Active Motion Compensation System, Offshore Industry, Gangway*



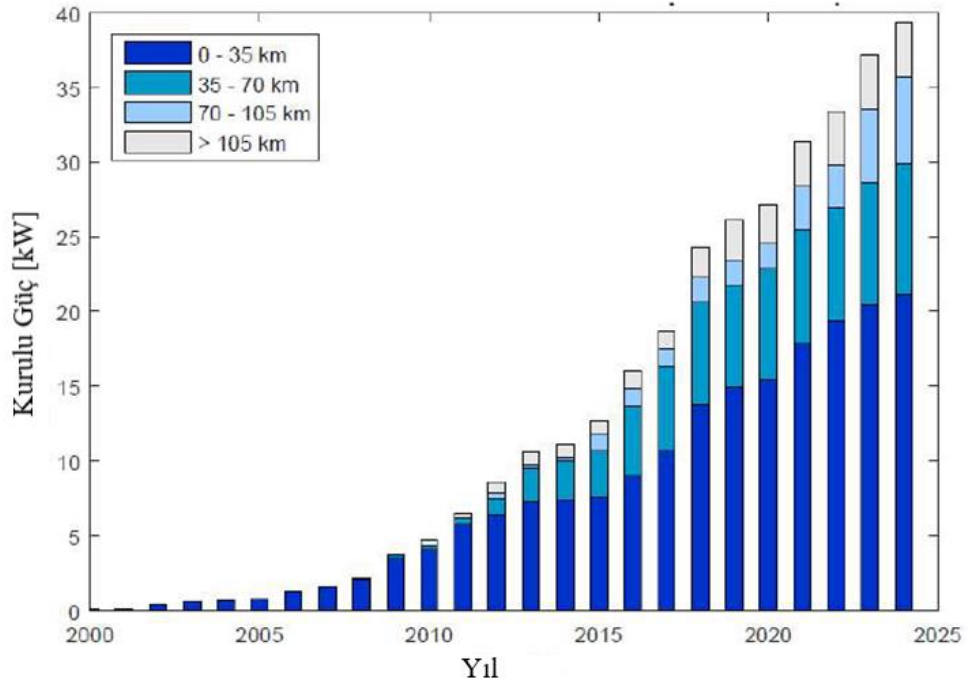
# 1. GİRİŞ

## 1.1 Açık Deniz Endüstrisi

Açık deniz endüstrisi, enerji üretimi, turizm, bilimsel araştırmalar, ulaşım ve lojistik gibi çeşitli alanlardaki faaliyetleri kapsayan geniş bir sektördür. Bu endüstrinin gelişimindeki temel güç ise, karasal kaynakların giderek azalması ve enerji ihtiyacının artmasıdır. Bu sebeple açık deniz endüstrisi son yıllarda büyük önem kazanmıştır.

Avrupa'daki açık deniz rüzgar enerjisi projeleri, 2000 ile 2010 yılları arasında kıydan en fazla 35 kilometre uzaklıkta kurulmuşken, 2020 yılı itibarıyla bu mesafe 70 kilometreye ulaşmıştır. Beklentiler, 2025 yılına kadar bu mesafenin 105 kilometreyi aşması yönündedir. Bu genişleme, açık deniz rüzgar enerjisi projelerinin planlama ve yatırım süreçlerinin hız kazandığını göstermektedir.

Bu çerçevede, son yirmi yılda açık deniz rüzgar türbinleri ve ilgili teknolojilerde önemli bir gelişme kaydedilmiştir.



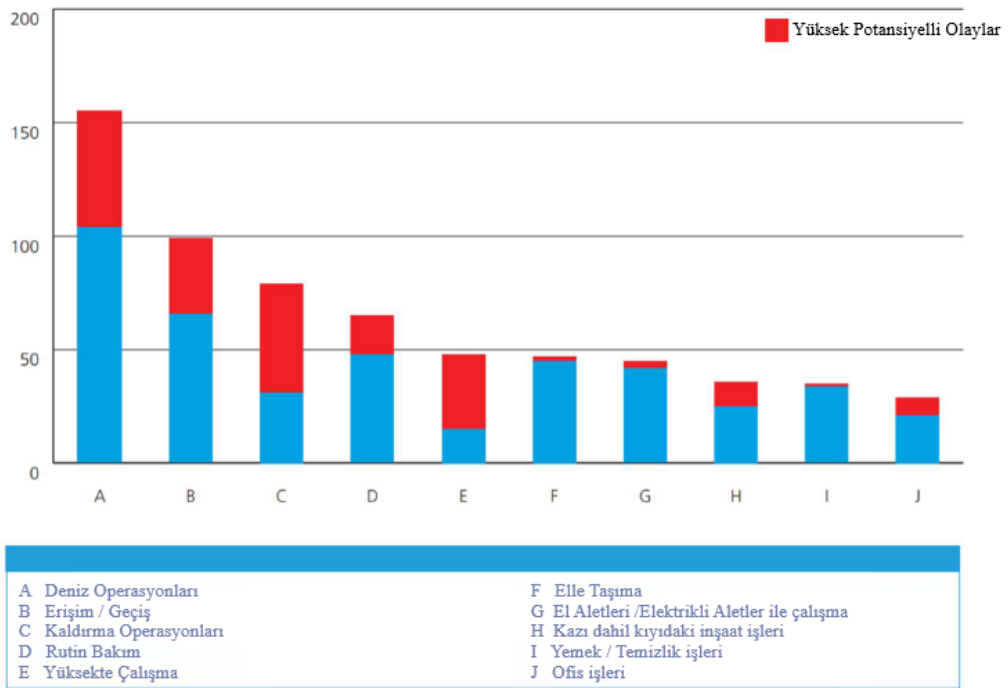
**Şekil 1.1:** 2000-2025 Yılları Arasında Küresel Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Gelişimi

**Kaynak:** (Twigt, 2020)

## 1.2 Deniz Dalgalanmalarının Açık Deniz Operasyonlarına Etkisi

Deniz dalgalanmaları, açık deniz operasyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Deniz üzerinde gerçekleştirilen bu operasyonlar, dalga boyu, belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga yönü gibi faktörlerden doğrudan etkilenir. Bu değişkenler; platformların, gemilerin ve diğer açık deniz yapılarının stabilitesini ve güvenliğini etkileyebilir, dolayısıyla operasyon verimliliğini ve çalışma koşullarını doğrudan etkiler.

Özellikle, gemi ile rüzgar türbinleri arasındaki transferler sırasında personelin suya düşmesi gibi vakalar, deniz dalgalanmalarının açık deniz güvenliği üzerindeki etkisinin somut örneklerinden biridir. Global Offshore Rüzgar Sağlığı ve Güvenliği Örgütü'nün 2018 yılına ait raporunda, bu tür vakalarla ilgili toplam 854 kayıt tespit edilmiştir.



**Şekil 1.2:** Açık Denizde Sektörel İş Güvenliği Risk Profili

**Kaynak:** (Twigt, 2020)

Deniz dalgalanmaları içerisinde, heave(batıp-çıkma) hareketi, yani yukarı-aşağı hareket, özellikle zorlu deniz koşullarında açık deniz operasyonlarının güvenliğini ve istikrarını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Diğer hareketler olan roll(yalpa),pitch(baş kış vurma), yaw (savrulma) surge(boyuna ötelenme), sway(enine ötelenme) gibi deniz hareketleri, dinamik konumlandırma sistemleri,

yalpa finleri gibi teknolojik çözümlerle etkin bir şekilde kontrol altına alınabilmektedir. Ancak, heave hareketinin telafisi, su yüzeyinin dalgalanma frekansına ve dalga yüksekliğine doğrudan bağlı olduğundan, daha karmaşık ve zorlayıcıdır. Bu bağlamda, heave kompanzasyonunun, deniz dalgalanmalarının açık deniz yapıları üzerindeki etkisini azaltmada kritik bir rol oynadığı ve açık deniz operasyonlarının güvenliği için hayati önem taşıdığı görülmektedir.

Bu tür açık deniz operasyonlarının güvenliğini ve verimliliğini artırmak için "Batıp-Çıkma Hareketi Telafisi Yöntemleri" kritik öneme sahiptir.

### **1.3 Batıp-Çıkma Hareketi Telafisi Yöntemleri**

Batıp-Çıkma Hareketi Telafi Yöntemleri, deniz dalgalanmalarının neden olduğu batıp-çıkma hareketleri etkin bir şekilde azaltmak veya ortadan kaldırmak için tasarlanmış sistemlerdir. Bu sistemler, özellikle açık deniz yapılarının ve gemilerin dalgalara karşı daha dirençli hale getirilmesi, operasyon sürekliliğinin sağlanması ve çalışanların güvenliğinin artırılması amacıyla geliştirilmiştir.

Bu nedenle, dalga etkilerini azaltmak ve açık deniz yapılarının işlevselliğini korumak için çeşitli dalga telafisi yöntemleri geliştirilmiştir. Açık deniz hareket dengeleyici transfer sistemlerinde kullanılan dalga telafisi yöntemleri Aktif Dalga Telafisi (AHC) ve Pasif Dalga Telafisi (PHC) olmak üzere iki ana kategoride incelenebilmektedir.

#### **AHC Sistemleri**

Aktif Dalga Telafisi (AHC), deniz dalgalanmalarının neden olduğu hareketleri algılayan ve bu hareketlere karşıt bir hareket üreterek telafi eden dinamik bir sistemdir. AHC sistemleri, hareket referans üniteleri (MRU), sensörler ve kontrol sistemlerinden oluşur. Bu bileşenler, açık deniz hareket dengeleyici transferinin ve bağlı olduğu geminin mevcut pozisyonunu ve hareketlerini sürekli olarak izler. Kontrol sistemi, elde edilen verileri kullanarak, hidrolik aktüatörler veya elektrik motorları gibi aktif bileşenleri uygun şekilde harekete geçirir. Bu sayede, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin ucunun hedeflenen açık deniz yapısına veya gemiye sabit bir mesafede kalması sağlanır, böylece yüksek dalga durumlarında bile transfer işlemleri güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilir.

## PHC Sistemleri

Pasif Dalga Telafisi (PHC), aktif sistemlerin aksine, dışarıdan bir enerji kaynağı ihtiyacı gerektirmeyen bir yöntemdir. PHC sistemleri, dalga hareketlerinin enerjisini mekanik olarak sönümleyen ve dağıtan yapısal elemanlar kullanır. Bu sistemler, mekanik bileşenlerin (örneğin, hidrolik silindirler, yaylar ve sönümleyiciler) doğal sönümleme özelliklerini kullanarak dalga hareketlerini pasif olarak telafi eder. Ancak, PHC sistemlerinin kullanımı bazı sınırlılıklara sahiptir. Yüksek dalga durumlarında (hs 3.5 m+) ve hızlı değişen deniz koşullarında, PHC sistemlerinin dalga hareketlerine tepki verme hızı ve etkinliği sınırlıdır.

AHC ve PHC sistemlerinin karşılaştırılması Çizelge 1.1 'de sunulmuştur.

**Çizelge 1.1: AHC ve PHC Karşılaştırması**

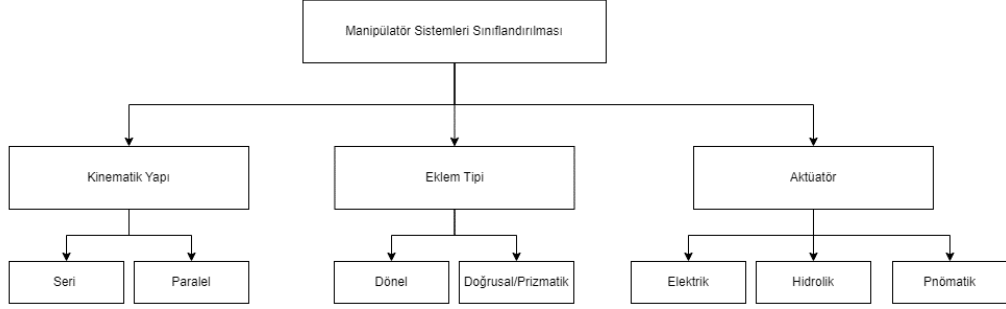
Özellik	Pasif Dalga Telafisi (PHC)	Aktif Dalga Telafisi (AHC)
Maliyet	Düşük	Yüksek
Tepki Süresi	Orta - Yüksek	Düşük
Doğruluk	Orta	Yüksek
Enerji Gereksinimi	Yok	Var
Sistem Karmaşıklığı	Düşük	Yüksek
Bakım Gereksinimleri	Düşük	Orta - Yüksek
Operasyonel Esneklik	Sınırlı	Geniş
Yük Kapasitesi	Yüksek	Çok Yüksek
Uygulanabilirlik	hs<1.5 m	hs<4.0 m

## 1.4 Tezin Amacı

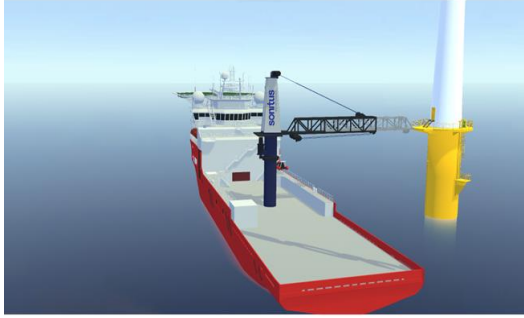
Bu tez kapsamında, sert deniz koşullarında malzeme ve insan transferini güvenli, hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirebilecek bir platformun geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla, platformun 1/10 ölçekli bir modeli üzerinde çalışılarak, ileri ve ters kinematik denklemler kullanılarak dalgaların yarattığı hareketlere karşı hareketler üreterek köprü ucunun sabit kalması hedeflenmektedir. 1/10 ölçeklendirme işlemi, denizcilik sektöründe kavitasyon testleri ve gemi direnç testleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan Buckingham Pi teoremi ile gerçekleştirilmiştir. Bu model, denizdeki dalgalanma ve hareketlerin köprü ucuna etkisini minimize ederek, transfer işlemlerinin daha güvenli ve verimli hale gelmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, özellikle zorlu deniz ortamlarında operasyon verimliliğini ve güvenliğini artırmak için önemli bir adımı temsil etmektedir.

Genelde bu sistemler seri veya paralel yapıda tasarlanmaktadır.

Manipülator sistemleri; kinematik yapısı, eklem tipi ve aktüatör tipine göre üç başlık altında incelenmektedir. Şekil 1.3'de manipülator sistemlerinin genel sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.3: Manipülator Sistemlerinin Sınıflandırılması



(a)



(b)

(a) Seri Sistem (b) Paralel Sistem

**Kaynak:** (b) Liang vd., (2020)

Şekil 1.4: Kinematik Yapısına Göre Manipülator Sistemlerinin Sınıflandırılması

Paralel sistem ile yapılan yapılar daha çok alanda kullanılabilmektedir.

Ancak seri manipülator, paralel manipülatöre göre daha esnek olduğundan bu çalışmada seri manipülator üzerinden devam edilmiştir. Bu çalışma neticesinde açık deniz transfer sistemlerinin kullanımı teorik olarak incelenmiştir. Ancak yapılan çalışmaların pratiğe aktarılması hususunda eksiklikler gözlemlenmiş olup, bu konuda organizasyonun sağlanması ve araştırmaların artırılması gerekmektedir.

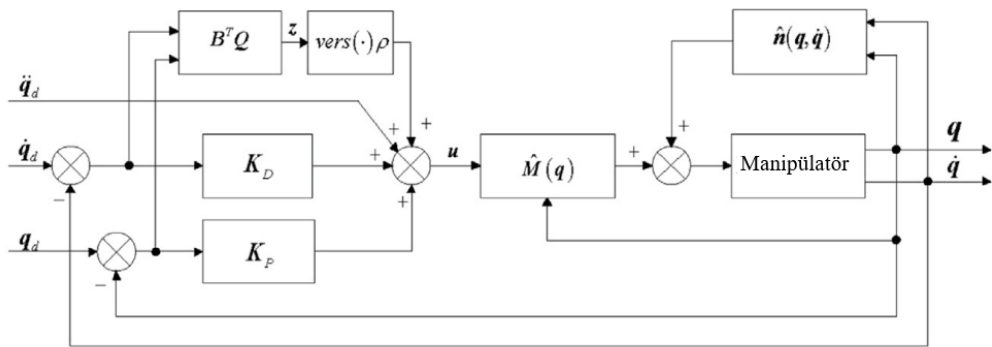
Seri ve paralel manipülatör için karşılaştırma tablosu Çizelge 1.2'deki gibidir.

**Çizelge 1.2:** Seri ve Paralel Manipülatör Karşılaştırması

Özellik	Seri Manipülatör	Paralel Manipülatör
<b>Tanım</b>	Birbirine ardışık bağlı segmentlerden oluşur.	Taban ile hareketli platform arasında birden fazla bağlantıya sahiptir.
<b>Fiziksel Kısıtlar</b>	Düşük	Yüksek
<b>Hareket Kabiliyeti</b>	Yüksek	Düşük
<b>Çalışma Alanı</b>	Geniş	Düşük
<b>Taşıma Kapasitesi</b>	Düşük	Yüksek
<b>Stabilite</b>	Yüksek	Yüksek
<b>Bakım ve Onarım Kolaylığı</b>	Yüksek	Düşük
<b>Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi Kullanımı</b>	Uzun mesafeli ve esnek konumlandırma gerektiren durumlar için uygun.	Daha kısa mesafelerde, yüksek yük taşıma ve stabilizasyon gerektiren durumlar için uygun.

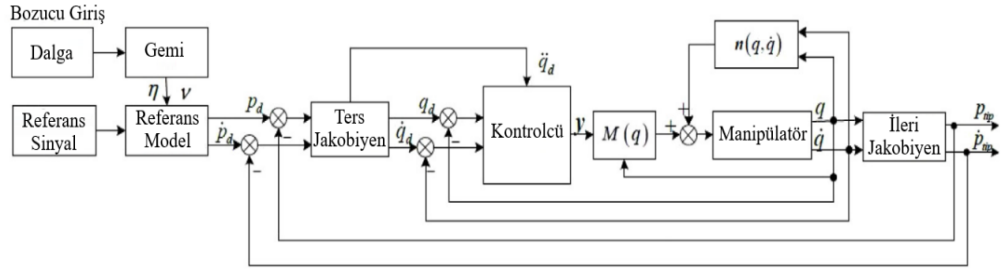
### 1.5 Literatür Araştırması

Liang Lihua ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen, deniz operasyonları sırasında personel transferini iyileştirmek amacıyla aktif hareket kompanzasyonlu bir açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin modellemesini ve Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da gösterilen kontrolör tasarımı ele alınmıştır. Çalışmada, seri manipülatör prototipinin kinematığı ve dinamiği, Euler-Lagrange denklemi kullanılarak incelenmiş ve geleneksel PD kontrolörlerine kıyasla iyileştirilmiş bir dinamik kontrolör önerilmiştir. Simülasyonlar aracılığıyla yapılan testler, önerilen kontrolörün performansının iyi olduğunu ve kararlı durum hatalarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu geliştirilmiş dinamik kontrolörün, pratik uygulamalarda arzu edilen sonuçların sağlanmasına katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır [2].



