

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SARKAÇ TİPİ DALGA ENERJİ SİSTEMİ HİDRODİNAMİK
PERFORMANSININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Fatih ALVER

OCAK 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SARKAÇ TİPİ DALGA ENERJİ SİSTEMİ HİDRODİNAMİK
PERFORMANSININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Fatih ALVER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 12 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 01 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Betül SARAÇ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Sarkaç Tipi Dalga Enerji Sistemi Hidrodinamik Performansının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Betül SARAÇ’a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Doç. Dr. Emre PEŞMAN’a ve Sayın Doç. Dr. Ali Ekber ÖZDEMİR’e, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Öğr. Gör. Cihan NACAK’a ve Öğr. Gör. M. Latif BAYRAM’a teşekkür ederim.

Ayrıca bu stresli dönemde manevi desteklerini her an üzerimde hissettiğim, hep arkamda olan eşim Duygu ODABAŞ ALVER’e ve canım kızım Alya ALVER’e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, aldığım tüm kararlarda arkamda olan, engin tecrübeleri ve bilgilerinden faydalandığım, maddi manevi desteklerini her an hissettiğim annem Ayşe ALVER ve babam Hasan ALVER’e, kardeşlerim Prof. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN, Ülker ÇÜRÜKSULU, Hülya ÖZCAN ve Derya YANCI’ya teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Yapmış olduğum bu tez çalışmasının daha sonra yapılacak olan çalışmalara ışık tutmasını ve katkı sağlamasını dilerim.

Fatih ALVER

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Sarkaç Tipi Dalga Enerji Sistemi Hidrodinamik Performansının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Betül SARAÇ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/01/2024

Fatih ALVER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Dalga Enerjisi Potansiyeli	4
1.2. Dalga Çeşitleri.....	7
1.2.1. Düzenli Dalgalar	7
1.2.2. Düzensiz Dalgalar	9
1.3. Dalga Enerji Yöntemleri ve Güç Hesabı.....	10
1.3.1. Deneysel Yöntem.....	10
1.3.2. Sayısal Yöntem	11
1.3.3. Dalga Güç Hesabı	12
1.4. Dalga Enerji Sistemlerinin Sınıflandırılması	13
1.5. Dalga Enerji Sistemlerinde Güç Çıkışlarının Sınıflandırılması	15
1.6. Tezin Amacı	17
1.7. Literatür Özeti	18
1.8. Kapsam.....	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	25
2.1. Ordu İli Dalga Karakteristiğinin Belirlenmesi	25
2.2. Yüzer Platform Optimizasyonu.....	26
2.2.1. Örnek P1 Platform Analizi.....	29
2.3. STDES Optimizasyonu	44
2.3.1. Sarkaç ve Dişli Sisteminin Analizi	46
2.3.2. Alternatör Analizi	47
2.4. STDES Çalışma Prensibi ve Prototip Üretimi	51

2.4.1. Çalışma Prensibi	51
2.4.2. Prototip Üretimi	53
2.5. Deney Düzeneği Kurulumu.....	55
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	57
3.1. Yüzer Platformların Hidrodinamik Analiz Sonuçları	57
3.2. Sarkaç ve Dişli Mekanizmasının Analiz Sonuçları	68
3.3. Alternatör Analiz Sonuçları.....	69
3.4. STDES Prototip Deney Sonuçları	72
3.5. Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	74
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
5. KAYNAKLAR	80
6. EKLER.....	85
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

SARKAÇ TİPİ DALGA ENERJİ SİSTEMİ HİDRODİNAMİK PERFORMANSININ
NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Fatih ALVER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Betül SARAÇ
2024, 84 Sayfa, 12 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, deniz dalgalarından enerji elde etmek için özgün bir Sarkaç Tipi Dalga Enerji Sistemi (STDES) tasarlanmış ve hidrodinamik performansı nümerik olarak, prototip performansı deneysel olarak test edilmiştir. Dalga Enerji Sistemleri, deniz dalgalarının enerjisini yakalamak için kullanılan cihazlardır. Ordu ili dalga verileri baz alınarak 6 farklı platform geometrisi incelenmiş ve Hesaplamalı Akışkan Dinamiği analizi ile platformların performansları değerlendirilmiştir. Ardından, sarkaç ve dişli sistemleri ile alternatör analizleri yapılmıştır. Ansys yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlarla bir prototip üretilmiş ve 12 farklı dalga parametresi altında laboratuvar koşullarında test edilmiştir. Yapılan analizler ve deneyler, sistemin %22 analiz verimine sahip olduğunu ancak deneylerde %17 verim elde edildiğini göstermiştir. Ancak, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında elde edilen verim %15-25 aralığındaki bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür. Gelecekte, daha gerçekçi deniz koşulları için düzensiz dalga spektrumlarının kullanılacağı ve gerçek deniz testlerinin yapılacağı araştırmalar önerilmektedir. Sonuçlar, farklı çalışma bölgelerinde çok sayıda STDES ile enerji hasatı tarlalarının kurulabileceğini ve böylece bölgenin enerji ihtiyacına katkı sağlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, Dalga enerjisi, Sarkaç tipi dalga enerji sistemi

PhD. Thesis

SUMMARY

EXAMINING THE HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF A PENDULUM TYPE WAVE ENERGY SYSTEM NUMERICALLY AND EMPIRICALLY

Fatih ALVER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Naval Architecture and Marine Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Betül SARAÇ
2024, 84 Pages, 12 Pages Appendix

In this study, a novel Pendulum Type Wave Energy System (PWES) is designed, and its hydrodynamic performance is tested numerically, and prototype performance is tested experimentally. The research evaluates the potential for harvesting wave energy by considering the dynamic interactions among various mechanisms involved. Based on wave data from Ordu province, 6 different platform geometries were examined and evaluated using Computational Fluid Dynamics analysis to assess their performance. Subsequently, analyses were conducted on pendulum and gear systems along with alternator assessments. A prototype was produced based on results obtained using Ansys software, and it was tested under 12 different wave parameters within laboratory conditions. Analyses and experiments revealed an analytical efficiency of 22%, while experimental efficiency reached 17%. However, when compared to similar studies in the literature, the achieved efficiency of 17% aligns within the range of 15-25% reported in other oscillating WES studies. Future research is suggested to use irregular wave spectra for more realistic sea conditions and to conduct tests in actual marine environments. Moreover, the results suggest the establishment of energy harvesting fields using numerous PTWES in various operating zones to contribute to the region's energy needs.

Key Words: Renewable energy, Wave energy, Pendulum type wave energy systems

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	2000-2015 yılları yenilenebilir enerji kapasitesi ve büyüme oranı (IRENA, 2017)	2
Şekil 2.	Kaynaklara Göre Küresel Elektrik Üretimi (IRENA, 2017)	4
Şekil 3.	Dünya dalga enerji yoğunluk atlası (kW/m) (Mørk vd., 2010)	5
Şekil 4.	Türkiye dalga haritası (Özhan & Abdalla, 2002)	6
Şekil 5.	Düzenli dalga formu (Godfrey, 2004)	8
Şekil 6.	Farklı dalga parametreleri ile oluşturulan düzensiz dalga spektrumu (Goda, 2010)	9
Şekil 7.	Farklı rüzgâr hızlarında Pierson-Moskowitz dalga spektrum değerleri	11
Şekil 8.	Deniz tabanına ve kıyıya olan uzaklığa göre DES sınıflandırılması (Falcão, 2010)	14
Şekil 9.	Dalga enerjisini yakalama prensibine göre DES sınıflandırılması (Ibáñez, 2008)	15
Şekil 10.	DES güç çıkış sistemlerinin sınıflandırılması (Pecher & Kofoed, 2017)	16
Şekil 11.	Doğu Karadeniz illeri ve Ordu ili detayı. (Akpınar ve Kömürcü (2012)	25
Şekil 12.	6 farklı platform modelinin üç boyutlu görselleri, teknik ölçüleri, yüzmeye merkezi ve ağırlık merkezi konumları.	27
Şekil 13.	Örnek P1 platformunun katı model kesiti ve yüzey model görünümü	29
Şekil 14.	Statik analiz görüntüsü	30
Şekil 15.	P1 platformu altı farklı serbestlik derecesi hareketi.	31
Şekil 16.	P1 platformu Ansys AQWA analiz akış şeması	32
Şekil 17.	Ansys AQWA programında P1 platform ve STDES ağırlıkları ve konumları	33
Şekil 18.	Katineri bağlantı şeklinin iki boyutlu görüntüsü	34
Şekil 19.	Katineri bağlantı şeklinin AQWA’ da üç boyutlu görüntüsü	36
Şekil 20.	P1 platformuna ait yüzey ağ yapısı görüntüsü	37
Şekil 21.	Hidrodinamik Difraksiyon analizi ekran görüntüsü	38
Şekil 22.	P1 modelinin düzenli bir dalga da yapmış olduğu salınım hareketi görseli	39
Şekil 23.	P1 platformu düzenli dalga analizi görüntüsü	42
Şekil 24.	P1 zamana bağlı düzenli dalga hareketleri	42
Şekil 25.	P5 platformuna ait farklı salma uzunları ve bağlantı halatı şekilleri	44

Şekil 26.	Mekanik yalpa hareketi düzeneğinin kesit görüntüsü	46
Şekil 27.	Mekanik yalpa hareketi sisteminin analiz görüntüsü.....	47
Şekil 28.	Eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörler a) Eksenel sabit mıknatıs dizim b) Eksenel sabit Halbach mıknatıs dizim	49
Şekil 29.	Eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörün Ansys Maxwell'de analiz görüntüsü	50
Şekil 30.	STDES mekanizması 3d görseli ve ana kısımları.....	51
Şekil 31.	Sağ ve sol dişli sistemlerinin çalışma prensipleri	52
Şekil 32.	Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatör üretim parçaları	54
Şekil 33.	Sağ STDES mekanizmasının sarkaç-dişli parçaları ve montaj görüntüsü	55
Şekil 34.	Mekanik deney düzeneği kurulumu.....	56
Şekil 35.	1:2 ölçekli Ordu ili dalga parametresi yoğunluk skalası ve platformların doğal yalpa periyodları	58
Şekil 36.	Platformların farklı dalga geliş açılarında yapmış olduğu rotasyonel hareketler. (Örnek dalga değerleri: $T=1,5$ sn, $H=0,2$ m)	60
Şekil 37.	P5 ve P5A platformlarının yapmış olduğu altı serbestlik dereceli hareketlerin karşılaştırılması.....	61
Şekil 38.	Farklı dalga açılarında P5A platformunun halat gerilmeleri ($T=3$ sn ve $H=0,6$ m).....	62
Şekil 39.	Jonswap düzensiz dalga karakteristiği.....	63
Şekil 40.	Düzensiz dalga hareketi ile P5A platformunda oluşan 6 serbestlik dereceli hareketi.....	64
Şekil 41.	Düzensiz dalgalarda oluşan P5A platformunun bağlama halatı gerilmeleri.....	65
Şekil 42.	$T=1,41$ sn periyotlu ve H_1, H_2, H_3 dalga yüksekliklerinde oluşan platform ortalama yalpa açısı değerleri	66
Şekil 43.	$T=2,12$ sn periyotlu ve H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 dalga yüksekliklerinde oluşan platform ortalama yalpa açısı değerleri	67
Şekil 44.	$T=2,82$ sn periyotlu ve H_1, H_2, H_3, H_4 dalga yüksekliklerinde oluşan platform ortalama yalpa açısı değerleri	67
Şekil 45.	Örnek $T=1,41$ sn ve $H=0,125$ m dalga parametresinin alternatörde oluşturduğu devir	69
Şekil 46.	Alternatörlerin manyetik akı yoğunlukları a) Eksenel akılı sabit mıknatıslı b) Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı c) Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı ve çelik levhalı	70
Şekil 47.	Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün üç faz volt gerilimi.....	70
Şekil 48.	Alternatör analiz görüntüsü (sağ üst), AC-DC köprü doğrultucusu şematik çizimi (sol üst), farklı dirençlerde oluşan volt ve amper değerleri (sol alt), güç değeri (sağ alt)	71

Şekil 49. Deney düzeneğinde 140 dev/dk alternatör volt, akım ve güç değerleri	73
Şekil 50. Alternatör analiz ve deney devir sayıları	74
Şekil 51. Alternatör analiz ve deney güç değerleri	75
Şekil 52. STDES mekanizmasının analiz ve deney güç verimleri.....	76
Ek Şekil 1. T=1,41 sn H=0,25 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir	85
Ek Şekil 2. T=1,41 sn H=0,375 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir.....	85
Ek Şekil 3. T=2,12 sn H=0,125 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir.....	86
Ek Şekil 4. T=2,12 sn H=0,25 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir	86
Ek Şekil 5. T=2,12 sn H=0,375 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir.....	87
Ek Şekil 6. T=2,12 sn H=0,5 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir	87
Ek Şekil 7. T=2,12 sn H=0,625 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir.....	88
Ek Şekil 8. T=2,82 sn H=0,375 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir.....	88
Ek Şekil 9. T=2,82 sn H=0,5 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir	89
Ek Şekil 10. T=2,82 sn H=0,625 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir.....	89
Ek Şekil 11. T=2,82 sn H=0,75 m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir	90
Ek Şekil 12. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 261 dev/dk üç faz gerilimi.....	90
Ek Şekil 13. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 313 dev/dk üç faz gerilimi.....	91
Ek Şekil 14. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 182 dev/dk üç faz gerilimi.....	91
Ek Şekil 15. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 266 dev/dk üç faz gerilimi.....	92
Ek Şekil 16. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 320 dev/dk üç faz gerilimi.....	92
Ek Şekil 17. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 580 dev/dk üç faz gerilimi.....	93
Ek Şekil 18. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 710 dev/dk üç faz gerilimi.....	93

Ek Şekil 19. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 390 dev/dk üç faz gerilimi.....	94
Ek Şekil 20. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 500 dev/dk üç faz gerilimi.....	94
Ek Şekil 21. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 683 dev/dk üç faz gerilimi.....	95
Ek Şekil 22. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 725 dev/dk üç faz gerilimi.....	95



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin net dalga gücü (Morg vd., 2010).....	6
Tablo 2. DES güç çıkış sistemlerinin verimleri (Aderinto & Li, 2019).....	16
Tablo 3. 1995-2009 yılları saatlik Hs ve Ts deniz durumlarının oluşum sayısı	26
Tablo 4. Platform ve STDES sistemine ait yapısal özellikler.....	28
Tablo 5. Bağlama halatlarının teknik özellikleri ve bağlantı noktalarının koordinatları.....	35
Tablo 6. Hidrodinamik Difraksiyon analiz girdileri	38
Tablo 7. Parametrelerin ölçeklendirme faktörü	40
Tablo 8. Ordu ili 20 farklı dalga parametresi ve 1:2 Froud ölçekli dalga parametresi.....	41
Tablo 9. P5A'nın farklı dalga yüksekliklerinde 2,12 sn periyotlu yalpa açısı değerleri	45
Tablo 10. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı ve Halbach mıknatıslı alternatörlere ait tasarım parametreleri	48
Tablo 11. Farklı yalpa açısı değerlerinde alternatörde oluşan devir sayıları	68
Tablo 12. Farklı dalga parametrelerinde analiz sonucunda alternatör, dalga güç ve verim	72
Tablo 13. Farklı dalga parametrelerinde deney sonucunda alternatör, dalga güç ve verim	73

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DES	: Dalga enerji sistemi
STDES	: Sarkaç tipi dalga enerji sistemi
RAO	: Tepki genlik operatörü
SWAN	: Kıyı şeridi dalga modeli simülasyonu
PLA	: Poliaktik asid
PVC	: Polivinil klorür köpük
MSEA	: Manyetik sonlu elemanlar analizi
ECMWF	: Avrupa orta vadeli hava tahmini merkezi
Mtep	: Mega ton eşdeğer petrol
B	: Yüzdürme merkezi
G	: Ağırlık merkezi
∇	: Deplasman hacmi
Δ	: Deplasman tonajı
H	: Dalga yüksekliği
T	: Dalga periyodu
λ	: Dalganın uzunluğu
d	: Su derinliği
L_c	: Dalga tepeleri arasındaki uzunluk
c	: Dalga hızı
k	: Açısal dalga numarası
σ	: Açısal dalga frekansı
I	: Atalet momenti
P	: Dalga gücü
V	: Volt
A	: Akım
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
ohm	: Direnç

1. GENEL BİLGİLER

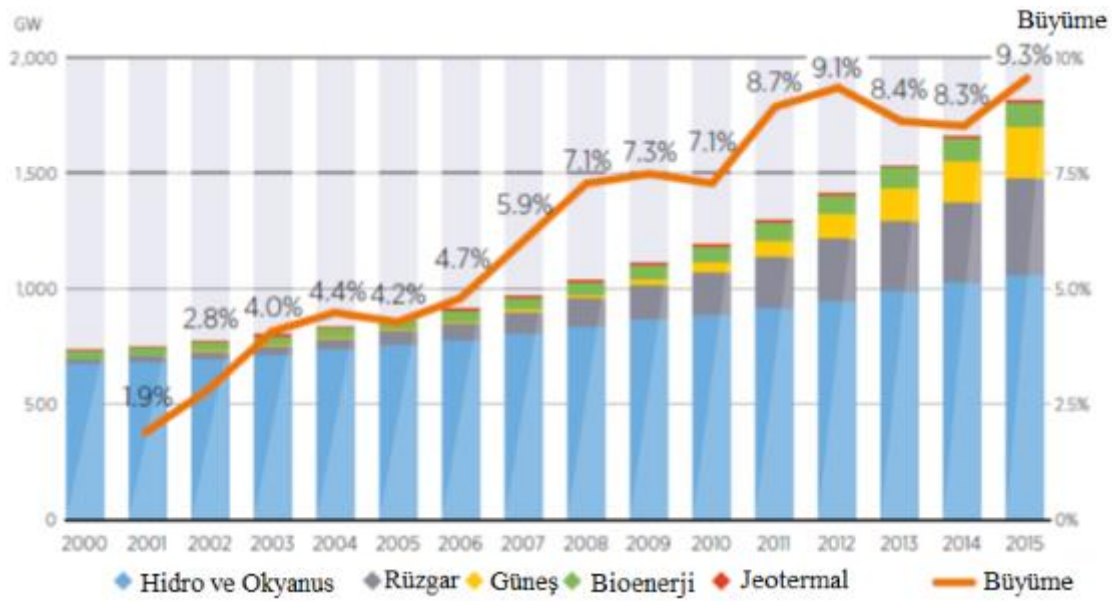
Günümüzde, toplumların karşı karşıya olduğu en önemli sorunlar iklim değişikliği, kirlilik, fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı ve artan enerji ihtiyacıdır. Bu sorunlar, endüstrileşme ve otomasyon süreçlerinden kaynaklanmıştır. Geçen yüzyıl boyunca, endüstrileşme dünya genelinde farklı hızlarda yayılmıştır. Sürekli artan bu süreç, başlıca olarak kömür, petrol, gaz ve bunların türevleri tarafından desteklenmektedir.

Küresel birincil enerji talebi 2000 ile 2014 yılları arasında kabaca üçte bir oranında artmış ve 2011'den bu yana yıllık ortalama büyüme yaklaşık %1,8 olmuştur. Bununla birlikte, büyüme oranları son zamanlarda yavaşlamış ve ülkelere özgü önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkeler, birincil enerji talebinde belirgin bir artışa tanık olmuştur. Gelişmekte olan ülkelerde enerji talebi artarken, gelişmiş ülkelerde yavaşlamış ve hatta azalmıştır. 20 yıl sonrasına bakıldığında, enerji talebinin 2014 yılına kıyasla %25 oranında artacağı öngörülmektedir (Hove & Patrick, 2015; REN21, 2019).

Enerji talebi ile ilişkilendirilen başlıca sorunlar, sera etkilerini ve iklim değişikliğini büyük ölçüde etkileyen kirlilik ve CO₂ emisyonlarıdır. Sanayi Devrimi'nden önce, atmosferdeki CO₂ seviyelerindeki dalgalanmaların temel nedeni, orman tahribatı ve arazi kullanım faaliyetlerinden kaynaklanmaktaydı. Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan emisyonlar, yaklaşık olarak 1920'lerden bu yana atmosferdeki CO₂'nin başlıca kaynağı olmuş ve günümüze kadar sürekli bir artış göstermiştir (Levin, 2012).

Son on yılda, karbon emisyonlarının ortalama büyüme hızı %2.2 oranındaydı. Ancak 2013 ile 2016 arasındaki dönemde bu hız neredeyse sabit kalarak %0.2'ye düştü, bu da önceki on yıl boyunca tehlikeli artış hızından farklı bir seyir izledi. CO₂ emisyonlarının azalmasının ana nedeni dünya genelinde kömür kullanımının azalmasıydı. Aynı zamanda enerji verimliliğindeki gelişmeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen enerji üretimindeki artış da bu azalmada etkili oldu (REN21, 2019). 1992 yılında, uluslararası topluluk tarafından paylaşılan ilk antlaşma olan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ni imzalayan devletler, karbon emisyonlarını azaltma konusunda taahhütte bulundular (Sands, 1992). Birkaç yıl sonra, 1997'deki Kyoto Protokolü, 2020 zaman dilimi için hedefler belirledi. 2015'te uluslararası topluluk tarafından Paris Anlaşması hazırlandı ve karbon emisyonlarını 2020 sonrası dönem için düzenlemeyi amaçlayan hedefler koydu (Nations, 1998).

Son yıllarda, 170’den fazla ülke yenilenebilir enerji hedefleri belirledi ve yaklaşık 150 ülke, yenilenebilir enerji teknolojilerine yatırım yapmayı teşvik etmek amacıyla politikalar uyguladı. Bu adımların amacı, iklim değişikliğini hafifletmek ve modern enerji kaynaklarına erişimi artırmaktır. Yenilenebilir enerji kapasitesinin fosil yakıtlara kıyasla fazla olması nedeniyle, yenilenebilir enerjiler şimdi dünya genelinde eklenen tüm yeni enerji üretim kapasitesinin %61’ini oluşturmaktadır (IRENA, 2017). Şekil 1’de sunulan verilere göre, 2015 yılında yenilenebilir enerji kaynakları için küresel kapasite 154 GW arttı, bu da 2014 yılına göre %9,3’lük bir büyüme hızını temsil etmektedir.



Şekil 1. 2000-2015 yılları yenilenebilir enerji kapasitesi ve büyüme oranı (IRENA, 2017)

Günümüzde küresel elektrik talebi 24.100 TWh büyüklüğüne ulaşmıştır ve yenilenebilir enerji kaynakları toplam miktarın %23,5'ini kapsamaktadır. Şekil 2, özellikle daha büyük pazarlarda hidroelektrik ve rüzgâr enerjisinin önemli katkıları görülmektedir. 1970'lerde, rüzgâr enerjisiyle birlikte enerji üretme olasılıklarını araştırmak için deniz dalgalarından enerji üretme fikri büyük ilgi gördü. Farklı yaklaşımlar denendi ve dalgaların kullanılmamış enerji potansiyeli önemli bir ilgi çekti. Rüzgâr enerjisi, bu alanda yapılacak sistematik araştırmaların öncülüğünü yapmış oldu. Dalga enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi enerji toplama için belirgin bir sistem geliştirmemiştir. Şu an Dalga Enerjisi, yenilenebilir enerjinin ayrılmaz bir parçasıdır. Giderek artan ve istikrarlı gelişmeler, dalganın enerji potansiyelinin çok fazla olduğunu kanıtlamaktadır (IRENA, 2017). Dalga enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi (örneğin, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidroelektrik enerji gibi) potansiyel

olarak temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Ancak, Şekil 2’de görüldüğü üzere, dalga enerjisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha az oranda kullanıldığı görülmektedir. Bunun temel nedenlerini başlıca şu şekilde sıralarsak:

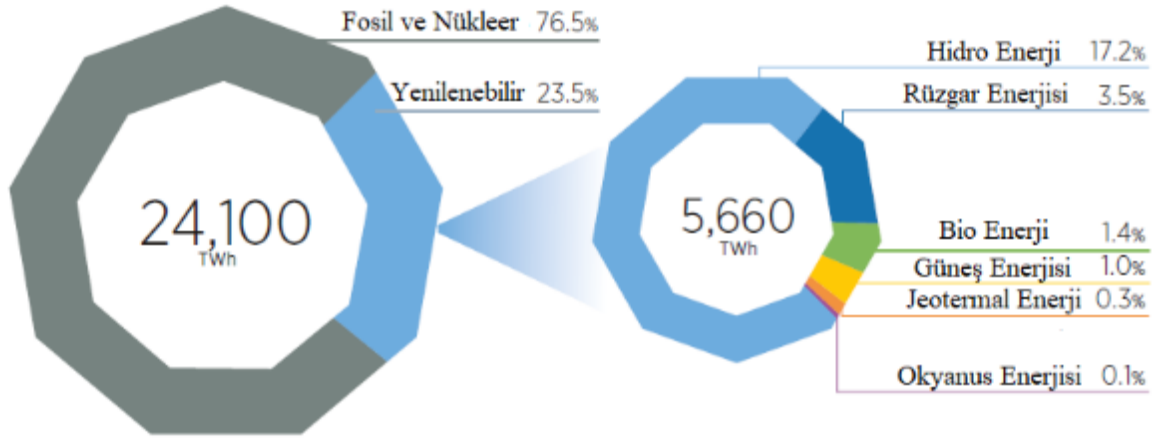
a) Teknolojik Olgunluk: Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları, daha uzun bir geçmişe ve daha olgun bir teknolojiye sahiptir. Bu kaynaklar üzerinde yıllar boyunca yapılan araştırma ve geliştirme, teknolojilerinin gelişmesine ve verimliliklerinin artmasına yardımcı olmuştur. Dalga enerjisi teknolojileri ise henüz bu kadar olgun değildir ve daha fazla Ar-Ge çalışması gerektirmektedir.

b) Maliyet ve Yatırım: Dalga enerjisi tesislerinin kurulumu ve işletilmesi genellikle diğer yenilenebilir enerji tesislerine göre daha maliyetlidir. Denizdeki ekipmanın dayanıklılığı ve maliyeti, dalga enerjisi projelerinin ekonomik olmasını zorlaştırabilir. Daha yüksek maliyetler, yatırımcıları ve endüstriyel oyuncuları diğer daha yaygın ve uygun maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirebilmektedir.

c) Çevresel Etkiler ve Deniz Ekosistemi: Dalga enerjisi tesislerinin deniz ekosistemine olan etkileri henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Projenin çevresel etkileri üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir. Bu belirsizlik, projelerin planlama ve izin alımı sürecini uzatmaktadır.

d) Altyapı ve İletim Zorlukları: Elde edilen enerjinin karaya iletilmesi ve depolanması, dalga enerjisi tesislerinin etkinliğini etkileyebilir. Verimli iletim hatlarına ve depolama sistemlerine ihtiyaç duyulur ve bu altyapı eksikliği, dalga enerjisinin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır.

Bu nedenlerden dolayı, dalga enerjisi potansiyel olarak büyük bir yenilenebilir enerji kaynağıdır, ancak halen gelişme aşamasındadır ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha az kullanılmaktadır. Sürekli teknolojik gelişmeler ve daha fazla araştırma ile bu engellerin aşılması ve daha etkili dalga enerjisi çözümlerinin geliştirilmesi mümkün olabilir.



Şekil 2. Kaynaklara Göre Küresel Elektrik Üretimi (IRENA, 2017)

Türkiye'nin birincil enerji tüketimi 2020 yılında 147,2 Mtep olarak gerçekleşirken, 2035 yılına kadar bu oranın 205,3 Mtep'e ulaşacağı tahmin edilmektedir. 2000-2020 yılları arası birincil enerji tüketiminin yıllık ortalama %3,1 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. 2020-2035 yılları arasında ise %2,2 oranında artış olacağı düşünülmektedir. Ayrıca 2020 yılında %16,7 olan ana enerji tüketimi içindeki sürdürülebilir enerji kaynaklarının payının 2035 yılında %23,7'ye yükseleceği öngörülmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Doğal enerji kaynaklarından olan dalga enerjisi üç tarafı denizlerle çevrili olan Türkiye için önemli bir enerji kaynağını oluşturmaktadır. Bu nedenle dalga enerjisi üzerine yapılacak olan çalışmalar, enerjiye olan talebin gün geçtikçe arttığı ülkemizde önemli bir rol oynayacaktır.

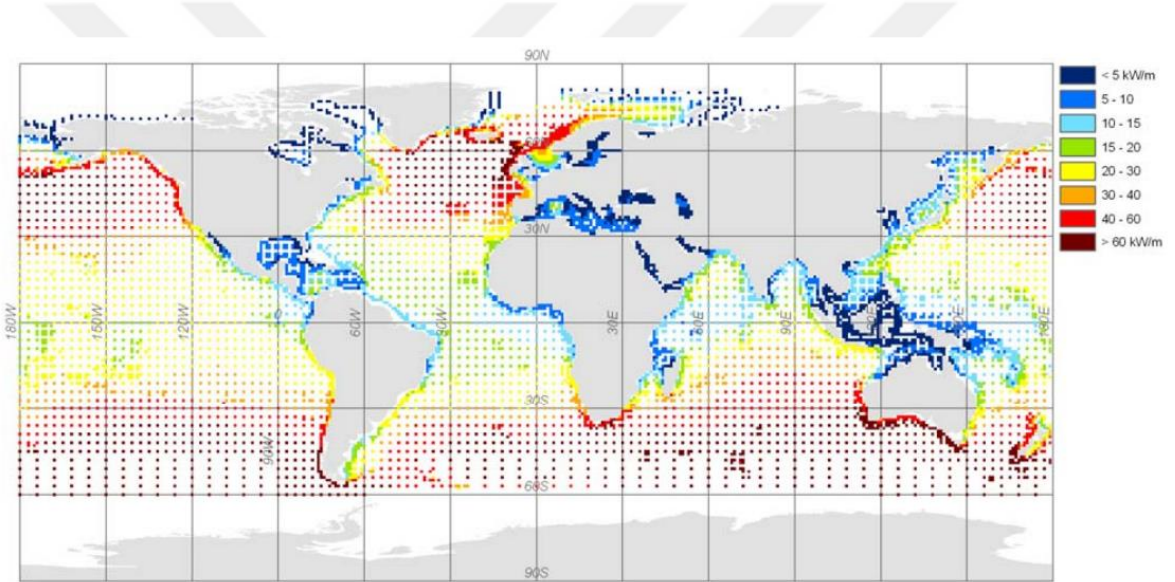
1.1. Dünya'da ve Türkiye'de Dalga Enerjisi Potansiyeli

Yenilenebilir enerji sınıfında, deniz enerjisi Dünya genelinde farklı kaynaklara dağılmış olan olağanüstü bir potansiyel sunmaktadır. Bu kaynaklar; dalgalar, gelgit ve deniz akıntıları, deniz termal enerji ve osmotik enerji (tuzluluk gradyanı) gibi farklı çeşitlerde bulunmaktadır. Deniz enerjisinin çekiciliği, Dünya'nın %70'inin su ile kaplı olması ve nüfusun yaklaşık %44'ünün kıyılara yakın bölgelerde yoğunlaşmış olması gerçeğinden kaynaklanmaktadır (Tollefson, 2014).

Dalga enerjisine odaklandığımızda, küresel anlamda teorik olarak hesaplanan dalga enerji potansiyeli yaklaşık 32.000 TW saat/yıl olarak hesaplanmıştır (Edenhofer vd., 2012). Dalga enerjisinin diğer önemli yönleri, güneş ve rüzgâr enerjisine göre daha yüksek enerji

yoğunluğuna sahip olmasıdır. Birim m^2 alanda elde edilen enerji dalgadan $2-3 \text{ kW/m}^2$, güneşten $0.1-0.2 \text{ kW/m}^2$ ve rüzgârdan $0.4-0.6 \text{ kW/m}^2$ olacak şekilde elde edilir (Borthwick, 2016; Reikard & Bidlot, 2017).

Dalga enerjisi, birçok diğer yenilenebilir enerji kaynağı türüyle karşılaştırıldığında Dünya üzerinde eşit bir şekilde dağılmamaktadır. Şekil 3'te görülen dalga atlası, her metrekareye düşen teorik dalga akışlarını dünya genelinde göstermektedir. En yüksek kaliteli dalga modeli verileri, tarihsel ölçümlerle birleştirilmiştir. Bu veri seti özellikle ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmini Merkezi) WAM model arşivinden elde edilmiştir ve 6 saatlik aralıklarla 10 yıllık bir dönemi kapsamaktadır (Arinaga & Cheung, 2012; Mørk vd., 2010).



Şekil 3. Dünya dalga enerji yoğunluk atlası (kW/m) (Mørk vd., 2010)

Dünyada, dalga enerjisi için en verimli bölgeler, Kuzey ve Güney yarımkürelerin 40° ile 60° enlemleri arasında yer alan alanlardır. Ancak yıllık ortalama potansiyel bakımından en yüksek alana sahip bölgeler, Güney yarımkürede, 40° ile 60° enlemleri arasındadır (López vd., 2013). Dalga enerjisi açısından verimli bazı bölgelerin sahip olduğu net dalga gücü Tablo 1'de belirtilmiştir (Mørk vd., 2010).

Bazı ülkelerin dalga güçleri; İngiltere 120 GW, İrlanda 21 GW, Danimarka 3.4 GW, Portekiz 10GW, İsveç 1GW ve Akdeniz kıyısındaki İspanya, Fransa, İtalya ve Yunanistan'ın toplam dalga enerjisi potansiyeli ise 30 GW olarak hesaplanmaktadır (Vicinanza vd., 2013).

Tablo 1. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin net dalga gücü (Morg vd., 2010)

Bölge	P_{net} (GW)
Avustralya ve Yeni Zelanda	574
Güney Amerika'nın batısı	324
Avrupa'nın kuzeyi ve batısı	286
Asya'nın güney doğusu ve Malenezya	283
Kuzey Amerika'nın batısı	207
Güney Amerika'nın doğusu	202

Üç tarafı denizlerle çevrili olan Türkiye'nin, Marmara Denizi dışındaki açık deniz kıyılarının toplam uzunluğu ortalama 8210 km'dir. Türkiye'de dalga enerji potansiyeli ile ilgili ilk çalışmalar 1994-2000 yılları arasında yapılmıştır (Özhan & Abdalla, 2002). NATO TU-WAVE projesi olarak adlandırılan bu projede, Türk sahillerini ve Karadeniz bölgesini etkileyen dalga iklimini araştırmayı amaçlayan kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. NATO TU-WAVES Projesi verilerinden faydalanarak yaklaşık belirgin dalga periyodu (T) ve dalga yüksekliği (H) değerleri belirlenen istasyonlardan elde edilerek Şekil 4'te görüldüğü üzere bir dalga haritası oluşturulmuştur.



Şekil 4. Türkiye dalga haritası (Özhan & Abdalla, 2002)

NATO TU-WAVE projesi kapsamında, Türkiye farklı denizlerin ortalama yıllık dalga enerjisi potansiyelleri aşağıdaki gibi gözlemlenmiştir.

- Karadeniz: 1.96-4.22 kWh/m
- Ege Denizi: 2.86-8.75 kWh/m
- Marmara Denizi: 0.31-0.69 kWh/m
- Akdeniz: 2.59-8.26 kWh/m
- İzmir-Antalya arası: 3.91-12.05 kWh/m

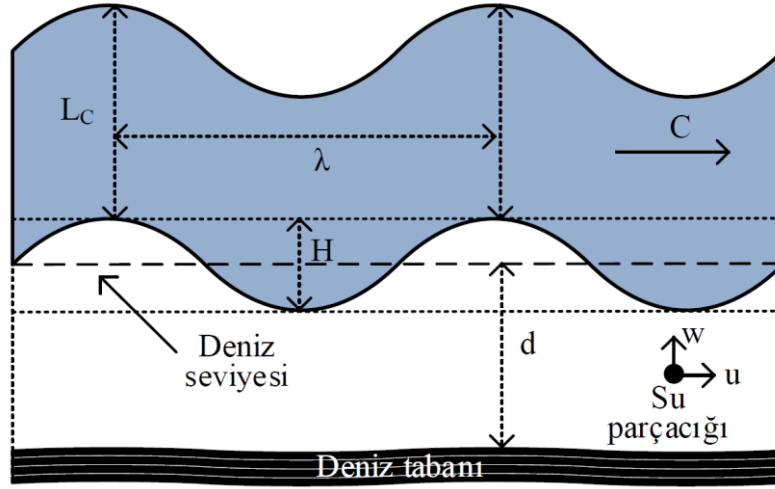
Elde edilen bu dalga enerjisi güç değerleri Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarından olan dalga enerjisi sınıfında ciddi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışmasında, ülkemizin alternatif bir dalga enerji kaynağı olabileceği düşüncesiyle Karadeniz'in Ordu ili sahilini kapsayan bir dalga enerji sistemi (DES) mekanizmasının enerji potansiyelinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

1.2. Dalga Çeşitleri

Dalga oluşumları, üç farklı şekilde meydana gelir. Bunlar; rüzgâr kaynaklı dalgalar, depreme bağlı dalgalar ve gel-git kaynaklı dalgalar. Depreme bağlı dalgalar, deniz tabanında gerçekleşen depremlerin neden olduğu sarsıntılar sonucu meydana gelirler. Gel-git olayı ise ortalama deniz seviyesindeki değişimlerin, dalga oluşumuna yol açan bir etkidir. Enerji üretimi genellikle rüzgâr kaynaklı dalgalar ile sağlanır. Deniz üzerindeki rüzgârın etkisiyle ortaya çıkan hareketler, deniz dalgalarını meydana getirir. Bu tür dalgalara "rüzgâr kaynaklı deniz dalgaları" denir. Rüzgâr kaynaklı bir dalga, denizdeki rüzgârın hızına, rüzgârın süresine ve "feç" uzunluğuna bağlı olarak boyut değiştirir. Dalga tahmin modellerinde oldukça sık kullanılan terimlerden biri olan "Feç," rüzgârın yönünde genellikle büyük bir değişiklik olmadan, denize enerji aktarmak için ne kadar mesafe kat ettiğini ifade eder (Godfrey, 2004).