**Şekil 1.5:** Ters Dinamik Kontrolör Şeması

**Kaynak:** (Liang vd., 2020)

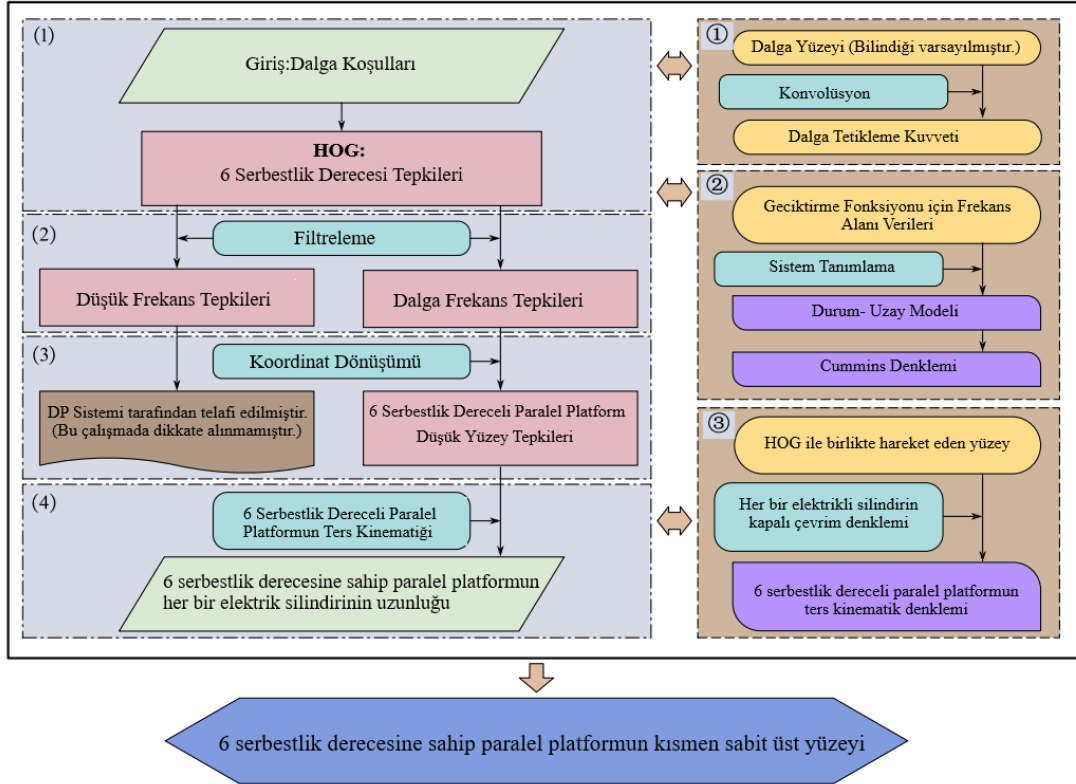


**Şekil 1.6:** Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi Şeması

**Kaynak:** (Liang vd., 2020)

Yin et al. ve diğerleri(2022) tarafından gerçekleştirilen Deniz Servis Operasyon Gemileri (SOV) için geliştirilen bir aktif hareket dengeleyici platformun detaylı bir incelemesini sunmaktadır. Çalışma, SOV ve entegre edilmiş aktif hareket dengeleyici platform arasındaki dinamik etkileşimi modelleyerek, bu sistemlerin kontrol stratejilerini geliştirmeye odaklanır. Özellikle, geminin dalgalanma, savrulma ve yalpa gibi hareketlerini azaltmak için Dinamik Konumlandırma (DP) sistemleri ile entegre çalışan bir aktif platformun kullanımı ele alınmıştır[3].

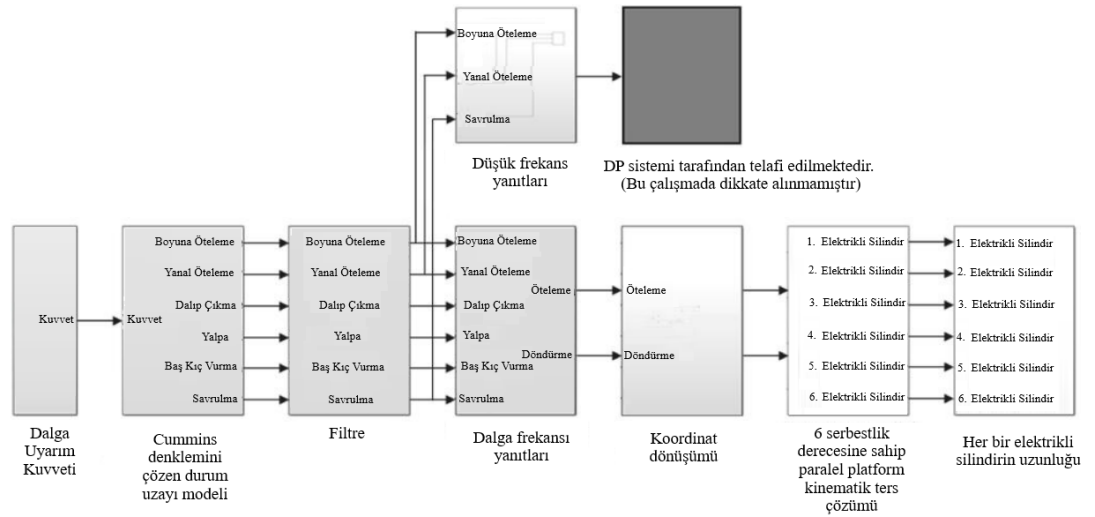
Bu sisteme ait kontrol akış şeması Şekil 1.7’de yer almaktadır.



**Şekil 1.7:** Paralel AHC Gangway Sistem Kontrolü Akış Şeması

**Kaynak:** (Yin vd., 2022)

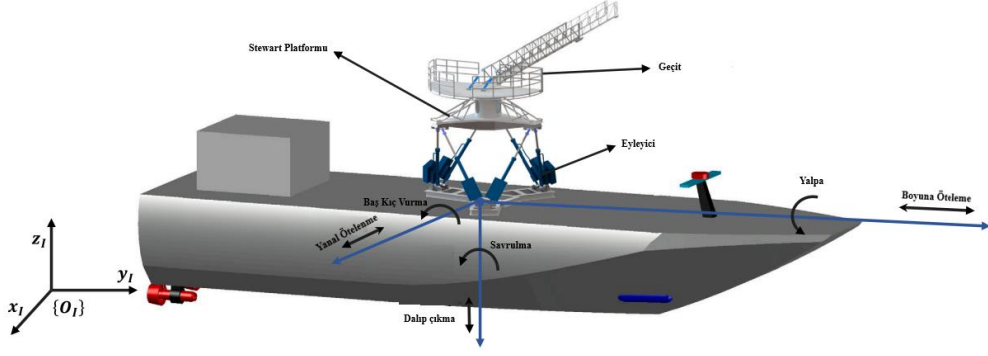
Ayrıca dinamik kontrolör, HOG ve altı serbestlik derecesine (6-DOF) sahip paralel platformun etkileşimini göz önünde bulundurarak gerçek zamanlı hesaplama verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yüksek verimlilik gereksinimini karşılamak için, Cummins denkleminin 6-DOF yanıtlarını elde etmek üzere durum-uzay modeli kullanılır. Sistem tanımlama ile elde edilen transfer fonksiyonunun doğruluğu Bode diyagramı ile doğrulanır ve durum-uzay modeli ile dördüncü dereceden Runge-Kutta yönteminin zaman alanı yanıtları karşılaştırılarak ispatlanır. Bu çalışma; HOG için geliştirilen dinamik paralel aktif hareket dengeleyici platformun, deniz koşullarında Şekil 1.8’de yer alan algoritma tasarımı yardımıyla operasyonel performansı önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir[3].



**Şekil 1.8:** Paralel AHC Gangway Sistem Algoritma Tasarımı

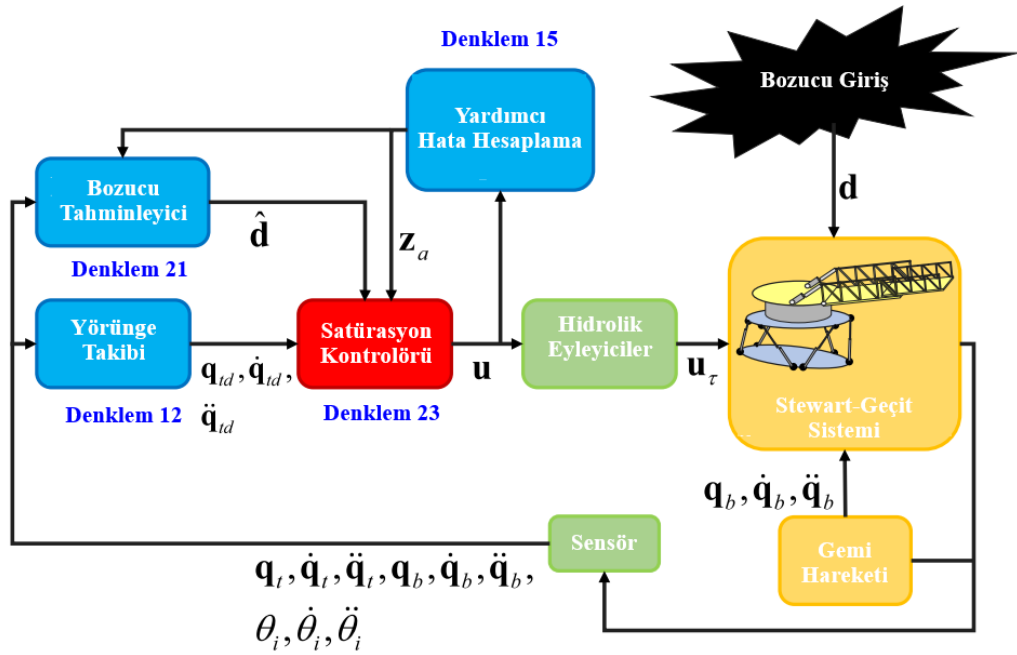
**Kaynak:** (Yin vd., 2022)

Rongji. Yin. ve diğerleri (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dış etkenler ve zamanla değişen giriş gecikmeleri gibi zorluklara karşı etkili bir şekilde çalışacak Şekil 1.9’da gösterildiği gibi aktif bir hexapod platformu için Şekil 1.10’da yeni bir kontrolör geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Kane yöntemiyle Stewart-Gangway sistem analizleri yaparak, sınırlar içinde kalan aktüasyon komutları veren ve hata oranlarını azaltan bir kontrol sistemi tasarlamışlardır. Simülasyonlar ile yaptıkları çalışmalarda, bu kontrolörün zorlu deniz koşullarında bile yüksek stabilite ve doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir [4].



**Şekil 1.9:** Stewart-Gangway Sistem Genel Yapısı

**Kaynak:** (Yin vd., 2022)

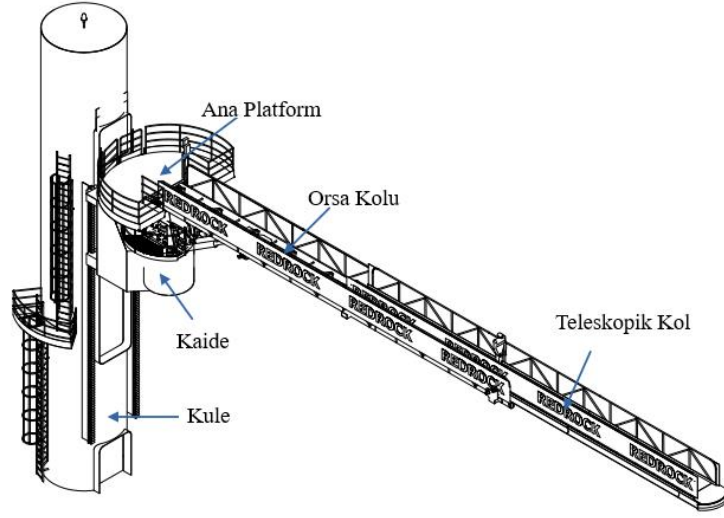


**Şekil 1.10:** Stewart-Gangway Kontrolör Mimarisi

**Kaynak:** (Liv vd., 2021)

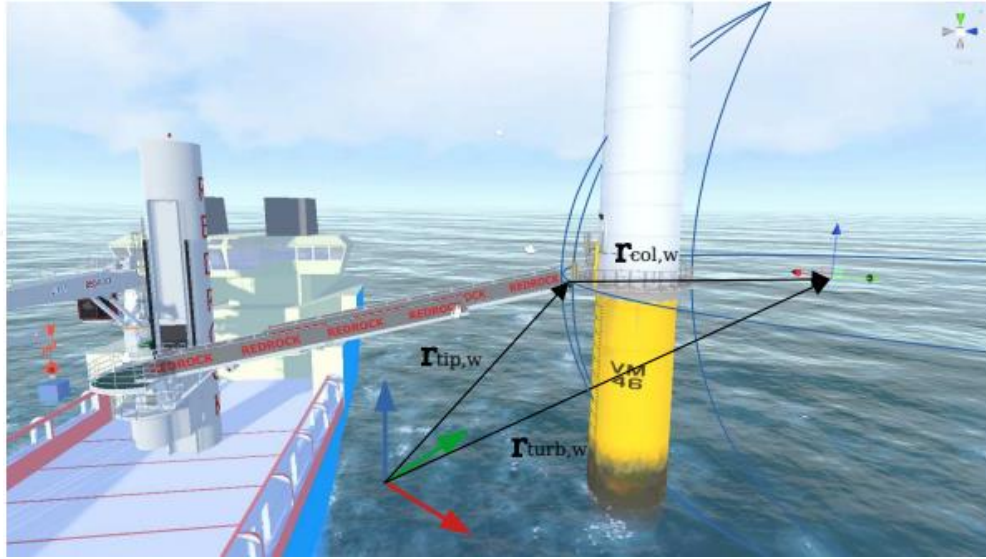
Binbin Li ve diğerleri (2021), tarafından gerçekleştirilen, Şekil 1.11’de gösterilen açık deniz operasyonları sırasında teleskopik açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin hareketlerinin zaman alanında incelenmesine odaklanmışlardır. Çalışma, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin teleskopik, orsa ve dönme gibi hareketleri zaman alanında incelenmiş ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Çoklu cisim sisteminin hidrodinamik etkileşimi, frekans alanında 3D saçılma ve ışınım hesaplaması ile analiz edilmiş ve doğrusal olmayan yuvarlanma sönümlemesi hem serbest bozulma hem de düzenli dalgalar üzerinde kalibre edilip doğrulanmıştır. Sonuçlar, önemli dalgaların yanı sıra birincil ve ikincil düzensiz dalgaları içeren senaryolar altında değerlendirilmiştir. Açık deniz





**Şekil 1.13:** Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi Yapısı

**Kaynak:** (Sangvik, 2021)

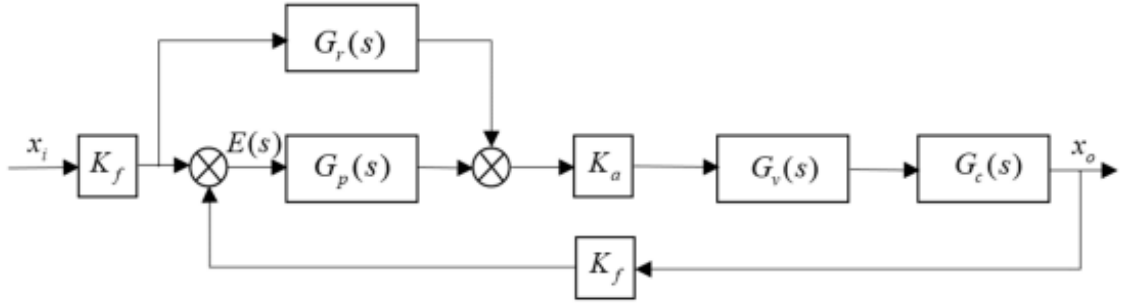


**Şekil 1.14:** Simülasyon Kompanzasyon Aktif Mod

**Kaynak:** (Sangvik, 2021)

Jingfu Wang ve diğerleri(2023) tarafından gerçekleştirilen, Fujian kıyı bölgesi için tasarlanmış aktif hareket kompanzasyonuna sahip yeni bir 3-DOFs TAS(Turbine Access System) tanıtmaktadır. Bu sistem, 2.2 m'ye kadar önemli dalga yüksekliklerinde TAS'ın ucundaki stabiliteyi sağlamak için yapısal tasarım, kinematik analiz, hidrolik tahrik tasarımı ve kontrol sistemi tasarımı içermektedir. Özellikle, sistemdeki hareketleri önceden tahmin ederek uygun düzeltmeleri

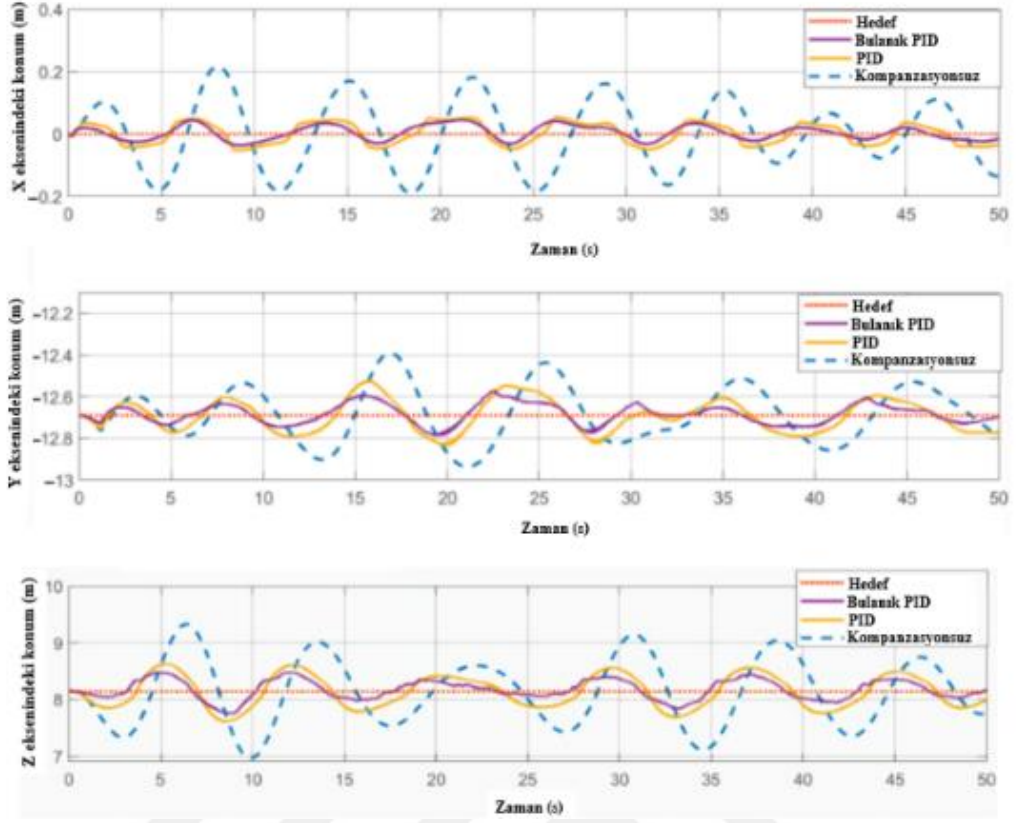
gerçekleştirmek için Bulanık Mantık PID kontrolörüne dayalı besleme öncesi kompanzasyon stratejisi kullanılmıştır[7].



**Şekil 1.15:** Döner Eklemin İleri Beslemeli Kompanzasyon Şeması

**Kaynak:** (Wang vd., 2023)

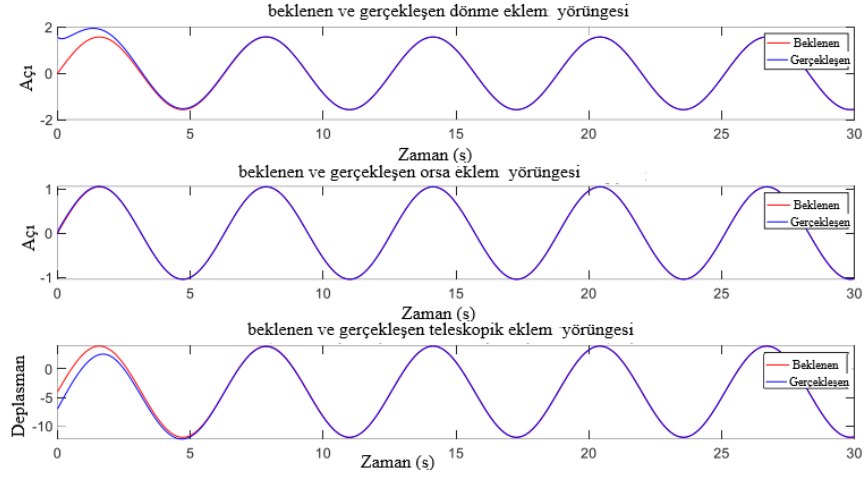
Şekil 1.15’de yer alan şema, besleme öncesi kompanzasyonun bir örneğini sergiler  $x_i$  istenen girişi,  $K_f$  besleme öncesi kazancını,  $E(s)$  hata sinyalini,  $G_r(s)$  besleme öncesi transfer fonksiyonunu,  $G_p(s)$  proses (sistem) transfer fonksiyonunu  $K_a$  ayarlayıcı kazancını,  $G_c(s)$  kontrolör transfer fonksiyonunu ve  $x_o$  çıkışı temsil eder. Bu düzenleme, istenen girişin sistem çıkışına nasıl yansıtılacağını optimize ederek performansı iyileştirmeyi amaçlar. Giriş, istenen değerden sapmayı azaltacak şekilde ayarlanır ve kontrolör ile düzeltme sinyalleri üretilir. Bu sinyaller, sistemin istenen çıkışa ulaşmasını sağlamak için prosese uygulanır. MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyon deneyleri, bu yaklaşımın yuvarlanma, eğim ve dalga yüksekliğindeki hareketleri önemli ölçüde azalttığını göstermiş(Şekil 1.16), böylece sistemin etkinliğini doğrulamıştır.



**Şekil 1.16:** TAS Uç Efektöründeki Dengeleme Tepkisi

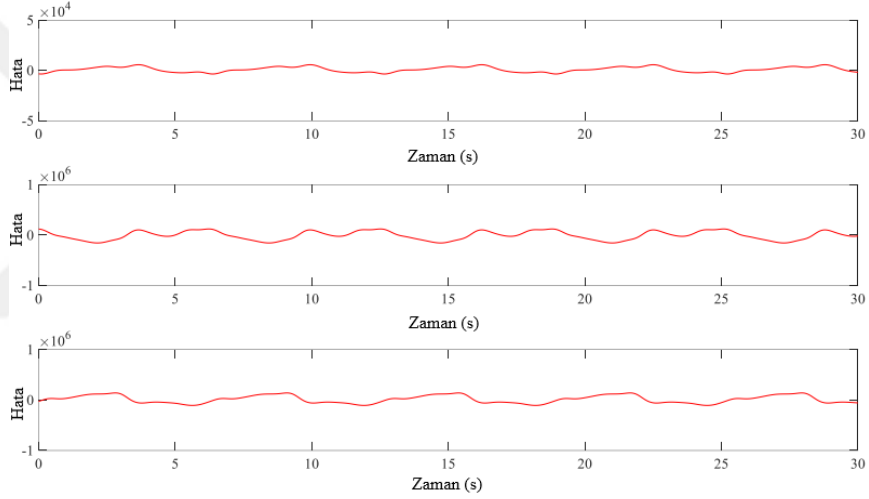
**Kaynak:** (Wen vd., 2017)

Henong Zhang ve diğerleri (2023) tarafından gerçekleştirilen, açık deniz hareket dengeleyici transfer sistemlerinin kontrol doğruluğunu geliştirmeyi hedeflemiştir. Dalga kaynaklı eklem tork bozulmalarını telafi etmek amacıyla, RBF (Radial Basis Function) sinir ağını kullanan bir kontrol algoritması geliştirmişlerdir. Bu sinir ağı, dalga bozulmaları ve model belirsizlikleri nedeniyle oluşan belirsizlikleri etkin bir şekilde modelleyip uyum sağlamıştır. Ayrıca, RBF sinir ağının temel işlev parametreleri, bir serçe arama algoritmasının iyileştirilmiş versiyonu kullanılarak optimize edilmiş ve bu sayede sinir ağının uyum doğruluğunu artırmışlardır (Şekil 1.17, Şekil 1.18). Bu iyileştirmelerle, açık deniz hareket dengeleyici transfer sistemi dalgalara karşı daha dirençli hale gelmiş ve böylece deniz üstü operasyonlarda daha yüksek kontrol performansına ulaşmışlardır [8].



**Şekil 1.17:** Açıl/Yer Değişirme İzleme Grafiği

**Kaynak:** (Wen vd., 2017)



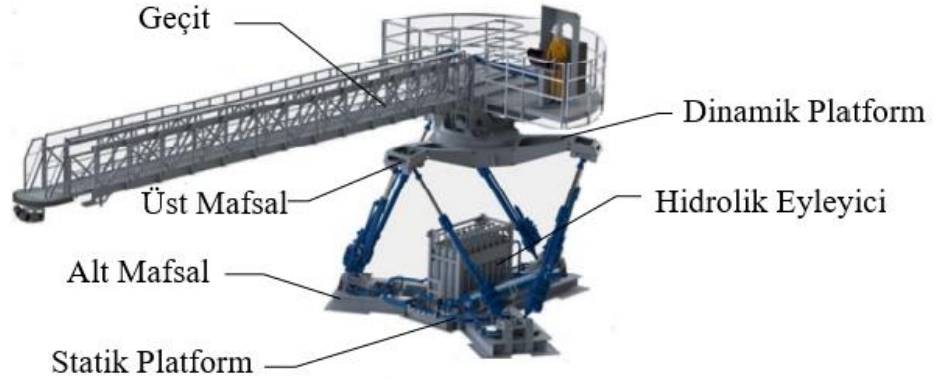
**Şekil 1.18:** Eklem Torku Bozulma Uyum Hata Grafiği

**Kaynak:** (Wen vd., 2017)

Guoxing Wen ve diğerleri (2017) tarafından gerçekleştirilen, bir konaklama gemisinin Yüzen Üretim, Depolama ve Boşaltma (FPSO) birimi gibi başka bir hareketli geminin hareketlerine dayanarak kompanzasyon sağlamasına olanak tanıyan bir kontrol stratejisi ele almıştır. Adaptif geri adım yöntemi, doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılan bir tekniktir ve sistem dinamiklerinin katmanlı bir şekilde incelenmesi ve kontrol kuvvetlerinin her adımda uyumlu bir şekilde entegre edilmesi esasına dayanır. Çalışmada uygulanan adaptif geri adım kontrolü, konaklama gemisinin ve FPSO'nun hareketlerinden kaynaklanan etkileri dikkate alarak, iki gemi arasındaki mesafeyi etkin bir şekilde kontrol etme amacı gütmüştür. Sınır ağları bu kontrol stratejisinde, gemi ve FPSO'nun karmaşık

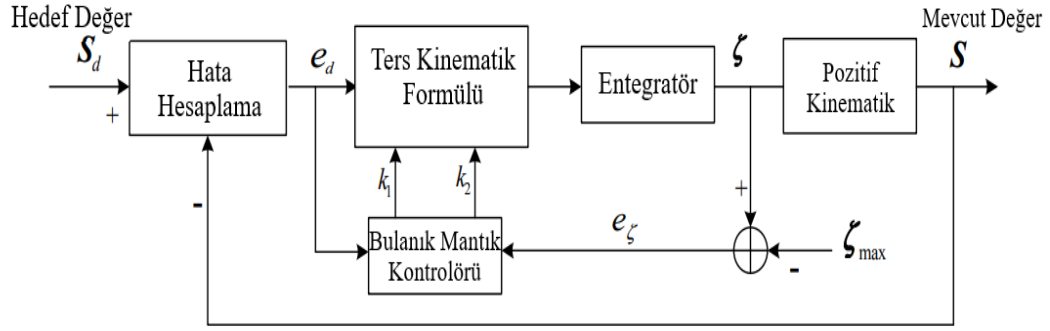
dinamiklerini modellemek ve adaptif bir şekilde kompanse etmek için kullanılmış ve yüksek düzeyde kompanzasyon sağlanmıştır [9] .

(Wei et al., 2019) tarafından gerçekleştirilen, rüzgar türbini platformlarına personel taşıma işlemleri için kullanılan hibrit erişim köprülerinin dalga etkilerine karşı kompanzasyon yeteneklerinin artırılması amaçlanmıştır. Bu sistem, 6 serbestlik derecesine sahip Stewart platformu ve 3 serbestlik derecesine sahip bir açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminde oluşan bir kombinasyonu içermektedir(Şekil 1.19). Bulanık mantık algoritmasının tercih edilmesinin temel nedeni, sistem dinamiklerindeki ve dış etkenlerdeki belirsizliklere adaptif bir yanıt sağlayarak, dalga hareketlerinden kaynaklanan bozulmaları etkin bir şekilde kompanse edebilme kapasitesidir. Önerilen kontrol stratejisi(Şekil 1.20), sistem kinematığı ve dinamikleri üzerine derinlemesine bir anlayış geliştirmek için ters kinematik çözümleri kullanmaktadır. Çalışma, bulanık mantık tabanlı kontrolörün, erişim köprüsünün dalga etkilerine karşı stabilitesini önemli ölçüde iyileştirebileceğini ve böylece deniz üstünde daha güvenli personel transfer operasyonlarını mümkün kılacağını ortaya koymaktadır [10].



**Şekil 1.19:** Stewart-Gangway Hibrit Sistemi

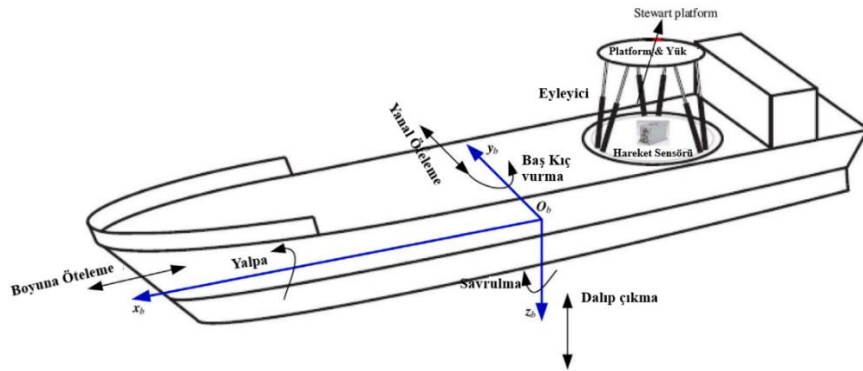
**Kaynak:** (Wei, vd., 2019)



**Şekil 1.20:** Stewart-Gangway Kontrol Algoritması

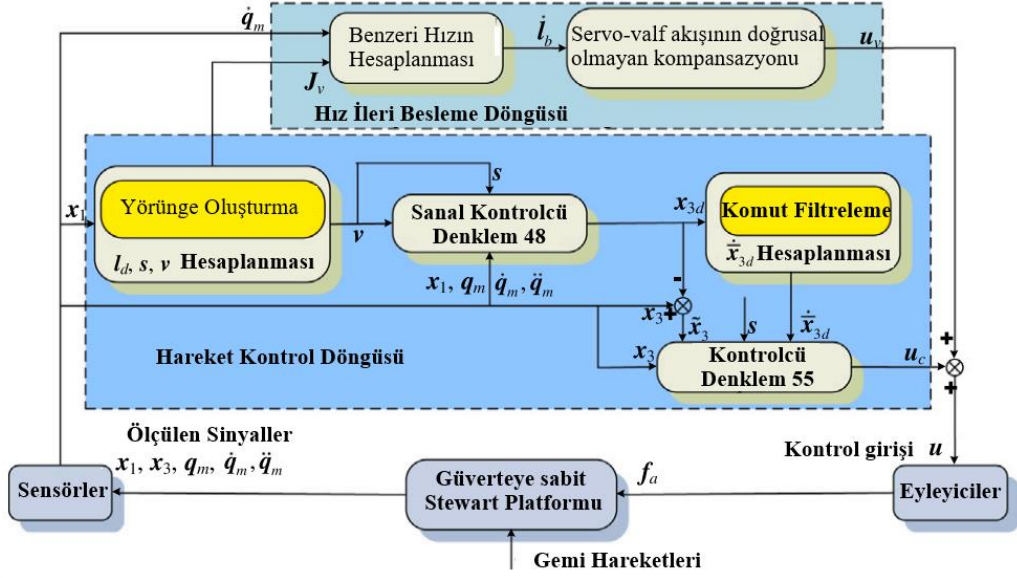
**Kaynak:** (Wei, vd., 2019)

Cai Yunfei ve diğerleri (2021) tarafından gerçekleştirilen, gemiye monte Stewart platformlarının(Şekil 1.21) dinamik modellemesi için Kane yöntemi kullanılarak, gemi hareketlerinin üst platform üzerindeki etkileri dikkate alınarak bir dinamik model oluşturmuşlardır. Aktüatör hızları, eylemsizlik referans çerçevesine göre ifade edilen hız vektörleri üzerinden belirlenmiş ve bu modellemeye dayanarak, sistem performansını iyileştirmek için yenilikçi bir hız besleme öncesi dengeleyici önermişlerdir. Ardından, gemi hareketlerinden kaynaklanan bozulmaları etkin bir şekilde ele almak için komut filtrelemeli bir kayan kipli geri adımlama kontrolörü geliştirmişlerdir. Kontrol hatalarının sınırlı olduğunu gösteren Lyapunov tabanlı bir analizle birlikte, önerilen kontrolörün(Şekil 1.22) kararlılığı ve etkinliği, titiz teorik analizler ve simülasyonlarla kanıtlamışlardır[11].



**Şekil 1.21:** Stewart Platform Sistemi

**Kaynak:** (Cai vd., 2021)



**Şekil 1.22:** Kontrolör Blok Diyagramı

Kaynak: (Cai vd., 2021)

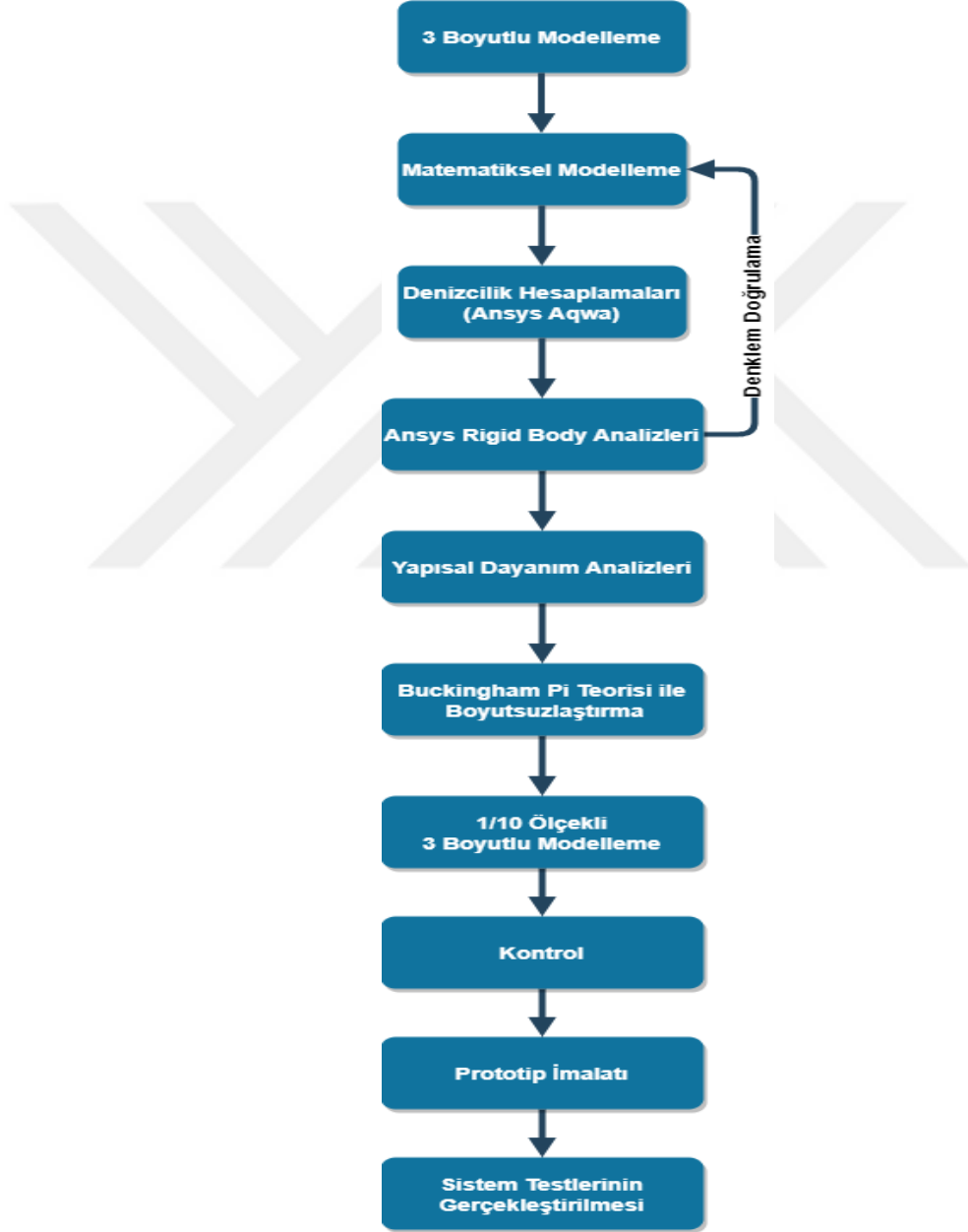
Literatür taraması kapsamında incelenen farklı kontrolör çözümlerin karşılaştırılması Çizelge 1.3'de yer almaktadır.