1.2.1. Düzenli Dalgalar

Düzenli deniz dalgası tek bir genliğe ve frekansa sahip olan bir sinüs dalgası gibi modellenilmektedir. Bu modelin karakteristiklerine ait gösterim Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Düzenli dalga formu (Godfrey, 2004)

Şekil 5’te, λ dalganın uzunluğunu (m), d su derinliğini (m), H dalganın yüksekliğini (m), C dalga hızını (m/s) ve L_c dalga tepeleri arasındaki uzunluğu (m), u su parçacığının yatay, w ise dikey hız bileşenlerini tanımlamaktadır. Bir periyotta (T), λ uzunluğu kadar yol alan bir dalganın hızı matematiksel olarak denklem (1)’de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

Su parçacığı hızının hareket halindeki yatay ve dikey bileşen değerlerinin eşitlikleri denklem (2) ve (3) verilmiştir.

$$u = \frac{\pi H}{T} \cos(kx - \sigma t) \quad (2)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \sin(kx - \sigma t) \quad (3)$$

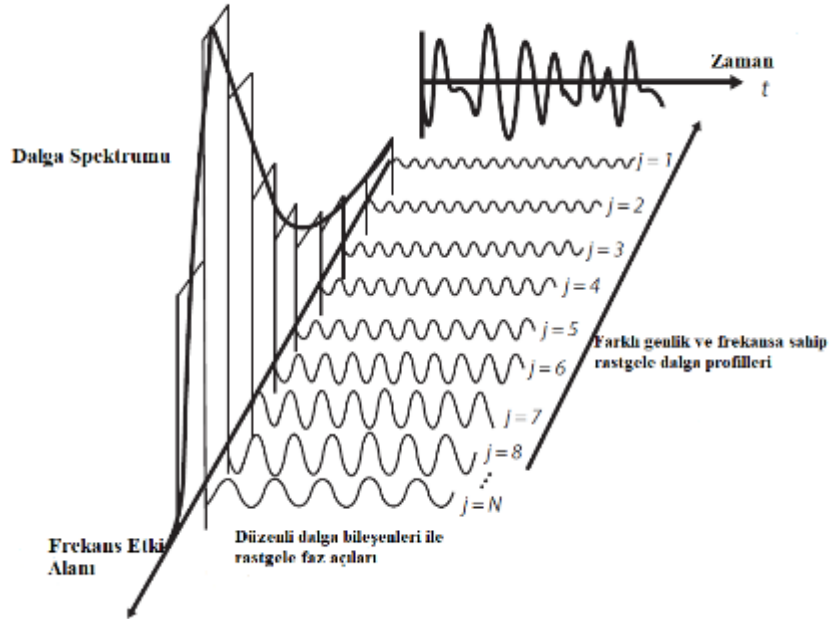
Yukarıda verilen eşitliklerde k açısal dalga numarasını, σ dalga açısal frekansını ve x yatay koordinatı sembolize etmektedir. Açısal dalga numarası ve dalga frekansına ait eşitlikler denklem (4) ve (5)’te verilmiştir.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

$$\sigma = 2\pi f_d \quad (5)$$

1.2.2. Düzensiz Dalgalar

Gerçek deniz dalgaları, düzensiz ve rastgele özelliklere sahip olma eğilimindedir, bu nedenle her ne kadar birçok çalışmada düzenli deniz dalgaları incelense de gerçek deniz dalgalarının karakteristik yapısı genellikle düzensizdir. Düzensiz deniz dalgaları, farklı genliklere ve frekanstaki birden çok deniz dalgasının birleşimi veya süperpozisyonuyla modellenebilmektedir. Bu yöntemle modellenen düzensiz dalgalar denizcilik, kıyı mühendisliği ve benzeri uygulama alanlarında genel olarak bilinen bir kavram olarak kabul edilmektedir. Bu modelin doğruluğu, gerçek deniz dalgalarının gemi ve kıyı yapıları üzerindeki etkilerini öngörme konusunda doğrulanmıştır (Jacobson vd., 2011). Şekil 6'da düzensiz bir dalga profilinin bir dalga spektrumundan nasıl türetildiğine dair bir görsel verilmiştir.



Şekil 6. Farklı dalga parametreleri ile oluşturulan düzensiz dalga spektrumu (Goda, 2010)

DES kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, düzenli ve düzensiz gerilim sinyalleri işlenir ve bu sinyaller farklı tipteki ve kontrol edilebilir güç elektroniği devrelerine uygulanabilmektedir. Bu yaklaşım, laboratuvar ortamında gerçek düzensiz deniz koşullarında üretilebilecek enerjinin üretilmesini sağlayabilmektedir.

1.3. Dalga Enerji Yöntemleri ve Güç Hesabı

Dalga Enerji Spektrumları, genellikle deniz dalgalarının enerji dağılımını analiz etmek için kullanılan matematiksel ifadelerdir. Bu spektrumlar, bir deniz dalgasının farklı frekanstaki bileşenlerinin enerji miktarını gösterir. Genellikle rüzgâr, dalga uzunluğu, dalga yüksekliği ve dalga periyodu gibi faktörlere bağlı olarak değişebilirler. Deniz bölgelerindeki ölçüm istasyonlarının sınırlı olması sebebiyle, rüzgâr kaynaklı deniz dalgalarının özellikleri genellikle matematiksel analiz yöntemlerinden türetilen çeşitli metotlar kullanarak tahmin edilmektedir. Bu metotlardan biri deneysel (parametrik) yöntemken, diğeri nümerik (model tabanlı sayısal) analiz yöntemidir (Moeini & Shahidi, 2007).

1.3.1. Deneysel Yöntem

JONSWAP (Hasselmann vd., 1973) ve Pierson-Moskowitz (PM) (Pierson & Moskowitz, 1964) modelleri deneysel yöntemle ait en çok tercih edilen modellerdendir. PM dalga spektral analiz yöntemine ait matematiksel eşitlikler denklem (6) ve (7)'de verilmektedir (Yin & Soo-Hong, 2010).

$$S(f)_{pm} = \alpha \frac{g^2}{f^5 (2\pi)^4} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f_m}{f} \right)^4 \right] \quad (6)$$

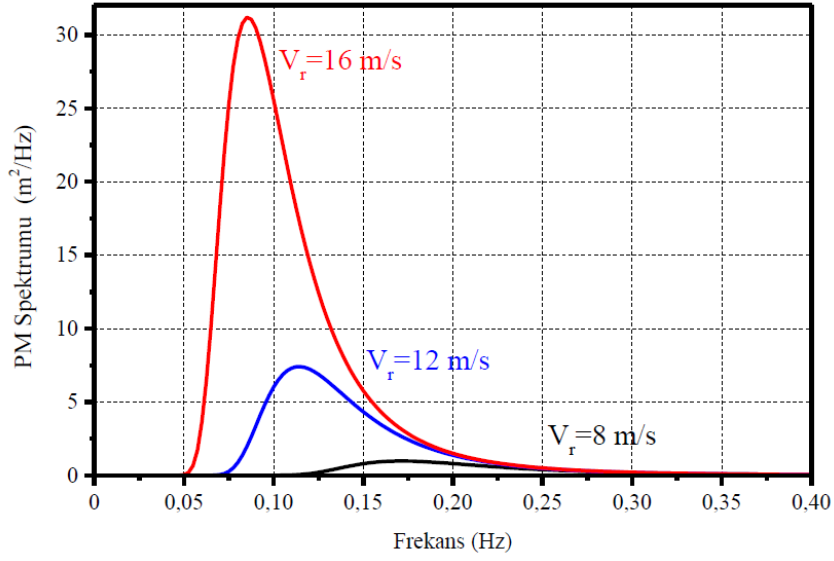
$$f_m = 0.1396 \frac{g}{V_r} \quad (7)$$

Verilen formülde, $g=9,81 \text{ m/s}^2$ yerçekimi ivmesini, $\alpha=0.0081$ sabit sayıyı, f dalganın frekansını, f_m enerji yoğunluğunun maksimum frekansını ve V_r deniz seviyesinin 19.5 metre üstünde ölçülen rüzgâr hızını (genel olarak 10-21 m/s) göstermektedir.

Bu model tarafından üretilen bazı yaygın dalga spektrumları Şekil 7'de sunulmuştur. Bu şekillerde, dalga enerjisinin dalga periyodu (T) ile yaklaşık olarak eksponansiyel bir

şekilde arttığı gözlenmektedir. Ayrıca, bu grafikler açıkça göstermektedir ki, rüzgâr hızındaki artış hem dalga yüksekliğini hem de dalga periyodunu arttırmaktadır.

Deney tabanlı yöntemler, açık denizler ve sakin rüzgâr koşulları için tatmin edici sonuçlar elde etse de geçici rüzgâr koşulları ve sınırlamalar için yetersiz kalabilir. Ek olarak, bu yaklaşımlar sadece belirli dalga yükseklikleri ve ortalama dalga periyodu hakkında bilgi sağlar (Akpınar vd., 2012).



Şekil 7. Farklı rüzgâr hızlarında Pierson-Moskowitz dalga spektrum değerleri

1.3.2. Sayısal Yöntem

Sayısal modeller, günümüzde kullanılan diğer dalga tahmin yöntemlerinden biridir (Mike21 (Warren & Bach, 1992), Wavewatch (Tolman, 1991), SWAN (Booij vd., 1999) vb.). Sayısal modeller, deniz koşulları ile ilgili daha fazla veri sağlaması, bu verilerin dalga dağılımı, yönü ve gücünü içermesiyle deneysel parametrik modellerden farklılık içerir.

SWAN (Simulating Waves Nearshore) olarak adlandırılan 3. nesil spektral dalga modeli, özellikle kıyı ve kıyılara yakın deniz bölgelerinde yüksek performans gösterir. Bu nedenle literatürde DES modellerinde kullanılan SWAN dalga değerleri sıkça tercih edilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan Ordu ili sahil dalga değerleri, bu modeli kullanan Akpınar ve Kömürcü (2012), yapmış olduğu çalışmasından alınarak yapılmıştır. Model, temel hareket-denge denklemi olarak aşağıda denklem (8)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (8)$$

Eşitlik yukarıda belirtildiği gibi, 6 terimden oluşmaktadır. $N(\sigma, \theta; x, y, t)$, sırasıyla rölatif dalga frekansı (σ), dalga yönü (θ), yatay koordinat (x), dikey koordinat (y) ve zamanın (t) bir fonksiyonudur. İlk terim, hareket yoğunluğunun zamanla olan yerel değişim hızını temsil eder. İkinci ve üçüncü terim, (x, y) uzayında c_x ve c_y hızları ile dalga yayılmasını ifade eder. Dördüncü terim, derinlik ve akıntı değişikliklerinin rölatif frekanstaki kaymaları temsil eder (c_σ, σ uzayında yayılma hızı ile). Son terim ise derinlik ve akıma dayalı kırılma sürecini temsil eder (c_θ, θ uzayında yayılma hızı ile). Eşitlikte sağ tarafta bulunan S ifadesi, dalganın ortaya çıkışını, kayboluşunu ve doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimlerini ifade etmektedir (Ris vd., 1999).

1.3.3. Dalga Güç Hesabı

Dalga enerji modeli sonuçlarından türetilen belirgin dalga periyodu (T_s) ve belirgin dalga yüksekliği (H_s) verileri, denklem (9) içinde verilen dalga gücü eşitliği formülünde kullanılmaktadır (Salter, 1974).

$$P(kW / m) = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_s \quad (9)$$

Yukarıda verilen eşitlikte ρ su yoğunluğunu (Karadeniz 1015 kg/m³) ve g yerçekimi ivmesini (9,80 m/s²) ifade etmektedir. Bilinen değerlerin yerine konulması ile elde edilen sadeleştirilmiş dalga güç değeri denklem (10)'da verilmiştir.

$$P(kW / m) = 0.486 H_s^2 T_s \quad (10)$$

Literatürde çoğu zaman dalga boyu, gözlemlenen dalga yüksekliklerinin en yüksek üçte birinin ortalaması olarak ifade edilir. Bu istatistiksel ortalama, $H_{1/3}$ veya H_s sembolleri ile gösterilir ve belirgin dalga yüksekliği olarak ifade edilir. Belirgin dalga yüksekliği formülü denklem (11)'de verilmiştir. Buradaki “n” terimi, kaydedilen dalga yüksekliği verilerinin sayısını simgelemektedir.

$$H_{\frac{1}{3}} = \frac{3}{n} \sum_{k=1}^{n/3} H_k \quad (11)$$

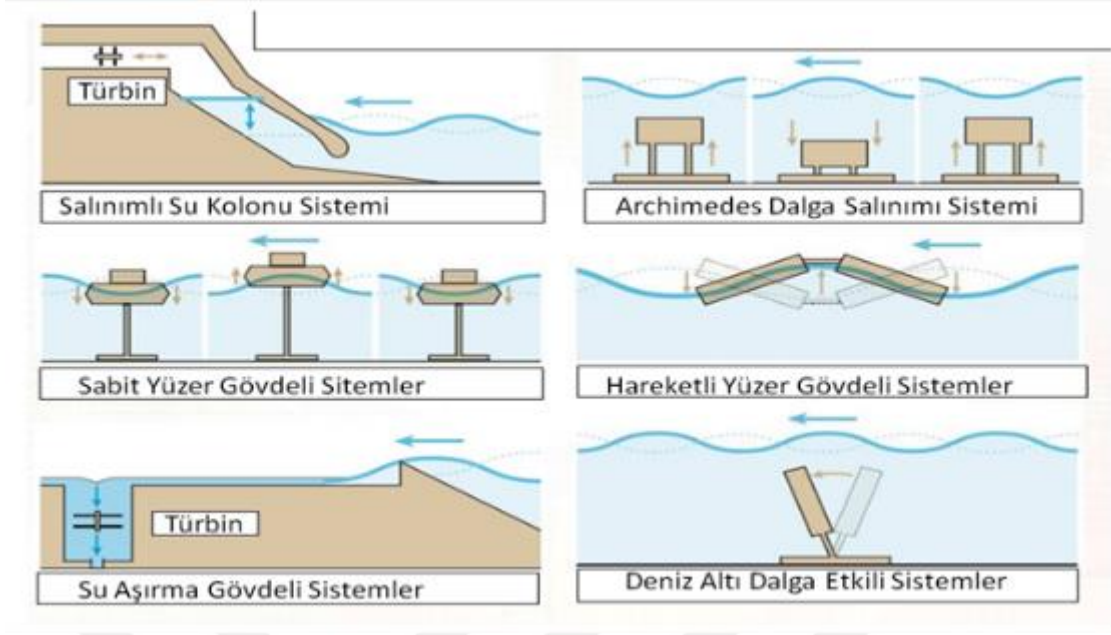
1.4. Dalga Enerji Sistemlerinin Sınıflandırılması

DES teknolojileri geliştirme konusunda birçok farklı yaklaşım bulunmakta ve dalga enerjisi dönüşüm cihazları birçok farklı ölçüte göre sınıflandırılabilir. Örneğin, bu cihazlar işleyiş prensiplerine, hareketlerine, güç çıkış sistemlerine ve kullanım alanlarına bağlı olarak sınıflandırılabilir (Sergienko, 2018). DES'lerin sınıflandırılması karmaşık bir konudur ve bu, farklı sınıflandırma yaklaşımları içinde birçok cihazın iki veya daha fazla farklı kategoriye atanabilmesiyle daha karmaşık hale gelebilmektedir.

Dalga enerjisi toplama alanı hızla gelişiyor ve dalga enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için farklı teknolojiler geliştirme konusunda büyük ilerlemeler kaydediliyor. Sürekli olarak yeni teknoloji konseptleri geliştiriliyor ve dalga enerjisi toplamak için yeni yaklaşımlar ortaya çıkıyor. 2015 yılından bu yana, dünya genelinde her yıl binlerce dalga enerjisi konseptinin patentlendiği tahmin ediliyor ve binlerce mevcut patent kayıtlı durumda (IRENA, 2020). Birçok farklı geliştirme aşamasında cihazlar bulunuyor ve bazı tam ölçekli tesisler ya faaliyette ya da test aşamasında. Bu hızla gelişen teknoloji nedeniyle, sürekli olarak yeni sınıflandırma teknikleri geliştiriliyor. Bu sınıflandırma tekniklerinin aşağıdaki kriterlere göre farklı bölümlerde ele alabiliriz:

- a. Deniz tabanı ve kıyıya olan mesafesi,
- b. Deniz seviyesi ile ilişkili konumu,
- c. Boyutu ve yönelimi,
- d. Enerji yakalama prensibi (IRENA, 2014).

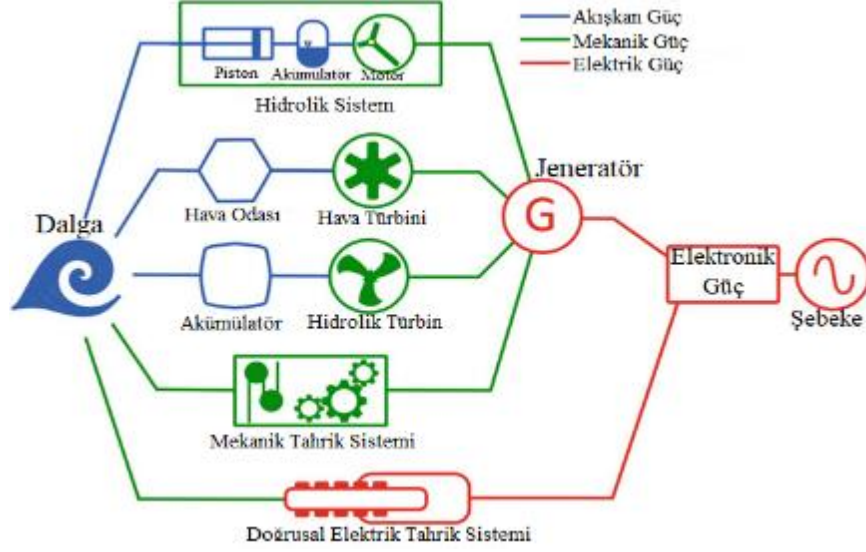
DES'leri sınıflandırmak için kullanılan ilk kriter, tesisin deniz tabanı ve kıyıya olan konumuyla ilgilidir. Bu kriter altında üç ana sınıflandırma bulunur: kıyı şeridi, kıyıya yakın ve kıyıdan uzak kurulan DES tesisleri. Kıyı şeridi sistemleri, genellikle sahil kenarında bulunan ve mevcut bir yapının veya yeni bir yapının inşa edileceği bir yapıyı ifade eder. Kıyıya yakın sistemler, derinliği 50 metreyi aşmayan sığ sularda bulunan alanları tanımlar. Kıyıdan uzak sistemler ise 50 metreden daha derin sularda bulunan bölgeleri ifade eder. Ayrıca sistemlerin deniz tabanına olan konumları şu şekilde sınıflandırılır: tabana sabit, batık ve yüzer pozisyonda olmak üzere üç çeşittir (Falcão, 2010). Şekil 8'de kıyıya olan uzaklık



Şekil 9. Dalga enerjisini yakalama prensibine göre DES sınıflandırılması (Ibáñez, 2008)

1.5. Dalga Enerji Sistemlerinde Güç Çıkışlarının Sınıflandırılması

DES güç çıkışı sistemleri, temel dönüştürücü tarafından emilen enerjinin kullanılabilir elektriğe dönüştürüldüğü mekanizma olarak tanımlanır. Temel dönüştürücü, örneğin salınlımlı su sütunu için kapalı bir odacık veya nokta emici, hareketli yüzer gövde, salınlımlı sarkaç vb. gibi sistemler için şamandıra olabilir. Güç çıkışı sistemi, emilen dalga enerjisinin elektriğe ne kadar verimli bir şekilde dönüştürüldüğünü doğrudan etkilemekle kalmaz, aynı zamanda dalga enerjisi dönüştürücüsünün kütlesine, boyutlarına ve yapısal dinamiklerine de katkıda bulunur (Pecher & Kofoed, 2017). Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında birçok farklı türde güç çıkış sistemi tasarımı ile DES mekanizmasından optimum verim elde edilmek istenmiştir. Belirli bir DES için seçilen güç çıkış türü genellikle dönüştürücü türüyle güçlü bir şekilde ilişkilidir. Dalga enerjisinin elektriğe dönüştürülmesi için seçilen güç çıkışı sistemleri Şekil 10'da görüldüğü gibi beş ana kategoriye ayrılabilir.



Şekil 10. DES güç çıkış sistemlerinin sınıflandırılması (Pecher & Kofoed, 2017)

Tablo 2’de hidrolik, su, hava, mekanik ve doğrudan tahrikli güç çıkış sistemleri için varsayılan verimlilik değerleri gösterilmektedir. Güç çıkışı sistemleri arasındaki verimlilik farklılıkları, tercih edilen teknolojiyi belirlemede önemli bir rol oynar. Ayrıca DES modelinin kullanılacağı coğrafi konumda güç çıkışı sistemini belirlemede diğer bir faktördür. Örneğin çok yüksek dalga verilerine sahip bir bölgede deniz üzerinde kurulum yapmak ve bundan enerji üretmek oldukça zordur. Bu durumda daha çok kıyı tipi uygulamalardan olan salınlı su sütunu sistemleri kullanılır ve buna bağlı olarak güç çıkışı olarak hava türbini tercih edilir. Fakat dalga genliği ve periyodu daha düşük bölgelerde deniz üzerinde DES sistemleri kurulumu daha uygundur. Bu tez çalışması kapsamında da Ordu ili dalga parametreleri daha düşük değerlerde olması nedeniyle deniz üzerinde çalışacak bir STDES modeli tasarlanmıştır. Ayrıca tez kapsamında verimliliği %90 olan mekanik güç çıkış sistemi tercih edilerek maksimum enerji verimliliği hedeflenmiştir.

Tablo 2. DES güç çıkış sistemlerinin verimleri (Aderinto & Li, 2019)

Güç Çıkış Çeşitleri	Verim Değerleri
Hidrolik	65%
Su	83%
Hava	54%
Mekanik	90%
Direk Tahrikli	95%

1.6. Tezin Amacı

Son yıllarda, konvansiyonel enerji kaynaklarına alternatif olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine odaklı çalışmalar hız kazanmıştır. Bu süreçte, dalga enerjisi üzerine yapılan araştırmalar da belirgin bir artış göstermiştir. Özellikle yüksek enerji yoğunluğu, süreklilik, daha az görsel etki, küçük alan gereksinimi, iklimsel değişkenlik uyumu gibi etmenlerden dolayı diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha üstün olduğu anlaşılmıştır. Dünya’da dalga enerjisi alanında birçok araştırma ve çalışma yapılmaktadır. Bu araştırmalar, dalga enerjisinin potansiyelini ve uygulanabilirliğini artırmak, daha verimli ve güvenilir sistemler geliştirmek, deniz kaynaklarından daha fazla ve sürdürülebilir bir enerji elde etmek için yapılmaktadır. Birçok üniversite, araştırma enstitüsü, enerji şirketi ve devlet kurumu, dalga enerjisi teknolojileri üzerinde araştırmalar yürütmekte ve bu alanda yenilikler geliştirmek için çaba sarf etmektedir.

Türkiye Kıyıları, Marmara Denizi dışında yaklaşık 8200 kilometrelik bir uzunluğa sahiptir. Bu geniş kıyı şeridi, dalga enerjisi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Fakat literatüre bakıldığında ülkemizde bu alanda yapılan çalışmaların çok kısıtlı sayılarda olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda ise daha önce literatürde kullanılan DES mekanizmalarının ülkemiz deniz koşulları altında test edildiği görülmüştür. Fakat tasarlanacak DES mekanizmasının geometrik şeklini çalışacağı bölgenin deniz dalga verilerinin belirlemesi gerekmektedir. Örneğin düşük dalga genlikleri için tasarlanacak bir DES sisteminin doğal dalga frekansının bölgenin dalga frekansı ile maksimum uyumlulukta olması gereklidir. Ayrıca düşük dalga değerlerinden optimum güç çıkışı sağlamak için farklı bir enerji dönüşüm metodoloji geliştirilmelidir. Bu amaç doğrultusunda bu doktora tezi, düşük dalga verilerinde optimum değerlerde güç üretebilecek bir DES modeli tasarımı oluşturarak bu modelin nümerik ve prototip analizlerini karşılaştırmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, Türkiye’de daha önce yapılmamış bir sarkaç tipi dalga enerjisi sistemi tasarlamak ve bunu düşük genlikli bir deniz durumunda çalışabilir olduğunu göstermek amaçlanmıştır. Çalışma bölgesi olarak Karadeniz’in diğer bölgelere kıyasla daha düşük dalga değerlerine sahip Ordu ili sahil şeridi seçilmiştir ve bu bölgenin dalga karakteristiği verileri temin edilerek nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Prototipin mekanik kısımları (dişli çarklar, miller , alternatör parçaları, vb.) 3D yazıcı ile üretilmiştir. Bu şekilde 3D yazıcılar ile DES mekanizmaları için yenilikçi, hızlı, kolay, ölçeklenebilir bir üretim sistemi literatüre kazandırılmıştır. Böylece ileride yapılacak farklı bölgelerdeki dalga değerlerine uyarlanarak

tasarlanacak STDES mekanizmaların üretim aşaması hızlandırılmış olacaktır ve seri üretim şeklinde dalga enerji hasatı sistemleri kurulumunu kolay hale gelecektir.

1.7. Literatür Özeti

Yıllar boyunca dalga enerjisi dönüştürücüleri için birçok konsept ve tasarım geliştirilmiştir. Literatürde salınımlı yüzer gövde sistemleri ve bu sistemlerin farklı tipte hareket ve güç çıkış mekanizmaları üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Tez de kullanılan STDES mekanizması dalganın rotasyonel hareketlerinden biri olan yalpa hareketini kullanması nedeniyle bu alanda yapılmış benzer salınım hareketli gövde sistemleri incelenmiştir. Bu alanda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür ve son 8 yılda toplamda salınım mekanizması şeklinde çalışan DES modeli 21 yayın bulunabilmektedir. Bu çalışmaların detayları aşağıda sunulmuştur.

Cordonnier vd. (2015), 2002 yılında başlayan SEAREV projesi, 12 yıl boyunca birçok akademik çalışma yapılarak geliştirilen DES tasarımıdır. Sistem, kapalı biçimde yüzen bir gövde içinde ağır salınım hareketi yapan bir sarkaç mekanizmasına sahiptir. Sarkaç salınımı ile elde edilen enerji hidrolik pistonlar ile yüksek basınca çevrilir ve jeneratörden güç çıkışı alınır. Yapılan son geliştirmeler neticesinde gövde boy uzunluğu 9,8 m, genişliği 30 m, su çekimi 11,9 m olarak tasarlanmış ve düzensiz dalgalarda test sonuçları yapılmıştır. Yapılan düzensiz dalga testleri sonucunda dalga yüksekliği 8 m ve dalga periyodu 9 sn olan durumda gövde maksimum yalpa açısının 137^0 ve çıkış gücünün 25 kW/m olduğu belirlenmiştir.

Boren vd. (2017), yapılan çalışmada küçük ölçekli (0,7 m platform çap, 4,10 kg sarkaç ağırlık ve 0,15 m sarkaç uzunluk) silindirik bir yüzer platform içerisine konuşlandırılmış yatay eksenli sarkaç mekanizmalı çalışan DES yerleştirilmiştir. Modelin deneysel çalışması Oregon State Üniversitesi O.H. Hinsdale Dalga Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır ve değişen dalga ortamlarına ve işletme koşullarına maruz bırakılmıştır. Düzensiz dalga durumları için yapılan testlerde mekanizmanın; farklı bağlama halat sayısı, dalga değerleri, dalga yönleri, salınım atalet momentleri ile test edilerek en optimum güç çıkışı elde edilmeye çalışılmıştır. Dalga yüksekliği 0,3 m, dalga periyodu 5, dalga açısı 0^0 olan Jonswap dalga spektrumu değerlerinde sistemin maksimum 1 W güç çıkışı elde edildiği görülmüştür.

Pozzi vd. (2018), Akdeniz iklimi için özel olarak tasarlanmış 1:12 ölçekli sarkaç sistemli bir DES mekanizmasının geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmada, sistemin dinamiklerinin matematiksel modeli oluşturulmuş ve sayısal modeli doğrulamak için

deneysel tank testi yapılmıştır. Sayısal modelin hem düzenli hem de düzensiz deniz durumlarında STDES sisteminin davranışını tahmin etmedeki doğruluğunu gösteren deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Dalga yüksekliğin 0,15 m ve dalga periyodunun 2,2 sn olduğu düzenli dalga durumunda prototipin 50 W enerji ve %18 verimle çalıştığı tespit edilmiştir.

Yurchenko ve Alevras (2018), yerçekiminin etkisini azaltan ve normal deniz durumlarında cihaz performansını artıran, yatay eksenli sarkaç olarak uyarılmış bir DES tasarımını sayısal ve deneysel sonuçlarını incelemiştir. İlk olarak tasarım, nokta emici olarak çalışacak bir konsept olarak düşünüldü fakat düşük dalga genliği ve frekansı değerlerinde istenilen gücün elde edilemediği tespit edildi. Ancak yatay eksenli sarkaç tasarımı normal bir deniz durumunda dahi dönme tepkisine izin verdiği tespit edildi. 6 m sarkaç kolu uzunluğu ve 100 kg sarkaç ağırlığı ile yapılan test sonuçlarında 2,5-7,8 kW aralığında güç çıkışı değerleri bulunmuştur.

Crowley vd. (2018), yapılan çalışmada küresel yüzer platform içerisine x-y eksenli boyunca hareket edebilen bir sarkaç dişli mekanizmasının matematiksel modeli ile deneysel modelini karşılaştırmıştır. Bu mekanizmanın içindeki dişli kutusu, hareketi için iki eksen arasındaki en büyük açısal hızı seçecek şekilde ve tek bir serbestlik derecesinde mekanizmayı döndürecek biçimde tasarlanmıştır. Ayrıca, sistem sadece 45 dereceden fazla dalgaların geldiği durumlarda veya parametrik kararsızlıkların başladığı durumlarda salınım yuvarlanma hareketinden enerjiyi elde edecek şekilde tasarlanmıştır. Modelin 6 m çapında ve sarkaç ağırlığının 58 kg olduğu durumda güç çıkışı değeri 17-27 kW olduğu gözlemlenmiştir.

Chen vd. (2019), enerji yoğunluğunun düşük olduğu denizlerdeki DES verimliliğini incelemek için silindir ve yarı küresel olmak üzere iki adet yüzer platform tasarlamıştır. Her iki platform içerisine yatay eksenli sarkaç mekanizma yerleştirilerek düzensiz dalgalarda DES mekanizmasının kuvvet, RAO ve dönüşüm verimliliği incelenmiştir. 2 m ve 4 m çaplı silindirik platform kuvvetinin, aynı çapta yarı küresel platformdan %194–1455 daha büyük olduğunu görülmüştür. Silindirik platform yalpa RAO'ları, kuvvet farkı nedeniyle yarı küresel platformdan %0,6–52,59 daha büyük çıktığı görülmüştür. Ayrıca silindirik platformun enerji verimliliğinin maksimum %6 olduğu görülmüştür.

Wang ve Lee (2019), iki serbestlik derecesine sahip bir DES, eksantrik çift eksenli bir halka ve dairesel Halbach dizili manyetik diskler ve demir çekirdekli bobinler kullanarak güç üreten bir sistem geliştirilmiştir. Platformun dalgalanma, yuvarlanma ve yükselme

hareketlerinden kinetik enerjiyi dönüştürerek, uygun ağırlık koşullarına sahip eksantrik çift eksenli halka, çift eksenli bir hula-hoop hareketi yaparak güç ürettiği tespit edilmiştir. Duba üzerine monte edilen çift eksenli eksantrik halka için kinetik denklemler, Lagrange-Euler denklemini kullanarak türetilmiştir. Duba hareketinin temel frekansı olan 0.7 ila 1.0 Hz arasında 0.56 W çıkış gücü üretilmiştir.

Aminuddin vd. (2020), yaptığı DES mekanizmasında, dalga gücünü elektrik enerjisine dönüştürmek için dört kasnaktan oluşan bir sistem geliştirmiştir. İlk kaynağı sarkaca çift serbest çarkla bağlı şekilde, ikinci ve üçüncü tekerler aktarma tekerlekleri olarak, dördüncü ise elektrik jeneratörüne eksenel olarak bağlı bir dönüştürücü bileşen şeklinde tasarlamıştır. Bu tasarımda, ideal bir boyutu incelemek ve tekerleklerin dönüş hızıyla ilgili hareket denkleminin sayısal çözümünü belirlemek için Euler-Lagrange formülasyonu ve Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır. Sistemin kütlesi, uzunluğu ve eylemsizlik momenti sırasıyla 10 kg, 2,0 m ve 0,25 kg, 2 m olduğunda düzgün bir şekilde döndüğünü görülmüştür. Buna ek olarak birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü tekerleklerin yarıçapları 0,5, 0,4, 0,2 ve 0,01 m, atalet değerleri ise 0,005, 0,004, 0,003 ve 0,1 kgm^2 'dir. Konvertör sistemi, bir elektrik jeneratörünün kolu olarak görev yapan dördüncü tekerleği yaklaşık 500-600 dev/dk'lık bir açısal frekansta döndürme kabiliyetine sahip olduğu analiz edilmiştir. Konvertör sistemi minimum 5 N kuvvet ve maksimum 0,05 sürtünme ile tahrik edildiğinde optimum şekilde dönmüştür. Bu nedenle, sistem 0,3-0,61 m genlikte, 50 Hz ile 220 V ve 7,5 kW elektrik ve üretme kapasitesinde olduğu belirlenmiştir.

Ding vd. (2020), yapmış olduğu çalışmada su altına çapa ile bağlanmış bir silindirik platform içerisine yatay eksenli sarkaç tipi bir DES sistemi oluşturmuş ve sarkaç kolu merkezine bir dişli ve jeneratör bağlanarak güç çıkışı verileri sayısal analiz yöntemleri ile test edilmiştir. Matematiksel modeller, Newton-Euler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Güç performansı farklı sönümler, doğal frekans ve düzenleme pozisyonu altında incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, toplayıcının 0.1-0.4 Hz aralığındaki düşük frekansta uyarıcılardan enerji çekebildiğini ve en yüksek çıkış gücünün uyarıcı frekansı $f=0.4$ Hz altında 0.7 W'a ulaşabildiğini göstermiştir.

Ma vd. (2020), Güney Çin Denizi'nde çalışması için salınımlı bir DES şekli ve iç düzeniğinin incelendiği çalışma yapılmıştır. Potansiyel akış teorisi temel alınarak ve Ansys-AQWA yazılımının kullanılmasıyla dalga enerjisi dönüşümünün hidrodinamik performansı incelenmiştir. Üç farklı platform tasarımı test edilmiştir ve platformların genişliği, yan yarıçapı ve ağırlık merkez pozisyonları platformun hidrodinamik performansına olan etkisi

analiz edilmiştir. Sallanma performansının, küresel tabanlı platformda en iyisi olduğu belirlenmiştir.

Hasnain vd. (2020), denizaltı ortamında ters sarkaç sisteminin dinamik tepkisini, titreşim kontrol tekniğini ve dikey istikrarını inceleyen bir çalışma yapmıştır. Sarkaç sistemi, dengeleme amacıyla dikey yönde pivot noktasına parametrik olarak uyarıcı bir kuvvet (su dalgası olarak kullanılan) maruz bırakılmıştır. Çalışmada, ters sarkaç sisteminin denizaltı dinamik tepkisini incelemek için, sisteme etki eden hidrodinamik kuvvetlerin (sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti gibi) etkilerini göz önünde bulunduran bir matematiksel model geliştirilmiştir. Sistemin matematiksel modeli, standart Lagrange denklemi uygulanarak elde edilmiştir. Hem alt hem de üst denge sınırları, vakumda ve su içindeki (viskoz olarak sönümlenmiş) her iki sarkaç sisteminin tepkileri için test edilmiştir. Parametrik uyarıcı kontrol yönteminin, yeni geliştirilen sistemi başarılı bir şekilde denizaltı ortamında dengelediği, su içinde sistem denge bölgesinde uyarıcı genlikte önemli bir artış olduğu ve vakumda sistem için denge bölgesinin su içindekinden daha geniş olduğu sonucuna varmıştır.

Literatüre bakıldığında çeşitli melez DES sistemlerde görmek mümkündür. Örneğin Gunawardane vd. (2021), çalışmasında DES ve Pendular dönüştürücülerini birleştirerek Gövde Rezervuar Dalga Enerjisi Sistemi (GRDES) adı verilen 1:12 ölçekli bir flap-tipi dalga enerjisi cihazının yeni bir konseptini oluşturmuştur. Cihaz, temel olarak yüzen bir rezervuardan ve rezervuar içinde asılı olan üst menteşeli bir flap'tan oluşur. Dört farklı iç su hacmine göre tasarım, Akdeniz dalga verileri kullanılarak test edilerek rezonans değerlerinin 5,5-8 sn aralığında olduğu tespit edilmiştir. Eklenen su hacmi miktarı arttığında flap rezonans değerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca melez tasarımın Akdeniz'de geniş dalga periyodu koşullarında DES mekanizmasına kıyasla daha iyi rezonans değerlerinde olduğu belirlenmiştir.

Deniz enerjisi kaynakları, deniz tabanında yapılan gözlem uygulamaları için uzun süreli operasyonları desteklemek amacıyla kullanılabilecek yüksek ve sürekli bir enerji kaynağı sağlama potansiyeline sahiptir. Dizon vd. (2021), yapmış olduğu çalışmada Washington Eyaleti sahilinde Ulusal Veri Boyu Merkezi'nin Self-Contained Ocean Observations Payload (SCOOP) cihazını çalıştırmak için sarkaç mekanizmalı DES'in uygulanabilirliği incelenmiştir. Tasarlanan sistemin sarkaç yarıçap kolu, kütlesi ve enerji çıkarma sönümlenme değerleri değiştirildiğinde güç çıkışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Matlab aracı kullanılarak elde edilen sonuçlar neticesinde yarıçap kolunun uzunluğu ve kütle

ile güç çıkışı arasında olumlu bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur ve yıl boyunca temel güç gereksinimini karşılamak için 20 kg bir sarkaç kütesinin gerektiği tespit edilmiştir.

Gioia vd. (2022), okyanus dalgalarından elde edilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için Gauss Proses Regresyonu (GPR) modelini uygulamıştır. Çalışmada sarkaç tipi DES mekanizması kullanılmıştır. Yapılan bu çalışma ile salınımlı DES için veri odaklı bir kontrol stratejisi yapılarak öğrenme süreci hızlandırılmış ve simülasyondan elde edilen sonuçların model tabanlı sonuçlardan daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Wan vd. (2022), aşırı deniz koşullarında yakalama verimliliğini ve hareket tepki yeteneğini geliştirmek için eğim-sarkaç şekilli DES modelinin optimizasyonu üzerine sayısal ve deneysel testler yapmıştır. Yapılan modelin tabanına bir eğim yapısı eklenerek 66 farklı düzenli dalga testi sonucuna göre güç çıkış verimliliğinin %13,24 ve düzensiz dalga testlerinde ise %10,06 arttığını tespit etmiştir.