**Çizelge 1.3:** Kontrolör Karşılaştırması

Referans No	Uygulama	Sistem Tipi	Hedef	Mevcut Yöntem	Önerilen Yöntem	Sonuç
2	Erişim Köprüsü	Seri Sistem	Kompanzasyon hızını ve doğruluğunu arttırmak	PD	PID	Z Konumunda PID kontrolörün daha iyi kompanze yaptığı tespit edilmiştir.
3	Erişim Köprüsü	Paralel Sistem	Kompanzasyon hızını ve doğruluğunu arttırmak	Runge-Kutta	Durum-Uzay	0.01 ile 0.001 zaman adımlarında yapılan testlerden elde edilen sonuçlar neticesinde, Durum-Uzay methodunun Runge-Kutta Methoduna göre 6.5 ile 65 kat arasında daha hızlı sonuç verdiği tespit edilmiştir.
7	Erişim Köprüsü	Seri Sistem	Kompanzasyon hızını ve doğruluğunu arttırmak	PID	Bulanık PID	Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar neticesinde, Fuzzy PID kullanımı ile PID kullanımından daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

## 2. SİSTEM TASARIMI VE GELİŞTİRME

Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin tüm geliştirme aşamaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Sistem Akış Diyagramı

## 2.1 Sistemin Geliştirilmesinde Dikkate Alınan Parametreler

### 2.1.1 Dalga durumu

Açık Deniz koşullarında gerçekleştirilen tüm operasyonlar, zorlu deniz koşulları altında gerçekleştirilir. Operasyonun başarılı bir şekilde tamamlanabilmesinin en önemli faktörü dalga durumudur. Dalga durumunu analiz etmek için aşağıdaki parametreler esas alınmıştır.

**Belirgin Dalga Yüksekliği (Hs):** Operasyon bölgesindeki ortalama en yüksek üçte bir dalga yüksekliği, sistemin dalga yüksekliklerine karşı dayanıklılığını belirlemek için kullanılmıştır.

**Dalga Periyodu (T):** Dalga periyotları, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin dalga döngüsüne uyum sağlama kapasitesini etkileyebileceğinden, dalga dinamiklerinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

**Dalga Yönü:** Dalga yönü değişiklikleri, sistemin yanal stabilitesine etki edebilir. Bu nedenle, gangway tasarımında, çeşitli dalga yönlerinden kaynaklanabilecek yükler göz önüne alınarak çeşitli denizcilik analizleri gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 2.1:** Deniz Durumları

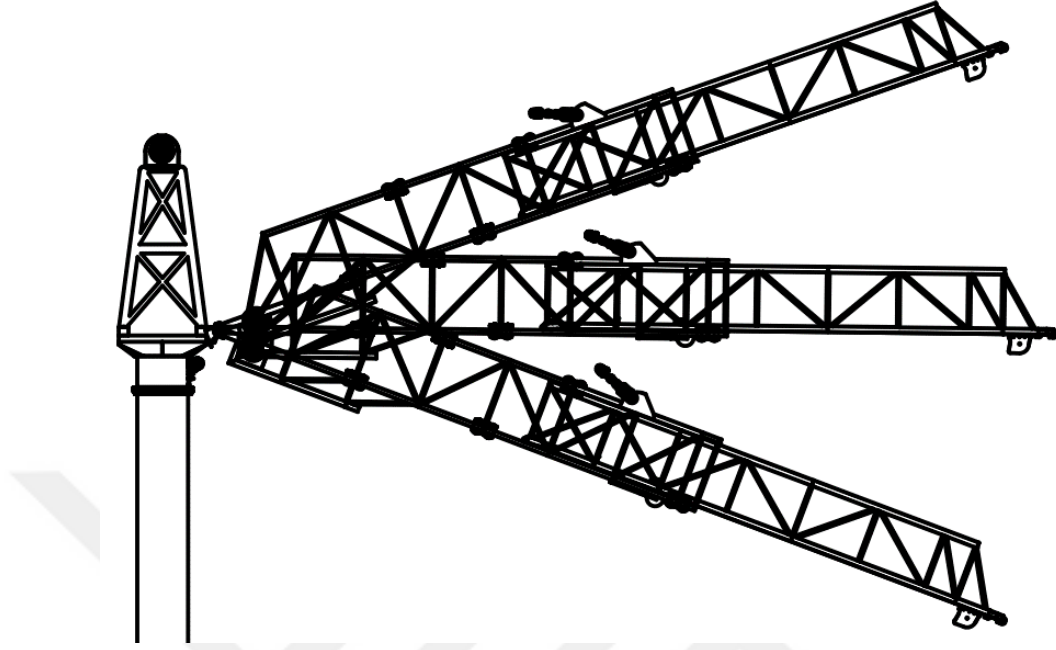
Deniz Durumu	Belirgin Dalga Yüksekliği (m)	Açıklama
0	Dalga yok	Durgun (Camsı)
1	0 - 0,1	Sakin (Kırışik)
2	0,1 - 0,5	Düzgün
3	0,5 - 1,25	Hafif
4	1,25 - 2,5	Orta
5	2,5 - 4	Kaba
6	4 - 6	Çok kaba
7	6 - 9	Yüksek
8	9 - 14	Çok yüksek
9	14 +	Olağanüstü

**Kaynak:** (Monaco vd., 2021)

### 2.1.2 Sistemin operasyonel çalışma açısı

Açık deniz hareket dengeleyici transfer sistemi, çeşitli su üstü platformları ve gemi bağlantısı gibi birçok amaca hizmet etmesinden dolayı etkin bir şekilde çalışması gerekmektedir. Bu nedenle, sistemin yapısal tasarımı ile beraber işlevselliği de kritik öneme sahiptir.

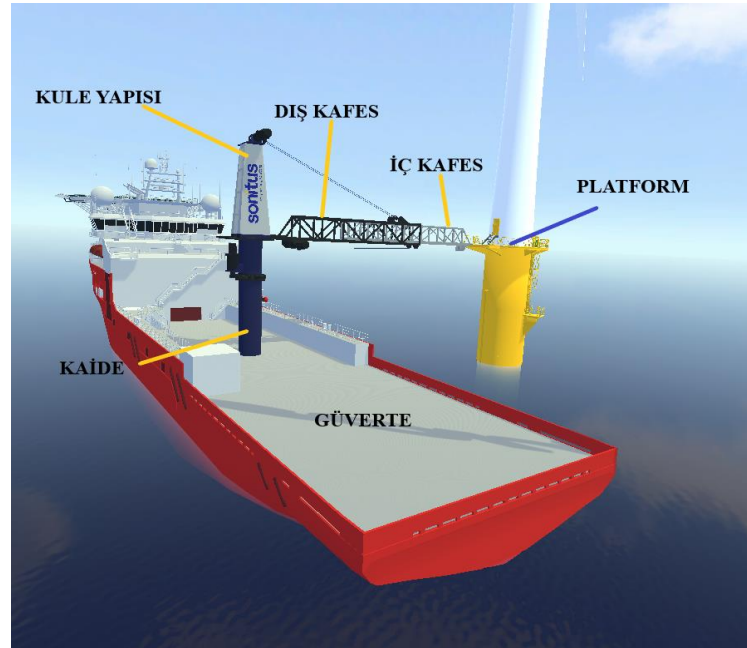
**Maksimum ve Minimum Çalışma Açıları:** Sistemin esnekliğini sağlamak için dönüş açısı  $+120^\circ$  ve orsa açısı  $+20^\circ$  olarak belirlenmiştir(Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Operasyonel Çalışma Sınırları

## 2.2 Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Geometrik Modeli

Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin komponentlerinin isimlendirilmesi Şekil 2.3’de yer almaktadır.



Şekil 2.3: Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Geometrik Modeli

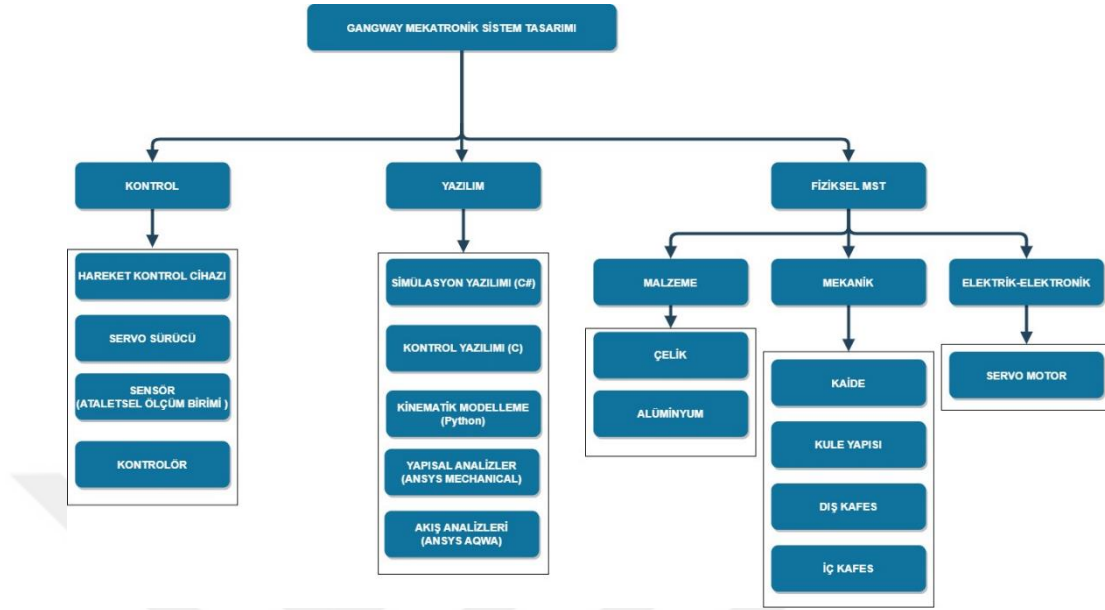
**Kaide:** Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin temel destek yapısını ifade eder. Ana güverteye sabitlenmiş olan bu kaide, Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin ağırlığını ve denizdeki hareketlerini sönümleyecek şekilde tasarlanmıştır. Kaidenin tasarımı, deniz koşullarının değişkenliğine uyum sağlayacak biçimde esneklik ve dayanıklılığı bir arada sunmak üzere optimize edilmiştir.

**Güverte:** Gemi yapısının temel yüzey alanıdır. Operasyonel ekipmanın yerleştirildiği, yük ve malzeme transferinin yapıldığı ve personelin çalışma aktivitelerini gerçekleştirdiği alandır. Güverte, yüksek mukavemetli malzemelerden üretilmiş olup ağır yük taşıma kapasitesine ve deniz ortamının aşındırıcı etkilerine karşı dirençli olacak şekilde tasarlanmıştır.

**Kule Yapısı:** Gemi üzerindeki kule yapısı, çeşitli operasyonel kontrollerin yapıldığı ve geminin navigasyon sistemlerinin yer aldığı bölümdür. Ayrıca, bu yapı hem iç hem dış kafes sistemlerini destekler; bu sistemler, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin kompanzasyon hareketlerine uyum sağlaması için hayati önem taşır.

**İç ve Dış Kafes Yapıları:** Bu iki yapı, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin ana kompanzasyon mekanizmasını oluşturur. Dış kafes, genellikle ağır hava koşullarına maruz kalan dış unsurları barındırırken, iç kafes daha korunaklı iç mekanizmaları içerir. Her iki kafes yapısı da, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin hem yatay hem de dikey eksenlerdeki hareketlerini düzenleyerek platform ile gemi arasında stabil bir bağlantı kurulmasını sağlar.

## 2.3 Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı



Şekil 2.4: Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı Diyagramı

Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sisteminin mekatronik sistemi, Kontrol, Yazılım, Fiziksel MST olmak üzere 3 ana başlık altında incelenmiştir(Şekil 2.4).

### 2.3.1 Kontrol

Kontrol sistemleri, sistemin hareketini ve operasyonel durumunu belirleyen en kritik bileşenlerinden biridir. Kontrol sistemi, elektromekanik donanımların doğru bir şekilde çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Özellikle, hareket kontrolünde kullanılan servo motorlar ve diğer kontrol cihazları, bu sistemde merkezi bir rol oynar. Ayrıca, kontrol sistemi içerisinde, NVIDIA Jetson Nano kullanılarak geliştirilen yazılım aracılığıyla PLC 'ye UDP protokolü üzerinden motor hızı, konum ve ivme bilgileri gönderilir. Bu bileşenin amacı, mekanik hareketlerin hassas bir şekilde yönlendirilmesini ve tüm sistem operasyonlarının uyum içinde çalışmasını sağlamaktır.

### 2.3.2 Yazılım

Yazılım ana başlığı, açık deniz hareket dengeleyici transfer sistemi mekatronik sisteminin dijital yapısını oluşturur.

Yazılım, sistem işlevselliğinin ve performansının dijital olarak modellenmesi, simüle edilmesi ve optimize edilmesi için çeşitli yazılım bileşenlerini ve araçlarını içerir.

**Simülasyon Yazılımı (C#):** Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin kinematik denklemlerinin doğrulanması ve sistemin dijital ikizinin oluşturulması amacıyla, C# programlama dili ve OpenGL teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş bir simülasyon yazılımı tasarlanmıştır. Geliştirilen simülasyon yazılımı ile birlikte sistemin performansı ve limit değerlerin uygunluğu simülasyon ortamında kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve doğrulanmıştır.

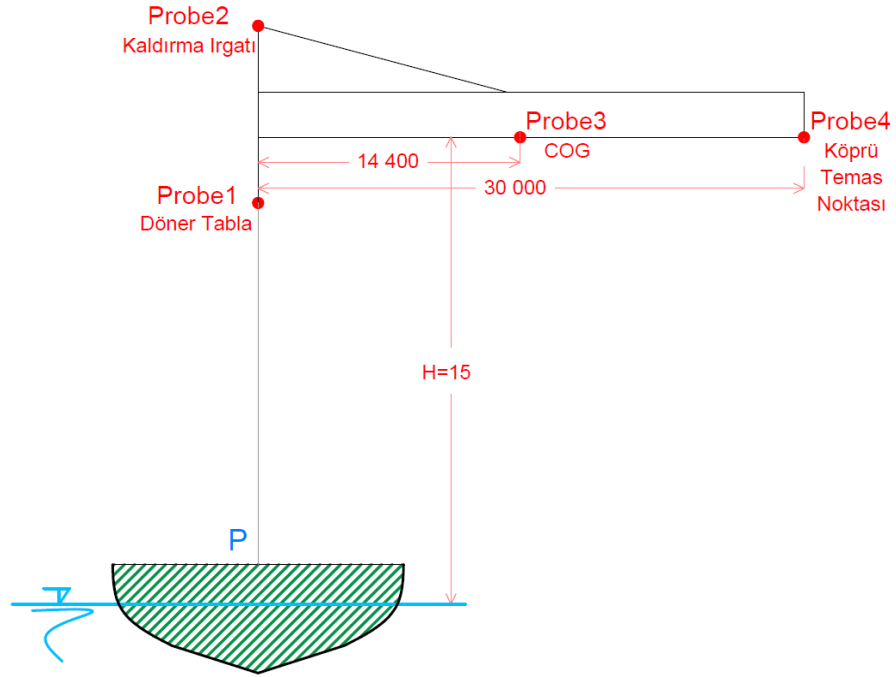
**Kontrol Yazılımı (C):** NVIDIA Jetson Nano kartı üzerinde etkin bir şekilde çalışır ve çeşitli sensörlerden alınan verileri sürekli olarak toplar ve işler. Bu veriler, sistemin mevcut durumunu yansıtarak, kontrol mekanizmasının temelini oluşturur. Yazılım, bu verileri kullanarak gerekli kinematik ve dinamik hesaplamaları gerçekleştirir. Bu hesaplamalar, sistem hareketlerinin ve mekanik yapılandırmasının, verilen komutlara ve dış koşullara uygun olarak optimizasyonunu sağlar. Elde edilen sonuçlar ve kontrol sinyalleri, UDP(User Datagram Protocol) kullanılarak, ağ üzerinden Programlanabilir Mantıksal Kontrolör (PLC)'ye iletilir. Bu iletişim protokolü, 10ms gibi düşük gecikme süresi olması nedeniyle, gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için idealdir. PLC, alınan verileri alarak sistemin elektromekanik bileşenlerini uygun şekilde yönlendirir, böylece sistem tasarlanan performans kriterlerine uygun olarak hareket eder.

**Kinematik Modelleme (Python):** Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin tüm ileri ve ters kinematik hesaplamaları Python programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Python'un güçlü matematiksel işlem kabiliyetleri ve özellikle simgesel matematik işlemleri için tasarlanmış açık kaynak kodlu SymPy kütüphanesi, ileri ve ters kinematik hesaplamaların etkin bir şekilde yapılabilmesi için tercih edilmiştir.

### 3. GANGWAY PROTOTİP ÜRETİM AŞAMALARI

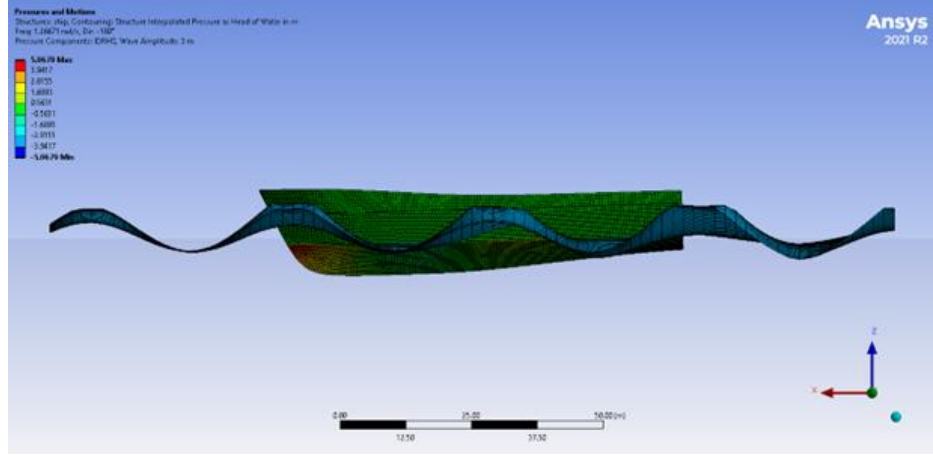
#### 3.1 Denizcilik Analizleri

Tez kapsamında örnek geminin dalgalar arasındaki hareket genliklerini çözmek için ANSYS Aqwa programı kullanılmıştır. Aqwa yazılımı potansiyel akış çözümü yapmakta ve üç boyutlu (3B) panel yöntemini kullanmaktadır. Düzenli veya düzensiz dalgalar içinde yüzen geminin difraksiyon ve radyasyon dalga kuvvetlerini içeren çözümler yapmaktadır. Analizler frekans ve zaman bölgesinde olmak üzere iki farklı yol ile gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma kapsamında karışık dalga içinde sıfır hızda hareket eden geminin hız, ivme, yer değiştirme gibi benzeri tepki parametreleri zamana bağlı olarak hesaplanmıştır.