Sarkaç ile çalışan bir DES mekanizmasında altı farklı serbestlik dereceli hareketin çoğu durumda sadece birini verimli bir şekilde kullanabildiği görülmektedir. Carapellese vd. (2022), dörtlü sezgisel kontrolör seti uygulayarak yetersiz çalışan bir sistem olan sarkaçlı DES sisteminin enerji dönüşümünü optimize etmiştir. Her kontrolörün performansı Akdeniz'i karakterize eden dalga kaynağı için test edilerek sarkaçlı DES mekanizmasında oluşan güç çıkışı değerinin %10 artışı görülmüştür.

Dalga etkisi ile salınım hareketi yapan STDES yapılarında sarkacın konumu, yapının ağırlık dağılımı, dalga yakalama yeteneği enerji verimliliği açısından önemlidir. Wu vd. (2022), yapılan çalışmada yatay olarak yerleştirilmiş 2 farklı sarkaç sistemini yüzer platformun üst ve alt kısmına konuşturarak en optimum değerleri alabilmek için deneyler gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde üstte yerleştirilen sarkaç ile alta yerleştirilen sarkaç karşılaştırıldığında, her ikisinin de neredeyse aynı dalga gücü yakalama yeteneği sunduğu ancak üstte yerleştirilen, sarkacın ağırlık merkezinin doğal olarak yüksek olması nedeniyle çoğu deniz durumundaki dalgayı yakaladığı gözlemlenmiştir. Üstte bulunan sarkacın kütlesi ve sarkacın açısal hareket genliği sırasıyla %35 ve %50 altta bulunan sarkaca göre daha küçük ayrıca sarkacın momenti alt sarkaca göre yarı değerinde olduğu belirlenmiştir.

STDES tasarımı ve optimize edilmesi, genellikle basitleştirilmiş koşullar altında analiz edilmektedir. Tipik olarak, dalga analizlerinde monodireksiyonel spektrumlar kullanılarak dalga davranışları yaklaşık olarak hesaplanır. Ancak gerçek deniz koşullarında dalgalar çok yönlüdür. Cervelli vd. (2022), yapılan çalışmada lineer dalga analizlerinin, farklı genliklere,

frekanslara, fazlara ve yönlerle sahip sinüs dalgalarının toplamı olarak incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmanın örnekleme mekanizması olarak sarkaç tipi DES seçilmiştir. İncelenen deniz durumları Kıbrıs adasına aittir. Spektrum, Jonswap frekans spektrumu ile cosinüs yönlü spektrumun birleşimi olarak tanımlanmıştır. Deniz seviyesi bileşenlerini hesaplamak için Deterministik Genlik Şeması (DAS) yöntemi kullanılmıştır. Cihaza etki eden zorlamalar, bağlama yükleri ve cihaz hareketleri incelenmiş ve monodireksiyonel yaklaşımların ürettiği hata miktarını ölçmek için karşılaştırılmıştır. Dalga-bağlama halatı etkileşimini incelemek için OrcaFlex yazılımı kullanılmıştır. Çok yönlü analize kıyasla monodireksiyonel yaklaşım, yalpa açısını %5 ve baş-kıç vurma açısını %3 fazla tahmin ettiği görülmüştür.

Jiang vd. (2023), dikey eksenli parametrik sarkaç tabanlı dalga enerjisi dönüştürücüsünün çıkış gücünü değerlendirmek için Öngörülen Uyarma Modeline dayalı geniş aralıklı bir analiz yöntemi uygulamıştır. Sarkaç hareketini doğru bir şekilde analiz etmek ve hasat performansını uygun bir şekilde değerlendirmek için Açısal Hızın Kümülatif Frekans eğrileri adı verilen yeni bir değerlendirme şekli geliştirilmiştir. Böylece, doğrusal sönümlleme, maksimum yakalama genişliği oranı %39,05 ile sabit sönümlemeden daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Böylece tam ölçekli bir cihaz için yıllık enerji üretimi 7,60 MW/saate ulaşabileceği öngörülmüştür.

Niosi vd. (2023), yapmış olduğu çalışmada Napoli Federico II Üniversitesi'nde yürütülen 1:25 ölçekte sarkaçlı DES mekanizmasının enerji verimliliğini etkilemeyen bakım, dayanıklılık ve düşük maliyet sağlayan yeni tip bir bağlama sistemini Orcaflex yazılım simülasyonları ile geliştirmiştir. Deney tankında ölçülen aynı dalga kayıtları sayısal simülasyonlarda kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda sayısal model deneysel verileri doğru bir şekilde tahmin ettiği ve boyutlandırma yükünü doğru bir şekilde belirlediği görülmüştür.

Literatürde, son yıllarda yapılan araştırmaların bir kısmı daha önce üretilen salınımlı DES mekanizmalarının geliştirilmesi üzerine odaklanıldığı görülmüştür. Yapılan diğer çalışmalara bakıldığında ise, genellikle farklı sarkaç sistemleri ve çalışma modülleri üzerine çalışmaların yoğunlaştığı ve bu sistemlerin yüksek dalga genliklerinde ve frekanslarında olumlu güç verimleri elde edildiği görülmüştür. Ancak düşük dalga genliği ve frekansı değerlerinde dalganın enerjisini en verimli şekilde kullanacak etkili bir DES çalışmasının eksik olduğu görülmektedir. Bu tez çalışması literatürde bu boşluğu kapatmayı hedefleyerek, düşük dalga genliği ve frekansına sahip bir bölgede kurulacak DES mekanizmasının dalga

enerjisinden optimum düzeyde faydalanarak enerji üretmesini sağlayacak yeni bir sarkaç tipi dalga enerji sistemi tasarımı yapmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, prototipte kullanılacak parçalarının 3D yazıcı ile üretimi, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla maliyetleri düşürecek, ölçeklendirme sorunlarını azaltacak ve özgün geometrilerin üretimini kolaylaştıracaktır. Ayrıca, güç çıkış mekanizması olarak literatürde daha önce sarkaç tipi DES mekanizmalarında kullanılmayan eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı bir alternatör tasarımı ve üretimi (3D yazıcı ile üretim parçaları yapılmıştır.) yapılarak, ileride yapılacak çalışmalarda öncü olacağı düşünülmektedir.

1.8. Kapsam

Giriş bölümünde, dünya genelinde enerji ve enerjinin kullanım alanları, yenilenebilir enerjinin günümüzdeki önemi, tez kapsamında olan dalga enerjisi (Dünya ve Türkiye) potansiyeli, dalga çeşitleri, dalga sayısal hesap yöntemleri ve DES sınıflandırmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu bölümde, tezin amacı ve literatürde yapılmış sarkaç mekanizmalı DES çalışmaları ele alınmış ve bu tez çalışmasının literatüre olan katkısından bahsedilmiştir. Yapılan çalışmalar kısmında, tezin çalışma bölgesi olan Karadeniz sahil şeridinde bulunan Ordu ili dalga karakteristiği değerleri incelenmiş ve verilerin nasıl temin edildiği anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde, farklı geometrili yüzer platformların, STDES modelinin ve alternatörün nümerik ve deneysel hesaplamalarının nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Bulgular kısmında nümerik analizler sonucunda elde edilen değerler ile deneysel analiz değerleri incelenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların tutarlı olup olmadığı karşılaştırılmıştır. Tartışma kısmında, yapılan hesaplamalarının literatüre uygunluğu ve elde edilen analiz sonuçlarının tutarlılığı tartışılmıştır. Sonuçlar kısmında, yapılan çalışmalarda elde edilen çıkarımlar özetlenerek sunulmuştur. Öneriler kısmında ise, STDES'lerin verimliliğini arttırmak için daha sonra ne gibi çalışmaların yapılabileceği ve deniz üzerine kurulu STDES enerji hasat sistemlerinin düşük dalga genliğine sahip bölgelerde alternatif bir enerji kaynağını oluşturabileceği ifade edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tezin bu bölümünde, STDES mekanizmasının analiz, tasarım ve deney aşamaları anlatılmıştır. Tüm mekanizmanın dinamiği farklı etmenlere bağlıdır: dalgalar ve platform, platform ve bağlama halatları, platform ve sarkaç, sarkaç ve dişliler, dişliler ve alternatör. Tüm bu etmenler kendi içinde kategorize edilerek anlatılmıştır.

2.1. Ordu İli Dalga Karakteristiğinin Belirlenmesi

Bu bölümde, Karadeniz kıyı bölgesinde bulunan Ordu ilinin dalga karakteristiği ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Akpınar ve Kömürcü (2012), Karadeniz'in güneydoğu kıyılarındaki dalga enerjisi potansiyelini araştırmış ve Doğu Karadeniz bölgesinde 7 farklı ilde dalga karakteristiği çalışması yapmışlardır. Şekil 11'de dalga karakteristiği çıkarılan Doğu Karadeniz illerinin ve çalışma bölgesi olan Ordu ilinin konumları verilmiştir. Çalışmada, SWAN (Simulated Waves Nearshore) modeli kullanılarak 1995-2009 dönemine ait altı saatlik verilerden yararlanılarak dalga enerjisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, şamandıra ölçümleriyle uyumlu olarak elde edilmiştir. Dalga enerjisi potansiyelinin karakterizasyonu için, çalışma noktalarında yıllık ve mevsimsel dalga gücü değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, dalga enerjisi gelişim indeksleri ve aşılma olasılıkları değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Doğu Karadeniz illeri ve Ordu ili detayı. (Akpınar ve Kömürcü (2012))

Tablo 3’de, Ordu için deniz durumlarından beklenen dalga enerjisinin 15 yıllık toplam süre boyunca saat olarak oluşum sayısını gösteren anlamlı dalga yüksekliği (Hs) ve belirgin dalga periyodu (Ts) değerleri verilmiştir. Tablo 2’de verilen anlamlı dalga yüksekliği, 0-5 m aralıklara bölünmüştür. Benzer şekilde, enerji periyodu 0-7 s aralığında bölmelere ayrılmıştır.

Tablo 3. 1995-2009 yılları saatlik Hs ve Ts deniz durumlarının oluşum sayısı

Ordu		Hs (m)									
		0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0
Ts (sn)	0-1	4320	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-2	83268	1818	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-3	10722	18540	1320	0	0	0	0	0	0	0
	3-4	6	3414	4788	1200	30	0	0	0	0	0
	4-5	0	18	474	714	564	96	12	0	0	0
	5-6	0	0	6	60	30	30	48	0	0	0
	6-7	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6

2.2. Yüzer Platform Optimizasyonu

Tez çalışmasında, kullanılacak şamandıranın performansı sayısal modelleme yöntemiyle araştırılmıştır. Sayısal modelleme yönteminde Hesaplamalı Akış Dinamiğine dayanan Ansys AQWA modeli kullanılmıştır. Üç boyutlu panel metot ve potansiyel teori tabanında geliştirilmiş olan yazılımda, çözümü yapılan akışkanın, ideal olduğu kabul edilmiştir. Platformlar ve diğer açık deniz yapılarında kullanılan ince, silindirik elemanların hidrodinamik analizleri içinse Morrison elemanları kullanılarak çözümler sunulmuştur (ANSYS Inc., 2022). Hesaplamalar 1:2 ölçek baz alınarak AQWA da 6 farklı yüzer platform analizi yapılmıştır ve çalışma bölgesi olan Ordu ilinin dalga karakteristik değerleri her bir şamandıra için test edilerek uygun platform geometrisi elde edilmeye çalışılmıştır.

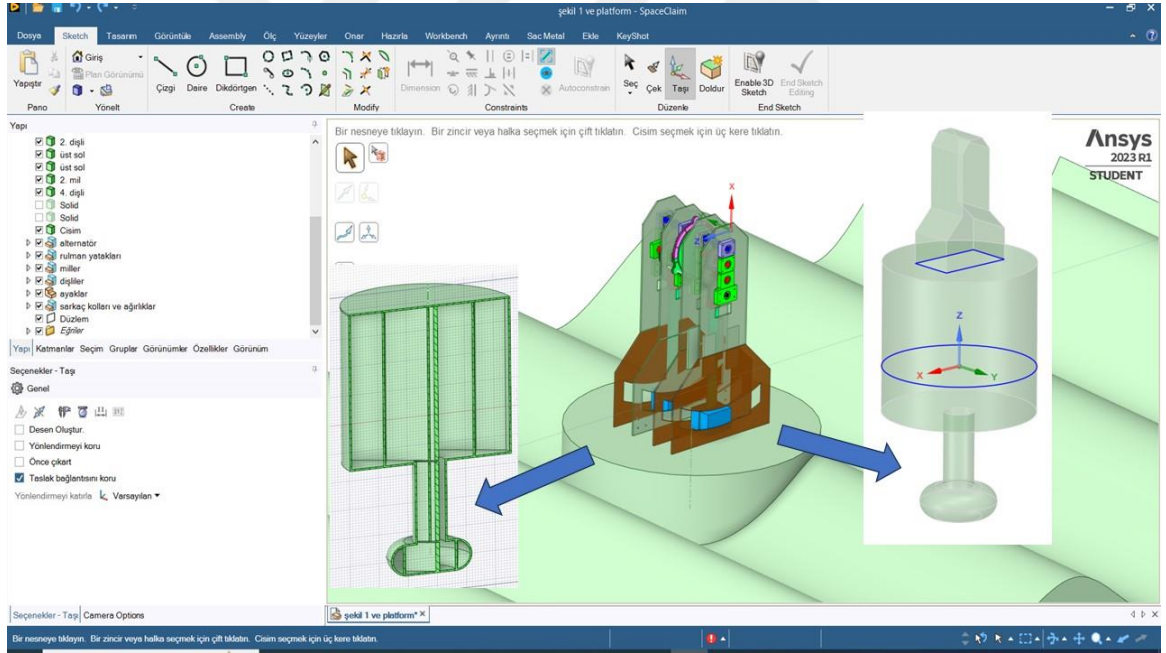
Şekil 12’de bu platformların üç boyutlu görselleri, teknik ölçüleri, yüzme merkezi ve ağırlık merkezi değerleri verilmiştir. Platformlar P1, P2, P3, P4, P5 ve P6 olarak kodlanmıştır. Platformlar arasında farklı geometriler bulunsun da ortak tasarım özellikleri mevcuttur. Her bir tasarımın, su çekimi, fribord ve genişlik ölçüleri eşit olarak alınmıştır. Ancak, eşit su çekimi yüksekliği nedeniyle deplasman tonajı değerleri farklılık göstermiş ve bunu dengelemek amacıyla salma kısmına farklı ağırlıklar eklenmiştir. Sonuç olarak, yüzme merkezi ve ağırlık merkezi değerleri platformlar arasında farklılık göstermiştir.

Tablo 4. Platform ve STDES sistemine ait yapısal özellikler

Yapısal Özellikler		P1	P2	P3	P4	P5	P6	Birim
Yüzer Platform								
Genişlik (B1)		1						m
Derinlik (D)		1,7						m
Su Çekimi (T)		1						m
Fribord(f)		0,7						m
Deplasman Hacmi (∇)		0,28	0,35	0,224	0,192	0,271	0,153	m^3
Deplasman Tonajı(Δ)		291,51	357,52	229,395	196,288	277,878	156,723	kg
Yüzdürme Merkezi(B)		-0,26	-0,24	-0,263	-0,281	-0,241	-0,345	m
Platform Kütlesi (Mp)		60,00	64,00	56,93	51	61,370	50,000	kg
Platform Ağırlık Merkezi (Gp)		0,09	0,10	0,1546	0,1304	0,131	0,087	m
Yapı Malzemesi Yoğunluğu	%60 PVC Köpük	80						kg/m^3
	%40 Reçine Polyester	1140						kg/m^3
Atalet Momentleri	Ixx(Baş-Kıç vurma)	25	27	23	20	26	13	kg.m^2
	Iyy(Yalpa)	25	27	23	20	26	14	kg.m^2
	Izz(Savrulma)	13	14	11	9	14	8	kg.m^2
Ek Kütle(kurşun)								
Kütle (M _{ek})		188,29	250,30	129,245	102,0675	173,2875	63,5025	kg
Ağırlık Merkezi (G _{ek})		-0,91	-0,88	-0,93668	-0,95	-0,91511	-0,96889	m
Kurşun Yoğunluğu		11340						kg/m^3
Atalet Momentleri	Ixx(Baş-Kıç vurma)	1,95	3,13	1,14206	0,850575	1,715959	0,496756	kg.m^2
	Iyy(Yalpa)	1,95	3,13	1,14206	0,850575	1,715959	0,496756	kg.m^2
	Izz(Savrulma)	2,82	3,75	1,938675	1,531013	2,599313	0,952538	kg.m^2
STDES Gövde								
Kütle (Ms)		21,22						kg
Ağırlık Merkezi (Gs)		1,03						m
Atalet Momentleri	Ixx(Baş-Kıç vurma)	1,46						kg.m^2
	Iyy(Yalpa)	1,48						kg.m^2
	Izz(Savrulma)	0,51						kg.m^2
Jeneratör,dişliler,rulmanlar vb. ekler								
Kütle (Mj)		8						kg
Ağırlık Merkezi (Gj)		1,383						m
Atalet Momentleri	Ixx(Baş-Kıç vurma)	0,053						kg.m^2
	Iyy(Yalpa)	0,053						kg.m^2
	Izz(Savrulma)	0,053						kg.m^2
Sarkaç Kolu								
Kütle (Msa)		14,00						kg
Ağırlık Merkezi (Gsa)		0,77						m
Atalet Momentleri	Ixx(Baş-Kıç vurma)	0,13						kg.m^2
	Iyy(Yalpa)	0,02						kg.m^2
	Izz(Savrulma)	0,14						kg.m^2

2.2.1. Örnek P1 Platform Analizi

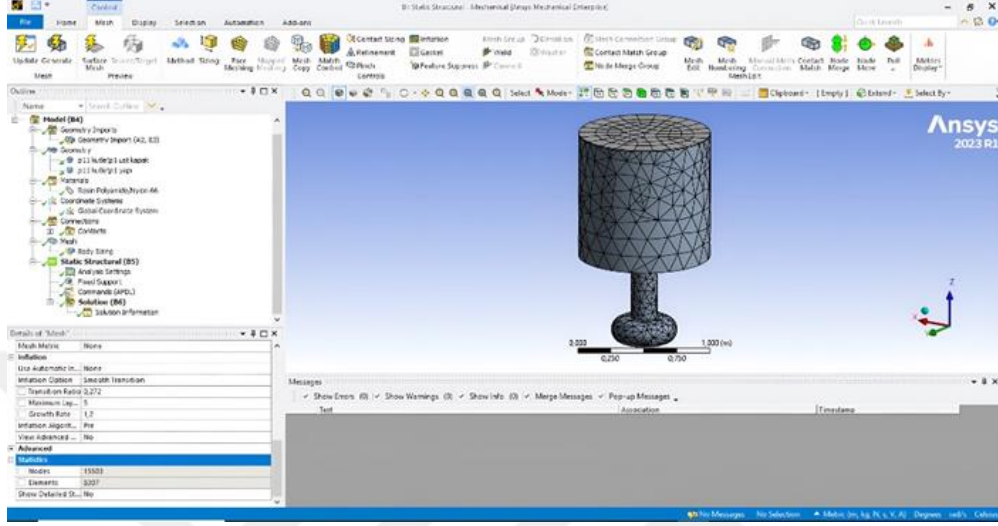
Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerin daha iyi anlaşılabilmesi için P1 modeli örnek olarak alınmıştır. Öncelikle tasarımın üç boyutlu bir görseli oluşturulmuştur. Bunun için Ansys'in modelleme ve tasarım programı olan Space Claim programı kullanılmıştır. Daha sonra oluşturulan tasarımın hem kütle analizleri hem de hidrodinamik analizleri için iki farklı türde tasarım oluşturulmuştur. Kütle analizleri için katı modele cidar kalınlığı verilmiştir. Böylece malzeme seçimi yapılarak doğru bir ağırlık ve ağırlık dengesi sonucu elde edilmiştir. Hidrodinamik analizde ise platform ve STDES yapıları yüzey şeklinde çizilerek modele girilmiştir. Ayrıca tüm platformlarda ortak olan 1 metre su çekimi mesafesine uyacak şekilde platform su altı ve su üstü olarak ikiye ayrılmıştır. Böylece su altı hidrodinamik analizlerinin daha doğru sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Şekil 13'te katı model kesit görüntüsü ve yüzey model görüntüsü verilmiştir.



Şekil 13. Örnek P1 platformunun katı model kesiti ve yüzey model görünümü

Tasarımlarda tüm platformların cidar kalınlığı 10 mm olarak alınmış ve 4 perde şeklinde tasarlanmıştır. Ayrıca tüm platformların malzemesi kompozit malzeme olarak seçilmiştir. Malzeme seçimi ve cidar kalınlığı belli olan P1 modelinin ağırlığı, ağırlık merkezi ve atalet momenti değerlerinin analizi için Ansys-Workbench de Static Structure modülü kullanılmıştır. Modelin sonlu elemanlar yöntemini kullanılabilmesi için ağ yapısı

oluşturulmuştur. Ağ yapısında 15503 node ve 8307 element örgüsüne göre analiz edilmiştir. Malzeme seçimi olarak kompozit %60 PVC köpük ve %40 epoxy reçine elyaf kullanılmıştır. Modüle ait statik analiz görüntüsünü veren model sayfası görseli Şekil 14'te verilmiştir.

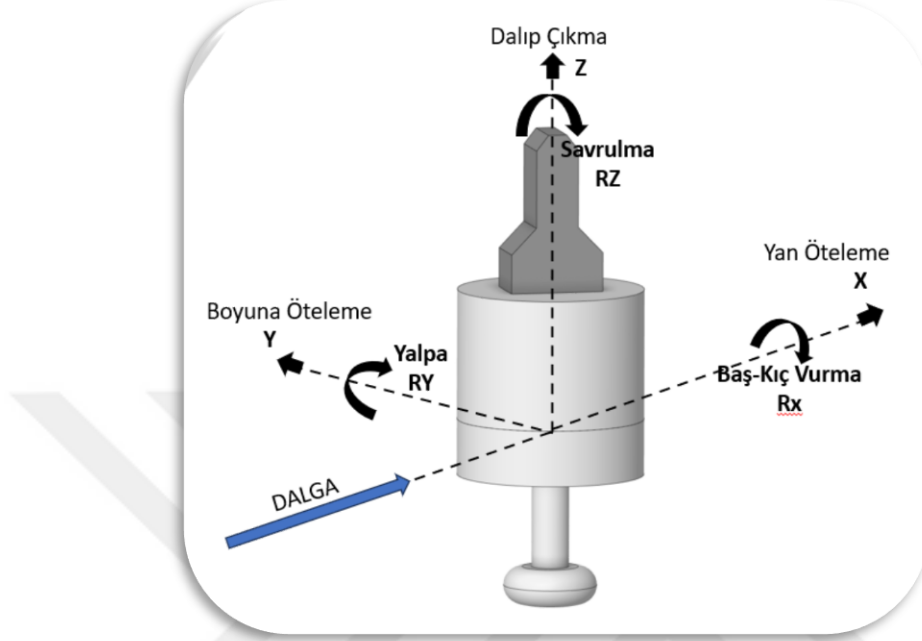


Şekil 14. Statik analiz görüntüsü

Hidrodinamik analiz girdilerini belirlemek için modelin ağırlık dağılımını, denge merkezini, yüzme merkezini belirlemek son derece önemlidir. Bu nedenle yapılan statik analizler sonucunda P1 platformuna ait kütle, ağırlık merkezi ve atalet momenti değerleri yüzer bir sistemin stabilite değerlerini en uygun bir şekilde belirlememize imkân sağlamaktadır. Elde edilen bu veriler neticesinde toplam ağırlık ve deplasman ağırlığının dengede olması sağlanmıştır. Deplasman ağırlığı ile platform toplam ağırlığı arasında oluşacak uyuşmazlıkları gidermek için salma kısmına kurşun malzemesinden ağırlık eklenerek ağırlık denge şartı sağlanmıştır.

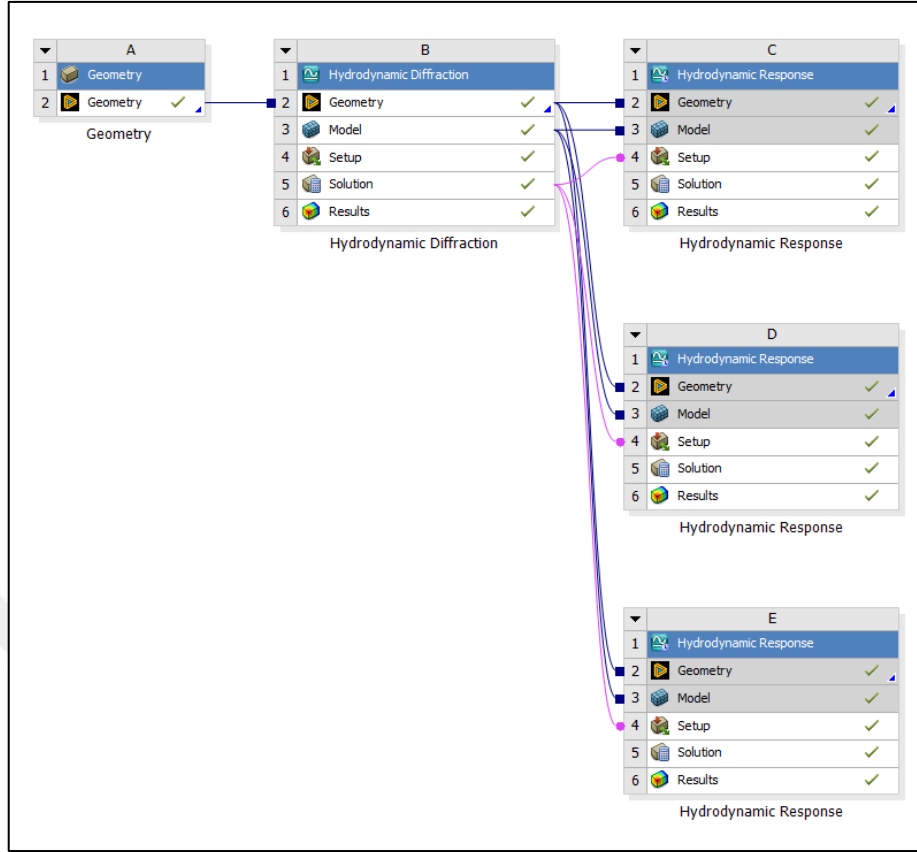
Yüzer yapılar, altı farklı hareket türünü gerçekleştirebilir, yani altı serbestlik derecesine sahiptir. Bu hareketlerin üçü deplasman (boyuna öteleme(Y), yan öteleme(X), dalıp çıkma(Z)) hareketlerini içerirken, diğer üçü rotasyon (yalpa (RY), baş vurma (RX), savrulma (RZ)) hareketlerini ifade eder. Bu altı farklı hareket, Şekil 15'te gösterilmiştir. İlk olarak bu 6 farklı hareketin doğal periyotları bulunmuştur. Doğal periyotları bulmak için her hareketin serbest sönümlenme testi yapılmıştır ve oluşan salınımların periyoduna bakılmıştır. STDES sitesinde bulunan sarkaç sistemi x eksenı boyunca salınım yapacağından özellikle platformun RY doğal periyodunun dalga periyodu ile maksimum

uyum, RZ, RX, X, Y ve Z ile minimum uyumlu olması gerekmektedir. Bu nedenle farklı tasarımlar analiz edilerek optimum değerleri sağlayan model seçilmiştir.



Şekil 15. P1 platformu altı farklı serbestlik derecesi hareketi.

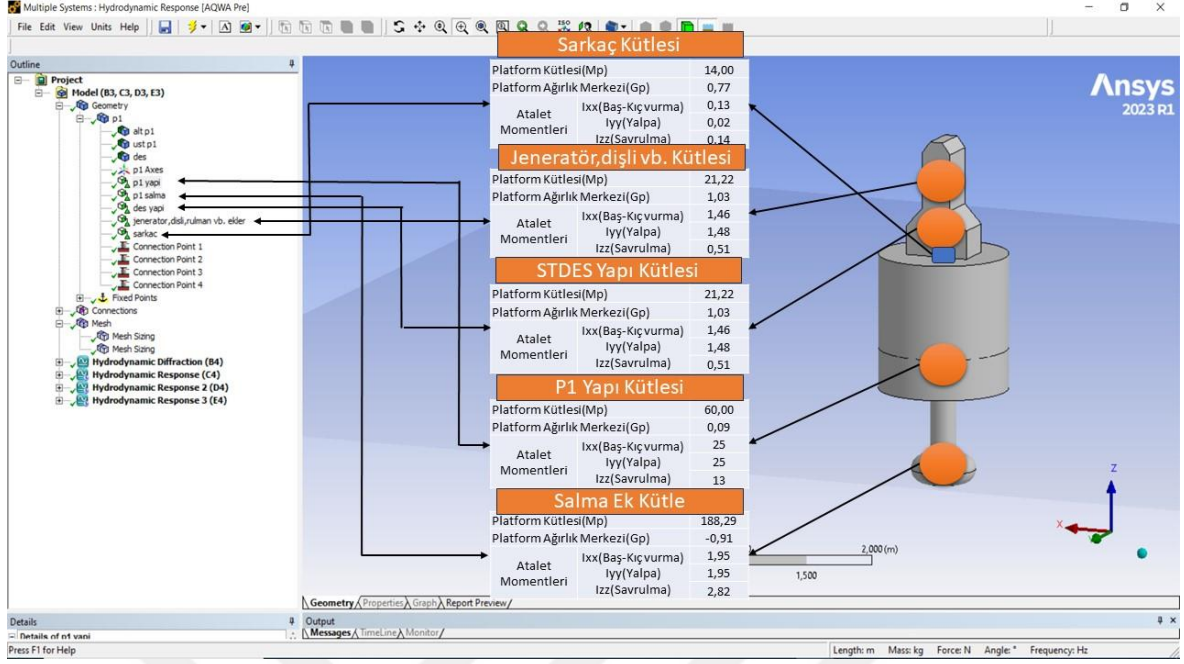
Tasarımı yapılan P1'in hidrodinamik analiz hesaplarının yapılabilmesi için, geometri katı modelden yüzey modele çevrilmiştir. Daha sonra yüzey suyun altında kalan ve su üstünde kalan olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Altı farklı platformunda su çekimi yüksekliği 1 m ve su üstü yüksekliği 0,7 m olarak belirlenmiştir. Yüzer platform geometrisinin hidrodinamik analiz girdileri oluşturulduktan sonra, son olarak STDES platformun üzerine yerleştirilerek hazır hale getirilmiştir. Şekil 16'da P1 platformunun Ansys AQWA'da hidrodinamik analiz basamakları verilmiştir. Platformun ilk olarak hidrodinamik difraksiyon analizi yapılarak yüzer platform yapısının doğal frekansı ile seçili dalga frekansı karşılaştırılmış ve uyumluluk analizi yapılmıştır. Belirlenen dalga verileri ile en uyumlu rezonans aralığı, tasarlanan tüm platform geometrileri için incelenerek, analiz edilmiştir. Daha sonra üç farklı hidrodinamik etki analizi yapılarak zamana bağlı düzenli ve düzensiz dalgalar için farklı dalga genlikleri ve periyotlarında P1 şeklinin seçili dalga parametrelerine karşı hidrodinamik davranışı analiz edilmiştir.



Şekil 16. P1 platformu Ansys AQWA analiz akış şeması

Ansys AQWA’da analize başlamadan önce çevre ve platforma ait bazı sınır verilerin girilmesi gerekmektedir. Çevre sınır şartları olarak, deniz derinliği 10 m ve x-y eksenı boyunca deniz sınırı 10 m olarak kabul edildi. Deniz suyu yoğunluğu çalışma bölgesi olan Karadeniz yoğunluk değeri seçildi. Analizi yapılacak platforma ait verileri sıralayacak olursak; Ağırlık dağılımı, bağlantı elemanları konum ve teknik özellikleri, P1 analiz ağ yapısı özellikleri şeklinde oluşur. Tüm bu veri değerleri programa girildikten sonra platformun dalgalara karşı yapmış olduğu hidrodinamik hareket analizleri AQWA’nın “Hidrodinamik Difraksiyon” ve “Hidrodinamik Zaman Tepkisi” modülleri ile test edildi.

Şekil 17’de analizi yapılan P1’in ağırlık dağılımları ve konumları verilmiştir. Sistemde 5 adet ağırlık bulunmaktadır. Bunlar; P1 platformunun yapı ağırlığı, salmaya eklenen ek ağırlık, STDES yapı ağırlığı, jeneratör-dişliler-rulmanlar vb. ek bağlantı elemanları ve son olarak sarkaç kolu ağırlığıdır. Ağırlıkların konumları ve büyüklükleri daha önce yapılan Statik analiz sonuçlarından temin edilmiştir.



Şekil 17. Ansys AQWA programında P1 platform ve STDES ağırlıkları ve konumları

Yüzer platformlar tasarlanırken deniz dalgı ve akıntılardan kaynaklanan büyük yatay hareketleri önlemek için bir bağlama sistemi gerekmektedir. Literatürde farklı tipte bağlama sistemleri mevcuttur. Bu tez çalışması boyunca yüzer platformlar için en çok tercih edilen katineri bağlantı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem bazı varsayımları içermektedir:

- Bağlama hattının çok yavaş hareket etmesi nedeniyle sürüklenme ve atalet kuvvetleri ihmal edilir.
- Bağlama hattına uygulanan çevresel yükler önemsizdir ve modele dahil edilemez.
- Çapa noktası herhangi bir yönde hareket etmez.
- Bağlama hattı yatay bir deniz tabanına uzanır, bu nedenle eğimli deniz tabanı etkileri göz ardı edilir.

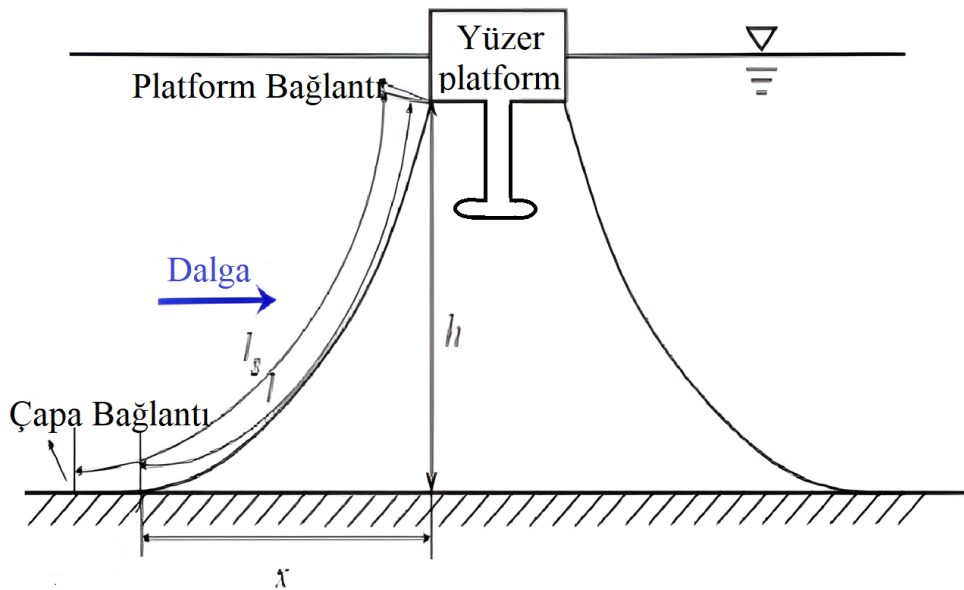
Bu varsayımlar, deniz platformunun bağlama sisteminin basitleştirilmiş bir modelini oluşturur ve platformun yatay düzlemde sabitlenmesini sağlamak amacıyla kullanılır (Freng vd., 2020).

Katineri hatları tarafından bağlı olan bir yüzer yapı için, gerilme değeri denklem (12) ve (13)'de gösterilmiştir.

$$x = l - h \left(1 + \frac{2a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \cos h^{-1} \left(1 + \frac{h}{a} \right) \quad (12)$$

$$T = T_H + wh \quad (13)$$

Denklem (13)'de bulunan T_H , yüzer yapının ağırlığı ve çevresel yükler nedeniyle hat üzerinde yatay olarak etki eden kuvvet olan bağlama hattındaki yatay gerilimi temsil eder. Sudaki birim uzunluk başına katineri bağlama hattının ağırlığı w ile temsil edilir. Denklem (12)'de katineri parametresi, a , T_H 'nin w 'ye oranı ile verilir. Bu parametre, kendi ağırlığı altında asılı duran bir eğri olan bağlama hattının şeklini ve ona uygulanan gerilimi hesaplamak için kullanılır. Denklem (12)'de bulunan x ve h , sırasıyla çapa ve bağlama hattının yüzer yapıya tutturulduğu nokta arasındaki yatay ve dikey mesafelerdir. Bu mesafeler ve uzunluk değerlerinin konumları daha iyi anlaşılabilmesi için, Şekil 18'de kesit resmi olarak verilmiştir. Şekil 18'de görülen x , palet ucundan bağlantı noktasına (l) kadar olan bağlama hattının uzunluğu ile palamar hattının uzunluğundan temas noktasına (l_s) kadar olan uzunluğu ve bağlama hattının yüzer yapıya tutturulduğu nokta ile temas noktası (x) arasındaki yatay mesafe arasındaki fark olarak ifade edilir. Şekil 18'de (l) değeri ise yüzer yapıya tutturulduğu nokta ile deniz dibi üzerindeki bağlantı noktası arasındaki mesafedir. Yüzer yapıya tutturulduğu noktadan temas noktasına kadar olan bağlama hattının uzunluğu, l_s olarak gösterilir. Bu değişkenler, yüzer yapının stabilitesini ve güvenliğini belirlemede önemli faktörler olan bağlama hattının şeklini ve üzerindeki yatay gerilimi hesaplamak için kullanılmıştır (Freng vd., 2020).



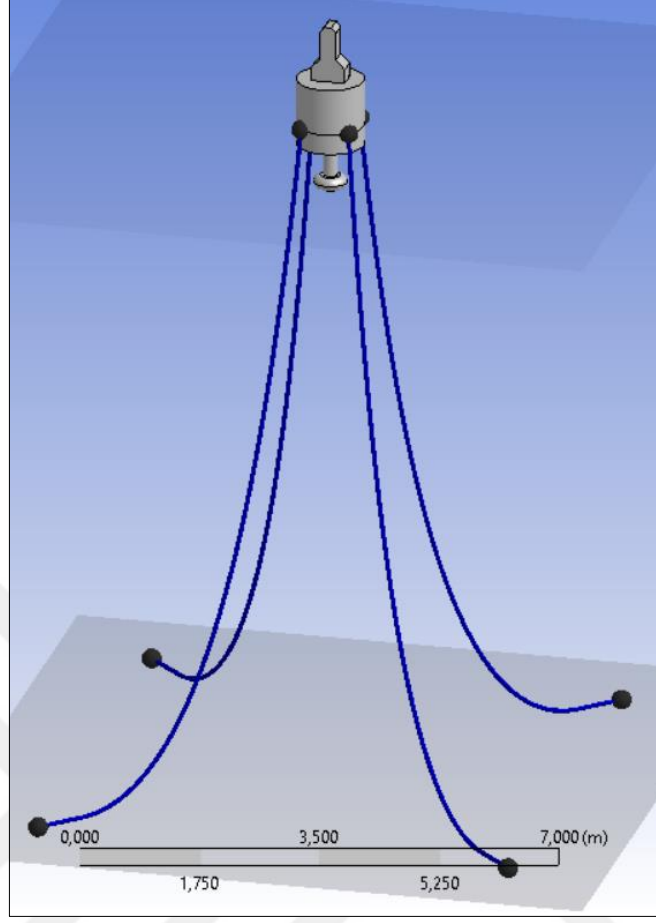
Şekil 18. Katineri bağlantı şeklinin iki boyutlu görüntüsü

Platform ve deniz zemini arasında oluşturulacak katineri bağlantı seçimi yapıldıktan sonra bağlantıda kullanılacak halat seçimi de son derece önemlidir. Uygulanacak halatın teknik özellikleri platformun bulunduğu bölgedeki deniz koşullarına elverişli olması gerekmektedir. Bu nedenle analizlerde kullanılacak kablo değerlerini belirlemede internette yüzer deniz yapıları için zincir, polyester ve çelik halat üreten firmalar araştırıldı. Halat bağlantısı olarak daha hafif ve sağlam malzemeden olan karbon alaşımlı deniz tipi kablo kullanıldı (URL-1, 2023). Kabloya ait teknik parametreler ve kablo bağlantı koordinatları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Bağlama halatlarının teknik özellikleri ve bağlantı noktalarının koordinatları

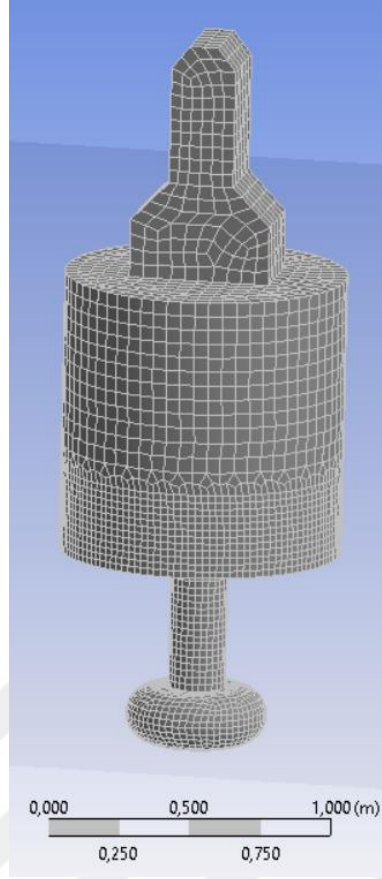
Bağlantı Kablosu Ana Özellikleri				
Bağlantı Tipi			Katineri	
Bağlantı Sayısı			4	
Halat Tipi			Polyester	
Kuru Ağırlık/metre (kg)			0,44	
Halat Kesit Alanı (m^2)			4,52E-04	
Gerilme Direnci (EA) (N)			1,58E+06	
Maksimum Gerilme (N)			1,32E+04	
Halat Çapı (m)			0,024	
Koordinatlar (m)				
		X	Y	Z
P1 bağlantı açısı				
1	45°	0,353	0,353	0
2	135°	-0,353	0,353	0
3	225°	-0,353	-0,353	0
4	315°	0,353	-0,353	0
Çapa açısı				
1	45°	3,535	3,535	-10
2	135°	-3,535	3,535	-10
3	225°	-3,535	-3,535	-10
4	315°	3,535	-3,535	-10

Şekil 19’da Ansys AQWA’da tüm bağlantı koordinatları ve teknik özellik değerleri girildikten sonra oluşan üç boyutlu model görseli verilmiştir. Burada sınır şartları olarak deniz derinliği ve deniz x-y sınır mesafeleri 10 m olarak alınmıştır.



Şekil 19. Katineri bağlantı şeklinin AQWA’ da üç boyutlu görüntüsü

Ansyes AQWA gibi yazılımlar, denizcilik mühendisliği ve deniz yapıları analizi için kullanıldığında, ağ örme işlemi, deniz yapısının yüzeyini veya hacmini, analiz için daha küçük ve hesaplamaların daha kesin yapılmasını sağlayan üçgenler, dörtgenler veya diğer geometrik elemanlara böler. Bu ağ, deniz yapılarının davranışını, güçlerini, gerilme ve deformasyonlarını incelemek ve hesaplamak için kullanılır. Şekil 20’da platformun su altı ve su üstü ağ yapısı görülmektedir. Ağ yapısı “Hidrodinamik Difraksiyon” ve “Hidrodinamik Zaman Tepkisi” analizlerinde daha hassas sonuçlar verilebilmesi için su altı ağ yapısını 0,025 element olarak seçildi. Suyun üst kısmında kalan platformda hidrodinamik analiz yapılmayacağından ağ yapısı 0,05 element büyüklüğünde seçildi. Bu şekilde toplam 6126 element ve 6122 node ile oluşan bir ağ yapısı oluşturuldu.



Şekil 20. P1 platformuna ait yüzey ağ yapısı görüntüsü

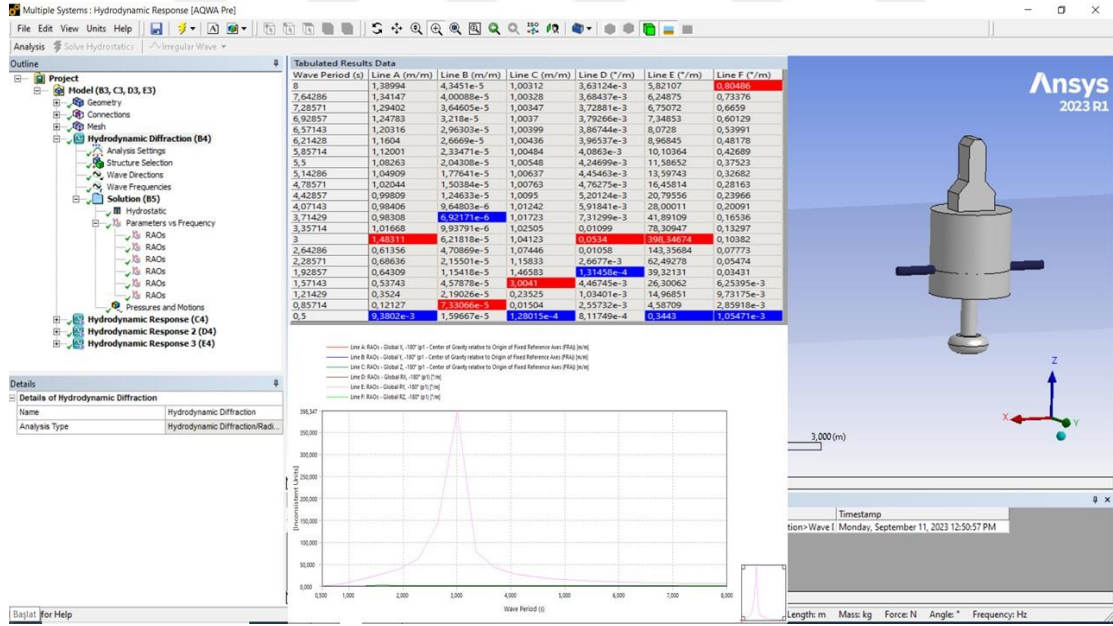
AQWA, 2005 yılında Ansys bünyesine katılmış ve “Hidrodinamik Difraksiyon” ve “Hidrodinamik Zaman Tepkisi” isimleri altında kullanıcılara sunulmuştur. “Hidrodinamik Difraksiyon” modülünde hesaplamalarda, lineer teori kullanılmaktadır ve frekans uzayında çözümler yapılmaktadır. Bu çözümler neticesinde, düzenli dalgalarındaki yapı hareketleri (RAO eğrileri), ıslak yüzeylerdeki hidrodinamik basınçlar ve dalga yükü altındaki yapılarda oluşan eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri hesaplanabilmektedir (Alkarem vd., 2018). Bu bölümde ise P1 platformu, 6 serbestlik derecesi için doğal periyod analizi yapılarak RAO eğrileri değerlerine bakılmıştır ve Ordu ili dalga periyodu ile uyumluluğu karşılaştırılmıştır. Platform Ordu ili kıyı şeridinde dik olacak şekilde deniz üzerinde konumlandırılacaktır. Bu nedenle 6 serbestlik derecesi için platformun en verimli şekilde çalışabilmesi RY (yalpa periyodu) değerinin Ordu dalga periyodu ile benzerlik göstermesi ve diğer 5 serbestlik derecesinin olabildiğince az benzerlik göstermesi gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için tasarımsal birçok farklı model geliştirilerek en uygun platform geometrisi elde edilmeye çalışılmıştır

“Hidrodinamik Difraksiyon” analizi için gerekli örnek P1 veri girdileri ve çevre sınır şartları değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

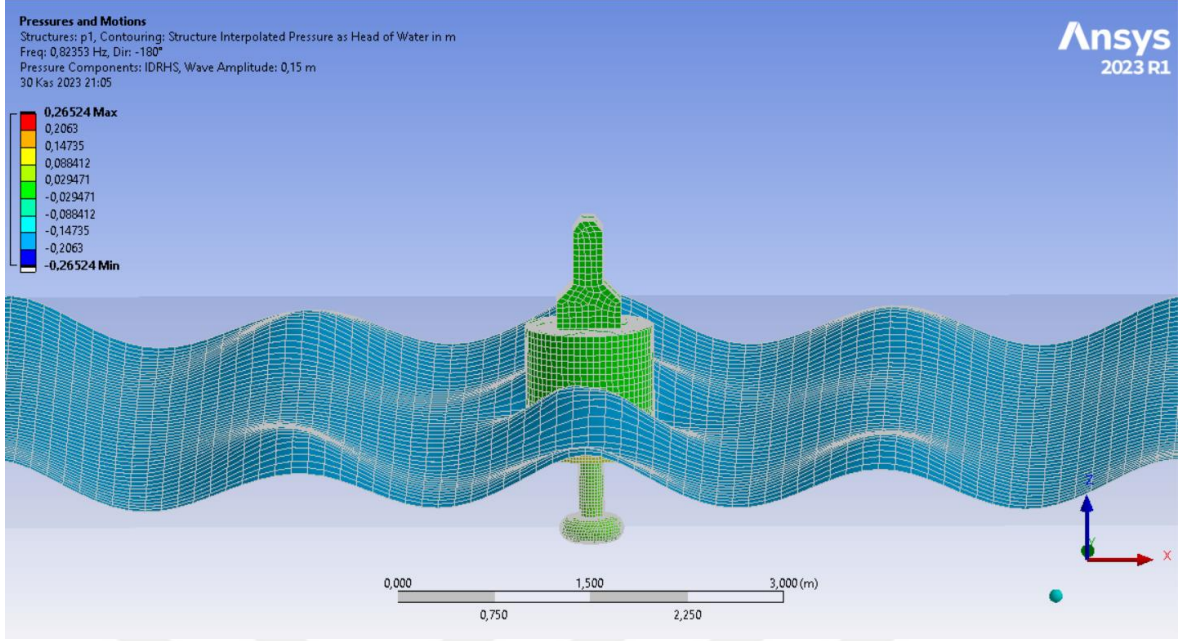
Tablo 6. Hidrodinamik Difraksiyon analiz girdileri

Sınır boyutları(m)	X	Y	Z(derinlik)
	10	10	10
Su yoğunluğu (kg/m ³)		1025	
Yerçekimi (m/s ²)		9,806	
Dalga yönü (°)		180	
Dalga periyod aralığı (s)		0,5-8	
Periyod aralığı değer sayısı		20	

Şekil 21’de ise analize ait ekran görüntüleri verilmiştir. Bu şekilde 6 farklı geometri analizi sonuçları Ordu ili dalga periyodları ile karşılaştırılmak üzere kaydedildi. Şekil 22 platformun belirlenen dalga periyodu ve düzenli dalga yüksekliklerine karşı göstermiş olduğu hareketin bir görseli verilmiştir.



Şekil 21. Hidrodinamik Difraksiyon analizi ekran görüntüsü



Şekil 22. P1 modelinin düzenli bir dalga da yapmış olduğu salınım hareketi görseli

“Hidrodinamik Zaman Tepkisi” modülünde ise zaman uzayında çevresel yükler altında lineer veya non-lineer çözümler yapılmaktadır. Bu kısımda: a) Düzenli, düzensiz veya zamana bağlı dalga kuvvetleri ve dalga spektrumları, b) Düzenli veya profile dayalı akıntı ve rüzgâr yükleri, demirleme sistemleriyle bir veya birden çok yapının hareketleri, c) Bağlantı elemanları üzerinde oluşan yükler hesaplanabilmektedir.

Tez kapsamında incelenecek olan tüm yüzer platform analizleri, 1:2 Froude ölçeği kullanarak modellenmiştir. Akpınar ve Kömürcü (2012), yapmış olduğu Ordu ili dalga yüksekliği ve dalga periyodu verileri Froude ölçeğine göre analiz girdisi olarak hesaplanmıştır. Tablo 7’te verilen parametrelerin ölçeklendirme faktörü göz önüne alındığında dalga yüksekliği bir uzunluk birimi olduğu için ölçeklendirme faktörü λ olarak alınmıştır. Zamana bağlı bir birim olan dalga periyodunda ise ölçeklendirme faktörü $\lambda^{0.5}$ olarak seçilmiştir.

Tablo 7. Parametrelerin ölçeklendirme faktörü

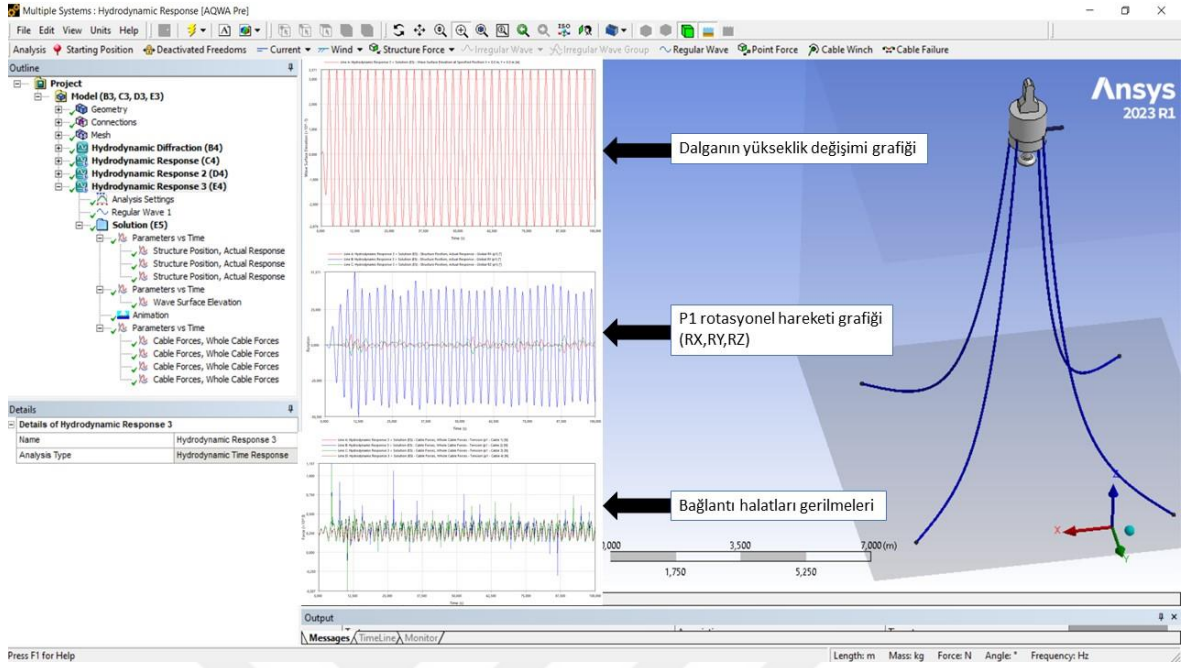
Parametre	Birim	Ölçeklendirme Faktörü
Uzunluk	[L]	Λ
Alan	[L] ²	λ^2
Hacim	[L] ³	λ^3
Yoğunluk	[M][L] ⁻³	1
Kütle	[M]	λ^3
Zaman	[T]	$\lambda^{0.5}$
Frekans	[T] ⁻¹	$\lambda^{-0.5}$
Hız	[L][T] ⁻¹	$\lambda^{0.5}$
İvme	[L][T] ⁻²	1
Kuvvet	[M][L][T] ⁻²	λ^3
Moment	[M][L] ² [T] ⁻²	λ^4
Güç	[M][L] ² [T] ⁻³	$\lambda^{3.5}$
Gerilme	[M][L] ⁻¹ [T] ⁻²	Λ
Kütle atalet momenti	[M][L] ²	λ^5
Alan atalet momenti	[L] ⁴	λ^4

Tablo 8’de “Hidrodinamik zaman tepkisi analizi” için 1:2 ölçeğine göre dalga yüksekliği ve dalga periyod değerleri verilmiştir. Dalga periyodu değerleri 1-5 sn aralığında 1 sn zaman dilimlerinde seçilmiştir. Dalga yükseklikleri 0,25-2,25 m yüksekliğinde 0,25 m yükseklik aralığında olacak şekilde seçilmiştir. Bu şekilde 20 farklı deniz durumu oluşturulmuş ve bu değerlerin 1:2 Froud ölçekli değerleri nümerik ve deneysel analizlerde kullanılmak üzere hesaplanmıştır. Dalga yüksekliği verilerinin seçiminde Ordu ilinde belirlenen dalga periyodlarına göre en yoğun dalga yüksekliklerinin olduğu aralık alınmıştır. Bu şekilde tasarlanacak platformların hem en düşük dalga genliklerindeki optimum performans aralığı, hem de en yüksek dalga genliklerinde oluşan halat kopma dayanımı ve STDES mekanizmasında oluşan dinamik kuvvetlerin analizi incelenecektir.

Tablo 8. Ordu ili 20 farklı dalga parametresi ve 1:2 Froud ölçekli dalga parametresi

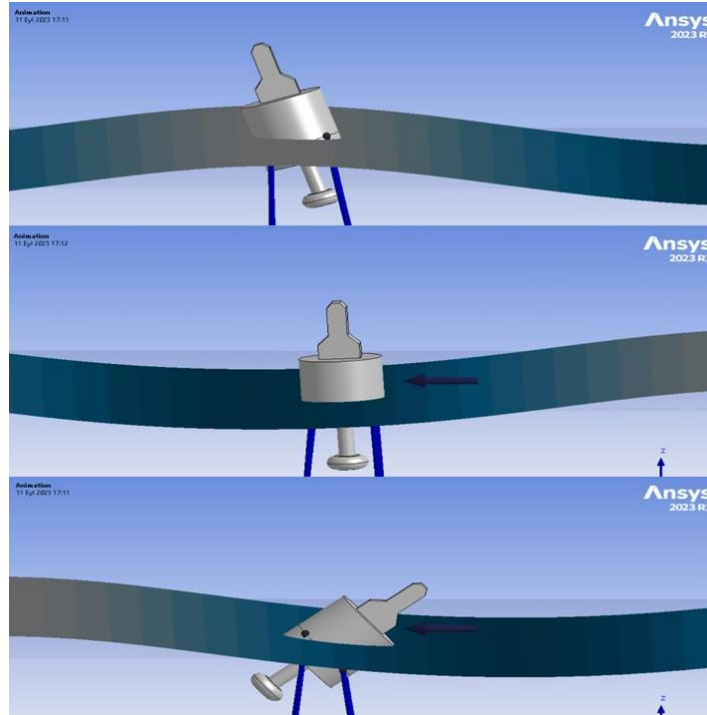
T ve H değerleri			
Ordu ili dalga karakteristiği		1:2 Froude ölçeği dalga karakteristiği	
T	H	T	H
1	0,25	0,707	0,125
1	0,5	0,707	0,25
2	0,25	1,414	0,125
2	0,5	1,414	0,25
2	0,75	1,414	0,375
2	1	1,414	0,5
3	0,25	2,121	0,125
3	0,5	2,121	0,25
3	0,75	2,121	0,375
3	1	2,121	0,5
3	1,25	2,121	0,625
3	1,5	2,121	0,75
4	0,75	2,828	0,375
4	1	2,828	0,5
4	1,25	2,828	0,625
4	1,5	2,828	0,75
4	1,75	2,828	0,875
5	1,25	3,536	0,625
5	2	3,536	1
5	2,25	3,536	1,125

Ölçekli dalga karakteristiği verileri neticesinde P1 platformunun yapmış olduğu 6 serbestlik dereceli hareket analizi düzenli ve düzensiz dalgalar için test edilmiştir. Verilen 20 farklı dalga yüksekliği ve dalga periyodunun platformda oluşturduğu deplasman (X, Y, Z) ve rotasyon (RX, RY, RZ) hareket sonuçlarına bakılmıştır. Tez çalışmasında sarkaç tipi bir DES sistemi kullanılması ve DES modelinin sahile paralel konumlandırılması neticesinde, RY (yalpa) hareketlerinin enerji verimliliği açısından uygun değerlerde olup olmadığı incelenmiştir. Ayrıca platforma bağlanan katineri bağlama halatları ile platformdaki dinamik stabilite değerlerindeki değişimlere ve kablolar üzerinde oluşan gerilme değerlerine bakılmıştır. P1 platformunun hidrodinamik zaman tepkisi analizinde, düzenli dalgaların hesabı için ikinci derece stokes dalga teorisi kullanılmıştır. Analiz zaman süresi 60 saniye, zaman aralığı 0,1 saniye olarak seçilmiştir. Dalganın geliş açısı 0° , 30° , 45° olarak üç farklı şekilde yapılmıştır. Yapılan düzenli dalga analizine ait program görüntüleri Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23. P1 platformu düzenli dalga analizi görüntüsü

Şekil 24'de düzenli dalgalara karşı P1 platformun yapmış olduğu hareketlere ait bazı resimler verilmiştir. Dalga yüksekliği 0,6 m ve dalga periyodu 2,82 saniye olarak seçilmiştir.

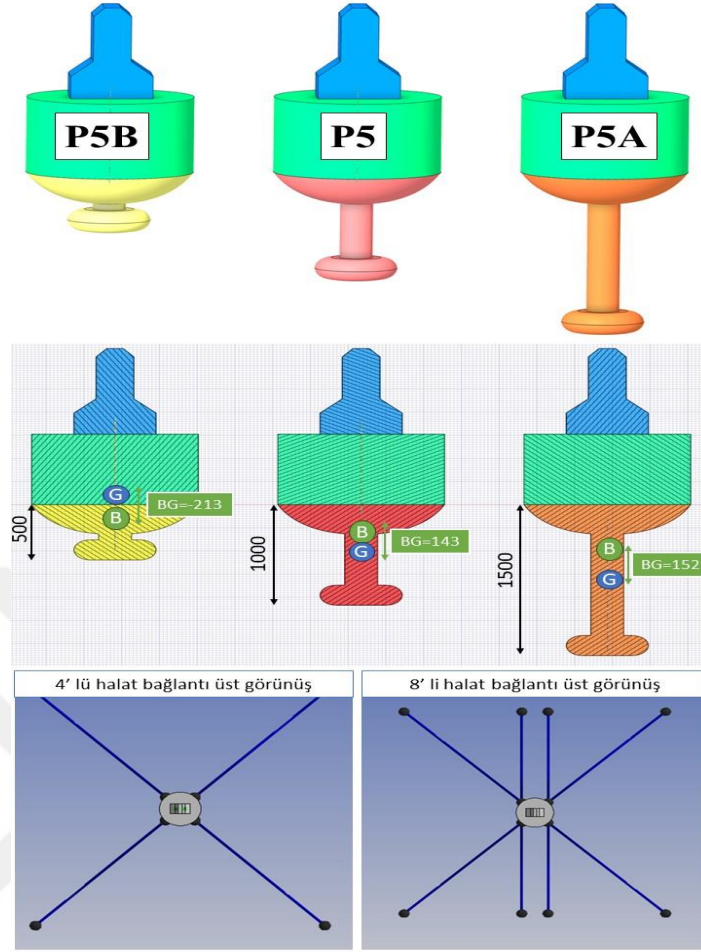


Şekil 24. P1 zamana bağlı düzenli dalga hareketleri

P1 platformunun düzensiz dalga analizi için zaman değeri 100 sn ve zaman aralığı 0,1 sn seçilmiştir. Düzensiz dalga tipi olarak Jonswap dalga spektrumu seçilmiştir. Başlangıç periyodu 10 sn, bitiş periyodu 0,5 sn, pik dalga yüksekliği 0,5 m, gamma değeri 2 ve pik periyodu 3 sn olarak çevre sınır koşulları belirlenmiştir. Düzenli dalgalarda olduğu gibi düzensiz dalgalarda da P1'in yapmış olduğu rotasyon hareketlerine, bağlama halatı kablo gerilmelerine üç farklı dalga geliş açısı (0° , 30° , 45°) ile incelenerek analiz çıktıları alınmıştır.

Örnek olarak verilen P1 hidrodinamik analizi daha önce belirlenen 6 farklı yüzer platform için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analiz boyunca en önemli kriterlerden biri olan dalga periyodu ile platform doğal periyodunun benzerlik göstermesi ve zamana bağlı düzenli ve düzensiz dalga analizlerinde yüzer yapının bağlantı halatları ile istenilen optimum yalpa açısını yapması ve diğer hareketleri minimum düzeyde yapması istenmektedir. Böylece seçilen en uygun platform geometrisi metodoloji kısmında bir sonraki adım olan sarkaç ve dişli hareketlerinin platformun hareketine göre nasıl bir dinamik hareket göstereceğini belirleyecektir. Bu nedenle tüm platformlardan elde edilen sonuçlar neticesinde en uygun geometri P5 olarak belirlenmiştir.

Ayrıca seçilmiş olan P5 platformunun salma uzunluğu 3 farklı şekilde tasarlanmıştır. Salma uzunlukları 500,1000,1500 mm olarak seçilmiş ve analiz edilmiştir. Kısa salma uzunluğu tutularak baygın bir gövde yapısı oluşturulmuştur. Uzun salma uzunluğunda ise diri bir gövde yapısı oluşturulmuştur. Böylece oluşturulan farklı dalga parametrelerine karşı platformun hidrodinamik davranışları test edilmiştir. Ayrıca her 3 farklı şekil için 2 farklı (4 ve 8 halatlı) halat bağlantı konfigürasyonları ile bağlanarak tekrar analiz edilmiştir. Tüm bu farklı veriler neticesinde en uygun geometrinin 1500 mm uzunluğunda salma geometrisi ve 8'li katineri bağlantı şekli olduğu tespit edilmiştir. Şekil 25'te P5 farklı salma uzunları ve farklı bağlantı tiplerinin görselleri verilmiştir. Kısa salma uzunluğunda olan platform için P5B, uzun salma olan platform için P5A kodu verilmiştir.



Şekil 25. P5 platformuna ait farklı salma uzunları ve bağlantı halatı şekilleri

2.3. STDES Optimizasyonu

Tezin bu bölümünde STDES üzerinde bulunan sarkaç ve buna bağlı olan dişli sisteminin dinamik analizi yapılmıştır. Analize başlamadan önce uygun yüzer platform geometrisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bölüm 2.2’de hidrodinamik analizleri yapılan 6 farklı platform içerisinden, çalışma bölgesi olan Ordu ili dalga karakteristiğine en uygun platform geometrisi P5 olarak seçilmiştir. Daha sonra P5, P5A, P5B olacak Şekilde 3 farklı salma boyu ve 2 farklı halat bağlantı şekilleri için de ayrı bir hidrodinamik analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları bulgular kısmında daha detaylı verilecektir fakat STDES sisteminde bulunan sarkaç-dişli mekanizması için hangi platformun kullanıldığını bu bölümde belirtmek gerekmektedir. Bu nedenle hidrodinamik analizler neticesinde bir sonraki analiz türleri için P5A platformu ve 8’li halat bağlantı şekli kullanılmıştır.

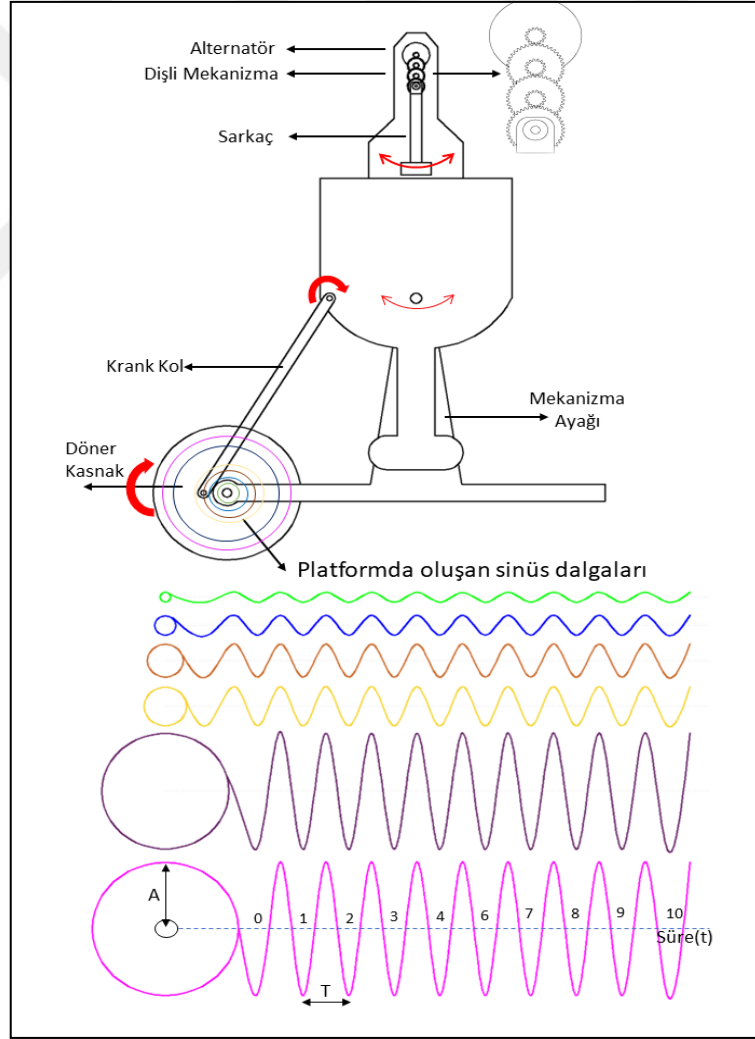
Sarkaç ve dişli dinamik analizi için öncelikle platformun salınım periyotlarına ihtiyaç vardır. Bu değerler P5A platformu için belirlenen 12 farklı dalga ve periyot varyasyonlarına göre analiz edildi ve tablo haline getirildi. Tablo 9’de örnek olması için dalga periyodu 2,12 saniye olan ve 6 farklı dalga yüksekliği ile elde edilen değerlerin örnek bir tablo görüntüsü verilmiştir. Bu şekilde 12 farklı dalga değeri için sonuçlar elde edilmiştir ve tüm değerler bulgular kısmında gösterilmiştir. Ancak tezin diğer bölümlerinde yapılan analizlere geçmeden önce bu şekilde bir örnek tablo vererek elde edilen her bir sonuç ile diğer analiz adımlarına geçilebildiği gösterilmiştir.

Tablo 9. P5A’nın farklı dalga yüksekliklerinde 2,12 sn periyotlu yalpa açısı değerleri

Ölçeklendirilmiş Dalga Parametreleri						
	T=2,12					
	H=0,125	H=0,25	H=0,375	H=0,5	H=0,625	H=0,75
Zaman (sn)	P5A’nın Zamana Bağlı Yalpa Açısı Değerleri-RY (°)					
0.0	2,90	5,00	7,10	9,85	31,11	29,84
0,1	3,18	5,93	8,77	11,84	38,27	37,71
0,2	3,20	6,38	9,80	13,02	42,45	42,66
0,3	2,94	6,29	10,08	13,28	42,69	43,82
0,4	2,42	5,67	9,56	12,55	38,56	41,67
0,5	1,68	4,55	8,26	10,87	30,96	36,10
0,6	0,78	3,02	6,24	8,34	21,04	27,38
0,7	-0,20	1,20	3,66	5,11	9,77	16,38
0,8	-1,18	-0,76	0,73	1,38	-2,09	4,21
0,9	-2,06	-2,66	-2,29	-2,57	-14,19	-8,39
1	-2,77	-4,33	-5,11	-6,38	-26,26	-20,86
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
10	-1,92	-4,80	-8,65	-13,97	-28,08	-22,67

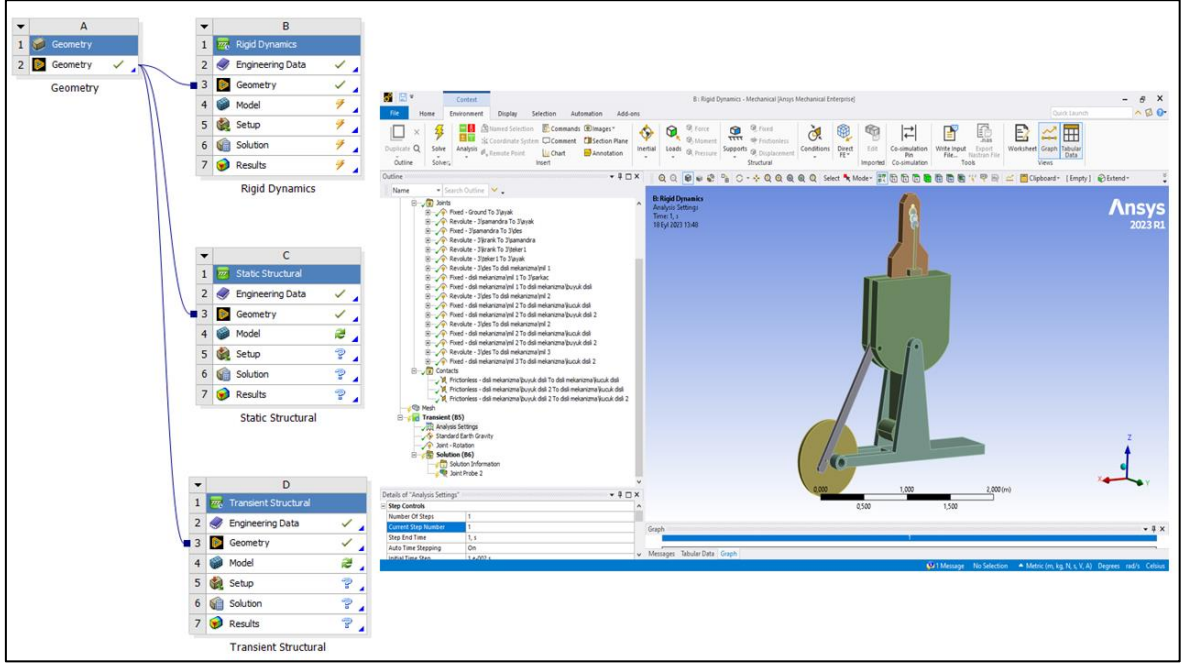
2.3.1. Sarkaç ve Dişli Sisteminin Analizi

Seçilmiş olan P5A ve buna bağlı olan STDES mekanizmasının sarkaç salınımı bilgisayar ortamında test edilmiştir. Öncelikle testi yapılacak olan modelin mekanik yapısının 2D görseli çizilerek modeldeki sabit ve hareketli parçalar belirlendi. Şekil 26’da modelin kesit görüntüsü verilmiştir. Modelde bulunan kasnak sistemi bir zaman ayarlı motora bağlıdır ve belirlenen düzenli dalga parametrelerine göre ayarlanarak kasnağa bağlı krank kolunu çevirir. Krank kolunda oluşan hareket P5A platformuna aktarılırak platformun istenilen dalga yüksekliği ve periyodunda bir salınım(yalpa) hareketi yapması sağlanır. Oluşan bu salınım hareketi sarkaç-dişli mekanizmasını hareket ettirerek, alternatörde bir dönme momenti oluşturur.



Şekil 26. Mekanik yalpa hareketi düzeneğinin kesit görüntüsü

Şekil 27’de hareket mekanizması tasarlanan sistemin Ansys Workbench’de yapılan analizleri gösterilmiştir. Mekanizmanın hareket analizini için “Rigid Body Dynamics” modülü, dişli sistemde ve millerde oluşan gerilme, deformasyon ve sürtünme kayıpları için “Statik Structural” modülü, dişli hareketi ile oluşan ve alternatöre aktarılan açısal hız ve tork analizi için “Transient Structural” modülü kullanılmıştır.



Şekil 27. Mekanik yalpa hareketi sisteminin analiz görüntüsü

Farklı dalga periyodu ve yükseklikleri için elde edilen alternatörün devir/dakika değerleri belirlendi. Böylece oluşan bu sonuçlar ile bir sonraki bölümde analizi yapılacak olan alternatörde farklı dev/dk değerlerinde oluşan voltaj, akım ve güç çıktıları belirlenecektir.