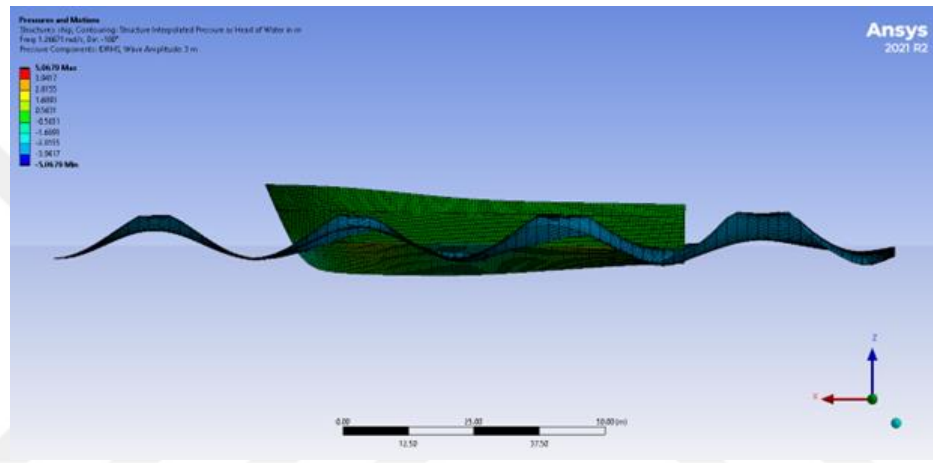


(a)

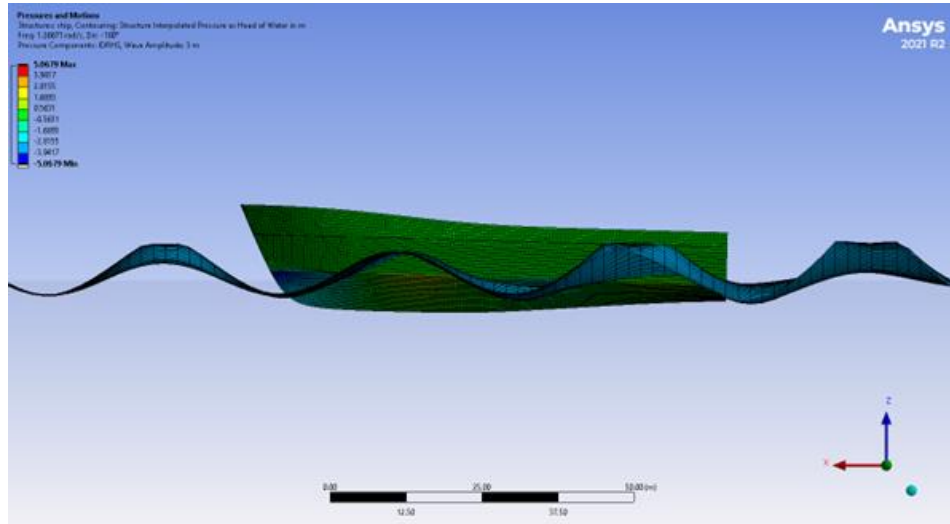
Şekil 3.1: Geminin Dalgalarda İlerlemesinin Zaman İçindeki Gösterimi



(b)



(c)



(d)

**Şekil 3.1:** (Devamı) Geminin Dalgalarda İlerlemesinin Zaman İçindeki Gösterimi  
Analizler vincin su hattına göre iki yükseklikte ( $H=15\text{m}$  ve  $25\text{m}$ ) pozisyonuna göre yapılmıştır(Şekil3.1a).

Analizlerde Şekilde gösterilen noktalardaki ivme ve hız değerleri zaman göre hesaplanmıştır. Ayrıca her senaryo için pitch, roll ve heave değerleri de zamana göre hesaplanarak Şekil 3.1b-Şekil1d'de verilmiştir.

### 3.2 Yapısal Analiz

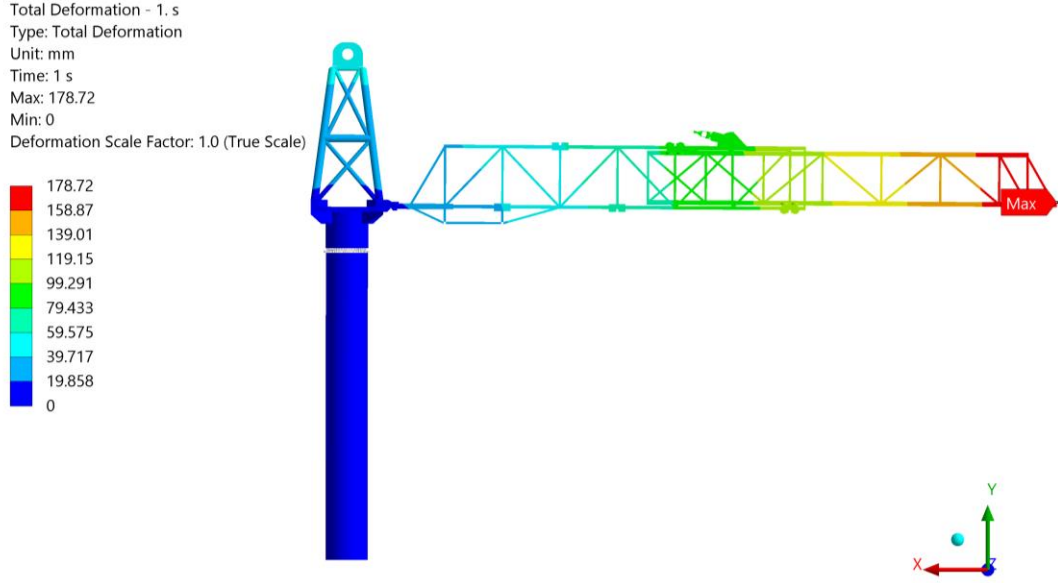
Yapısal analizler DNV standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle, ANSYS Mechanical ile yapılan simülasyonlarda, sistemin kinematik yapılandırması ve hareket mekanizmaları dikkate alınmıştır. Bu, kinematik denklemlerin doğruluğunun ve sistemin hareketli bileşenlerinin etkileşiminin anlaşılmasını sağlamıştır. Rigid body (katı cisim) dinamiği kullanılarak, sistemin hareketli parçalarının etkileşimleri ve bunların yapısal bütünlüğe olan etkileri detaylı bir şekilde modellenmiştir.

Simülasyonlar sırasında, Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin kritik yük noktaları ve potansiyel zayıf noktaları belirlenmiş, bu da tasarımın optimizasyonu ve geliştirilmesi için değerli bilgiler sağlamıştır. Örneğin, sistem üzerindeki dinamik yüklerin ve dış etmenlerin (rüzgar, dalga hareketleri vb.) etkileri, gerçekçi çalışma koşullarını simüle etmektedir.

Bu yapısal analizler, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin güvenliğini ve performansını artırmak için tasarım değişikliklerinin yapılmasını sağlamış, ayrıca sistemin belirli standartlara ve yönetmeliklere uygunluğunun doğrulanmasına olanak tanımıştır. ANSYS Mechanical ile yapılan bu detaylı yapısal analizler, açık deniz hareket dengeleyici transfer sistemi tasarımının mekanik yeterliliğini ve uzun vadeli dayanıklılığını güvenilir bir şekilde değerlendirme fırsatı sunmuştur.

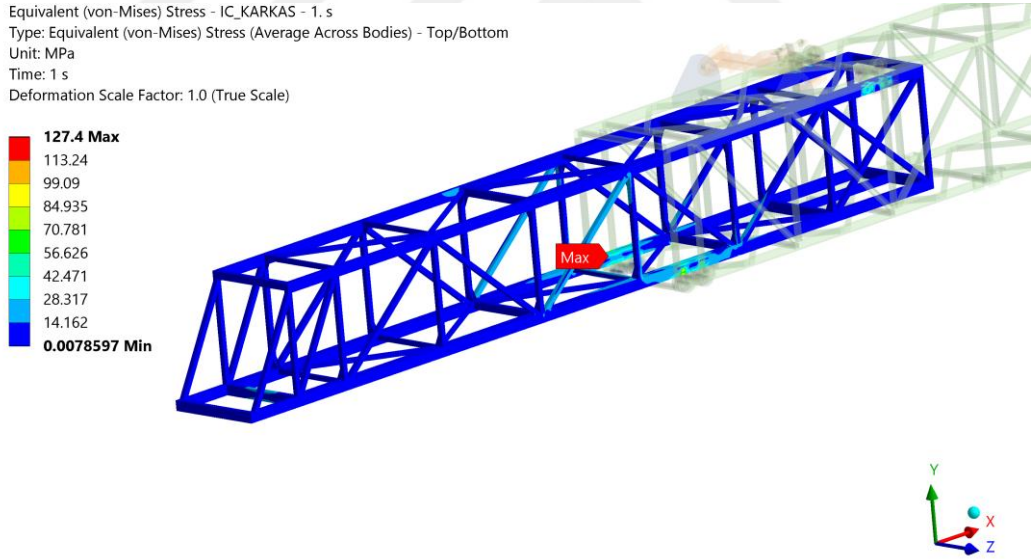
Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminde her bir komponente etkiyen net kuvvet Şekil 3.2'de yer alan serbest cisim diyagramında gösterilmiştir. Şekil 3.3'de hesaplanan halat reaksiyon kuvveti serbest cisim diyagramı oluşturularak hesaplanmıştır.





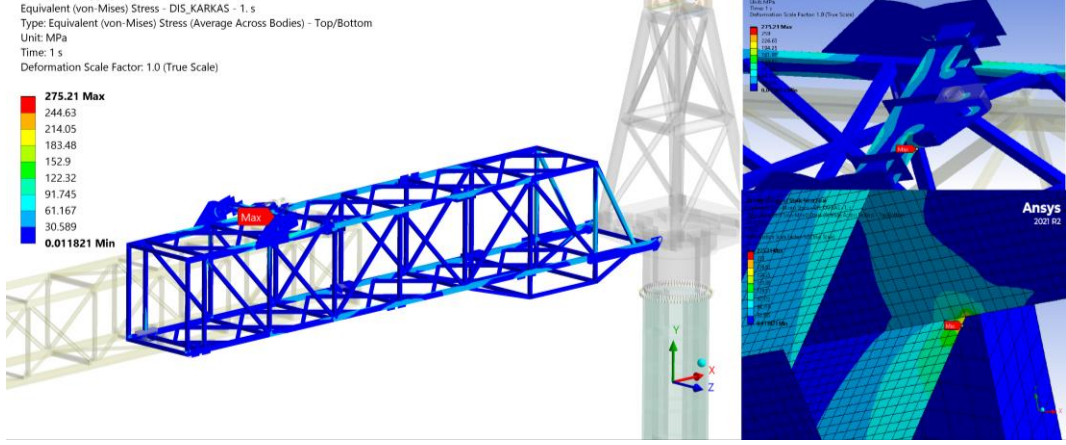
**Şekil 3.4:** 1 t Yükleme Altında Oluşan Yer Değişirme Sonuçları

1 t yükleme altında sistemde maksimum 179 mm yer değişikliği meydana gelmektedir. Maksimum deformasyon dış kafesin uç noktasında meydana gelmektedir. Görsel 1/1 ölçeklidir. Skalada sunulan sonuçlar mm cinsindedir.



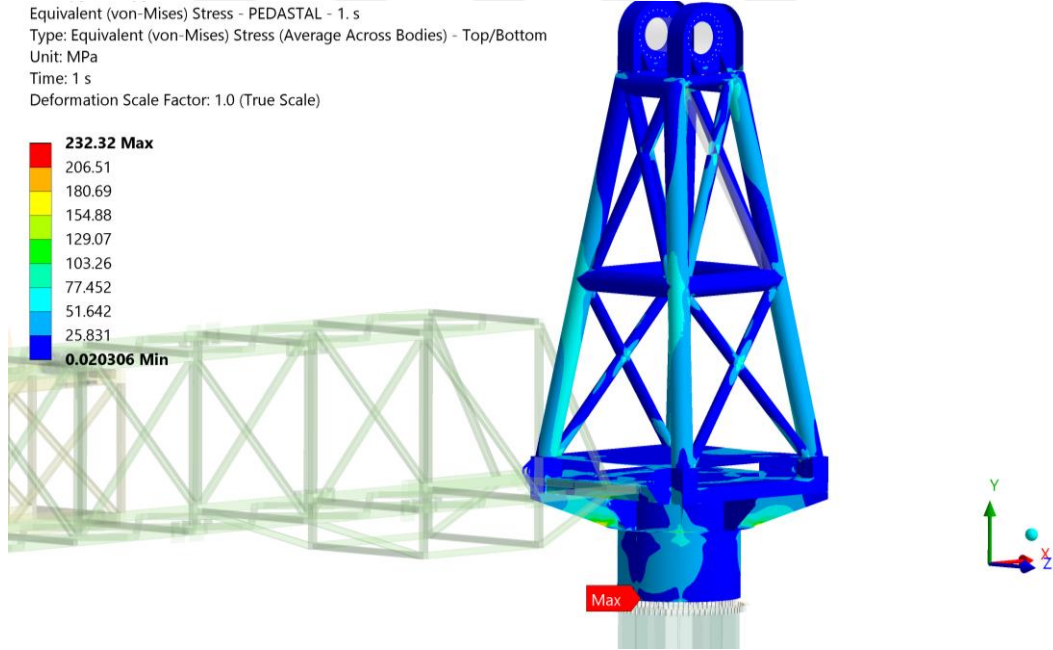
**Şekil 3.5:** İç Kafes Gerilme Sonuçları

Analizler neticesinde iç karkas yapısında (Şekil 3.5) maksimum 127 MPa eşdeğer gerilme hesaplanmıştır. Maksimum gerilme; iç karkasın tekerlere bastığı yüzeyler üzerinde meydana gelmektedir. Bu bölge St52 malzeme yapısına sahiptir. Bu bölgedeki emniyet katsayısı 2.78 ( $355/127.4$ ) olarak hesaplanmıştır. Skala sunulan sonuçlar MPa cinsindedir.



**Şekil 3.6:** Dış Kafes Gerilme Sonuçları

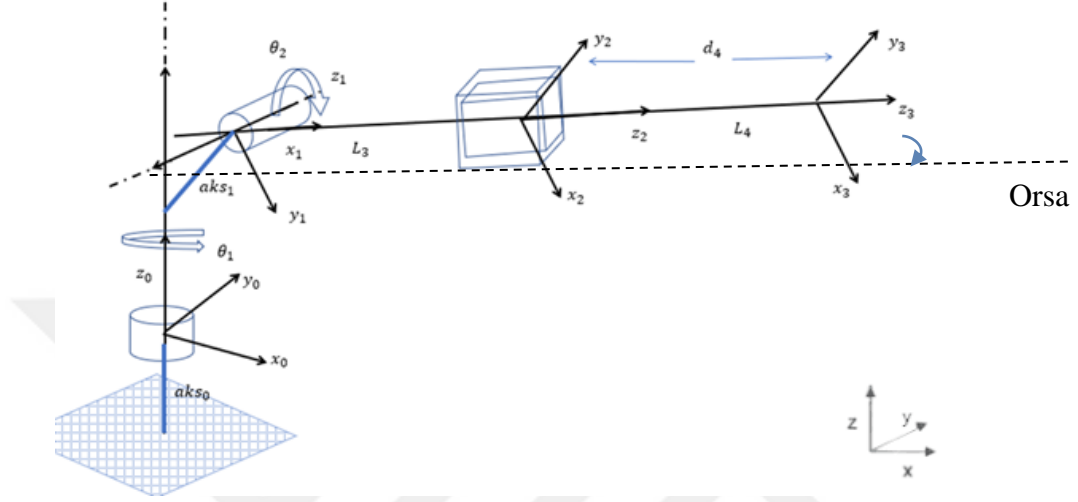
Analizler neticesinde dış karkas yapısında(Şekil 3.6) maksimum 275 MPa eşdeğer gerilme hesaplanmıştır. Maksimum gerilme; dış karkasa bağlanan halat bölgesinde meydana gelmektedir. Bu bölge St52 malzeme yapısına sahiptir. Bu bölgedeki emniyet katsayısı 1.29 ( $355/275.2$ ) olarak hesaplanmıştır. Skala sunulan sonuçlar MPa cinsindedir.



**Şekil 3.7:** Kule Yapısı Gerilme Sonuçları

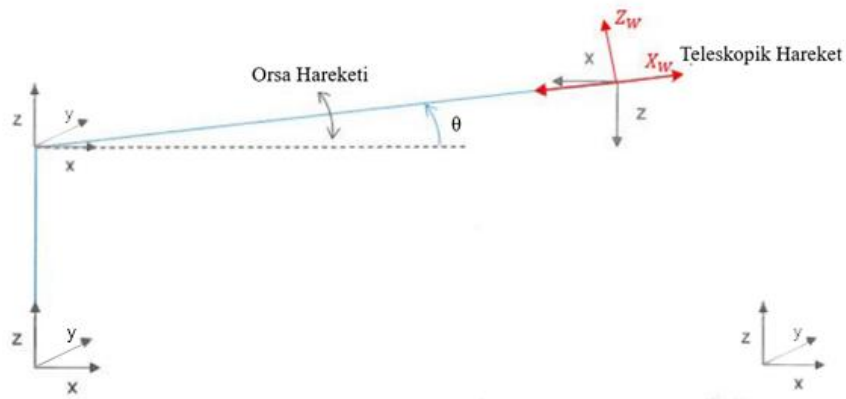
Analizler neticesinde kule yapısında(Şekil 3.7) maksimum 232 MPa eşdeğer gerilme hesaplanmıştır. Maksimum gerilme; kulenin kaideye bağlandığı yatağın civatalarında gelmektedir. Bu bölge St52 malzeme yapısına sahiptir. Bu bölgedeki emniyet katsayısı 1.52 ( $355/232.3$ ) olarak hesaplanmıştır. Skala sunulan sonuçlar MPa cinsindedir.

## 4. KİNEMATİK MODELLEME



Şekil 4.1: Matematiksel Model

Üretim sistemlerinde içerisindeki tekrarlı işlemlerin belirlenen tolerans sınırları içerisinde gerçekleştirilmesi ve yeniden programlanabilir üretim sistemlerinde, belirlenen pozisyonlara mümkün olan en küçük hata ile erişilmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 4.2: Kinematik Yönelim

Kaynak: (Boumzaouad, 2017)

#### 4.1 İleri Kinematik Modeli

İleri kinematik problemi, robot kolun eklemleri ile uç-işlevcisinin pozisyon ve yönelimi arasındaki ilişki ile ilgilidir. Her ekleme bir eksen takımı yerleştirilirse, art arda gelen iki eklem arasındaki ilişki  ${}^{i-1}_i T$ , i numaralı eklem i-1 numaralı eklem göre dönüşümünü olarak ifade edilebilir. Dönüşüm matrisi, dönme matrisi  ${}^{i-1}_i R$  ile pozisyon vektörü  ${}^{i-1}_i p$  elde edilen 3x4 boyutundaki matrise birim elemanlar eklenerek Denklem 4.4'deki gibi 4x4 boyutunda kare matris elde edilir.

$${}^{i-1}_i R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^{i-1}_i p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} {}^{i-1}_i R & {}^{i-1}_i p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Düzlem yerleşimleri gerçekleştirilen eklemlerin, kendilerinden önceki eklem ait düzlem referans olarak tanımlanması için, Denklem 4.5'de yer alan öteleme(translation) ve Denklem 4.6'da yer alan rotasyon (rotation) olmak üzere matrislerinden uygun olanlar sıralı olarak kullanılmaktadır. Matris içerisinde kosinüs için 'c' harfi ve sinüs için 's' harfi kullanılmıştır.