2.3.2. Alternatör Analizi

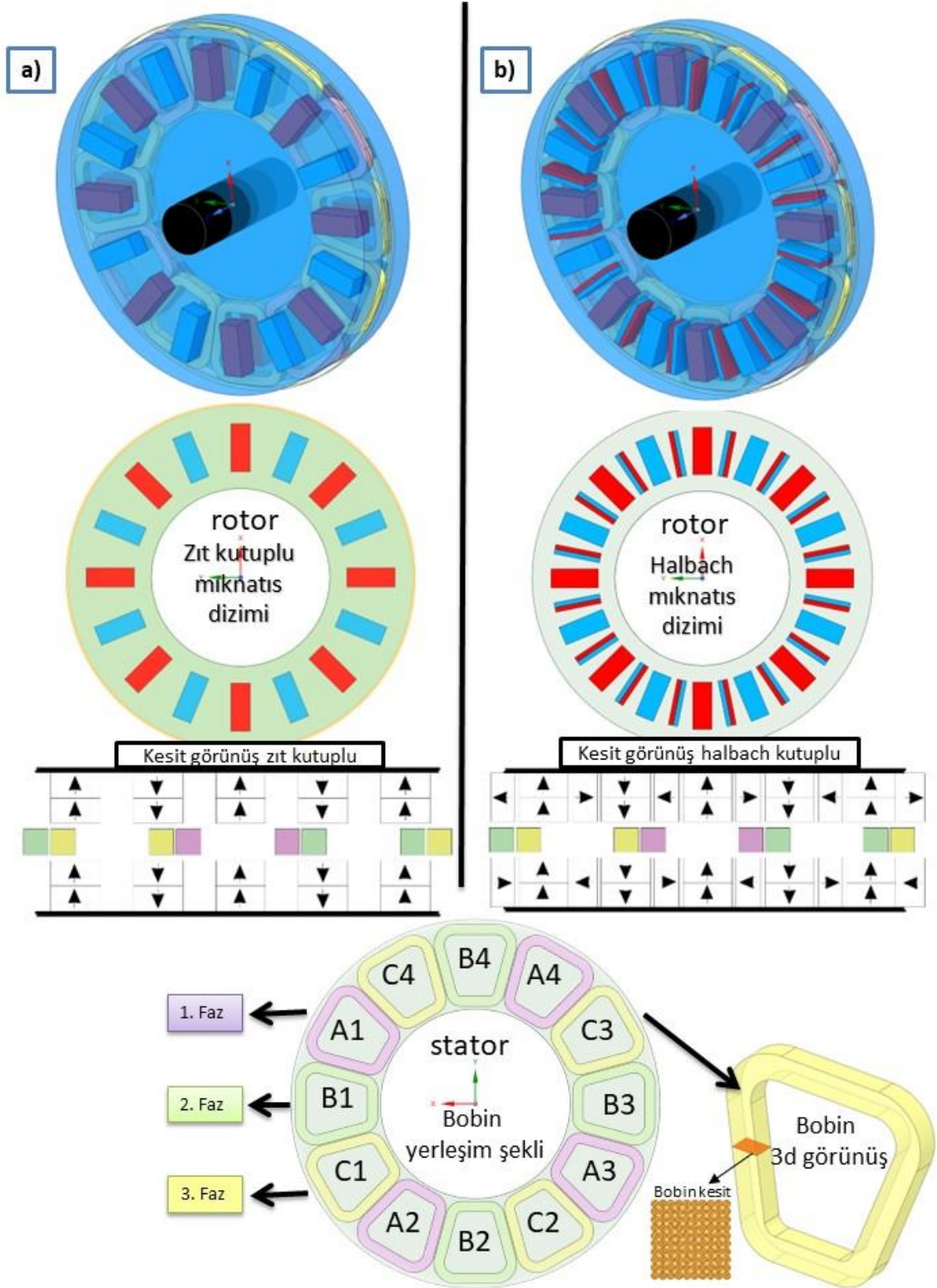
Lineer olmayan malzeme davranışlarından ötürü alternatör ve motor gibi elektrik makinalarının analitik denklemlerle çözülmesi biraz zordur. Bu sebeple Manyetik Sonlu Elemanlar Analizi (MSEA) kullanarak daha doğru sonuçlar elde edilir (Yusuf vd., 2018). Tezin bu bölümünde sarkaç-dişli analizleri sonucunda mekanizmadan elde edilen açısal kinetik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmek için uygun alternatör analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler için Ansys Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Alternatör

modelinin programa tanımlanmadan önce modele ait parametrik girdilerin belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 10’da modele ait parametrik veriler gösterilmiştir.

Tablo 10. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı ve Halbach mıknatıslı alternatörlere ait tasarım parametreleri

Alternatör Parametreleri	
Rotor Malzemesi	ABS
Rotor dış yarıçap	160 mm
Rotor iç yarıçap	80 mm
Rotor Kalınlık	15 mm
Stator Malzemesi	Epoxy reçine
Stator dış yarıçap	180 mm
Stator iç yarıçap	90 mm
Stator Kalınlık	10,5 mm
Hava Boşluğu	2 mm
Rotor mıknatıs adet	16
Mıknatıs tipi	NdFeB
Mıknatıs Şekli	Dikdörtgen
Mıknatıs ölçüleri	20x20x50 mm
Rotor mıknatıs adet	16
Bobin malzemesi	Bakır
Bobin Şekli	Romboit
Bobin kalınlık	10 mm
Bakır tel çap	1 mm
Bobin tur sayısı	100
Bobin sayısı	12
Faz sayısı	3

Tez kapsamında en verimli güç çıkışı değerlerini sağlamak amacıyla iki farklı mıknatıs dizim şekli uygulanmıştır. Bunlar eksenel akıllı sabit mıknatıslı ve sabit halbach mıknatıslı dizim şekilleridir. Her iki mıknatıs dizimlerine göre elde edilen güç çıkışlarına bakılarak en verimli olanı tercih edilmiştir. Şekil 28’de her iki alternatörün 3d görseli, rotor mıknatıs dizim şekli, kesit resmi, stator şekli ve stator kesit şekli gösterilmiştir.

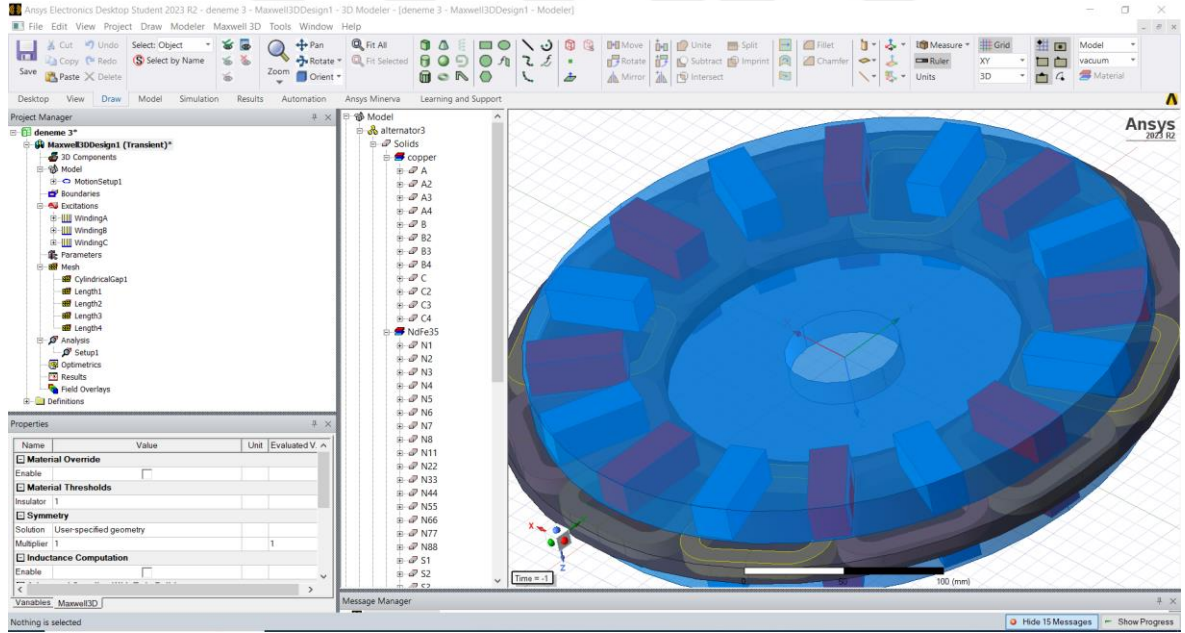


Şekil 28. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı alternatörler a) Eksenel sabit mıknatıs dizim b) Eksenel sabit Halbach mıknatıs dizim

Ansyz Maxwell’de analize başlamadan önce bazı ön hazırlık verileri belirlenmiştir ve programa girilmiştir. Bu veriler şu şekilde sıralanmıştır:

- Alternatör tipinin belirlenmesi ve geometrinin oluşturularak programa girilmesi.
- Malzeme atamalarının yapılması. (Rotor, stator, mıknatıs vb. gibi)
- Mıknatıs kutup yönlerinin belirlenmesi.
- Rotorların zamana bağlı hareketinin girilmesi
- Sınır koşullarının belirlenmesi.
- Bobin sargılarının tanımı ve akım yönlerinin atanması.
- Ağ yapısı (mesh) boyutlarının tanımlanması.
- Çözüm zaman adımlarının tanımlanması.

Alternatörlerin geometrilerine ait parametrik ve program ön hazırlık verileri girildikten sonra belirli devir sayıları ve gerilim dirençleri altında her iki alternatör için, manyetik alan yoğunlukları, akı çizgileri, akım, voltaj ve güç değerleri belirlenmiştir. Programın arayüzüne ve eksenel akılı sabit mıknatıslı modele ait görsel Şekil 29’da verilmiştir.

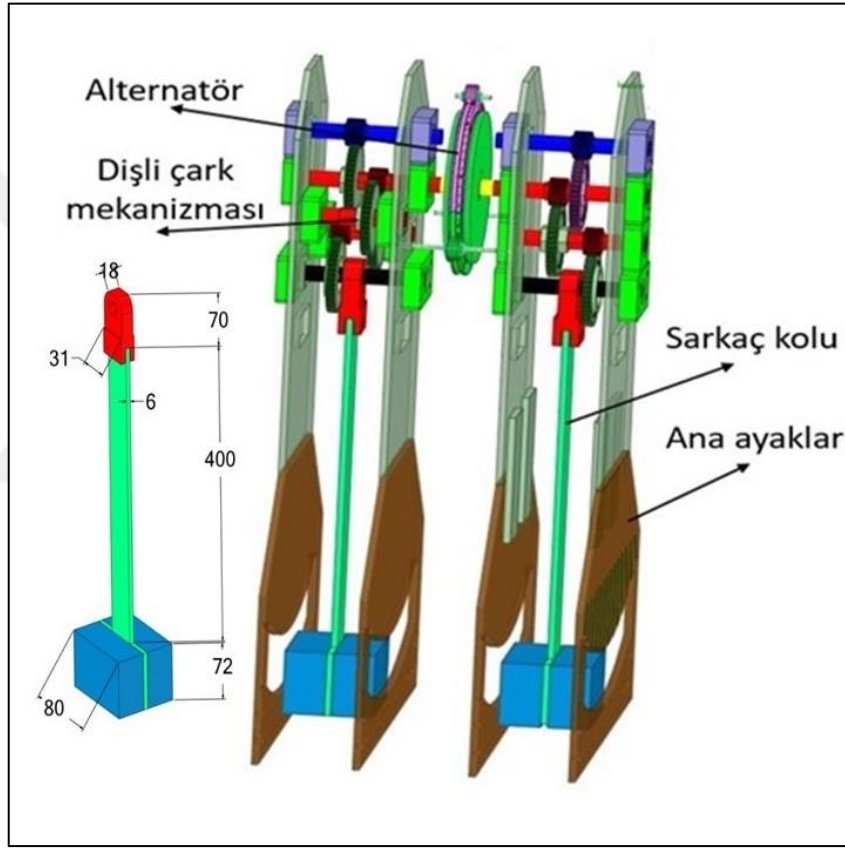


Şekil 29. Eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörün Ansys Maxwell'de analiz görüntüsü

2.4. STDES Çalışma Prensibi ve Prototip Üretimi

2.4.1. Çalışma Prensibi

Yapılan tüm analizler sonucunda tasarımın genel parametreleri çalışma alanı olan Ordu ili denizine uygun şekilde belirlenmiştir. STDES mekanizmasında 4 ana yapıdan oluşmaktadır. Bunlar; ana ayaklar, sarkaç kolu, dişli mekanizması ve alternatör olarak belirlenmiştir. Şekil 30'da mekanizmaya ait bu dört ana yapı gösterilmiştir.



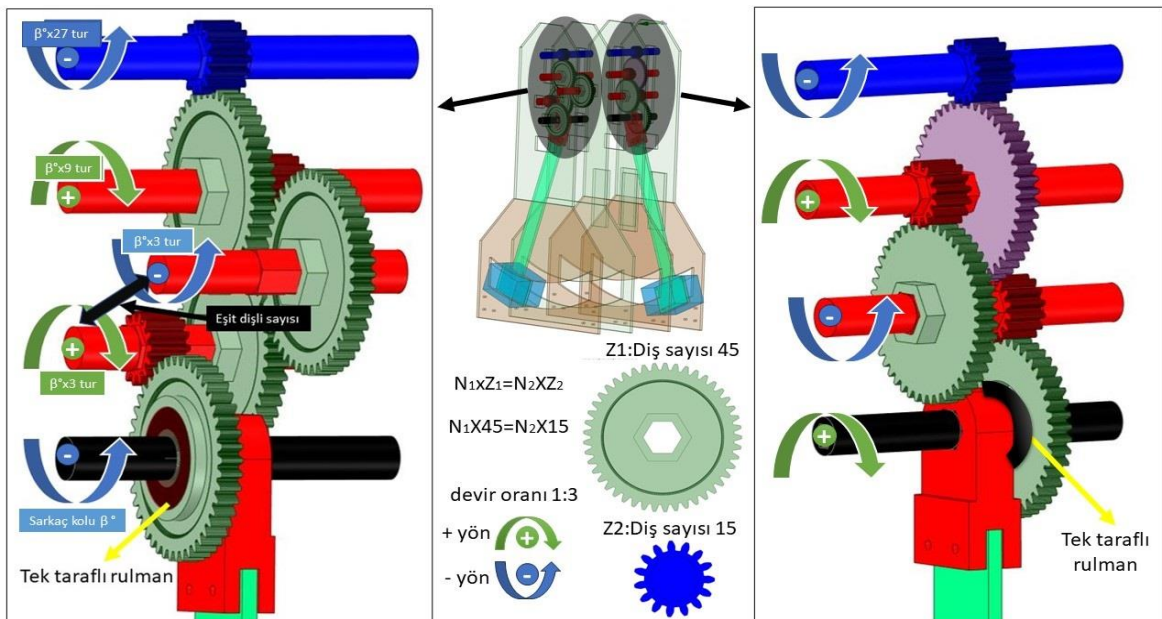
Şekil 30. STDES mekanizması 3d görseli ve ana kısımları

Sarkaç kollarına bağlı olan ağırlıklar ve sarkaç uzunluğu mekanik analizler sonucunda sağ ve sol sarkaç için 540 mm uzunluk ve 7 kg ağırlık olarak belirlenmiştir. Ağırlıklar dalga hareketi ile oluşan yalpa hareketi esnasında bize fazladan dönme momenti sağlamaktadır ve bu sayede dişli mekanizmasını döndürecek gücü üretmektedir.

Şekil 31'de dişli mekanizmasının çalışma prensibi gösterilmiştir. Dişli sisteminin çalışmasında en büyük zorluklardan birisi sağ ve sol sarkaç kollarında oluşan zıt yönlü salınımlar ile tersine moment kuvveti oluşmasıdır. Dişli sistemleri üzerinde oluşan bu ani zıt

yönlü moment kuvveti değişimleri dişlilerin deformeye hatta kırılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle oluşan zıt moment kuvvetini engellemek için tek yönlü rulman mekanizması kullanılmıştır. Bu sayede sarkaç kolları bir yöne ilerlerken dişlileri tahrik etmekte fakat zıt yöne giderken dişli mekanizmasını çalıştırmamaktadır. Ayrıca sol dişli sayısı 5, sağ dişli sayısı 4 olacak şekilde dişliler yerleştirilmiştir. Bunun temel nedeni sarkaç kolu ileri hareket ettiğinde, sol sarkaç kolu dişlileri tahrik etmekte geri yönde dönme momenti oluşturmaktadır. Sarkaç kolu geri hareket ettiğinde ise sağ sarkaç kolu dişlileri tahrik etmekte ve ileri yönde dönme momenti oluşturmaktadır. Sol dişli sayısının 5 adet dişlisinden 2. ve 3. dişli mekanizmaları aynı bölüm dairesi çapında ve aynı diş sayıdadır. Bu şekilde bağlanarak 1. dişliden 5. dişliye kadar oluşan dönme kuvveti sol dişlide aynı şekilde sağ 5. dişlide olduğu gibi saat yönü tersinde oluşmaktadır. Bu sayede son dişlilerin millerine bağlanan alternatör dalga hareketi ile salınım yapan sarkaç kollarının ileri ve geri hareketi tek yönde toplayarak alternatörün tek yönlü çalışmasını ve daha verimli olmasını sağlamaktadır.

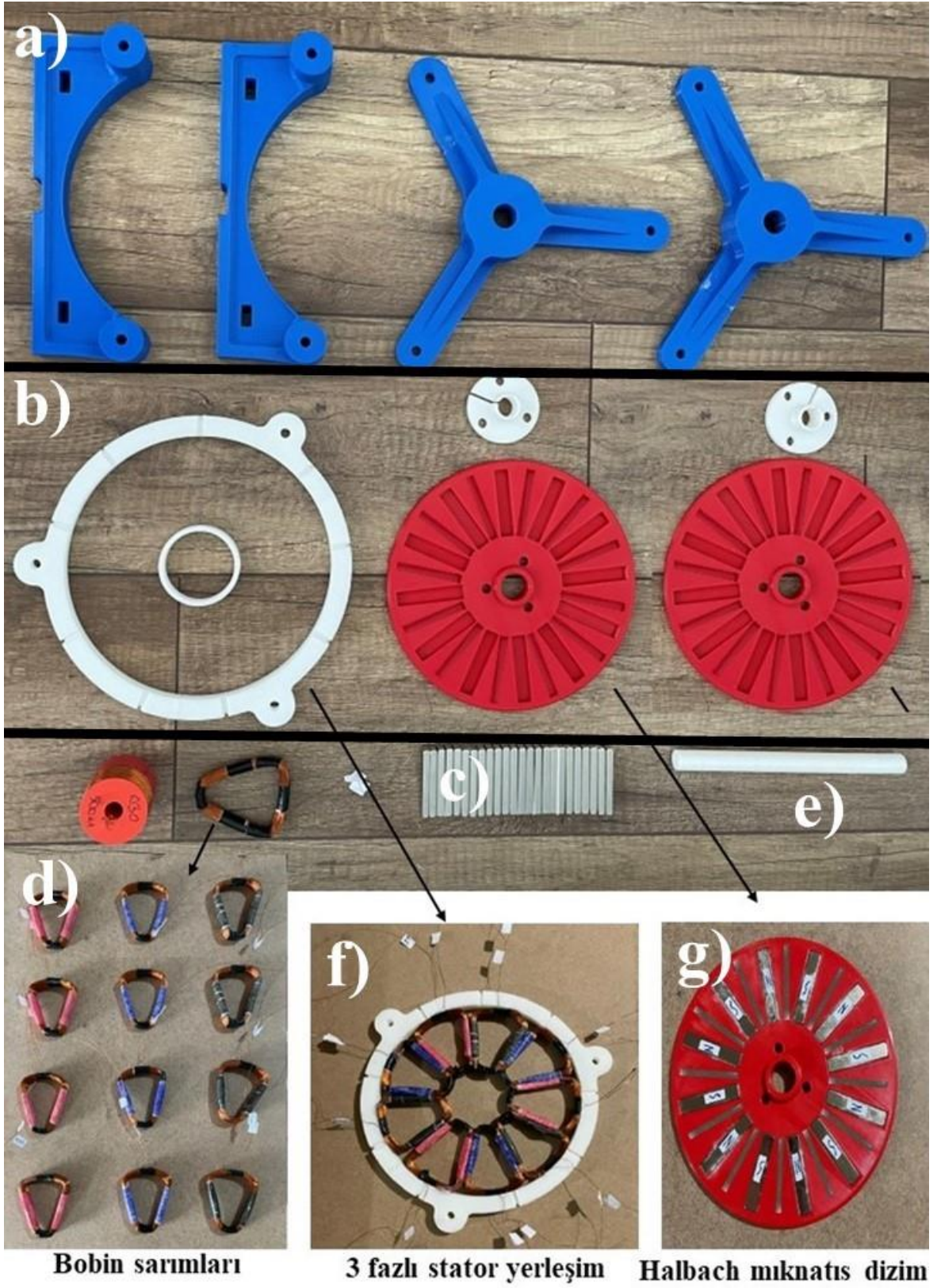
Şekil 31’de gösterilen dişli mekanizmalarında iki adet farklı dişli yarıçapı kullanılmıştır. Büyük dişli 45, küçük dişli 15 adet diş sayısından oluşmaktadır. Her bir dişli geçişinden 3:1 oranında tur arttırımı sağlanmıştır. Örneğin sarkaç kollunun β° derecelik salınım hareketi ile oluşan dönme hareketi en üst dişliye $\beta^\circ \times 27$ tur olarak aktarılmaktadır. Bu sayede küçük dalga genliklerinde dahi alternatörün dönmesi sağlanmıştır.



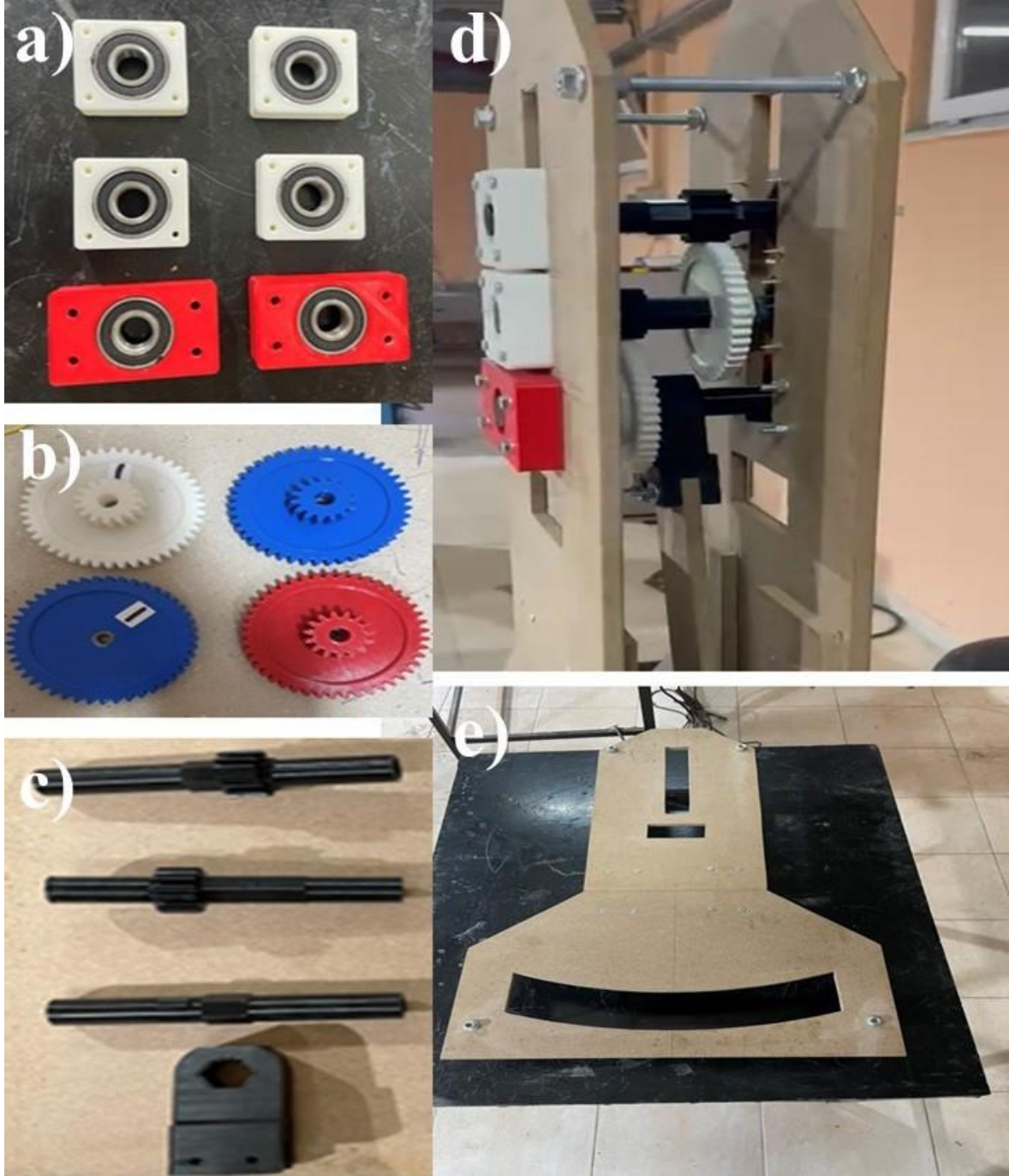
Şekil 31. Sağ ve sol dişli sistemlerinin çalışma prensipleri

2.4.2. Prototip Üretimi

Yapılan nümerik analizler sonucunda, prototipte üretilecek STDES mekanizmasında bulunan sarkaç boy uzunlukları, sarkaçlara eklenecek ağırlıklar, kullanılacak dişli sayısı ve dişli boyutları, rulman-mil ölçüleri ve güç çıkışı için alternatörün ölçü parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen fiziksel boyut değerleri neticesinde prototip parçaları üç boyutlu olarak çizilerek 3D yazıcı formatı olan .stl dosyasına dönüştürülmüştür ve 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üretilen parçalar şu şekildedir: sarkaç kolları, sarkaç bağlantı parçaları, dişli çarklar, miller, rulman yatakları, sarkaç kolu, stator ve rotor. Böylece üretim aşamasında maliyet, zaman azalması ve karmaşık parçaların üretim kolaylığı sağlanmıştır. Şekil 32’de alternatörün ayakları (a), stator ve rotor yatakları (b), kullanılan neodyum mıknatıslar (c), bakır sargı bobinleri (d), mil (e), stator bobin yerleşim planı (f) ve Halbach mıknatıs dizim şekli (g) gösterilmiştir. Dalganın yapmış olduğu yalpa hareketi ile sarkaçta oluşan salınım dişli çarklarda yüksek açısal moment oluşturmaktadır. Oluşan bu moment sonucu dişli çark deformasyonları en aza indirmek için tüm üretim parçaları karbon elyaf dolgulu PLA malzemesi ile basılmıştır. Rotor, mil, rulman yatakları ve sarkaç kolu ferromanyetik özellik içermeyen PLA kullanılmıştır. Stator ise çelik dolgulu PLA kullanılarak, statorun ferromanyetik özelliği artırılmıştır. STDES sisteminin ana yapı konstrüksiyonu ise marin tip 5x10 mm kontrplaktan yapılmıştır. Şekil 33’te mekanizmanın mekanik hareket kısmında bulunan parçalardan; rulman yatakları (a), dişli çarklar (b), dişli milleri (c), sağ sarkaç kolu montaj şekli (d) ve STDES yan ayak (e) görüntüsü verilmiştir.



Şekil 32. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatör üretim parçaları

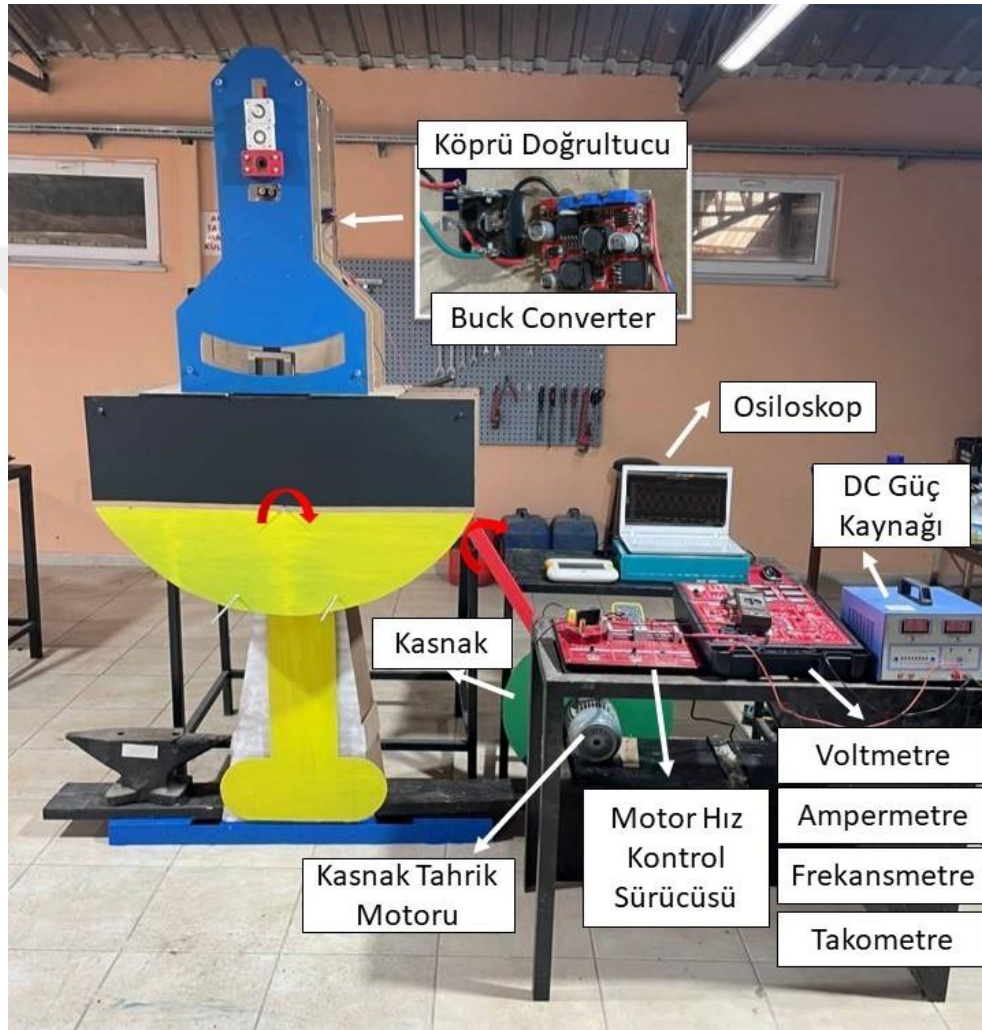


Şekil 33. Sağ STDES mekanizmasının sarkaç-dişli parçaları ve montaj görüntüsü

2.5. Deney Düzeneği Kurulumu

Bilgisayar ortamında nümerik analizleri yapılan P5A platform geometrisi ve ona bağlı olan STDES mekanizmasının deney analizleri için Şekil 34’de görülen düzenek kurulmuştur. Düzenek P5A yüzer platformu, STDES mekanizması, döner kasnak sistemi ve elektrik motorundan oluşmaktadır. Sistemde döner kasnağa bağlı olan elektrik motoru,

motor hız kontrol sürücüsü yardımı ile dönüş hızı ayarlanarak istenilen düzenli dalga frekansı oluşturulmaktadır. Ayrıca, kasnağa bağlı olan krank kolu farklı bağlantı yükseklikleriyle bağlanarak istenilen dalga yükseklik değerlerine göre ayarlanabilmektedir. Böylece, tez çalışması kapsamında seçilen 12 farklı dalga değeri tek tek düzenekte oluşturulabilmektedir.



Şekil 34. Mekanik deney düzeneği kurulumu

Oluşturulan yalpa açısı değerleri sonucunda sarkaç-dişli sistemine bağlı olan alternatör dönme hareketi gerçekleştirmektedir. Alternatörde oluşan farklı devir, voltaj ve akım değerleri mekanizmaya bağlanan takometre, voltmetre ve ampermetre yardımı ile ölçülmüştür. Ayrıca alternatörden gelen 3 fazlı AC gerilim değerleri sisteme bağlanan köprü doğrultucu ile DC gerilime dönüştürülmüştür ve daha sonra buck converter cihazıyla istenilen voltaj ve akım değerlerine göre ayarlamalar yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

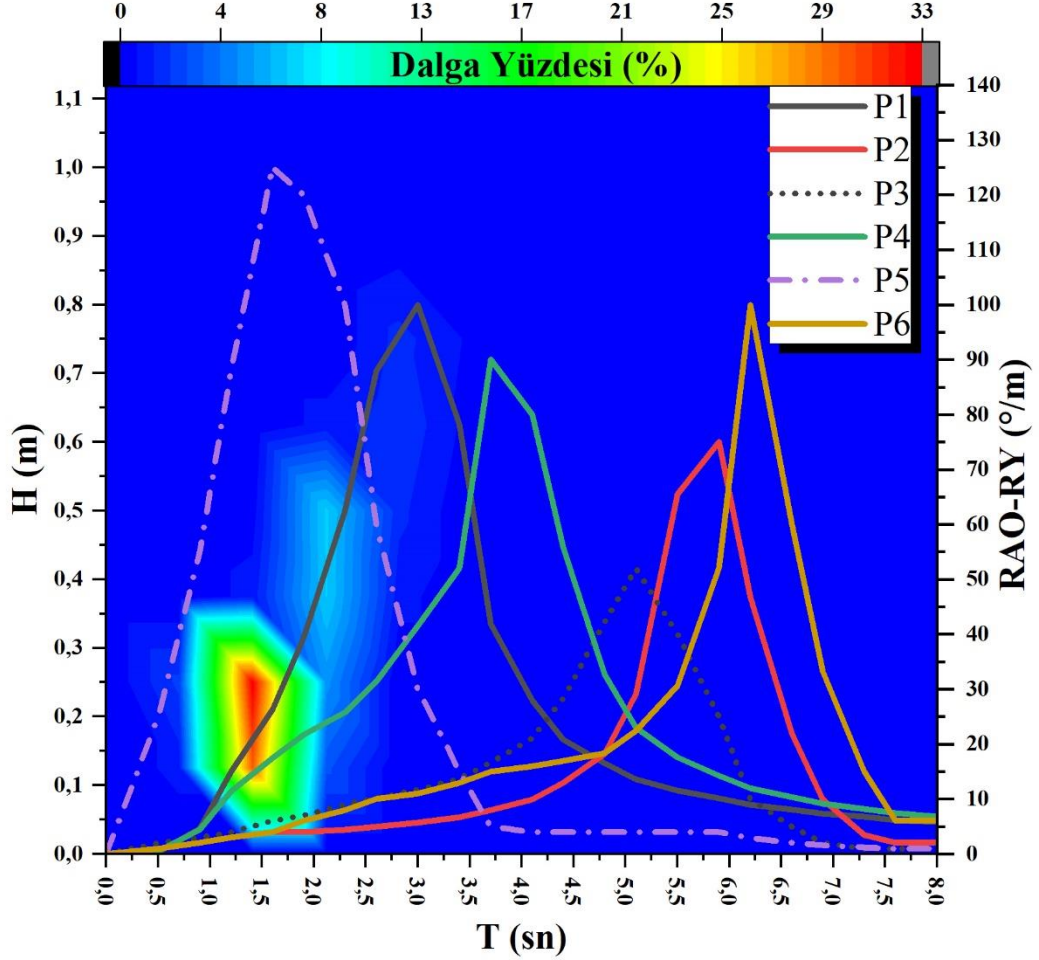
Tezin bu bölümünde uygun platform geometrisinin belirlenmesi için hidrodinamik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Seçilen platform geometrisinde farklı dalgalar etkisi ile oluşan yalpa açısı değerleri ve sarkaç-dişli mekanizmasında oluşan devir sayıları bulunmuştur. Son olarak elde edilen farklı devir sayılarında alternatörün güç çıkış değerleri tespit edilmiştir. Analiz sonucu bulunan güç verileri ile modelin prototipinden elde edilen deney güç verileri karşılaştırılarak benzerlik olup olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca farklı dalga değerleri sonucu alternatör güç çıkış verileri ile dalgaın güç değerleri karşılaştırılarak STDES siteminin verimi incelenmiştir.

3.1. Yüzer Platformların Hidrodinamik Analiz Sonuçları

Dalga hareketi ile sallanan bir platform tasarımı yaparken, sarkacın maksimum salınım yapabilmesi için dalga periyodu ve platformun doğal periyodu arasında belirli bir uyum gerekmektedir. Bu uyum, rezonans koşullarına dayanır. Sarkacın maksimum salınım yapabilmesi için platformun doğal periyodu dalga hareketinin periyodu ile eşleşmesi önemlidir. Tasarımı yapılan platformun doğal periyodu ile dalga periyodu birbiri ile uyumlu görünüyorsa, bu, platformun dalga hareketinin rezonans koşullarına yakın olduğunu gösterir.

Şekil 35’de 1:2 ölçekli dalga parametreleri ile 6 adet platforma ait doğal periyod değerleri gösterilmiştir. Grafikte gösterilen Ordu ili H ve T değerlerinin yüzdesel yoğunlukları belirlenerek renk skalası olarak en yoğun olduğu bölgeler gösterilmiştir. Oluşturulan yüzdesel yoğunluk değerlerinde maviden kırmızıya doğru dalgaların görülme sıklığı belirtilmiştir. Ordu ilinde en yoğun dalga değerlerinin yaklaşık %63 ile $T=1,41$ sn için $H=0,125$ m, $H=0,25$ m ve %21 ile $T=2,12$ sn için $H=0,25$ m, $H=0,375$ m, $H=0,50$ m dalga yüksekliklerinde olduğu görülmüştür. Dalga periyodunun değeri arttığında dalgaların görülme yüzdelilerinin giderek azaldığı görülmüştür. Ayrıca grafiğin sağ kısmında 6 adet farklı tasarıma sahip platformların RAO (birim uzunlukta yalpa açısı) değerleri verilmiştir. Her bir platformun yalmış olduğu doğal yalpa açısı değerleri karşılaştırılmıştır. Ordu ili dalga periyoduna en uygun olan platformun Şekil 35’de görüldüğü gibi P5 olduğu tespit edilmiştir. P5 platformunun hareketinin dalga ile senkronize olduğunu görmek, platformun performansının en iyi olduğunu gösterir. Bu uyumlu bir tasarımın başarılı olduğunu ve dalga

hareketi ile platformun rezonans koşullarında çalıştığını belirtir. Bu, tasarımın istenen sonuçları elde etmek için doğru bir şekilde tasarlandığını ve optimize edildiğini gösterir. Tüm bu analizler sonucunda P5 platformunun hareketinin dalga ile senkronize olduğunu görmek, platformun performansının en iyi olduğunu gösterir. Bu uyumlu bir tasarımın başarılı olduğunu ve dalga hareketi ile platformun rezonans koşullarında çalıştığını belirtir.