Şekil 4.1'de matematiksel modeli verilen açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin düzlemlerinin konumlandırılması için, eklemler bir önceki eklem düzlemine göre sıralı bir şekilde yerleştirilir. Denklem 4.5'te yer alan öteleme(translation) matrisi ve Denklem 4.6'da yer alan rotasyon (rotation) matrisi olmak üzere her bir eklem tipi ve eksenine uygun olarak sıralı olarak kullanılmaktadır.

$$Trans(X_d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Trans(Y_d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Trans(Z_d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$Rot_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Rot_y(\beta) = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Rot_z(\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$T_0^n = A_1 * A_2 * A_3 \dots * A_n = T_1 * T_2 * T_3 \dots * T_n \quad (4.7)$$

$$A_1 = A_0^1, \quad A_2 = A_1^2, \quad A_3 = A_2^3 \dots \quad A_n = A_{n-1}^n \quad (4.8)$$

Bu tez kapsamında, Liang Lihua (2020) Çizelge 4.1 'de yer alan matematiksel model ve D-H Parametreleri referans alınmıştır.

**Çizelge 4.1:** Açık Deniz Hareket Dengeleyici Transfer Sistemi D-H Parametreleri

Link	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	$L_x$	0	$L_1 + L_z$	$\theta_1^*$
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_2^*$
3	0	$3\pi/2$	$d_3^*$	0
4	0	0	$L_4$	0

**Kaynak:** (Liang vd., 2020)

İşlem sonucu elde edilen homojen matrislerine aşağıda yer verilmiştir.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$T_p^b = \begin{bmatrix} c1c2 & -c1s2 & s1 & L_x - (L_4 + d_3) c1s2 \\ s1c2 & -s1s2 & -c1 & - (L_4 + d_3) s1s2 \\ s2 & c2 & 0 & L_z + L_1 + (L_4 + d_3) c2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

## 4.2 Ters Kinematik Modeli

Robotlar için ters kinematik problem ise, araç çerçevesinin ana çerçeveye göre yönelimi ve konumu verildiğinde, robotun bu yönelim ve konuma ulaşabilmesi için gerekli olan açı setlerinin hesaplanması şeklinde tanımlanır. Ters Kinematik Analitik ve İteratif Yöntem olmak üzere 2 farklı metot kullanılarak hesaplanır. Ancak iteratif yöntem kesin sonuç vermemekle beraber, çözüm işlemi, analitik

çözümüne göre daha yavaş çalışır. Bu sebepten dolayı iteratif yöntem ile sistem çözümünü incelenmemiş olup analitik yöntem ile devam edilmiştir.

Ters kinematik problem çözümü, Aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi eşitliğin sağ ve sol tarafında karşılıklı yer alan matris elemanlarının birbirine eşitlenmesiyle gerçekleştirilir. Sistemde temel olarak dönme , orsa, teleskopik Hareket olmak üzere 3 hareket bulunur. Ancak deniz şartları çoğu zaman düzensiz olmak üzere üç ekseninde salınımlar yarattığından dolayı ileri ve ters kinematikte sisteme etki eden Roll, Pitch, Heave hareketleri sisteme eklenmek zorundadır. Aksi takdirde ileri ve ters kinematik çözümü geçersiz olacaktır. Roll, Pitch, Heave hareketlerinden dolayı rotasyon ve öteleme matrisleri dahil edilir. Ancak bu işlemin el ile yapılması kolay olmadığından dolayı MATLAB, Python gibi programlama dillerinde ileri düzey matris çözücülere ihtiyaç duyulmaktadır.

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (4.11)$$

$$[{}^0_1 T \quad {}^1_2 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^2_3 T \quad {}^3_4 T \quad {}^4_5 T \quad {}^5_6 T$$

$$[{}^0_1 T \quad {}^1_2 T \quad {}^2_3 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^3_4 T \quad {}^4_5 T \quad {}^5_6 T$$

$$[{}^0_1 T \quad {}^1_2 T \quad {}^2_3 T \quad {}^3_4 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^4_5 T \quad {}^5_6 T$$

$$[{}^0_1 T \quad {}^1_2 T \quad {}^2_3 T \quad {}^3_4 T \quad {}^4_5 T]^{-1} {}^0_6 T = {}^5_6 T$$

$$\begin{bmatrix} \bullet \\ P_x \\ \bullet \\ P_y \\ \bullet \\ P_z \\ \bullet \\ \omega_x \\ \bullet \\ \omega_y \\ \bullet \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Jacobian, q1,q2,d3'ün her biri için T vektörünün kısmi türevine eşittir

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial d_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial d_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial d_3} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

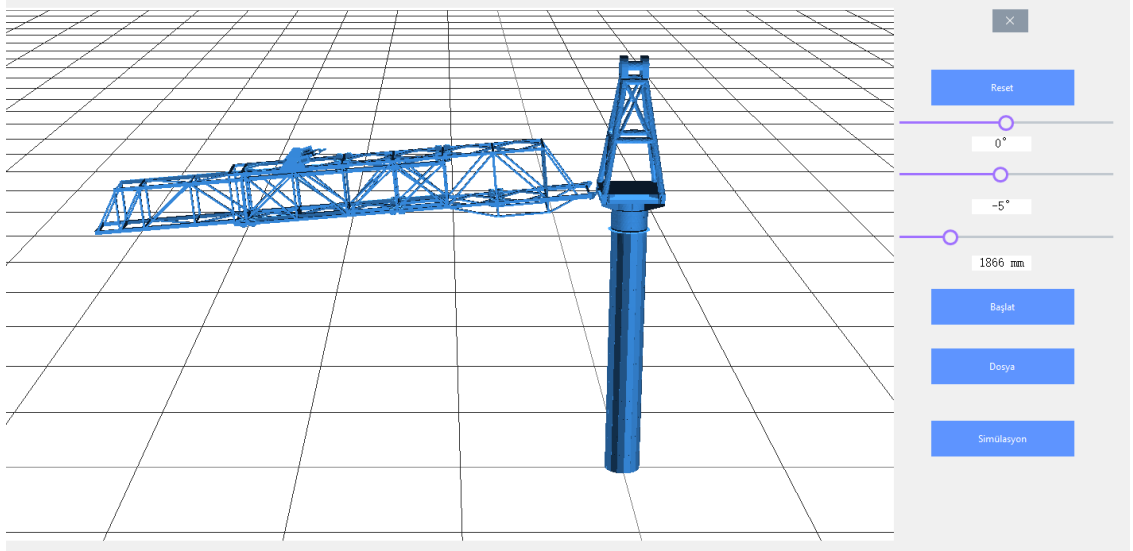
$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = J(\theta_1(t), \theta_2(t), d_3(t)) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Bu eşitlik sonrası eklemlerin açısıl ve doğrusal hızları elde edilir. (4.16) Hız denklemleri yukarıdaki algoritmayı kullanarak Python ile hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{teta1Hiz} &= (Vy \cdot \cos(x)) / (192 \cdot \cos(x)^2 + 192 \cdot \sin(x)^2 + 1143 \cdot \cos(x)^2 \cdot \cos(y) + 1143 \cdot \cos(y) \cdot \sin(x)^2 + a3 \cdot \cos(x)^2 \cdot \cos(y) + \dots \\ \text{teta2Hiz} &= (Vz \cdot \cos(y)) / (a3 \cdot \sin(y)^2 + 1143 \cdot \cos(y)^2 + 1143 \cdot \sin(y)^2 + a3 \cdot \cos(y)^2) - (Vy \cdot \sin(x) \cdot \sin(y)) / (1143 \cdot \cos(x)^2 \cdot \cos(y)^2 + \dots \\ \text{d3Hiz} &= (Vz \cdot \sin(y)) / (\cos(y)^2 + \sin(y)^2) + (Vx \cdot \cos(x) \cdot \cos(y)) / (\cos(x)^2 \cdot \cos(y)^2 + \cos(x)^2 \cdot \sin(y)^2 + \cos(y)^2 \cdot \sin(x)^2 + \sin(x)^2 \cdot \sin(y)^2) + \dots \end{aligned} \quad (4.16)$$

### Denklem Doğrulama

Yukarıdaki bölüm 4.2'de verilen matrislerin Python ortamında çözülmesinden sonra  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  denklemleri elde edilmiş olup bu denklemler kullanılarak C# ve OpenGL kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon programı arayüzü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Simülasyonda manuel olarak roll, pitch açıları ve heave ötelemesi tanımlanmış olup sistem uç noktasının sabit olduğu izlenmiştir.



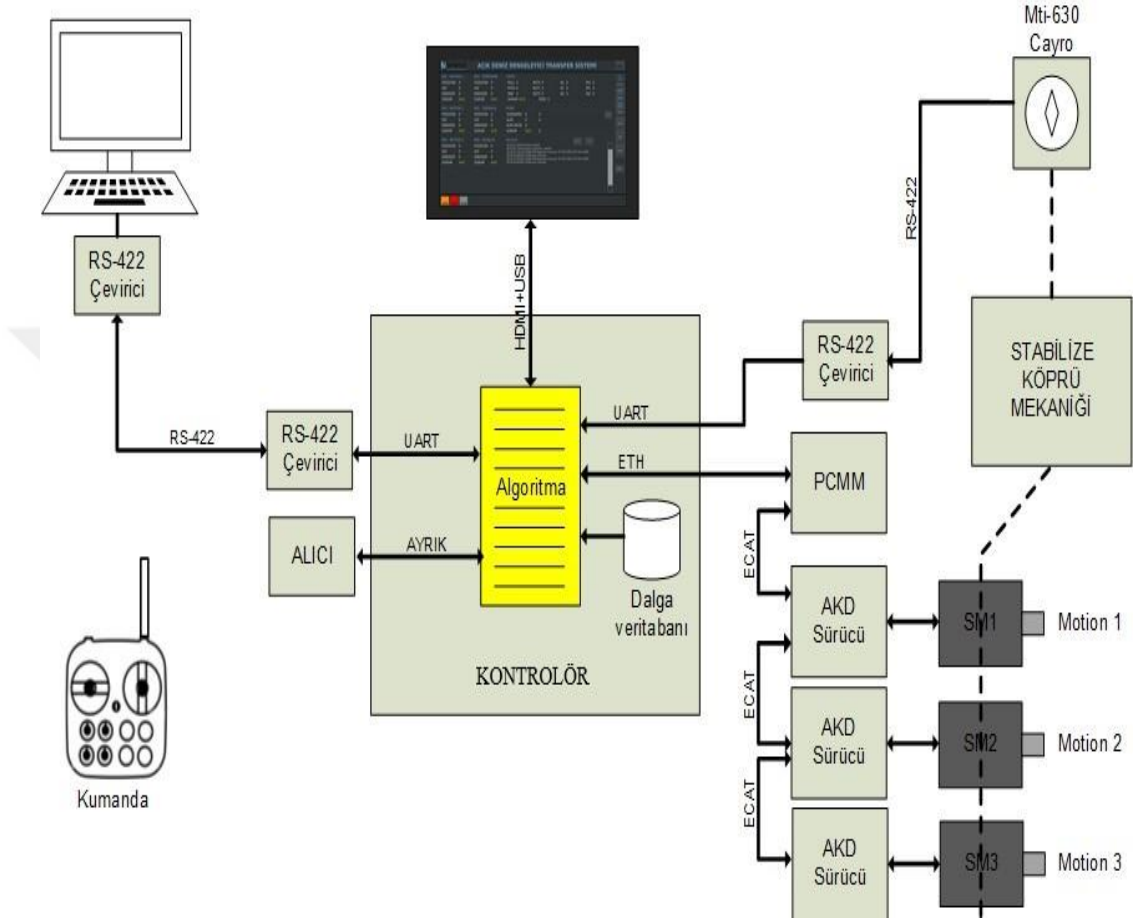
**Şekil 4.3:** Denklem Doğrulama Simülasyon Yazılımı

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin simülasyon ile doğrulanmasına ek olarak ayrıca 3 eksenli bir hareket platformu geliştirilerek, simülasyon ortamında doğrulanmış olan açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin, açık deniz koşullarını tam olarak yansıtmamakla birlikte, Çizelge 4.2’de yer alan dalga durumlarına göre gerçek dünyada doğrulanmasına ve geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

**Çizelge 4.2:** Hareket Platformunun Tasarım Parametreleri

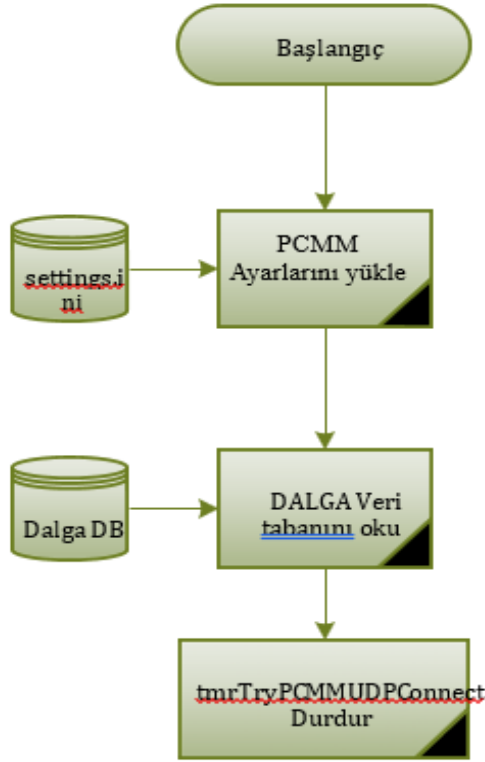
Özellik	Dalga Durumu 1	Dalga Durumu 2
Roll	+0.45 °	+0.85 °
Pitch	+1.25 °	+2.40 °
Heave	+20mm	+45mm

## 5. SİSTEM KONTROLÜ



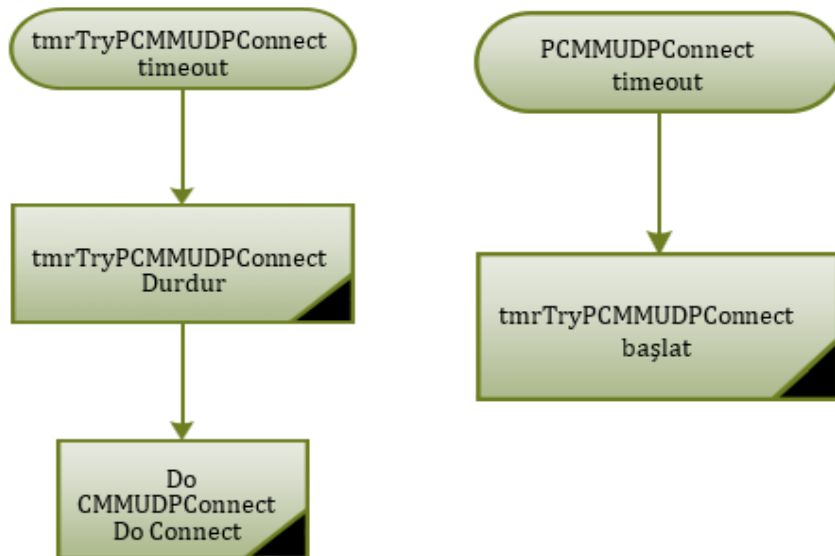
Şekil 5.1: Sistem Kontrol Şeması

Yazılımın başlangıç aşamasında Şekil 5.1'deki akış şemasında gösterilen işlemleri yapmaktadır. Bu kısımda sistem ayarları okunur, dalga veri tabanı yüklenir ve bağlantı zamanlayıcısı başlatılır.



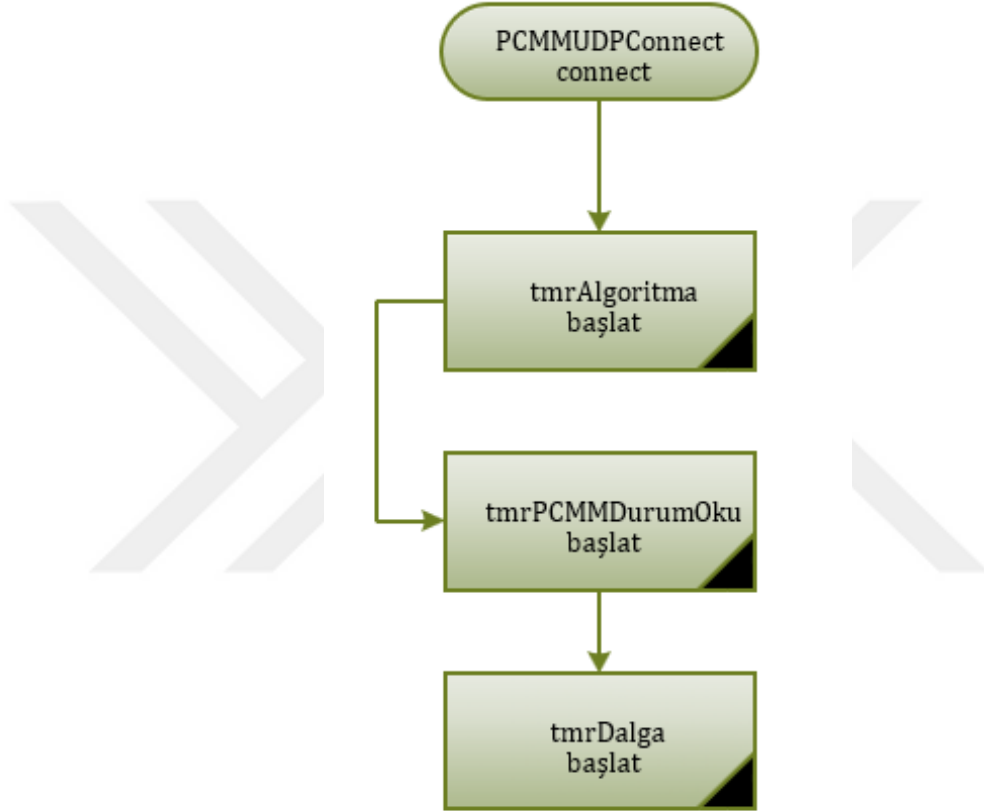
Şekil 5.2: Başlangıç İşlemleri Akış Şeması

PCMM ile UDP protokolü üzerinden bağlantı kurulması için bir zamanlayıcı çalışmaktadır. Zamanlayıcı her saniye başında bağlantı kurmayı denemektedir. Böylece sistem başlatıldığında PCMM kapalı olsa bile açıldığında otomatik olarak bağlantı sağlanabilmektedir veya çalışma sırasında bir sebeple bağlantı koparsa yeniden bağlanabilmektedir. Şekil 5.2’de yer alan akış şemasında gösterilmiştir.



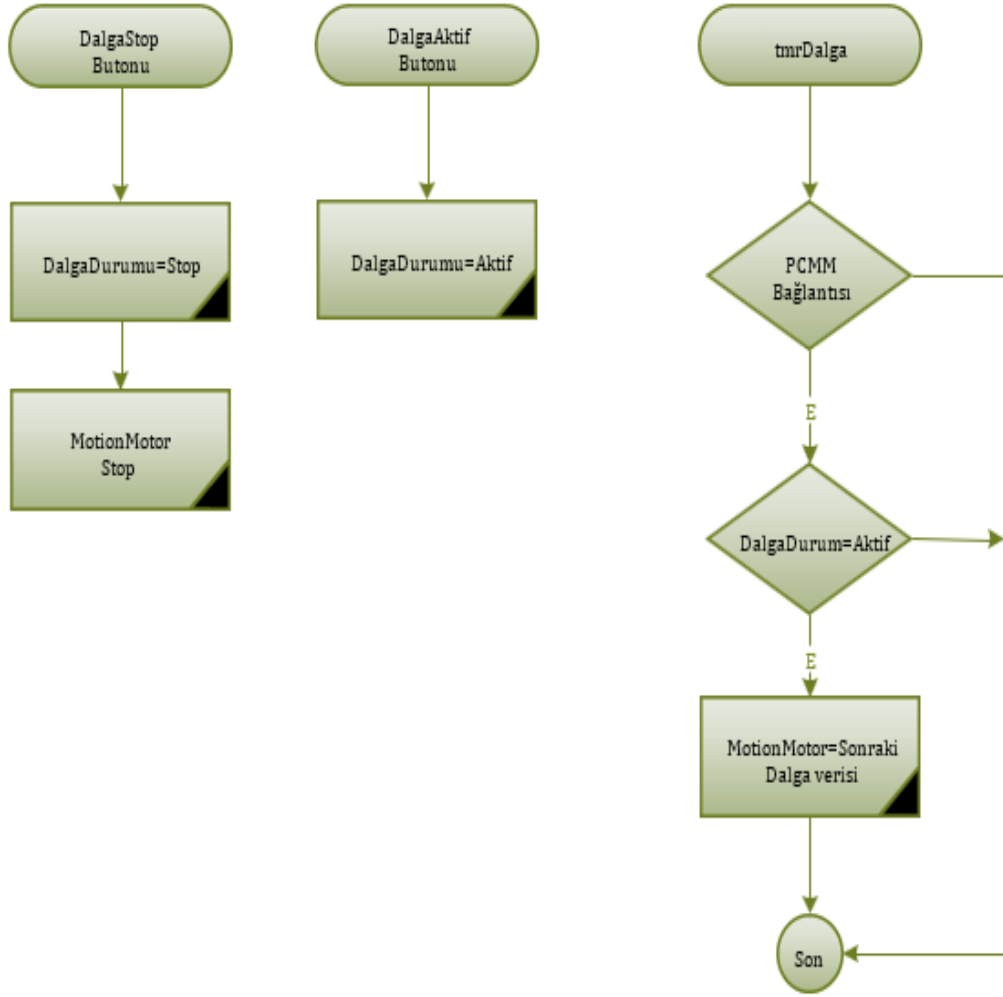
Şekil 5.3: PCMM ile UDP Bağlantı İşlemleri Akış Şeması

PCMM ile UDP bağlantısı kurulduğunda ise hareket dengeleyici transfer sisteminin algoritmalarını ve diğer işlemlerin yapılmasını sağlayan üç adet zamanlayıcı başlatılır. Algoritma zamanlayıcısı belirlenmiş aralıklarla algoritmayı çalıştırır. Dalga zamanlayıcısı belirlenmiş sürelerle dalga veri tabanından okuduğu bilgileri motorlara iletir. Durum zamanlayıcısı PCMM den sistemin ve motorların durumlarını okur. Herhangi bir hata dönüşünde sistemi durdurur. Bu işlemlere ait akış şeması Şekil 5.3’de sunulmuştur.



**Şekil 5.4:** Çalışma Başlangıcı Akış Şeması

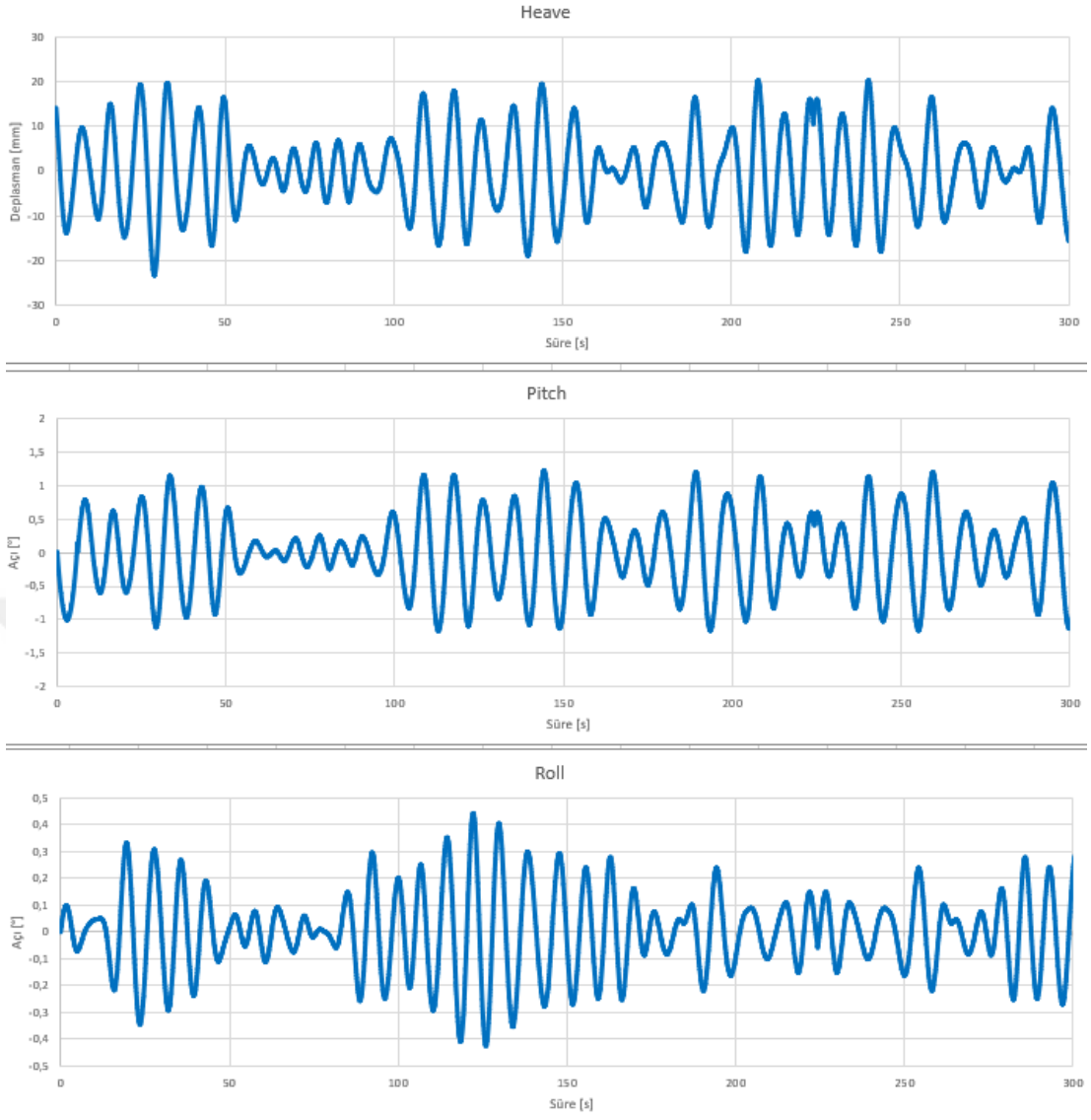
Hareket dengeleyici transfer sisteminin test edilmesi amacıyla oluşturulan Dalga Masasına çalışma komutları Şekil 5.4’de gösterilen akış şemasındaki işlemlere gerçekleştirilir. Dalga hareketinin başlaması için Dalga Aktif butonuna basılması gerekmektedir.



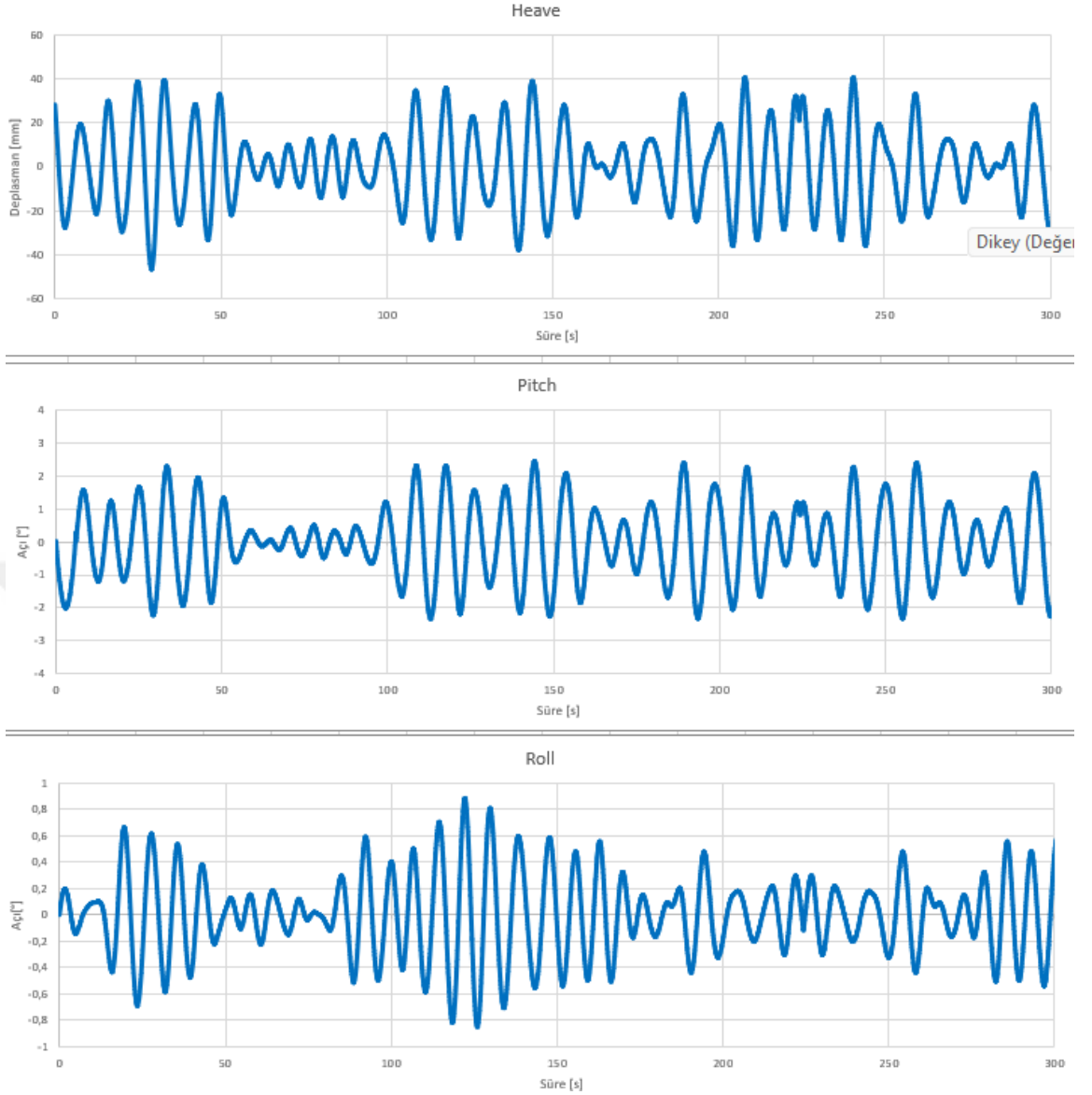
Şekil 5.5: Dalga Masası Akış Şeması

### 5.1 Sistem Hareket Analizi

Sistemin üretilip montajlanmasından sonra deniz durumu-1 ve deniz durumu-2 için 50 farklı test yapılmıştır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 bu testlerde kullanılan deniz durumu-1 ve deniz durumu -2 için verilen roll, pitch ve heave değerleri aşağıda yer almaktadır.



Şekil 5.6: Dalga Durumu -1 Hareketleri

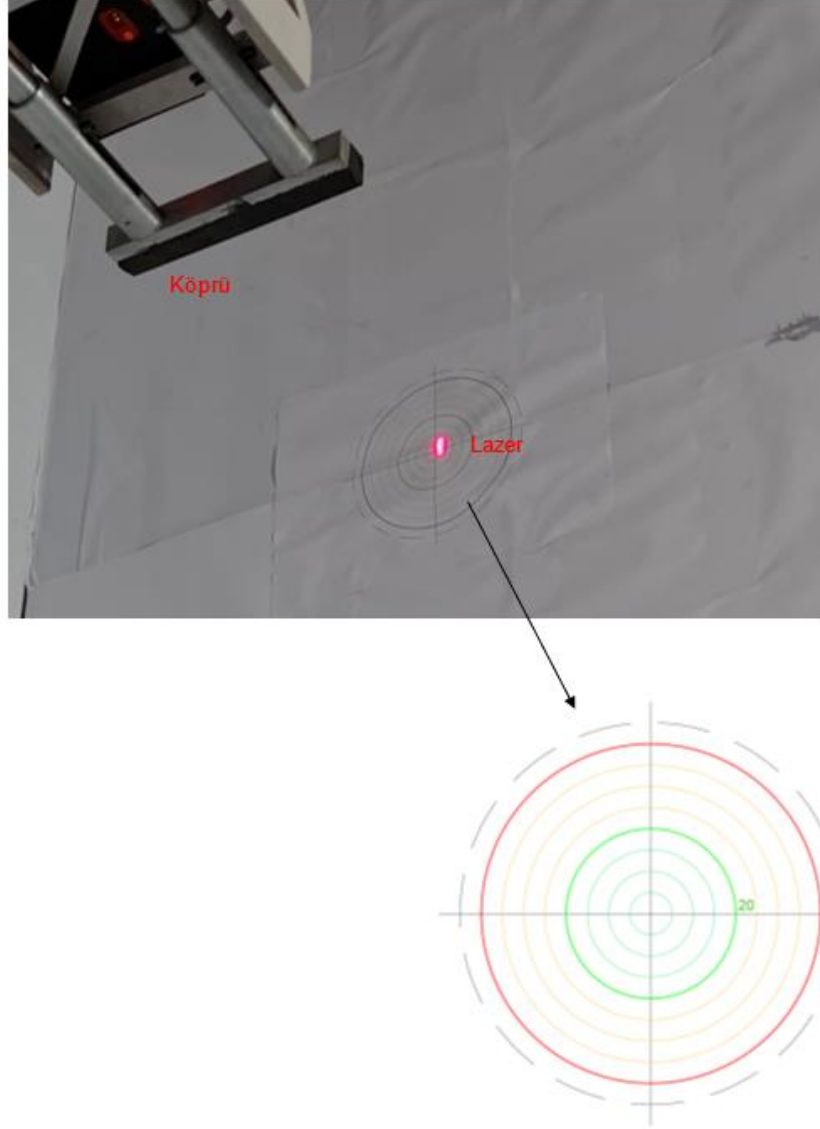


**Şekil 5.7:** Dalga Durumu -2 Hareketleri

Testlerde görsel izleme için kullanılan hedef, çapları 5 mm aralıklarla büyüyen dairelerden oluşmaktadır. (Şekil 5.8) Burada iki sınır değeri yeşil ve kırmızı renklerde belirlenmiştir; yeşil olan, yani 20 mm çapındaki çember mekanik boşlukların sınırını göstermektedir. Bu boşluklar deniz hareketlerini üreten hareket platformunun mafsallı birleşim yerlerinden kaynaklanmaktadır.

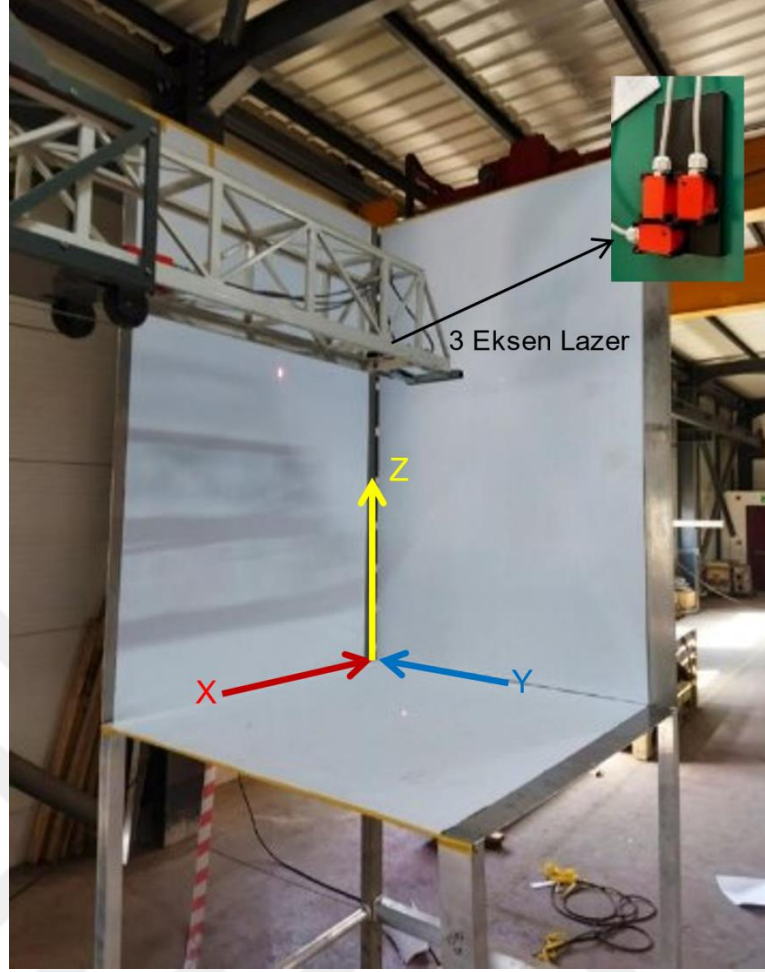
Bu yüzden yeşil daire içerisinde kalan kısım proje hedefi içerisinde dengeleme işlemlerinin başarıyla yapıldığı ancak mekanik boşluklardan dolayı salınımın engellenemediği bölge olarak tanımlanmıştır.

Kırmızı daire ise ilave  $\pm 20$  mm tolerans bölgesi sınırını göstermektedir. Lazer ışını 40 mm'lik bu sınır dışına taşığında dengeleme tamamen başarısız olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 5.8:** Uç Konum Hedefi

Yukarıda tanımlandığı gibi üç ekseninde oluşan kaymaların kontrolü için köprü ucuna yerleştirilen üç adet lazer sensörünün okuma yaptığı üç adet dik yüzeyden oluşan ölçüm (teyit) düzeneği bulunmaktadır. Bu sensörler daha önce kalibre edilmiş olup maksimum  $\pm 5$  mm hata ile okuma yapabildikleri tespit edilmiştir. Sensör okumaları için en iyi yansıtıcı yüzeyin beyaz kağıt olmasından dolayı tüm yüzeyler kağıt ile kaplanmıştır(Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Sistem Doğrulama Düzeneği

## 5.2 Deney Çalışmalarının Temel Aşamaları

- Dalga verisi seçilerek sisteme yüklenir.
- Motorlar başlangıç pozisyonuna alınır.
- Sensör verileri sıfırlanır.
- Kompanzasyon aktif hale getirilir.
- Dalga aktif hale getirilerek alt platforma hareket verilir.
- Dalga hareketi tamamlanır ve alt platforma kendiliğinden durur.
- Kompanzasyon durdurulur.
- Veriler kaydedilir.