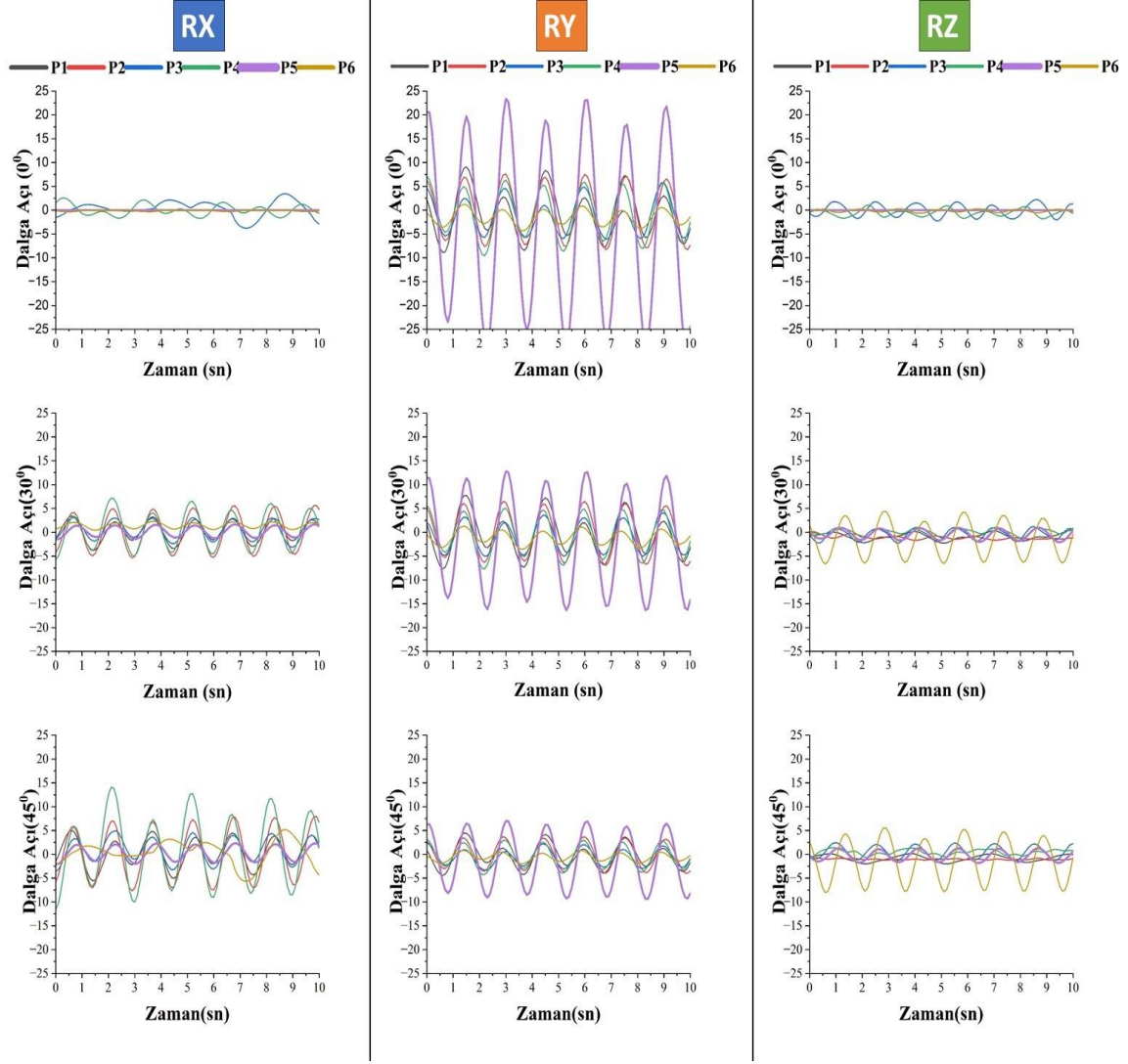


Şekil 35. 1:2 ölçekli Ordu ili dalga parametresi yoğunluk skalası ve platformların doğal yalpa periyodları

Şekil 36'de Tasarlanan 6 platformun farklı dalga geliş açılarında (0° , 30° , 45°) oluşan rotasyonel hareketleri (RX, RY, RZ) ve bu hareketler sonucunda platformlarda meydana gelen açı değerleri gösterilmiştir. Örnek dalga parametresi olarak yoğun bölge olan $T=1,5$ sn ve $H=0,2$ m alınmıştır. Ayrıca her platform 4 köşesinden katineri bağlantı şekliyle deniz tabanına bağlantısı yapılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında platforma gelen dalga geliş açısı arttığında platformların rotasyonel hareketlerin azalma görüldüğü

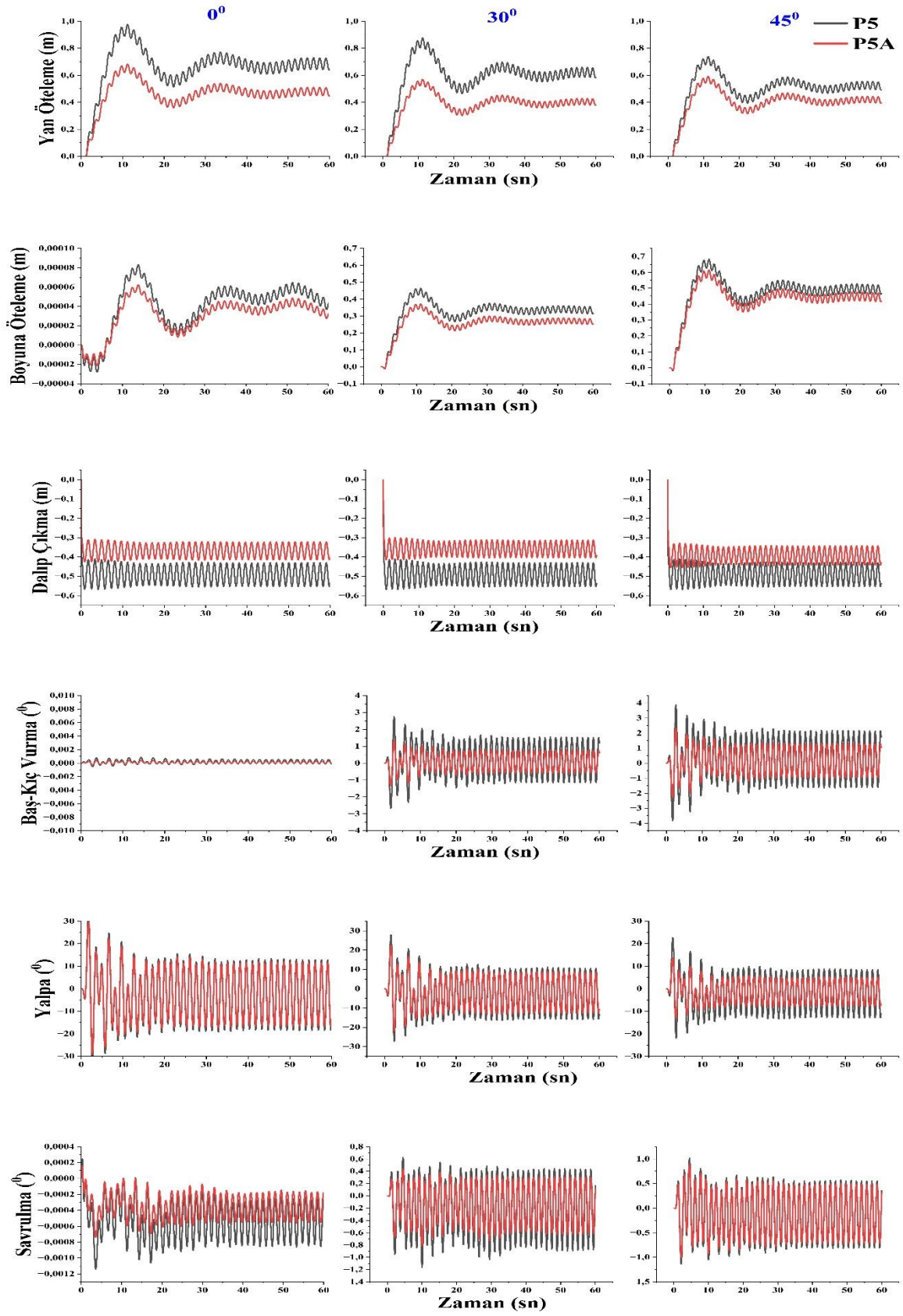
tespit edilmiştir. Platform üzerine konuşlandırılacak STDES mekanizmasının verimli bir şekilde çalışabilmesi için RY hareketinin en yüksek, diğer iki hareket olan RX ve RZ hareketini en düşük seviyede yapması gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 36'de görüldüğü üzere doğal yalpa periyodu Ordu ili dalga periyodu ile benzerliği Şekil 35'de tespit edilen P5 platformunun RY değerleri diğer 5 platformdan tüm dalga geliş açılarında fazla olduğu tespit edilmiştir. Dalga geliş açısı 0^0 da RY değeri $\pm 20-23^0$ aralığında, 30^0 de $\pm 10-12^0$ aralığında, 45^0 de $\pm 5-7^0$ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Diğer tüm platform RY değerlerine bakıldığında en yüksek değerlerin P5 platformuna ait olduğu görülmüştür. Ayrıca P5'e ait RX ve RZ değerlerinin de diğer platformlardan en düşük olduğu analizler sonucunda belirlenmiştir. Tüm bu analizler neticesinde, P5 tasarımının istenen sonuçları elde etmek için doğru bir şekilde tasarlandığını ve optimize edildiğini göstermektedir.

P5 platformu yapılan analizler neticesinde optimum değerlerde olduğu belirlenmiştir ancak platformda oluşan yalpa hareketi dışındaki tüm hareketleri en düşük seviyelerde tutmak amacıyla birtakım farklı konfigürasyonlar denenmiştir. Farklı tipte salma uzunlukları deneyerek ağırlık merkezi konumu aşağı çekilmiş ve dalgalara karşı daha diri bir gövde tasarımına gidilmiştir. Böylece büyük dalga genlikleri ve periyotlarında dahi dayanabilecek bir tasarım planlanmıştır. Ayrıca 4 köşeden yapılan bağlama halatlarına 4 adet daha farklı yönlerde halat bağlantısı eklenerek oluşacak RX, RZ, X ve Z hareketlerini en düşük seviyede tutmak amaçlanmıştır. Bu nedenle salma uzunluğu 1 metreden 1,5 metreye çıkarılmıştır ve 1,5 metrelik salmaya ekstra 4 adet daha bağlama halatı eklenerek 8'li bir bağlantı oluşturulmuştur. Uzun salma ve 8'li bağlantı şekli için kısayol olarak "P5A" kodu kullanılmıştır.



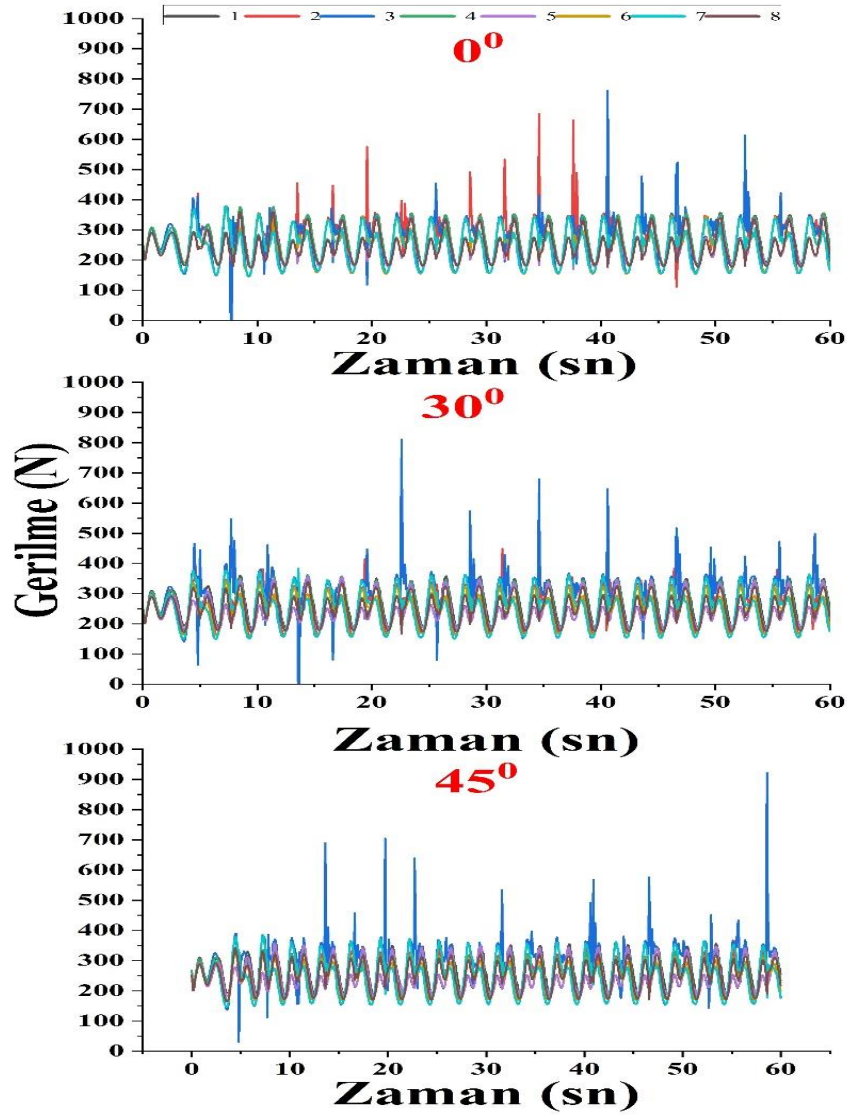
Şekil 36. Platformların farklı dalga geliş açılarında yapmış olduğu rotasyonel hareketler. (Örnek dalga değerleri: $T=1,5$ sn, $H=0,2$ m)

Şekil 37’da P5 ve P5A platformlarının üç farklı dalga geliş açısı (0^0 , 30^0 , 45^0) ile yapmış oldukları 6 serbestlik dereceli hareketlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 37’da dalga analiz parametrelerinden biri olan düzenli dalga $T=1,41$ ve $H=0,125$ m seçilmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda salma uzunluğundaki artış ve halat bağlantı farklılıkları yan öteleme, boyuna öteleme, dalıp çıkma hareketleri için ortalama %20-30 aralığında azaldığı gözlemlenmiştir. Baş kıkırma, yalpa ve savrulma hareketlerinde ise yaklaşık %8-12 aralığında bir azalma görülmüştür. Tüm veriler neticesinde salma uzunluğu ve ek halat bağlantısı platform üzerine konuşlandırılacak olan STDES sistemini daha verimli bir şekilde çalışacağı tespit edilmiştir.



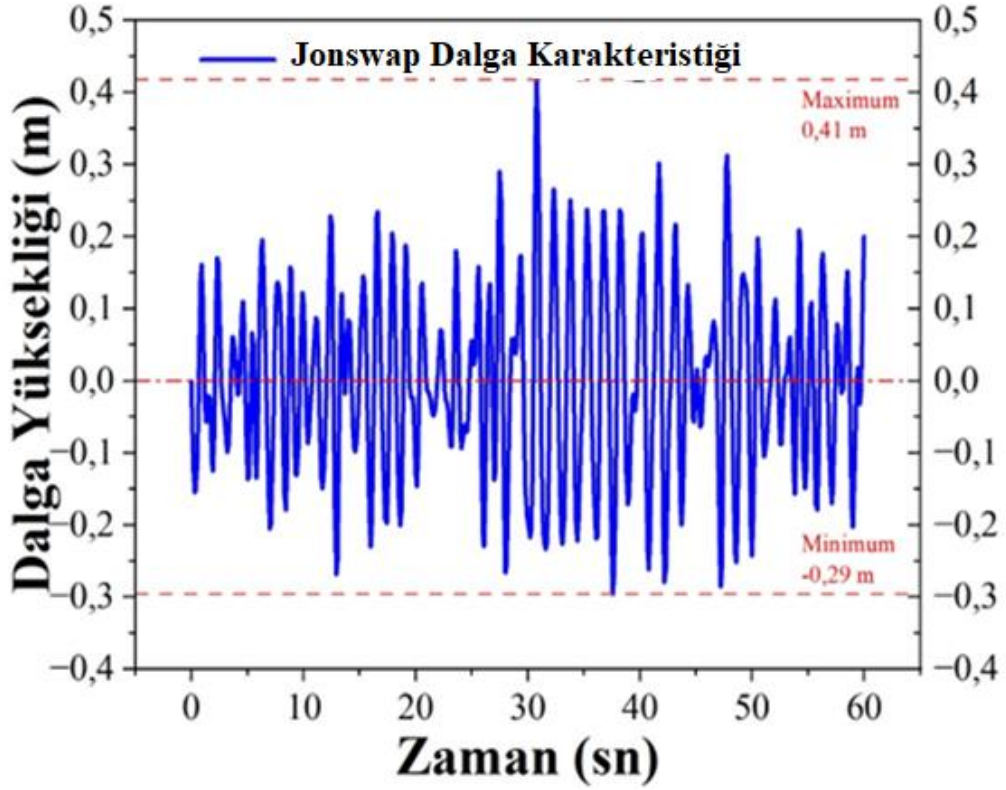
Şekil 37. P5 ve P5A platformlarının yapmış olduğu altı serbestlik dereceli hareketlerin karşılaştırılması

Şekil 38’te P5A platformunda farklı dalga geliş açılarında oluşan halat gerilme değerleri gösterilmiştir. 8 adet halat katineri olarak bağlanmıştır ve dalga parametresi olarak $T=3$ sn ve $H=0,6$ m olarak seçilmiştir. Dalga parametre değerleri yüksek değerlerde seçilerek en zorlu şartlarda dahi halatların dayanımı test edilmek istenmiştir. Dalga açısı 0° olduğu konumda halat gerilmelerinin pik değerleri 800 N, açı değeri 30° olduğunda pik değerin 850 N ve 45° olduğunda ise 1000 N olduğu görülmüştür. Kullanılan halatın katalog en yüksek gerilme değeri dayanımı $1,32 \times 10^3$ N olduğu bilinmektedir ve elde edilen sonuçlar neticesinde en yüksek dalga parametrelerine dayanabileceği görülmektedir.



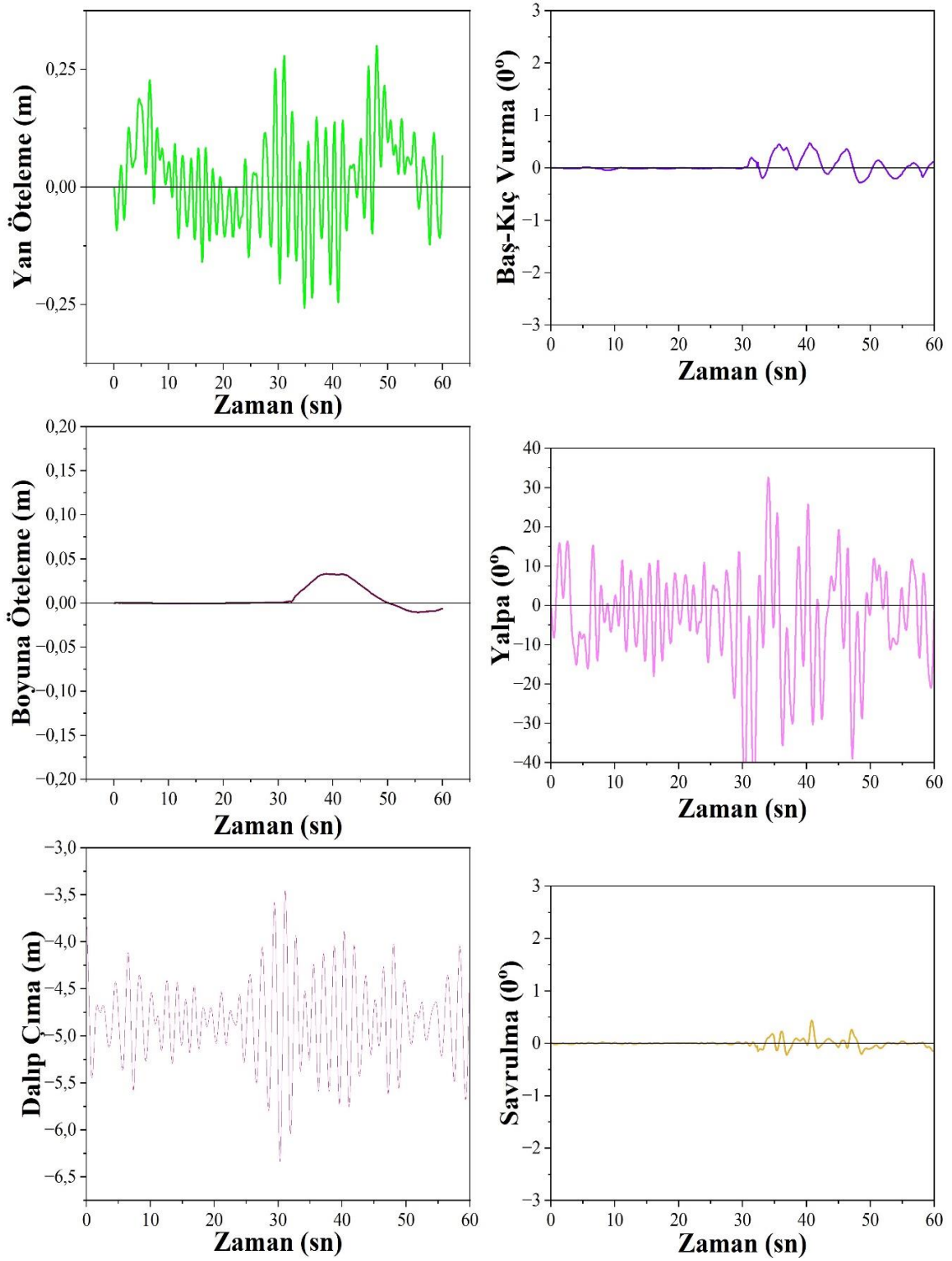
Şekil 38. Farklı dalga açılarında P5A platformunun halat gerilmeleri ($T=3$ sn ve $H=0,6$ m)

Ansyes AQWA yazılımı ile yüzer platformların düzensiz dalga hareketlerine karşı yapmış olduğu hidrodinamik hareketleri de gözlemek mümkündür. Şekil 39’de P5A platformu için düzensiz dalga karakteristiği gösterilmiştir. Analiz için seçilen dalga değerleri Ordu ili 1:2 ölçekli dalga verilerinden alınarak başlangıç periyodu $T_s=4$ sn, bitiş periyodu $T_f=0,5$ sn, tepe periyodu $T_p=1,5$ sn, en yüksek dalga pik değeri $H=0,6$ m ve dalga geliş açısı 0^0 seçilmiştir. Dalga karakteristiği olarak “Jonswap Dalga Karakteristiği” kullanılmıştır.



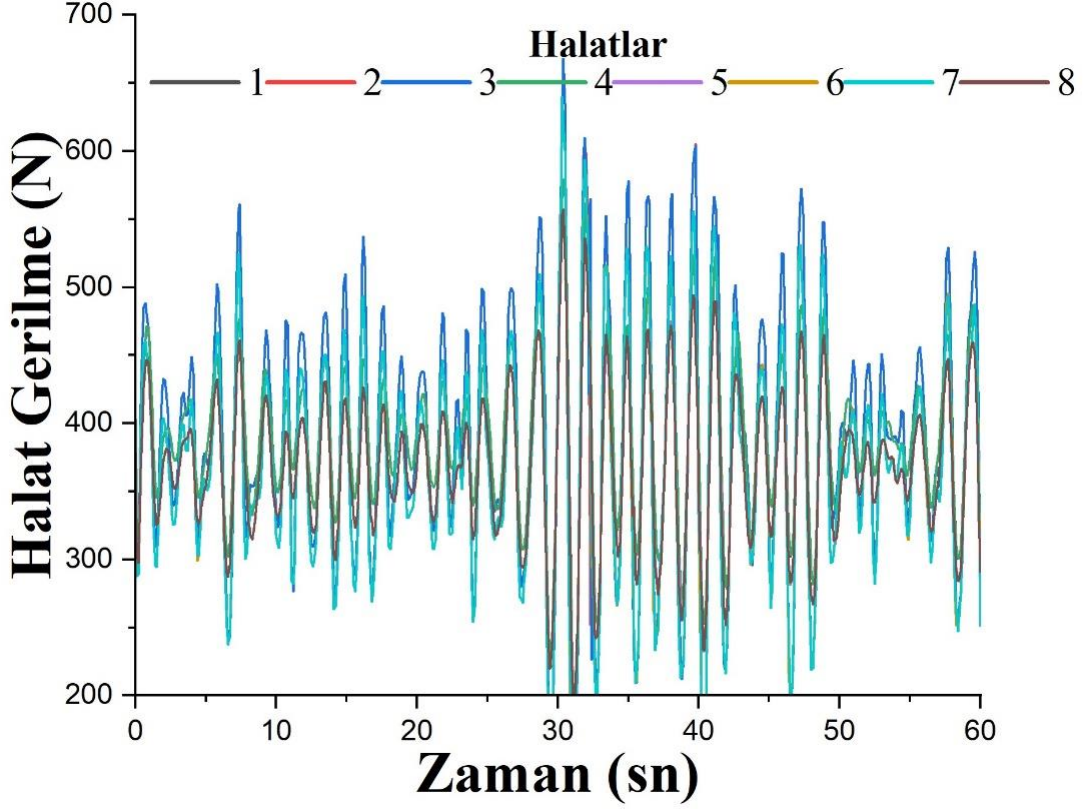
Şekil 39. Jonswap düzensiz dalga karakteristiği

Analizi yapılan P5A platformunun düzensiz dalga değerleri sonucunda oluşturduğu 6 serbestlik dereceli hareketi Şekil 40’da gösterilmiştir. Platformun maksimum yan $\pm 0,25$ m, boyuna öteleme $\pm 0,025$ m, dalıp çıkma ± 2 m olarak bulunmuştur. Ayrıca rotasyonel hareketleri maksimum baş-kıç vurma açısı $\pm 0,5^0$, yalpa açısı $\pm 35^0$, savrulma $\pm 0,4^0$ olduğu gözlemlenmiştir.



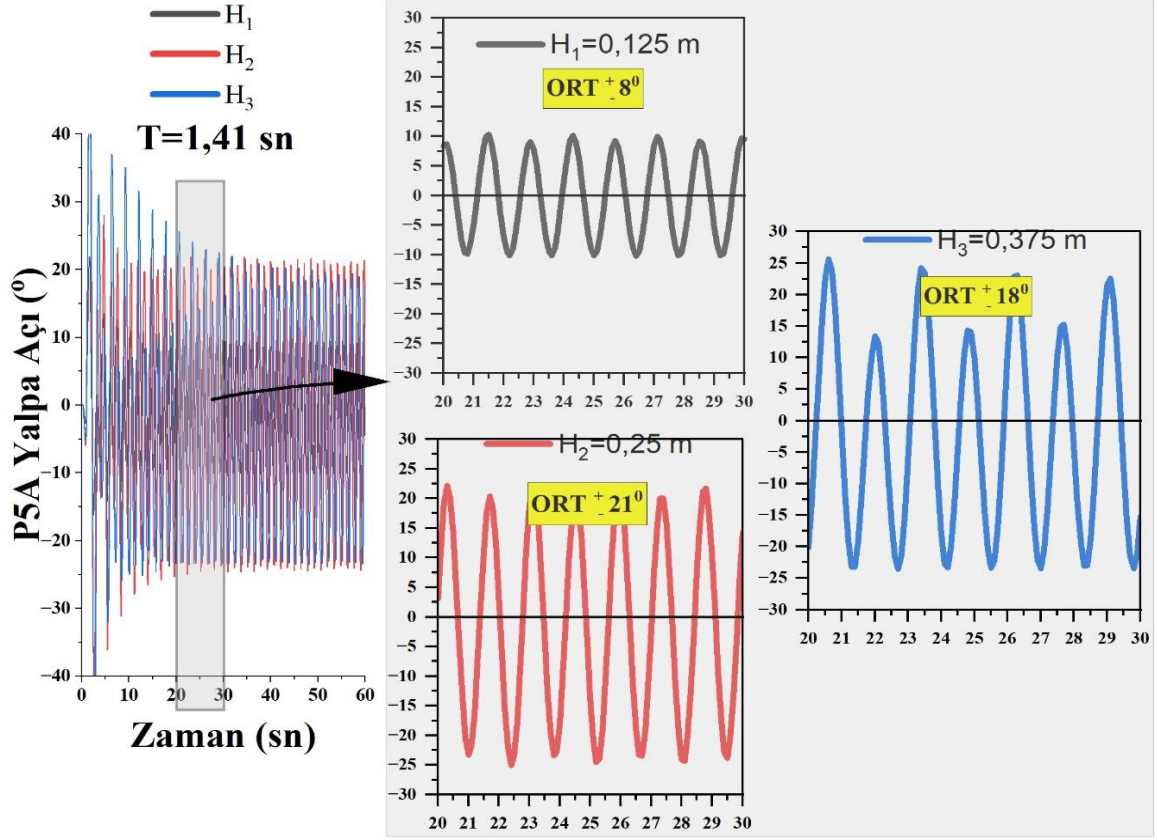
Şekil 40. Düzensiz dalga hareketi ile P5A platformunda oluşan 6 serbestlik dereceli hareketi

Şekil 41’da düzensiz dalgalar oluşan platformda bağlı olan 8 adet bağlama halatının oluşturduğu gerilmeler verilmiştir. Halatların maksimum gerilme değerinin 660 N olduğu ve $1,32 \times 10^3$ N olan en yüksek gerilme değerini aşmadığı görülmüştür.



Şekil 41. Düzensiz dalgalarda oluşan P5A platformunun bağlama halatı gerilmeleri

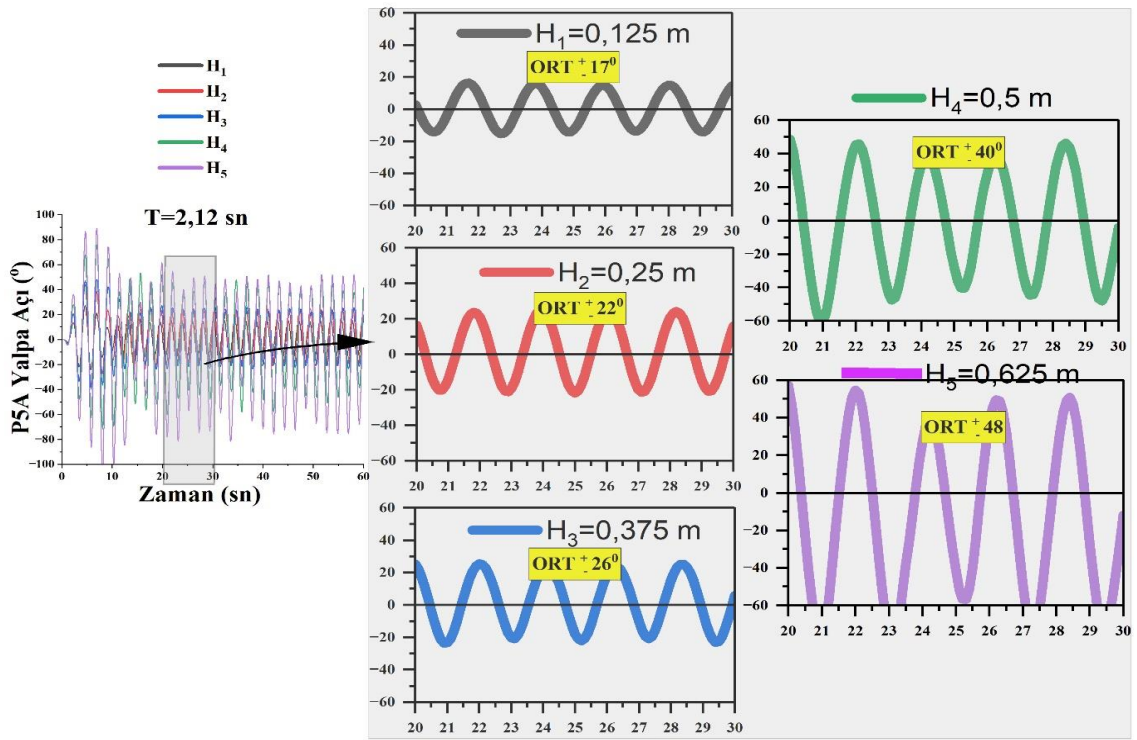
Yapılan tüm analizler neticesinde P5A platformunun düzenli ve düzensiz dalgalarda en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bağlama halatlarındaki gerilme değerlerindeki sınır değerleri aşmadığı tespit edilmiştir. Tezin bu bölümünde ise belirlenen 12 farklı dalga parametresi ile P5A’nın yapmış olduğu yalpa açısı değerleri tespit edilmiştir. Platform denizde, sahil kıyı şeridine dik olacak şekilde konumlandırılacağı düşünülerek dalga geliş açısı 0° olacak şekilde analizler yapılmıştır. Şekil 42’de dalga periyodu $T=1,41$ sn ve dalga yükseklikleri $H_1=0,125$, $H_2=0,25$, $H_3=0,375$ m olacak şekilde üç farklı dalga değerine göre analiz edilmiştir. Analiz süresi 60 sn belirlenmiştir. Elde edilen verilerin daha iyi anlaşılabilmesi için 10 sn olan 20-30 sn aralığı detay şekli olarak sağda üç farklı dalga yüksekliği için ayrı ayrı gösterilmiştir. Üç farklı dalga yüksekliklerinde oluşan platform yalpa açısı H_1 için $\pm 8^\circ$, H_2 için $\pm 21^\circ$, H_3 için $\pm 18^\circ$ olduğu belirlenmiştir.



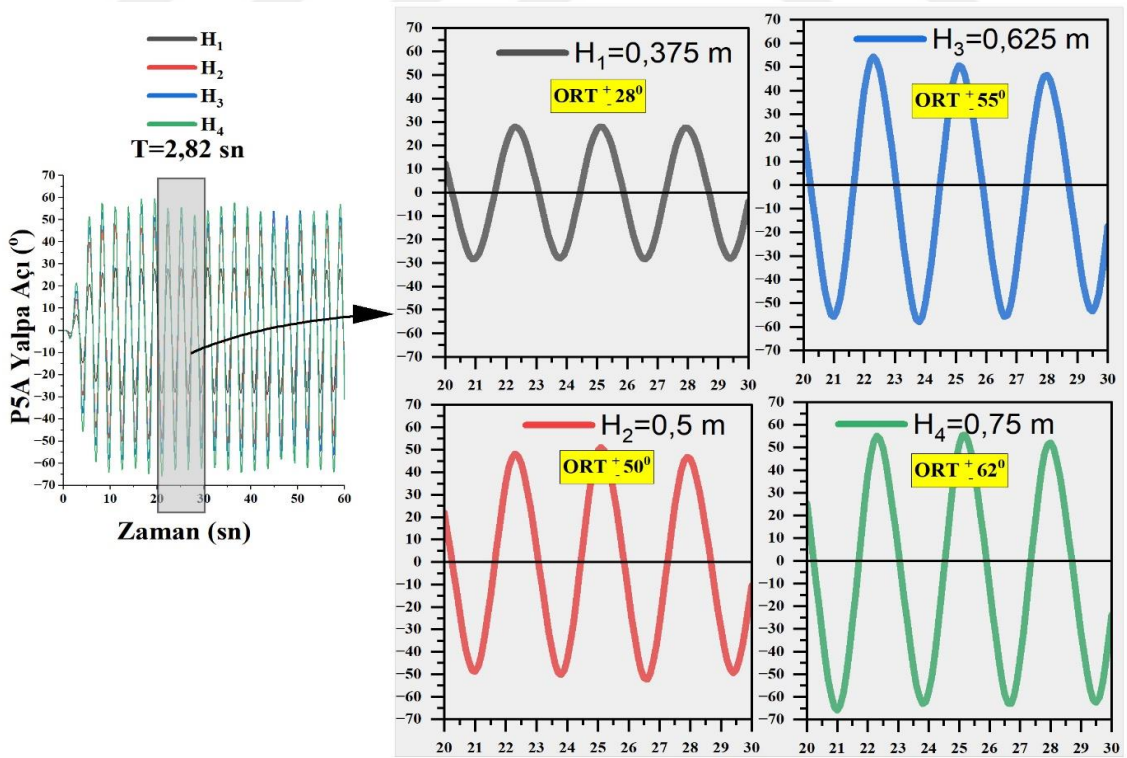
Şekil 42. $T=1,41$ sn periyotlu ve H_1 , H_2 , H_3 dalga yüksekliklerinde oluşan platform ortalama yalpa açısı değerleri

Şekil 43’de dalga periyodu $T=2,12$ sn ve dalga yükseklikleri $H_1=0,125$, $H_2=0,25$, $H_3=0,375$, $H_4=0,5$, $H_5=0,625$ m olacak şekilde beş farklı dalga değerine göre analiz edilmiştir. Analiz süresi 60 sn belirlenmiştir. Elde edilen verilerin daha iyi anlaşılabilmesi için 10 sn olan 20-30 sn aralığı detay şekli olarak sağda beş farklı dalga yüksekliği için ayrı ayrı gösterilmiştir. Beş farklı dalga yüksekliklerinde oluşan platform yalpa açısı H_1 için $\pm 17^\circ$, H_2 için $\pm 22^\circ$, H_3 için $\pm 26^\circ$, H_4 için $\pm 40^\circ$, H_5 için $\pm 48^\circ$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 44’de dalga periyodu $T=2,82$ sn ve dalga yükseklikleri $H_1=0,375$, $H_2=0,50$, $H_3=0,625$, $H_4=0,75$ m olacak şekilde dört farklı dalga değerine göre analiz edilmiştir. Analiz süresi 60 sn belirlenmiştir. Elde edilen verilerin daha iyi anlaşılabilmesi için 10 sn olan 20-30 sn aralığı detay şekli olarak sağda dört farklı dalga yüksekliği için ayrı ayrı belirtilmiştir. Dört farklı dalga yüksekliklerinde oluşan platform yalpa açısı H_1 için $\pm 28^\circ$, H_2 için $\pm 50^\circ$, H_3 için $\pm 55^\circ$, H_4 için $\pm 62^\circ$ m olarak bulunmuştur.



Şekil 43. $T=2,12$ sn periyotlu ve H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 dalga yüksekliklerinde oluşan platform ortalama yalpa açısı değerleri



Şekil 44. $T=2,82$ sn periyotlu ve H_1, H_2, H_3, H_4 dalga yüksekliklerinde oluşan platform ortalama yalpa açısı değerleri

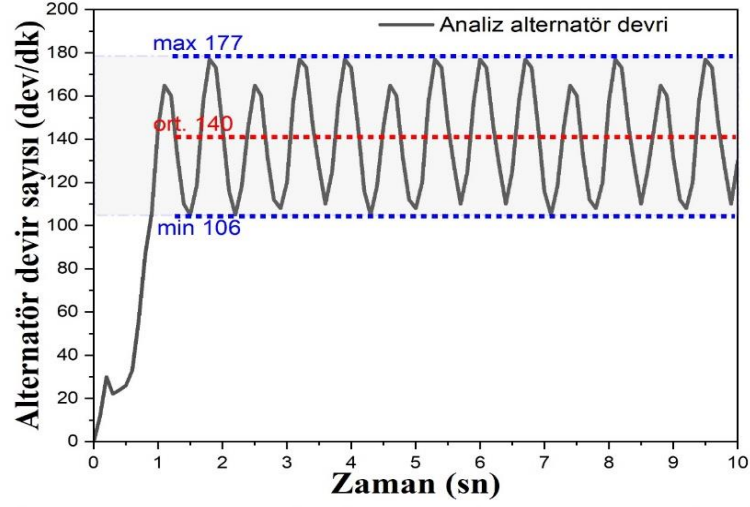
3.2. Sarkaç ve Dişli Mekanizmasının Analiz Sonuçları

Yapılan hidrodinamik analizler sonucunda farklı dalga değerlerinde P5A platformunda oluşan yalpa açısı verileri hidrodinamik analizler sonucunda tespit edilmiştir. Tezin bu bölümünde, elde edilen bu yalpa açısı değerleri sonucunda STDES sisteminde bulunan sarkaç-dişli mekanizmasının yapmış olduğu dinamik analiz sonuçları gösterilmiştir. Tablo 11’de 12 farklı dalga değeri ile oluşan platform yalpa açısı değerleri ve sarkaç-dişli mekanizmasında meydana gelen dinamik hareketler sonucu oluşan alternatör devir sayıları gösterilmektedir. Dalga periyodu ve dalga yüksekliği arttıkça platformda oluşan yalpa açısının arttığı ve buna bağlı olarak oluşan alternatör devir sayısının da arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 11. Farklı yalpa açısı değerlerinde alternatörde oluşan devir sayıları

	Dalga H (m) ve T (sn)	P5A Ort. Yalpa Açısı	Alternatör Ort. Devir (dev/dk)
T=1,41	H=0,125	$\pm 8^\circ$	140
	H=0,25	$\pm 21^\circ$	261
	H=0,375	$\pm 18^\circ$	313
T=2,12	H=0,125	$\pm 17^\circ$	182
	H=0,25	$\pm 22^\circ$	266
	H=0,375	$\pm 26^\circ$	320
	H=0,5	$\pm 40^\circ$	580
	H=0,625	$\pm 48^\circ$	710
T=2,82	H=0,375	$\pm 28^\circ$	390
	H=0,5	$\pm 50^\circ$	500
	H=0,625	$\pm 55^\circ$	683
	H=0,75	$\pm 62^\circ$	725

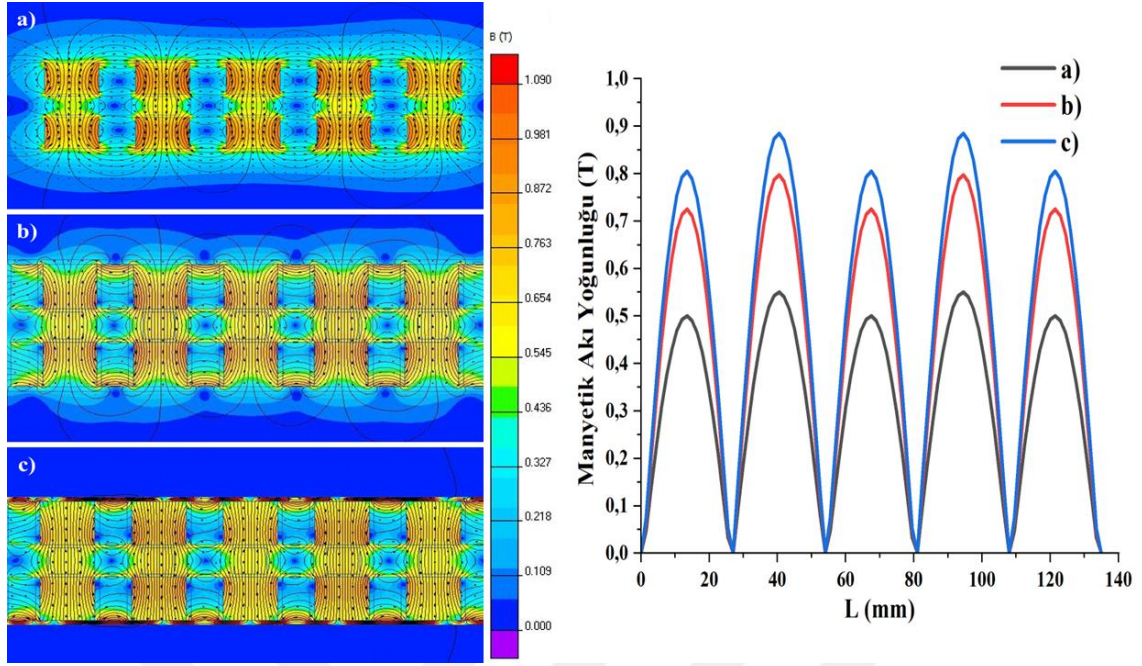
Şekil 45’de örnek olarak verilen dalga değerleri (T=1,41 sn ve H=0,125) olan bir dalganın sarkaç-dişli mekanizması ile oluşan alternatör devir sayısı gösterilmektedir. Sarkaç mekanizmasının 10 sn süre sonunda 80° ’lik açılar ile sallanması sonucunda sarkaç-dişli mekanizmasında maksimum 177, minimum 106 ve ortalama 140 dev/dk olduğu gözlemlenmiştir. Alternatördeki güç çıkışı değerleri hesaplanırken ortalama devir sayılarına göre analiz yapılacaktır. Ordu ili diğer dalga verilerinde oluşan devir sayılarına ait değerlerin maksimum, minimum ve ortalama değerleri Ek Şekil 1-11 aralığında gösterilmiştir.



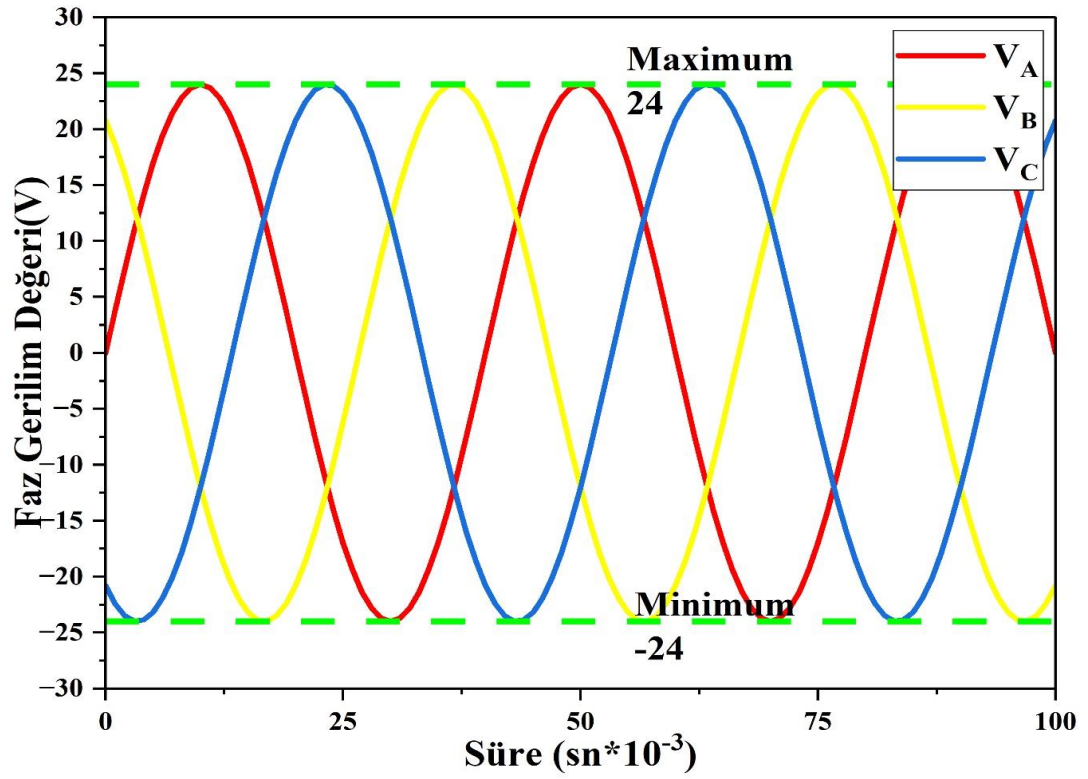
Şekil 45. Örnek $T=1,41$ sn ve $H=0,125$ m dalga parametresinin alternatörde oluşturduğu devir

3.3. Alternatör Analiz Sonuçları

Tezin bu kısmında üç farklı alternatör tasarımının manyetik sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 46'de sağ bölümde a) Eksenel akılı sabit mıknatıslı b) Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı c) Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı çelik levhali alternatör tasarımlarının kesit görünüşleri ve oluşan manyetik akı çizgileri yoğunlukları gösterilmiştir. Şeklin sol tarafında ise üç farklı alternatör için elde edilen manyetik akı yoğunluklarının grafikleri verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörün en yüksek manyetik akı yoğunluğu değeri ortalama 0,5 T, Halbach mıknatıs şekilli alternatörün ortalama 0,75 T ve Halbach+çelik plakalı alternatörün ortalama 0,85 T olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu veriler neticesinde eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı ve çelik plakalı alternatör tasarımının, eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörden yaklaşık %60 daha fazla manyetik akı yoğunlaştırduğu gözlemlenmiştir. Manyetik akı yoğunluğunun yüksek olması alternatörden elde edilen gerilim değerini arttırmaktadır. Bu nedenle daha fazla güç değeri elde etmek ve STDES mekanizmasının verimini arttırmak için analizin diğer bölümlerinde eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı ve çelik levhali alternatör tasarımı kullanılmıştır.

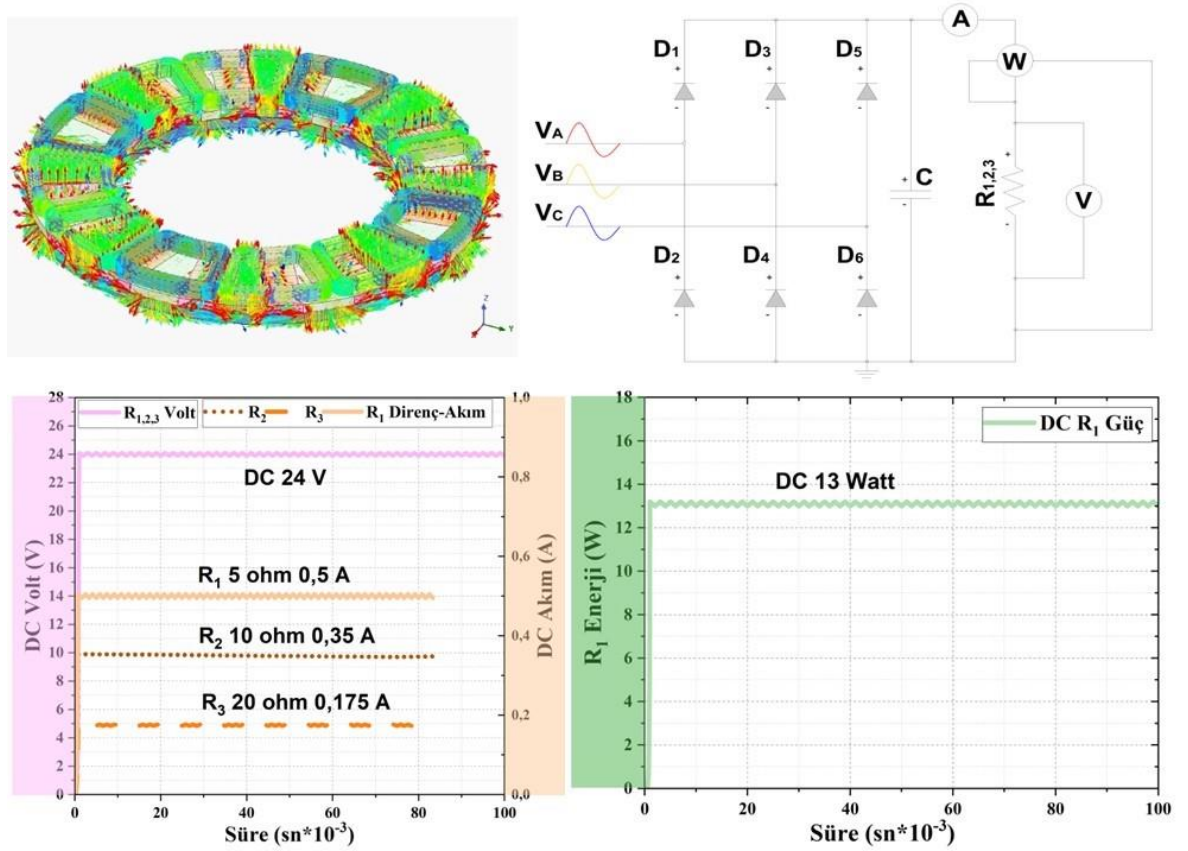


Şekil 46. Alternatörlerin manyetik akı yoğunlukları a) Eksenel akılı sabit mıknatıslı b) Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı c) Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı ve çelik levhalı



Şekil 47. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün üç faz volt gerilimi

Şekil 47’da örnek olarak alınan 140 dev/dk dönen eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 0,1 sn zaman diliminde fazlarında oluşan gerilim değerleri gösterilmiştir. Üç fazlı olarak tasarlanan bobinlerin fazları V_A , V_B ve V_C olarak isimlendirilmiştir. Analiz sonucunda fazlarda oluşan pik voltaj değeri 24 volt olarak bulunmuştur. Ayrıca, bulunan diğer devir sayısı değerlerinde oluşan alternatör gerilim değerleri Ek Şekil 12-22 aralığında gösterilmiştir.



Şekil 48. Alternatör analiz görüntüsü (sağ üst), AC-DC köprü doğrultucusu şematik çizimi (sol üst), farklı dirençlerde oluşan volt ve amper değerleri (sol alt), güç değeri (sağ alt)

Ansys Maxwell ile 140 dev/dk dönme değeri ile 24 volt bulunan alternatörün voltaj değeri alternatif akım (AC) olarak bulunmuştur. Bulunan değer doğru akım (DC) olarak belirlenmesi için analizde sisteme bir adet köprü doğrultucu devresi eklenmiştir. Şekil 48’te sol üst kısımda köprü doğrultucu devresinin şematik çizimi gösterilmiştir. Sağ üst kısımda analizi yapılan alternatörün görseli verilmiştir. Sol alt bölümde farklı direnç değerlerinde oluşan akım değerleri verilmiştir. 5 ohm-0,5 A, 10 ohm-0,35 A, 20 ohm-0,175 A bulunmuştur. Sağ alt bölümde ise 5 ohm dirençte alternatörün üreteceği güç değeri 13 W

olarak bulunmuştur. Alternatörde bulunan diğer farklı devir sayılarında oluşan DC güç çıkışı değerleri Ek Şekil 23'te verilmiştir.

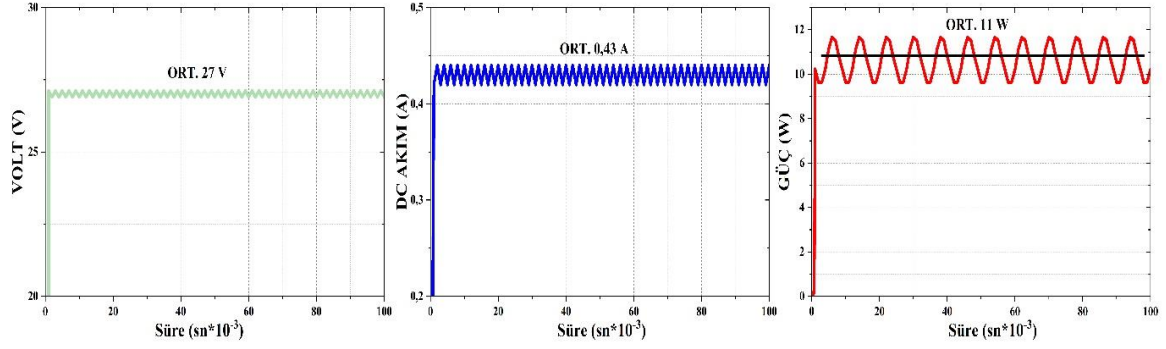
Tablo 12'de 12 farklı dalga değerlerinde analizi yapılan alternatör ve dalga güç değerleri ve sistemin her dalga değerinde oluşturduğu verim gösterilmiştir. Analizler sonucunda dalganın periyodu uzadıkça elde edilen alternatör devir değerleri dalga yükseklikleri aynı dahi olsa arttığı görülmüştür. Örneğin dalga periyodu 1,41 ve 2,12 sn olan iki farklı değerde dalga yükseklikleri 0,125 m olduğu fakat alternatörde oluşan devir sayıları 140 ve 182 olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca çok büyük dalga periyodlarında alternatörden alınan verimin giderek azaldığı anlaşılmıştır. Yapılan analiz sonuçları bize STDES mekanizmasının küçük dalga periyodlarında daha verimli çalıştığını göstermektedir.

Tablo 12. Farklı dalga parametrelerinde analiz sonucunda alternatör, dalga güç ve verim

Dalga T (sn) ve H (m)		Alternatör Analiz Ort. Devir (dev/dk)	Alternatör Analiz Güç (W)	Dalga Güç (W/m)	STDES Analiz Verim (%)
T=1,41	H=0,125	140	13	22	60
	H=0,25	261	18	86	21
	H=0,375	313	28	194	14
T=2,12	H=0,125	182	17	32	53
	H=0,25	266	24	129	19
	H=0,375	320	40	291	14
	H=0,5	580	83	517	16
	H=0,625	710	97	808	12
T=2,82	H=0,375	390	62	387	16
	H=0,5	500	88	688	13
	H=0,625	683	127	1075	12
	H=0,75	725	133	1548	9

3.4. STDES Prototip Deney Sonuçları

Tezin bu bölümünde 1:2 ölçekli olarak üretilen STDES mekanizmasının deney düzeneği sonuçları verilmiştir. Farklı dalga değerleri, deney düzeneğinde test edilerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Örnek olarak alternatör analizinde kullanılan 140 dev/dk da oluşan AC voltaj değeri, DC akım değeri ve güç çıkışı değerleri Şekil 49'te gösterilmiştir.



Şekil 49. Deney düzeneğinde 140 dev/dk alternatör volt, akım ve güç değerleri

Tablo 13. Farklı dalga parametrelerinde deney sonucunda alternatör, dalga güç ve verim

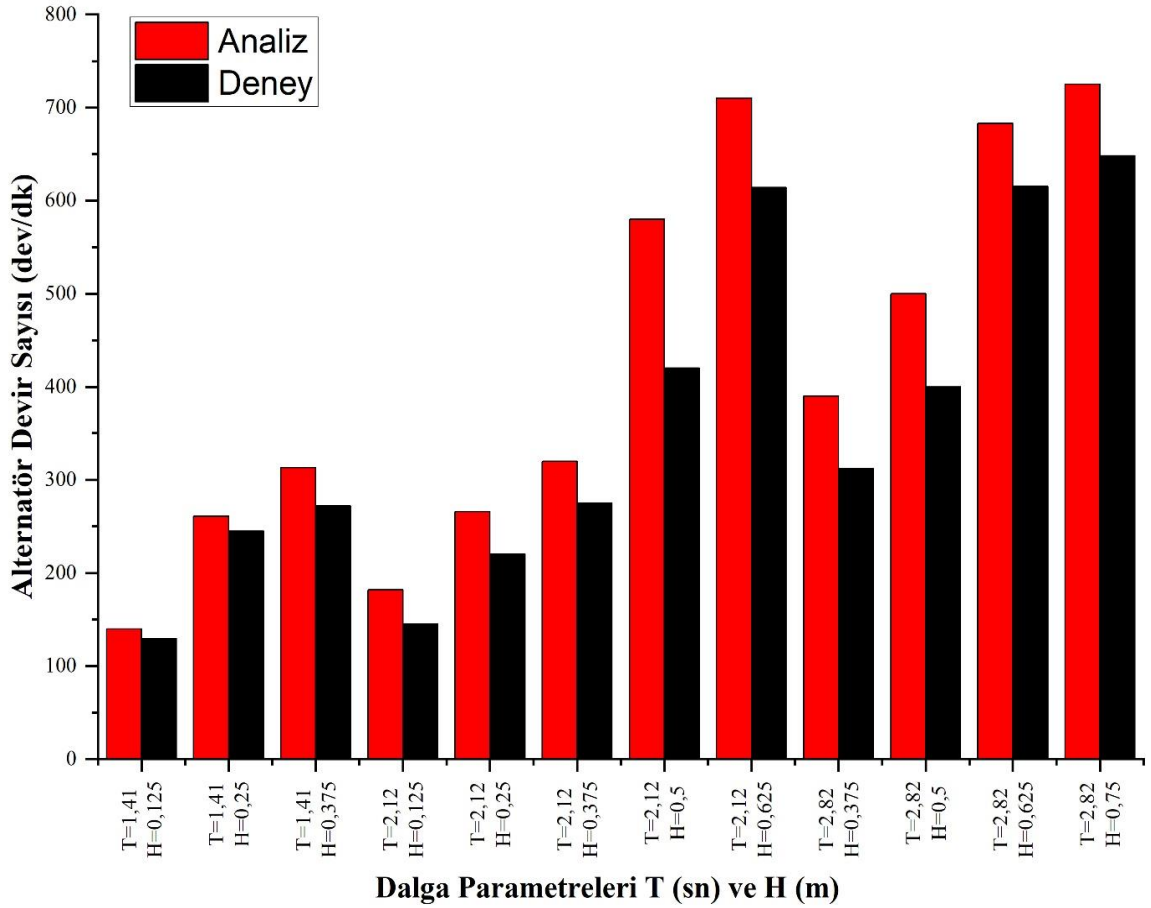
Dalga T (sn) ve H (m)		Alternatör Deney Ort. Devir (dev/dk)	Alternatör Deney Güç (W)	Dalga Güç (W/m)	STDES Deney Verim (%)
T=1,41	H=0,125	129	11	22	51
	H=0,25	245	15	86	17
	H=0,375	272	22	194	11
T=2,12	H=0,125	145	13	32	40
	H=0,25	220	18	129	14
	H=0,375	275	26	291	9
	H=0,5	420	70	517	14
	H=0,625	614	78	808	10
T=2,82	H=0,375	312	52	387	13
	H=0,5	400	65	688	9
	H=0,625	615	90	1075	8
	H=0,75	648	94	1548	6

Tablo 13'te deney düzeneği ile oluşturulan 12 farklı dalga değerinin alternatörde yapmış olduğu devir sayısı ve bu devir sayısına karşılık üretilen güç değeri gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen güç değerleri ile dalga güç değerleri karşılaştırılarak deney sisteminin verimi belirtilmiştir. Analiz ile bulunan alternatör güç değerleri, deney sonuçlarından elde edilen güç değerleriyle benzerlik göstermektedir. Dalga periyodu aynı tutulup dalga yüksekliği artırıldığında oluşan devir sayısının arttığı ve buna bağlı olarak üretilen güç miktarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Örneğin periyodu 1,41 sn olan dalganın yüksekliği 0,125 m oluşan devir 140 ve güç çıkışı 11 W değerinde ancak dalga yüksekliği 0,25 m olduğunda oluşan devir 261 ve güç çıkışı 15 W olduğu görülmektedir.

3.5. Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tezin bu bölümünde STDES mekanizmasının farklı dalga değerleri ile oluşan yalpa açılarında alternatörde meydana gelen devir sayısı, güç çıkışı ve verim değerleri analiz ve deney bulgularına göre karşılaştırılmıştır.

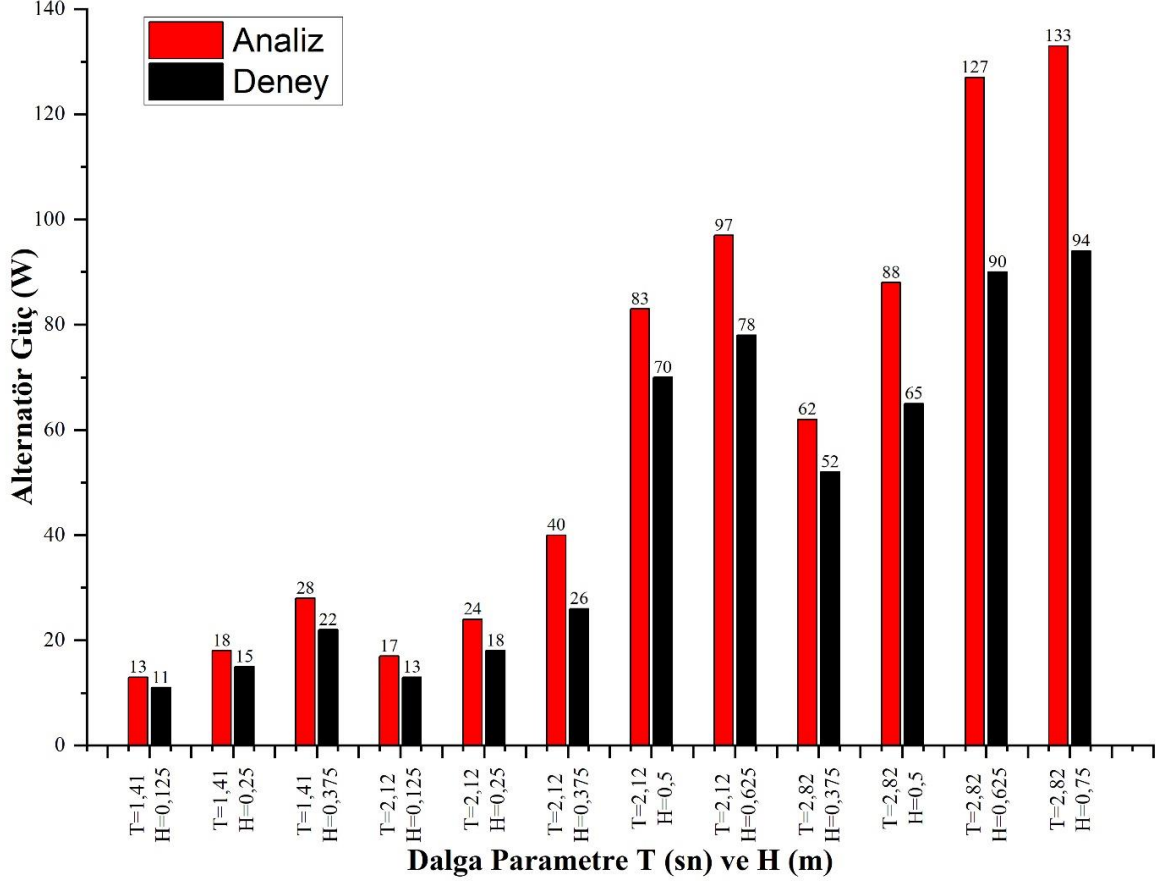
Şekil 50’da alternatörün analiz ve deney sonuçlarında yapmış olduğu devir sayıları verilmiştir. Farklı dalga değerlerinde oluşan devir sayıları karşılaştırılmıştır. Analiz ve deney sonuçlarına bakıldığında aynı dalga periyodunda dalga yüksekliği arttıkça elde edilen devir sayısının arttığı tespit edilmiştir. Deney sonuçlarının analiz sonuçlarından ortalama yüzde 10-15 aralığında daha düşük devir sayılarında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 50. Alternatör analiz ve deney devir sayıları

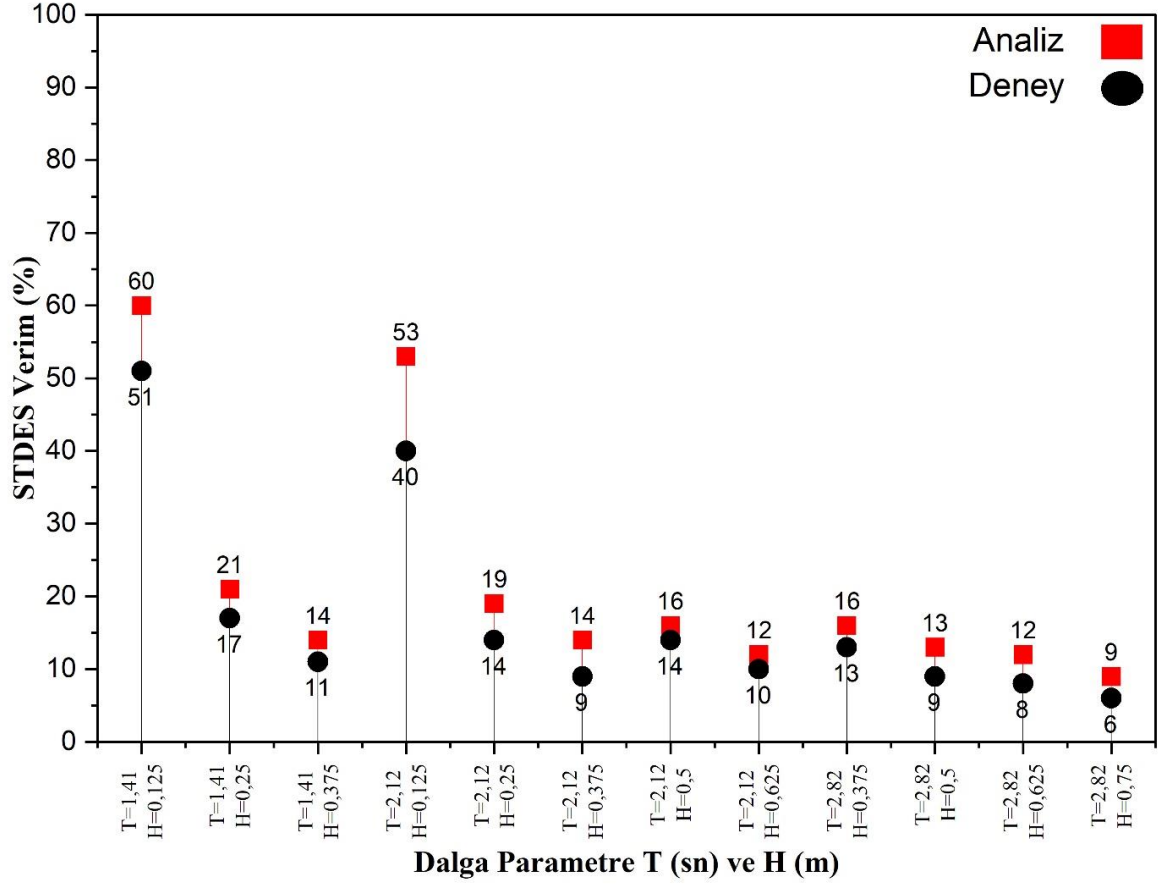
Şekil 51’de alternatörün deney ve analiz güç değerleri verilmiştir. Alternatörün devir sayısında oluşan artışa paralel olarak güç değerlerinde de benzer artmalar olduğu görülmüştür. Elde edilen güç verilerine bakıldığında analiz ve deney bulguları arasında Şekil 50’da gösterildiği gibi yüzde 10-15 aralığında fark olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 51’de hem

analiz hem deney sonuçlarına bakıldığında dalga periyod ve yükseklik değerleri arttığında elde edilen güç değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 51. Alternatör analiz ve deney güç değerleri

Şekil 52’de farklı dalga değerlerinde hesaplanan dalga gücü ve bu dalga gücünde STDES mekanizmasının verim değerleri analiz ve deney olarak karşılaştırılmıştır. STDES analiz ve deney veriminin T=1,41 sn ve H=0,125 m olduğu dalga durumunda %60 ve %51 olduğu gözlemlenmiştir. Aynı dalga periyodunda analiz ve deney veriminin dalga yüksekliği arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Sistemin ortalama analiz verimi %22, deney verimi %17 olarak tespit edilmiştir. Deney sonuçlarında yaklaşık %5’lik bir verim kaybının olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 52. STDES mekanizmasının analiz ve deney güç verimleri

Deney ve analiz sonuçları arasındaki farkın en temel nedenleri arasında, malzemelerin sürtünme kayıpları, mesh ağ yapısı ve geometrik karmaşıklık önemli bir rol oynamaktadır. Malzeme sürtünme kayıpları, analizde kullanılan malzeme parametrelerinin gerçek dünyadaki davranışı tam olarak yansıtamamasına neden olmaktadır. Malzemelerin sürtünme katsayıları, özellikle kontak problemleri veya sürtünme önemli olduğunda, analiz sonuçlarını etkilemektedir. Mesh ağ yapısı, modelin ayrıntısını ve çözünürlüğünü belirtir ve bu, sonuçların hassasiyetini büyük ölçüde etkilemektedir. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında STDES deney çıktılarının daha düşük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, deniz dalgalarından enerji elde etmek için özgün bir Sarkaç Tipi Dalga Enerji Sistemi tasarlanmış ve hidrodinamik performansı nümerik olarak, prototip performansı deneysel olarak test edilmiştir. Düşük dalga genliklerinde dahi enerji üretimi yapabilecek sarkaç tipi dalga enerji dönüştürücüsü sisteminin hidrodinamik performansı üzerine yapılmış olan bu tez çalışmasında;

- Günümüzde kullanılan enerji kaynakları ve bu kaynaklardan olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanları üzerine bir araştırma yapılmıştır. Ayrıca sürdürülebilir enerji kaynakları arasında olan dalga enerjisinin Dünya’da ve Türkiye’de mevcut potansiyeli hakkında bilgiler edinilmiştir. Elde edilen araştırmalar sonucunda dalga enerjisinin birim metre başına düşen enerji yoğunluğun diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla çok yüksek olduğu görülmüştür.

- Bugüne kadar sarkaç tipi dalga enerji sistemleri üzerine yapılan literatür çalışmaları incelenmiş ve dalga enerji sistemleri çeşitleri, yapıları, güç çıkış mekanizmaları ve çalışma prensipleri ortaya konulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında sarkaç modelli DES sistemlerinde genellikle dalga genlikleri ve frekansları yüksek değerlerde olan bölgeler tercih edilmiş ve bu bölgelerdeki güç verimleri değerlendirilmiştir. Düşük dalga değerlerinde enerji verimliliği yüksek bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu nedenle, bu tez çalışmasında düşük dalga genliklerinde ve frekansında dalganın enerjisini optimum seviyede kullanabilecek bir STDES mekanizması tasarlanmıştır. Düşük dalga genliklerinde dalganın potansiyel enerjisini %50-60 verim aralığında yakalayabilecek bir sitem geliştirilmiştir.

- Nümerik ve deney analizleri için kullanılacak olan dalga parametre değerleri Karadeniz’de bulunan ve diğer bölgelere kıyasla daha düşük dalga parametrelerine sahip Ordu ili dalga verilerinden temin edilmiştir. 12 farklı dalga parametresi anlamlı dalga yüksekliği (H_s) ve belirgin dalga periyodu (T_s) değerleri olarak seçilmiştir.

- Altı adet farklı yüzer platform geometrisi 1:2 ölçekli tasarlanarak hidrodinamik analizleri yapılmıştır. Çalışma bölgesi olan Ordu ili dalga karakteristik değerleri her bir platform için ayrı ayrı test edilmiştir. Ordu ili dalga frekansı ile altı farklı platformun doğal frekansı karşılaştırılarak optimum uyum benzerliği olan platform geometrisi P5 olarak belirlenmiştir. Belirlenen P5 geometrisi çeşitli dalga değerlerinde analiz edilerek stabilize

verileri incelenmiştir. Ayrıca P5 platformunun aşırı deniz durumlarında stabilite performansı değerlerini koruyabilmesi için salma boyu uzunluğu ve çeşitli bağlama halatları konfigürasyonları denenerek en uygun salma boyu ve bağlantı şekli geometrisinin uzun salmalı 8 bağlantı halatlı şekli olan P5A geometrisi olduğu görülmüştür. Tasarlanan yüzer platformların hidrodinamik performansları sayısal modelleme yöntemiyle incelenmiş ve hesaplamalı akış dinamiğine dayanan Ansys AQWA yazılımı sayısal hesaplamalarda kullanılmıştır.

- Seçilen dalga verileri ile en uyumlu çalışacak platform geometrisi olan P5A belirlendikten sonra 12 farklı dalga değerinde oluşan yalpa açısı değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler platformun üzerine yerleştirilecek olan STDES mekanizmasında bulunan sarkaç ve buna bağlı olan dişli sistemlerinin dinamik analizinde kullanılmıştır. Dinamik analiz hesaplamalarında, mekanizmanın hareket analizi için Ansys Workbench’de “Rigid Body Dynamics” modülü, dişli sistemde ve millerde oluşan gerilme, deformasyon ve sürtünme kayıpları için “Statik Structural” modülü, dişli hareketi ile oluşan ve alternatöre aktarılan açısal hız ve tork analizi için “Transient Structural” modülü kullanılmıştır. Tüm dalga değerlerine göre ayrı ayrı analizler sonucunda alternatöre aktarılan devir sayıları 1,41 sn dalga periyodu ve 0,125 / 0,25 / 0,375 m dalga yüksekliğinde sırasıyla 140, 245, 313 dev/dk olduğu ancak dalga periyodu ve dalga yüksekliği değerleri arttığında oluşan devir sayılar değerleri 710 ile 725 dev/dk aralığına kadar çıktığı görülmüştür.

- Sarkaç-dişli dinamik analizleri neticesinde elde edilen açısal kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için uygun alternatör tasarımı oluşturulmuştur. İki farklı mıknatıs bağlantı şekline sahip eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörler tasarımı yapılmıştır. 20x20x50 boyutlarında 16 adet neodyum mıknatıs farklı dizilim şekillerinde analiz edilerek en yüksek akı yoğunluğuna sahip mıknatıs dizilimi elde edilmiştir. Mıknatıslar rotorlara zıt kutup dizilimi şeklinde bağlandığında 0,5 tesla, Halbach dizilimi ile bağlandığında 0,75 tesla ve Halbach mıknatıs diziliminde rotor arkalarına çelik plaka takıldığında 0,85 tesla değerlerine çıktığı görülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde, en verimli manyetik akı yoğunluğu %60 daha fazla olan eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı çelik plakalı tasarım tercih edilmiştir. Tüm manyetik analizler Ansys Maxwell programı ile yapılmıştır.

- Yapılan tüm nümerik analizler sonucunda STDES tasarımının genel parametreleri çalışma alanı olan Ordu ili denizine uygun şekilde belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler neticesinde deneysel çalışmalar yapılabilmesi için modelin 1:2 ölçekli bir prototipi üretilerek

mekanik bir düzenli dalga sistemi tasarlanmış ve 12 adet farklı düzenli dalga parametresi altında test edilmiştir. Yapılan deney sonuçları neticesinde, STDES mekanizmasının alternatör devir sayısı, alternatör güç çıkış değerleri belirlenmiştir.