**Şekil 5.10:** Sistem Test Düzeneği

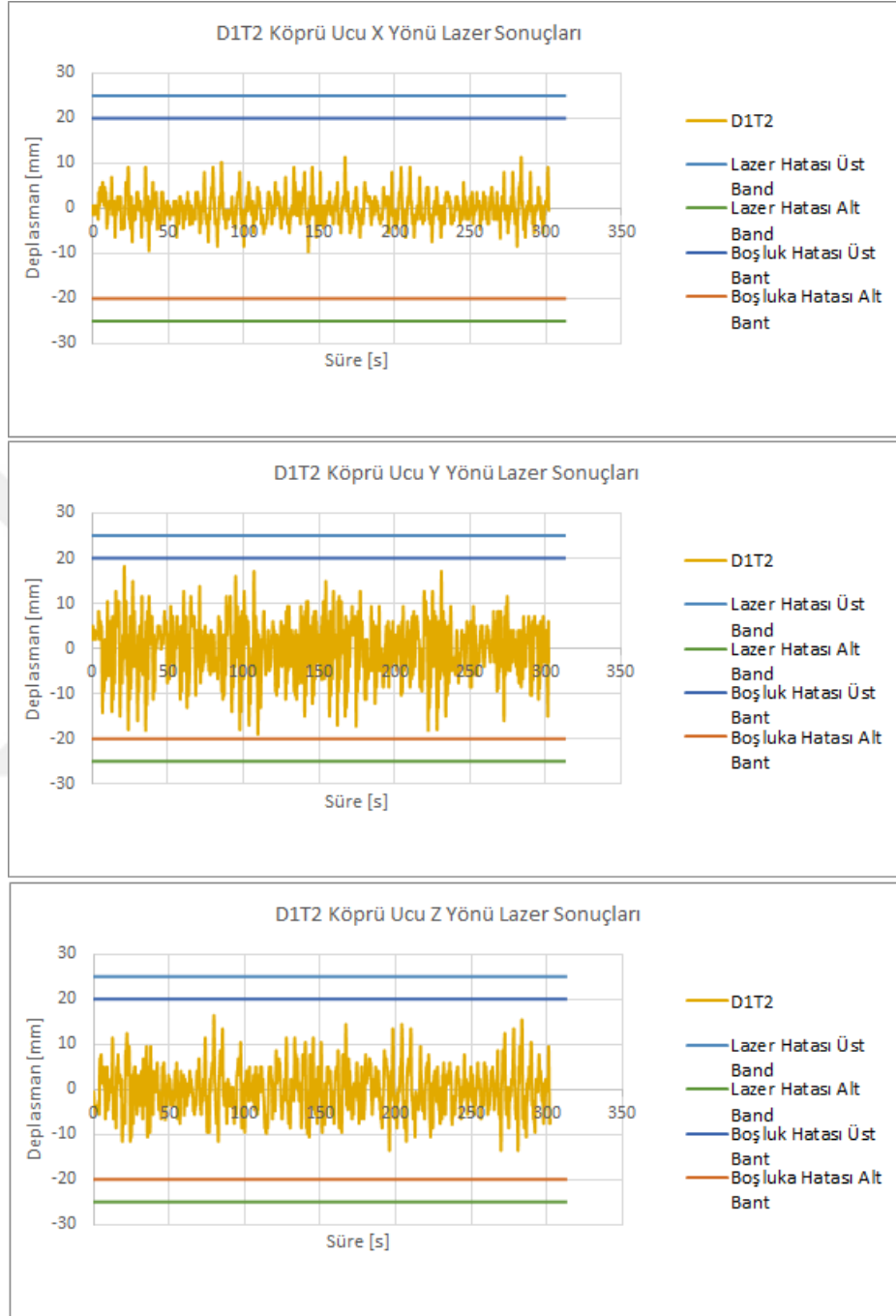
## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Tez kapsamında, sert deniz koşullarında malzeme ve insan transferini güvenli, hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirebilecek bir platformun mekatronik sisteminin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla, platformun 1/10 ölçekli bir modeli üzerinde çalışılarak, ileri ve ters kinematik denklemler kullanılarak dalgaların yarattığı hareketlere karşıt hareketler üreterek köprü ucunun sabit kalması sağlanmıştır. Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin ileri ve ters kinematik denklemleri analitik yöntem ile hesaplanarak uç noktanın kesin denklemi üretilmiştir. C# ile yapılan simülasyon ve ANSYS ile yapılan simülasyonlarla, simülasyon ortamında denklemlerin doğruluğu kanıtlanmıştır. Sistem testleri kapsamında, hareket platformunun mafsallarında oluşan mekanik boşluklar nedeniyle sapmalar meydana gelebilmektedir. Bu sapmaya sebep olan temel neden, hareket platformundaki mekanik boşluklardan kaynaklı sistemin salınım yapmasıdır. Mekanik boşluklar nedeniyle kule yapısında  $\pm 0.5^\circ$  eğilme gözlemlenebilmektedir. Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin uç noktası hareket platformu ve kompanzasyon modu pasif durumda tüm yönlerde ortalama 20 mm sapma olduğu gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında yapılan gözlemlerde dalga yüksekliğinin sapmaya neden olmadığı, alt hareket platformunda olan mekanik boşluklar nedeniyle, ani ivme değişimlerinin sistemin tam olarak bu hareketleri takip edememesine ve sapmasına neden olabildiği gözlemlenmiştir. Bu tez; Açık Dengeleyici Transfer Sistemi konulu olarak hazırlanmış Türkiye'deki ilk tez çalışmasıdır.

Sistem testlerine ait sonuçlar Şekil 6.1 ile Şekil 6.2'de yer almaktadır. Ayrıca sistem sapma oranı ve büyüklükleri Çizelge 6.1'de yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde deniz durumu-1 ve deniz durumu-2 için açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin hedeflenen toleranslar içerisinde kompanzasyon sağladığı tespit edilmiştir.

Deniz durumu – 1 koşulları altında gerçekleştirilen testlerde açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin uç noktasında meydana gelen sapma

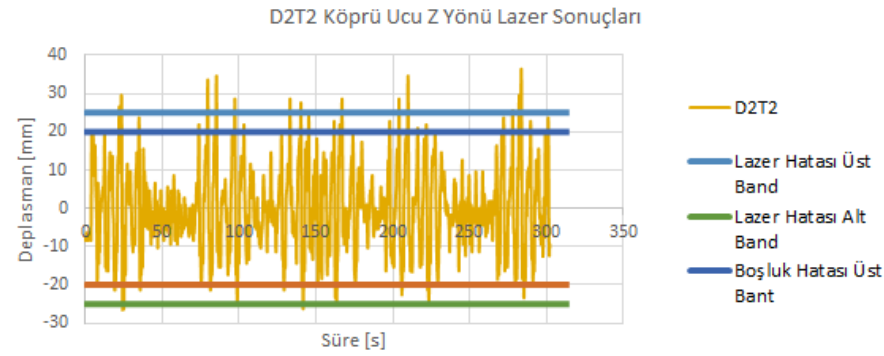
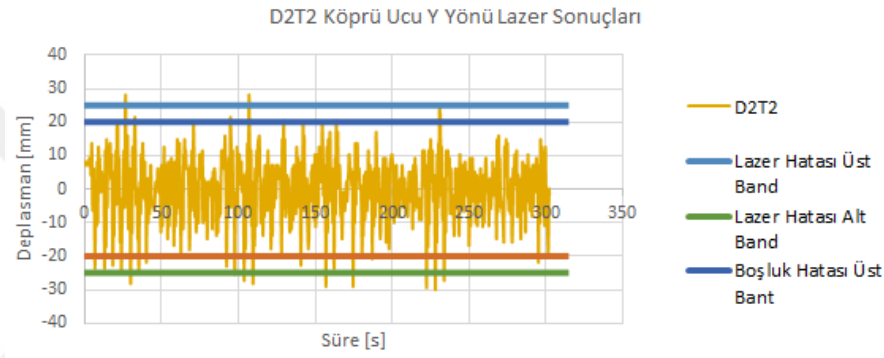
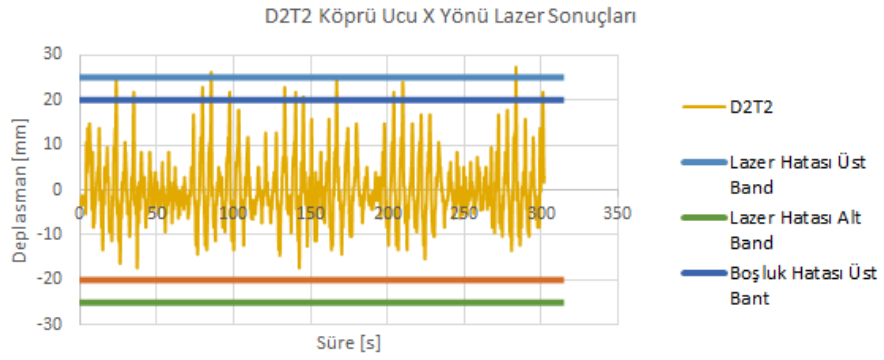
büyüklikleri her 3 eksen için Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Meydana gelen maksimum sapma miktarının tüm yönlerde boşluktan kaynaklı oluşturulan bant içinde kaldığı ölçümlenmiştir.



Şekil 6.1: Dalga Durumu-1 Test Sonuçları

Deniz durumu – 2 koşulları altında gerçekleştirilen testlerde açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin uç noktasında meydana gelen sapma büyüklükleri her 3 eksen için Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Meydana gelen maksimum

sapma miktarının tüm yönlerde boşluktan kaynaklı oluşturulan bant içinde %98 oranında kaldığı ölçümlenmiştir.



**Şekil 6.2:** Dalga Durumu-2 Test Sonuçları

Deniz durumu 1 ve deniz durumu 2 koşullarında gerçekleştirilen sistem testlerinde açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin uç noktası ölçülen düşey ivme, ağırlık merkezinde meydana gelen yer değiştirme ve uç noktalarında oluşan sapma oranı Çizelge-6.1’de yer almaktadır.

Açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin çalışma alanını oluşturan servis gemileri, yük ve insan transferi gerçekleştirirken pozisyonunu korumaktadır. Bu koşullar altında gemide meydana gelen düşey ivme, testlerde köprünün uç

noktasında ölçülen düşey ivmeye göre daha düşük mertebelerde olması beklenmektedir. Dolayısıyla deniz durumu 1 testlerinde köprü uç noktasında ölçülen  $4.49 \text{ m/s}^2$  ve deniz durumu 2 testlerinde köprü uç noktasında ölçülen  $8.92 \text{ m/s}^2$  hareket kaynaklı dinamik ivmeler altında sistemin kompanzasyon sağlaması; açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin operasyonu başarı ile gerçekleştirebileceğini göstermektedir.

Deniz durumu 1 ve deniz durumu 2 testleri 300 s boyunca gerçekleştirilmiştir. Test süresince ölçülen maksimum genliklerin harmonik olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir ve test sürelerinin yeterli olduğuna karar verilmiştir. Test süreleri boyunca deniz durumu 1 koşulları altında meydana gelen sapma büyüklüklerinin mekanik boşluk kaynaklı sapma bandının %100 oranında, deniz durumu 2 koşulları altında meydana gelen sapma büyüklüklerinin ise mekanik boşluk kaynaklı sapma bandının %98.4 oranında altında kaldığı ölçülmüştür. Bu değerler açık deniz hareket dengeleyici sistemlerin operasyonu başarı ile gerçekleştirebileceğini göstermektedir.

**Çizelge 6.1: Test Sonuçları**

Test	Köprü Ucu Düşey İvme - az ( $\text{m/s}^2$ )	Ağırlık merkezi düşey yer değiştirme (m)	+/-40mm Üzerinde kalan oran(%)			+/-25mm & +/-40mm altında kalan oran(%)			+/-25mm Altında kalan oran(%)		
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Deniz Durumu-1	4.49	0.45	0	0	0	0	0	0	100	100	100
Deniz Durumu-2	8.92	0.87	0	0	0	0.19	0.71	1.59	99.81	99.29	98.41

1/10 ölçekli modelde meydana gelen mekanik boşluk kaynaklı sapmalar, hareket platformuna deniz hareketlerinin aktarılmasını sağlayan mafsallar kaynaklı meydana gelmektedir. 1/1 ölçekli açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin gemiye yerleştirilmesi durumunda, bu sistem geminin mukavim açık güvertesine yerleştirilecektir ve deniz hareketleri direkt olarak sistemin kule yapısına etki edecektir. Böylelikle test düzeneğinde meydana gelen mekanik sapmaların 1/1 ölçekli sistemde meydana gelmeyeceği öngörülmektedir.

Servis gemilerinde kullanılan açık deniz hareket dengeleyici transfer sisteminin başarılı olarak operasyonlarını gerçekleştirmesiyle kaza vakalarının önlenmesi, işçi sağlığının korunması ve servis gemilerine güvenli teknik personel ve yük transferinin gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Twigt, N. (2020). Access systems for offshore wind turbines: A review of conventional and walk-to-work transfer methods (Master's thesis, Aalborg University Esbjerg)
- [2] Liang, L., Le, Z., Zhang, S., & Li, J. (2020). Modeling and controller design of an active motion compensated gangway based on inverse dynamics in joint space. *Ocean Engineering*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106864>
- [3] Yin, L., Qiao, D., Li, B., Liang, H., Yan, J., Tang, G., & Ou, J. (2022). Modeling and controller design of an offshore wind service operation vessel with parallel active motion compensated gangway. *Ocean Engineering*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112999>
- [4] Yin, R., Xie, W., Wen, Y., Zhang, C., Chen, W., & Zhang, W. (2023). Robust wave compensation controller design for an active hexapod platform with time-varying input delays. *Ocean Engineering*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114084>
- [5] Li, B., Liang, H., Chen, X., & Araujo, R. (2021). Study of telescopic gangway motions in time domain during offshore operation. *Ocean Engineering*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108692>
- [6] Sangvik, H. (2021) Digital Twin of 3d Motion Compensated Gangway Use of Unity Game Engine and TwinCAT PLC Control for Hardware-in-the-Loop Simulation (Master's thesis). University of Agder, Grimstad.
- [7] Wang, J., Zhang, S., Cheng, J., Li, Y., Shen, Y., & Wu, Z. (2023). Modeling and Simulation of a Turbine Access System with Three-Axial Active Motion Compensation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/jmse11122237>
- [8] Zhang, H., Wei, Y., Wang, Y., Song, F., & Cao, Y. (2023). Ocean Wave Active Compensation Algorithm For Offshore Gangway Based on Optimized RBF Neural Network. *2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2023*, 1167–1172. <https://doi.org/10.1109/ICMA57826.2023.10216265>
- [9] G. Wen, S. S. Ge, F. Tu and Y. S. Choo, (2017)" Artificial Potential-Based Adaptive H $\infty$  Synchronized Tracking Control for Accommodation Vessel," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5640-5647, July 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2677330.
- [10] Wei, Y., Wang, A., & Han, H. (2019). Ocean wave active compensation analysis of inverse kinematics for hybrid boarding system based on fuzzy algorithm. *Ocean Engineering*, 182, 577-583. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.059>
- [11] Cai, Y., Zheng, S., Liu, W., Qu, Z., Zhu, J., & Han, J. (2021). Sliding-mode control of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation using velocity feedforward. *Ocean Engineering*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109477>
- [12] Monaco, E., Traverso, A., & Lanzoni, M. (2021). Development and validation of a novel hybrid wave-pendulum energy converter. *Energies*, 14(20), 6604. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6604>
- [13] Boumzaouad, M. Y. (2017). Simulation study on the active motion compensation of an offshore gangway [Master's thesis, Delft University of Technology].

- [14] F. Yu. (2017) "Modeling, Simulation and Control of Motion Compensated Gangway in Offshore Operations." MA thesis
- [15] DNV GL AS(2022) DNV-ST-0358 Offshore gangways STANDARD
- [16] Chu, Y., Aesøy, V., Bunes, Ø., & Pedersen, E. (2016) "Modeling and simulation of the accumulator during active heave compensation operations." In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (Vol. 49927, p. V001T01A007). American Society of Mechanical Engineers.
- [17] Do, K. D., & Pan, J. (2008). Nonlinear control of an active heave compensation system. *Ocean Engineering*, 35(5), 558-571. [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.11.005>]
- [18] Fossen, Thor I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons Ltd..
- [19] Lebret, G., Liu, K., & Lewis, F.L. (1993). Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator. *J. Robot. Syst.*,
- [20] Katsouris, G., & Savenije, L. (2016). *Offshore Wind Access 2017*. Energie Onderzoekscentrum Nederland.
- [21] Gebruers, C. (2015). Safety assessment of offshore O&M access with regard to human resources. LEANWIND.
- [22] G+ Global Offshore Wind Health & Safety Organisation. (2019). *G+ Global Offshore Wind Health & Safety Organisation 2018 incident data report*. Energy Institute, Londen.
- [23] TNO. (2019). *Offshore Wind Access 2019*. TNO, Petten.
- [24] Fossen, T.I., & Perez, T. (2004). *Marine systems simulator (MSS)*. URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>
- [25] Cerda Salzmann, D.J.(2010) "Ampelmann: Development of the Access System for Offshore Wind Turbines." Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands,.
- [26] Yang, W.; Zhang, Z.; Zhang, A.(2008) "Research on an active heave compensation system for remotely operated vehicle." In *Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Changsha, China, 20–22 October 2008; pp. 407–410.
- [27] Küchler, S.; Sawodny, O.(2010) "Nonlinear control of an active heave compensation system with time-delay." In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Control Applications*, Yokohama, Japan, 8–10 September 2010; pp. 1313–1318.
- [28] Xie, T.; Huang, L.; Guo, Y. "Modeling and simulation analysis of active heave compensation control system for electric-driven marine winch under excitation of irregular waves." *Meas. Control* 2022, 56, 1004–1015.
- [29] Christopher, N. "Offshore Access Systems." U.S. Patent 5074382, 24 December 1991.
- [30] Tang, G.; Lu, P.; Hu, X. "Control system research in wave compensation based on particle swarm optimization." *Sci. Rep.* 2021, 11, 15316.
- [31] Yin, R.; Xie, W.; Wen, Y. "Robust wave compensation controller design for an active hexapod platform with time-varying input delays." *Ocean Eng.* 2023, 274, 114084.
- [32] Chen, W.; Wang, S.; Li, J. "An ADRC-based triple-loop control strategy of ship-mounted Stewart platform for six-DOF wave compensation." *Mech. Mach. Theory* 2023, 184, 105289.
- [33] Liu, J.; Chen, X. "Adaptive control based on neural network and beetle antennae search algorithm for an active heave compensation system." *Int. J. Control Autom. Syst.* 2022, 20, 515–525.

- [34] Chen, B.; Chiang, M. "Simulation and experiment of a turbine access system with three-axial active motion compensation." *Ocean Eng.* 2019, 176, 8–19.
- [35] Huang, Y.; Lin, C.; Chiang, H. "Development of an Offshore Turbine Access System with Four-Axial Active Motion Compensation." In *Proceedings of the 2022 8th International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*, Nantou, Taiwan, 21–23 April 2022; pp. 127–129.



## ÖZGEÇMİŞ

**Burak ÖZDEMİR**

### ÖĞRENİM DURUMU

- Yüksek Lisans : (2024, T.C. İstanbul Gedik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Tezli)
- Lisans : (2020), T.C. Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM

- Advens Mühendislik A. Ş, Ar-Ge Mühendisi (2020-)