- Nümerik ve deney sonuçlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve birbiri ile tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir. Nümerik analiz sonuçlarında düşük dalga genliklerinde STDES verimi %53-60 aralığında olduğu tespit edilirken, deney sonuçlarında bu değer %40-51 aralığında olduğu görülmüştür. Yapılan analizler ve deneyler, tüm dalga değerlerinde sistemin ortalama %22 analiz verimine sahip olduğunu ancak deneylerde %17 verim elde edildiğini göstermiştir. Ancak, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında elde edilen verim %15-25 aralığındaki bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür.

Çalışmanın temeli, uygun bir yüzer geometriye sahip bir platform ve bu platformun oluşturduğu yalpa hareketi kaynaklı açısız kinetik enerjiyi en optimum şekilde düşük dalga genliklerinde dahi absorbe edecek uygun bir STDES mekanizma tasarımını içermektedir. Nümerik ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, düşük dalga genliklerine sahip bir deniz durumunda dahi uygun tasarım parametreleri belirlenebilirse verimli bir güç çıkış değeri elde edilebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında STDES analizleri, düzenli dalga kabulü yapılarak test edilmiştir. İleride yapılacak olan araştırmalarda literatürde geliştirilmiş olan dalga hesaplama yöntemleri ile daha gerçekçi deniz durumları için düzensiz dalga spektrumları seçilerek hem nümerik hem de deneysel bulgular temin edilebilir. Ayrıca deneysel çalışmada laboratuvar koşullarında oluşturulan mekanik düzenli dalga oluşturucu sistem yerine gerçek deniz koşulları altında deniz üzerinde testler gerçekleştirilebilir. Ayrıca STDES sayısal ve deney bulguları arasında oluşan tutarlılık neticesinde farklı çalışma bölgeleri seçilerek çok sayıda STDES ile bölgede deniz üzerine enerji hasatı tarlaları kurularak bölgenin enerji ihtiyacına katkıda bulunacak araştırmalar yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- ACTEON. (2023). INTERMOOR: <https://acteon.com/moorings-anchors/intermoor/> adresinden alındı
- Aderinto, T., & Li, H. (2019). Review on power performance and efficiency of wave energy converters. *Energies*, 12(22), s. 4329.
- Akpınar, A., & Kömürcü, M. İ. (2012). Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea. *Energy*, 42(1), s. 289-302.
- Akpınar, A., Vledder, G. P., Kömürcü, M. İ., & Özger, M. (2012). Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*, 50, s. 80-99.
- Aktaş, K., Karem, R. A., Özbahçeci, B. Ö., & Özkol, Ü. (2018). Açık deniz rüzgar türbinleri yüzer platformlarının hidrodinamik modellenmesi. 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu (s. 788-801). Adana: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Aminuddin, J., Effendi, M., Nurhayati, N., Widiyani, A., Razi, P., Wihantoro, W., . . . Bilalodin, B. (2020). Numerical analysis of energy converter for wave energy power generation-pendulum system. *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)*, 9(2), s. 255-261.
- ANSYS Inc, A. (2013). *Aqwa Theory Manual*. Cyberships.files: https://cyberships.files.wordpress.com/2014/01/wb_aqwa.pdf adresinden alındı
- Arinaga, R., & Cheung, K. F. (2012). Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, 39(1), s. 49-64.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), s. 7649-7666.
- Boren, B. C., Lomonaco, P., Batten, B. A., & Paasch, R. K. (2016). Design, development, and testing of a scaled vertical axis pendulum wave energy converter. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), s. 155-163.
- Borthwick, A. G. (2016). Marine renewable energy seascape. *Engineering*, 2(1), s. 69-78.
- Cai, Q., & Zhu, S. (2021). Applying double-mass pendulum oscillator with tunable ultra-low frequency in wave energy converters. *Applied Energy*, 298, s. 117228.
- Carapellese, F., Pasta, E., Paduano, B., Faedo, N., & Mattiazzo, G. (2022). Intuitive LTI energy-maximising control for multi-degree of freedom wave energy converters: the PeWEC case. *Ocean Engineering*, 256, s. 111444.

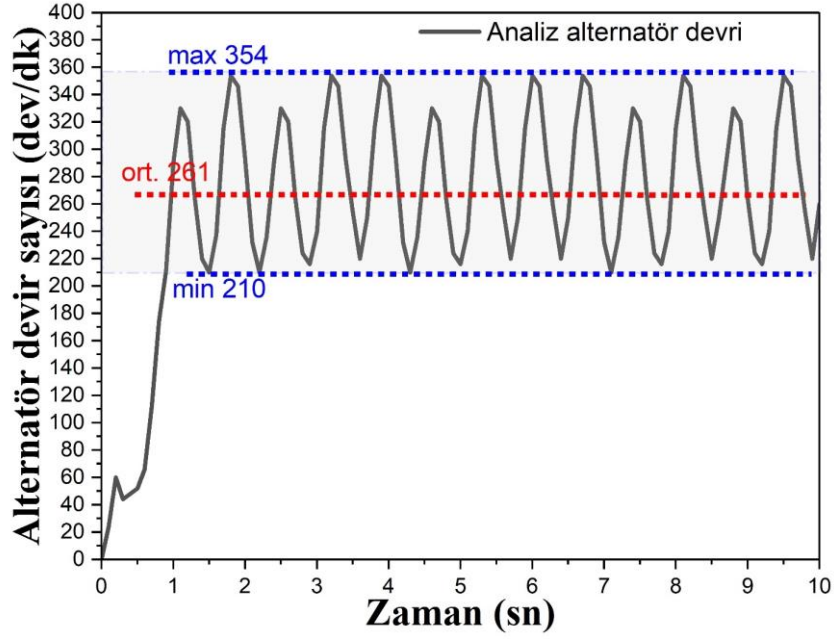
- Cervelli, G., Battisti, B., & Mattiazzo, G. (2022). On the influence of multidirectional irregular waves on the PeWEC device. *Frontiers in Energy Research*, 10, s. 908529.
- Chen, F., Duan, D., Han, Q., Yang, X., & Zhao, F. (2019). Study on force and wave energy conversion efficiency of buoys in low wave energy density seas. *Energy conversion and management*, 182, s. 191-200.
- Chen, F., Duan, D., Han, Q., Yang, X., & Zhao, F. (2019). Study on force and wave energy conversion efficiency of buoys in low wave energy density seas. *Energy conversion and management*, 182, s. 191-200.
- Cordonnier, J., Gorintin, F., De Cagny, A., Clement, A., & Babarit, A. (2015). SEAREV: Case study of the development of a wave energy converter. *Renewable Energy*, 80, s. 40-52.
- Crowley, S., Porter, R., Taunton, D., & Wilson, P. A. (2018). Modelling of the WITT wave energy converter. *Renewable Energy*, 115, s. 159-174.
- Ding, W., Wang, K., Mao, Z., & Cao, H. (2020). Layout optimization of an inertial energy harvester for miniature underwater mooring platforms. *Marine Structures*, 69, s. 102681.
- Dizon, C., Cavagnaro, R. J., Robertson, B., & Brekken, T. K. (2021). Modular horizontal pendulum wave energy converter: Exploring feasibility to power ocean observation applications in the US pacific northwest. *IET Renewable Power Generation*, 15(14), s. 3354--3367.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., . . . von Stechow, C. (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*. England: Cambridge University Press.
- Falcao, A. F. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), s. 899-918.
- Gioia, D., Pasta, E., Brandimarte, P., & Mattiazzo, G. (2022). Data-driven control of a pendulum wave energy converter: A gaussian process regression approach. *Ocean Engineering*, 253, s. 111191.
- Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures* (Cilt 33). World Scientific Publishing Company.
- Godfrey, B. (2004). *Renewable energy-power for a sustainable future*. Oxford: Oxford University Press 2nd edition.
- Gunawardane, S., Bandara, G., & Lee, Y.-H. (2021). Hydrodynamic analysis of a novel wave energy converter: Hull Reservoir Wave Energy Converter (HRWEC). *Renewable Energy*, 170, s. 1020--1039.

- Hasnain, S., Kallu, K. D., Nawaz, M. H., Abbas, N., & Pruncu, C. I. (2020). Dynamic response of an inverted pendulum system in water under parametric excitations for energy harvesting: A conceptual approach. *Energies*, 13(19), s. 5215.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., . . . Kruseman, P. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*.
- Hepbasli, A., Ozdamar, A., & Ozalp, N. (2001). Present Status and Potential of Renewable Energy Sources in Turkey. *Energy Sources*, 23(7), s. 631-648.
- Hove, H. H., & Patrick, L. (2015). Energy 360: Invited perspective: The outlook for energy: A view to 2040. *Journal of Petroleum Technology*, 67(04), s. 14-19.
- Ibañez, P. (2008). Energías de las olas: Situación y Futuro. *Tecnalia Corporasion Tecnologica*. Coruña.
- IRENA. (2014). *Wave Energy: Technology Brief*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency technical report.
- IRENA. (2017). *Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA, E. (2020). *Innovation outlook: Ocean energy technologies*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency .
- Jacobson, P., Hagerman, G., & Scott, G. (2011). *Mapping and assessment of the United States ocean wave energy resource*. United States: Electric Power Research Institute.
- Jiang, X., Shi, H., Cao, F., Zhao, Z., Li, M., & Chen, Z. (2023). System analysis and experimental investigation of a pendulum-based wave energy converter. 277, s. 114-300.
- Levin, I. (2012). The balance of the carbon budget. *Nature*, 488(7409), s. 35-36.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., & Alegria, I. M. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, s. 413-434.
- Ma, Y., Ai, S., Yang, L., Zhang, A., Liu, S., & Zhou, B. (2020). Research on design and optimization of the pitching float wave energy converter. *Energy Science & Engineering*, 8(11), s. 3866--3882.
- Moeini, M., & Etemad-Shahidi, A. (2007). Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. *Applied Ocean Research*, 29(3), s. 137-145.
- Mork, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010). Assessing the global wave energy potential. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 49118, s. 447--454. China: 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3.

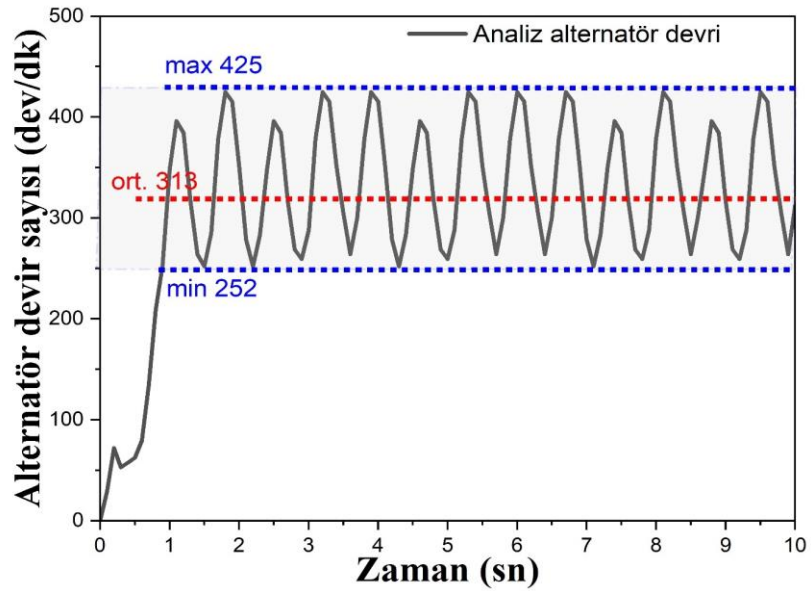
- Mork, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010). Assessing the Global Wave Energy Potential. *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, (s. 447-454).
- Nations, U. (1998). Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. *United Nations*.
- Ng, Y. Y., & Park, S. H. (2010). Analysis and Realization of Ocean Wave Surface by Utilizing Matlab. *Korea Institute of Electronic Communication Science*, 5(3), s. 281-287.
- Nielsen, K. (2003). *Annex II Report 2003. Development of recommended practices for testing and evaluating ocean energy systems*. Lisbon: Technical report, IEA-Ocean Energy Systems.
- Niosi, F., Begovic, E., Bertorello, C., Rinauro, B., Sannino, G., Bonfanti, M., & Sirigu, S. (2023). Experimental validation of Orcaflex-based numerical models for the PEWEC device. *Ocean Engineering*, 281, s. 114963.
- Özhan, E., & Abdalla, S. (2002). *Wind & Deep Water Wave Atlas for Turkish Coast Ankara*. Ankara: TMK/MEDCOAST.
- Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2017). *Handbook of ocean wave energy*. New Orleans: Springer Nature.
- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*, 69(24), s. 5181--5190.
- Pozzi, N., Bracco, G., Passione, B., Sirigu, S. A., & Mattiazzo, G. (2018). PeWEC: Experimental validation of wave to PTO numerical model. *Ocean Engineering*, 167, s. 114-129.
- Reikard, G. R., & Bidlot, B. (2017). Wave energy worldwide: Simulating wave farms, forecasting, and calculating reserves. *International journal of marine energy*, 17, s. 156-185.
- REN21. (2019). *Renewables 2019 global status report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Ris, R., Holthuijsen, L., & Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), s. 7667--7681.
- Salter, S. H. (1974). Wave power. *Nature*, 249(5459), s. 720--724.
- Sands, P. (1992). The United Nations framework convention on climate change. *Rev. Eur. Comp. & Int'l Envtl. L.* 270, 1, s. 270.
- Sergiienko, N. Y. (2018). *Three-tether wave energy converter: hydrodynamic modelling, performance assessment and control*. University of Adelaide Adelaide: Australia.

- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. Ankara. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf adresinden alındı
- Tollefson, J. (2014). Power from the oceans: Blue energy: Blue energy. *Nature*, 508(7496), s. 302-304.
- Tolman, H. L. (1991). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21(6), s. 782-797.
- Two-dimensional numerical modelling of a moored floating body under sloping seabed conditions. (2020). *Feng, Aichun; Kang, Hooi Siang; Zhao, Binbin; Jiang, Zhiyu*, 8(6), s. 389.
- URL-1. (2023, Mart 15). *Acteon* . Intermoor: <https://acteon.com/moorings-anchors/intermoor/> adresinden alındı
- Vicinanza, D., Contestabile, P., & Ferrante, V. (2013). Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*, 50, s. 506-521.
- Wan, Z., Li, Z., Zhang, D., & Zheng, H. (2022). Design and Research of Slope-Pendulum Wave Energy Conversion Device. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), s. 1572.
- Wang, Y.-J., & Lee, C.-K. (2019). Dynamics and power generation of wave energy converters mimicking biaxial hula-hoop motion for mooring-less buoys. *Energy*, 183, s. 547-560.
- Warren, I., & Bach, H. (1992). MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7(4), s. 229--240.
- Wu, J., Qian, C., Zheng, S., Chen, N., Xia, D., & Goteman, M. (2022). Investigation on the wave energy converter that reacts against an internal inverted pendulum. *Energy*, 247, s. 123493.
- Yang, B., Wu, S., Zhang, H., Liu, B., Shu, H., Shan, J., . . . Yao, W. (2022). Wave energy converter array layout optimization: A critical and comprehensive overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, s. 112-124.
- Yurchenko, D., & Alevras, P. (2018). Parametric pendulum based wave energy converter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99, s. 504-515.
- Yusuf, A. A., Irfan, M., & Razzaq, M. F. (2018). A design of coreless permanent magnet axial flux generator for low speed wind turbine. *5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)* (s. 637-641). Malang: IEEE.

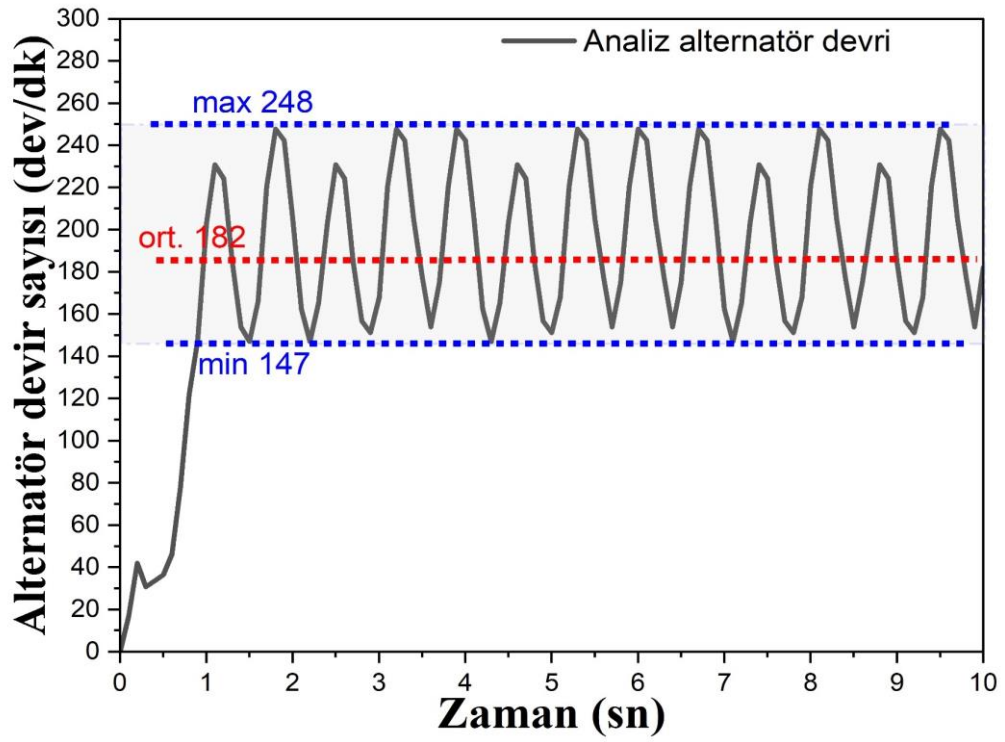
6. EKLER



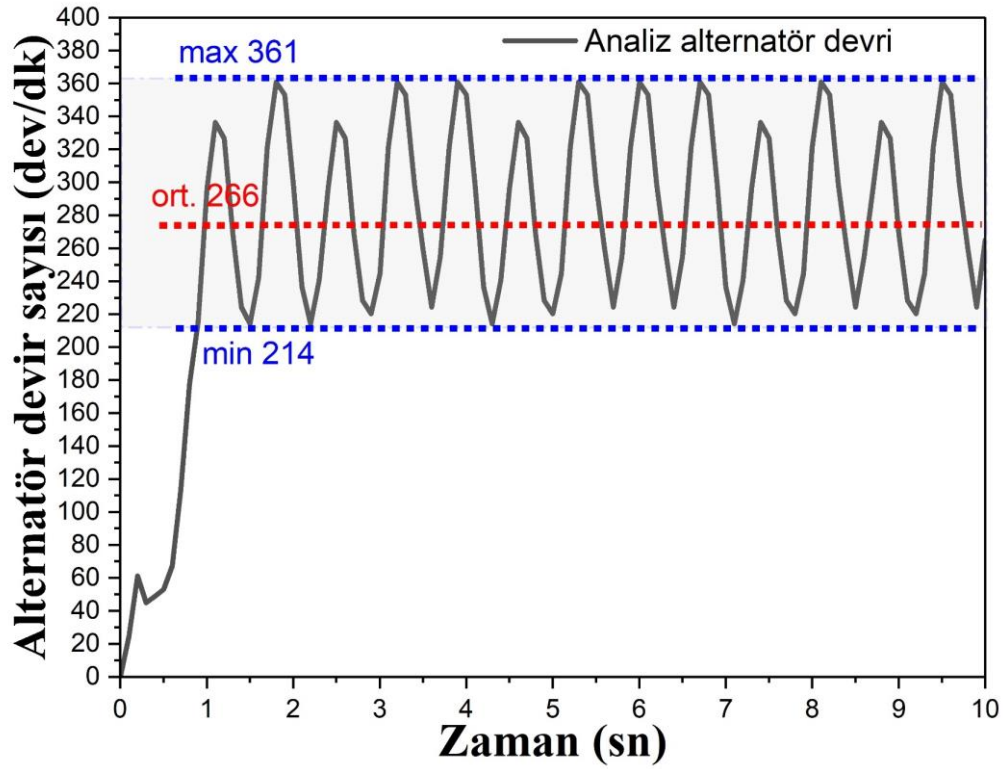
Ek Şekil 1. $T=1,41$ sn $H=0,25$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



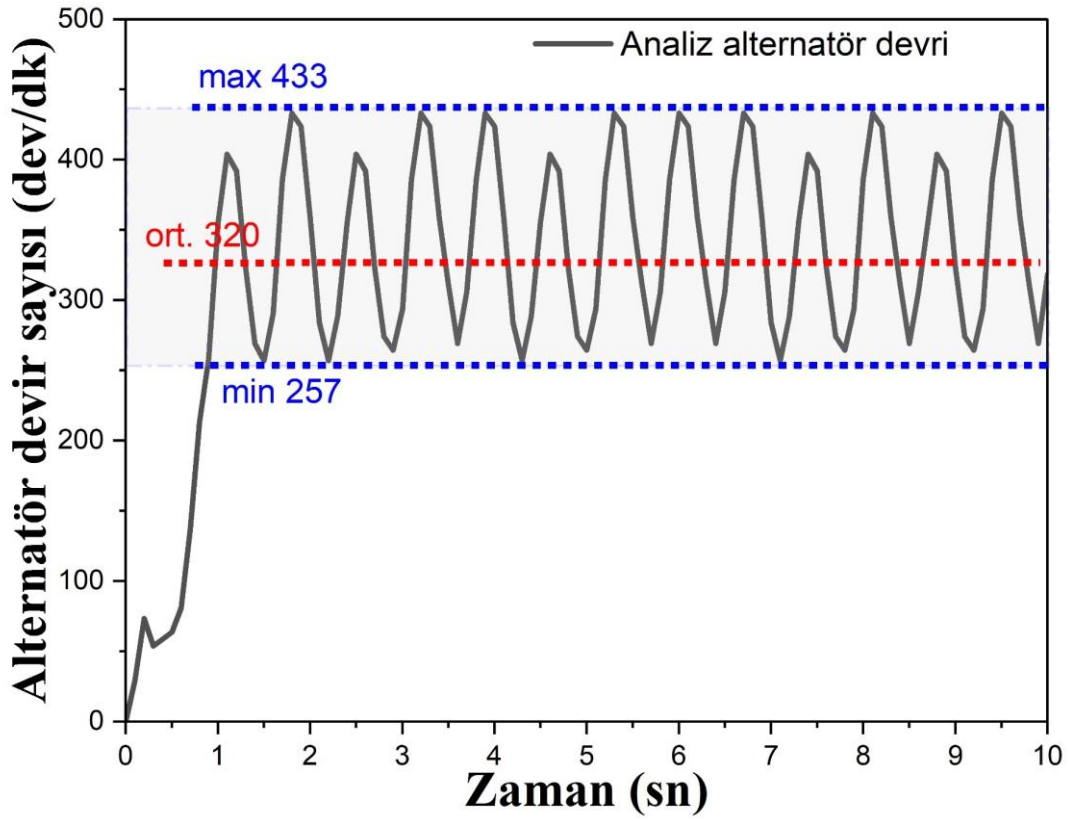
Ek Şekil 2. $T=1,41$ sn $H=0,375$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



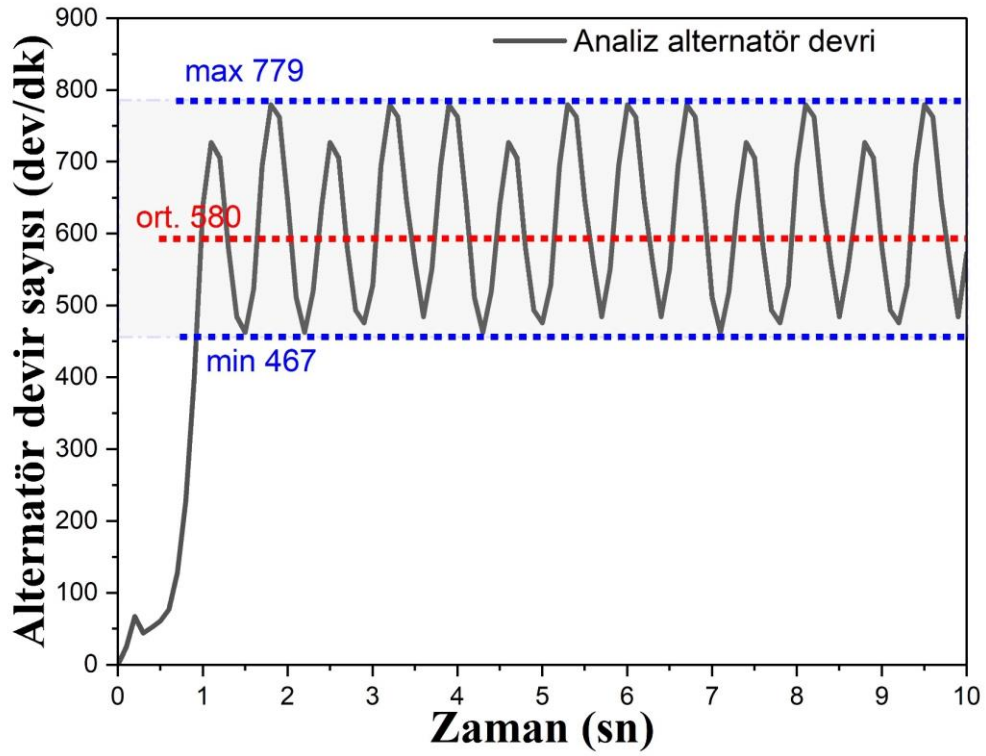
Ek Şekil 3. $T=2,12$ sn $H=0,125$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



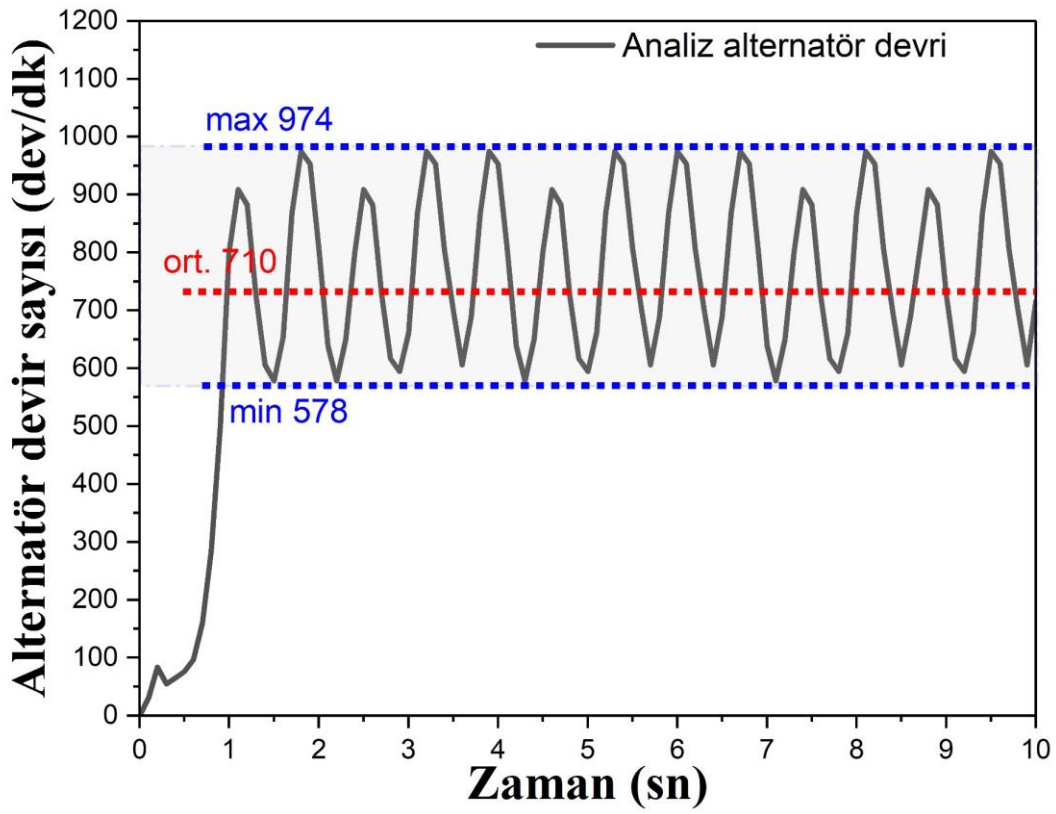
Ek Şekil 4. $T=2,12$ sn $H=0,25$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



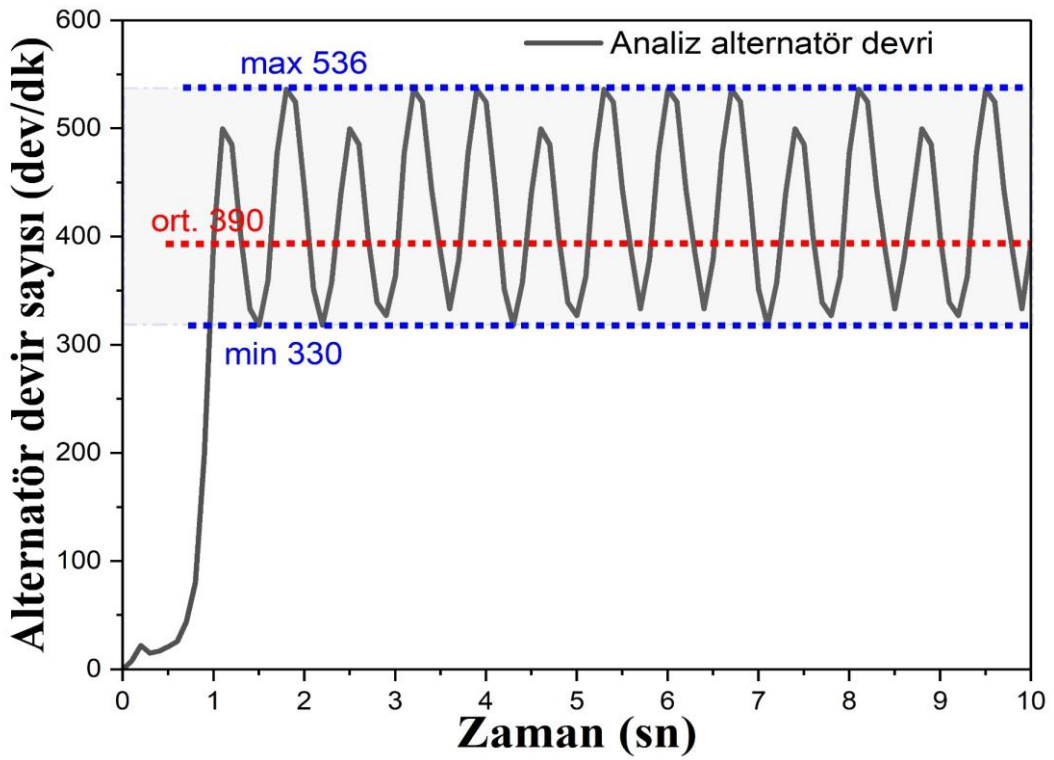
Ek Şekil 5. $T=2,12$ sn $H=0,375$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



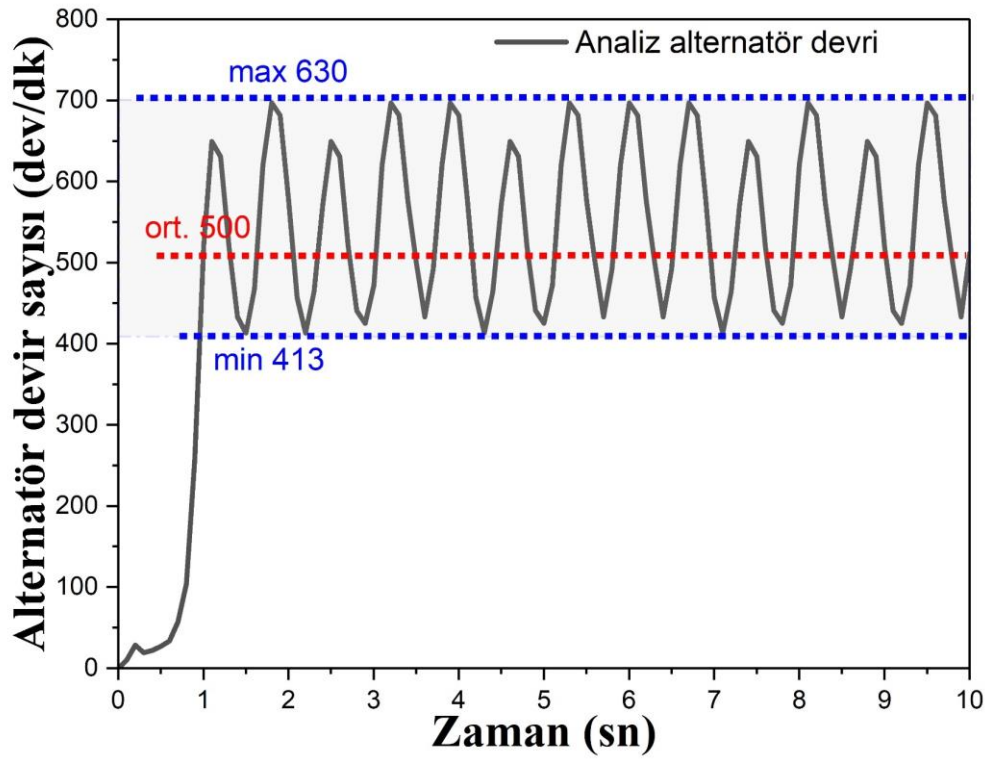
Ek Şekil 6. $T=2,12$ sn $H=0,5$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



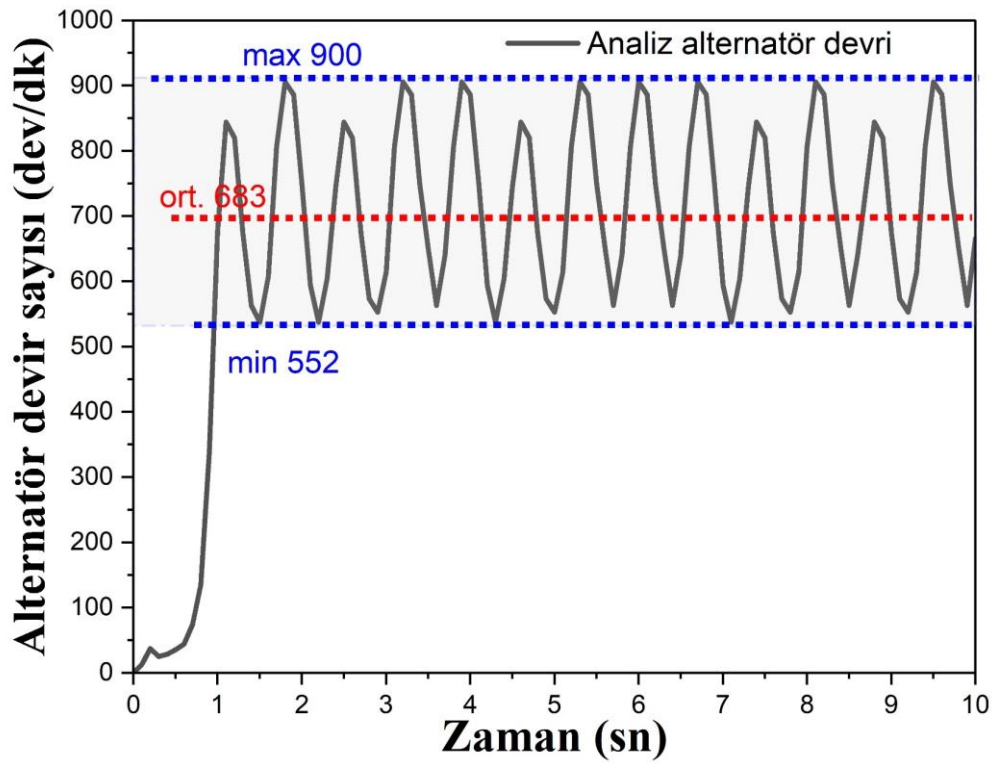
Ek Şekil 7. $T=2,12$ sn $H=0,625$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



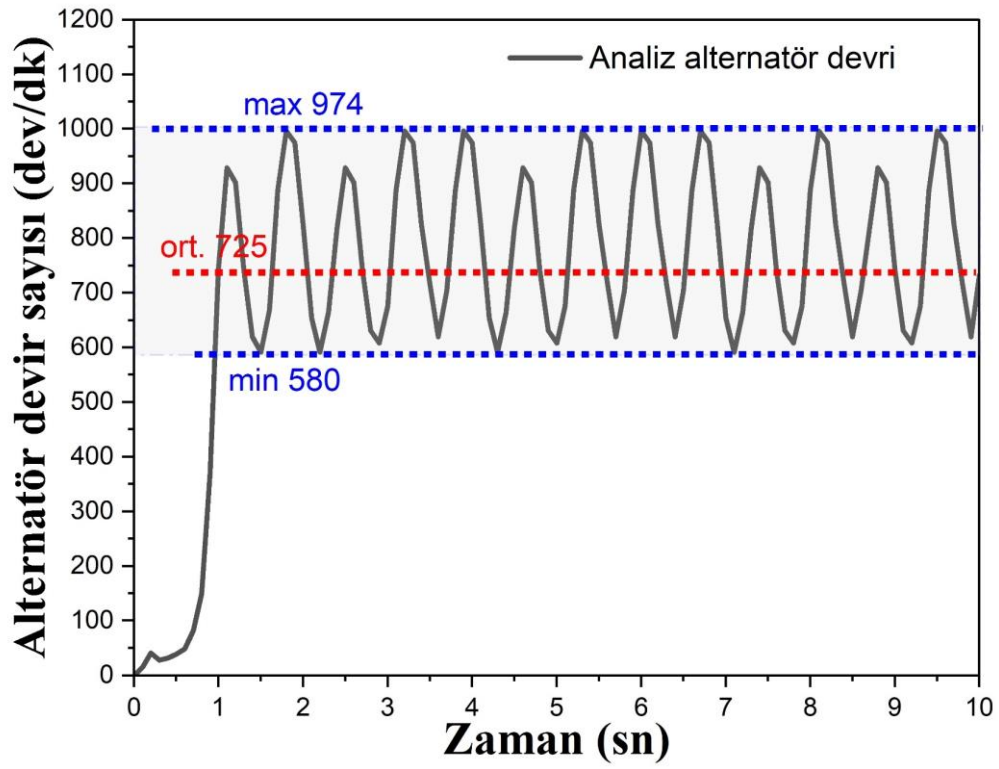
Ek Şekil 8. $T=2,82$ sn $H=0,375$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



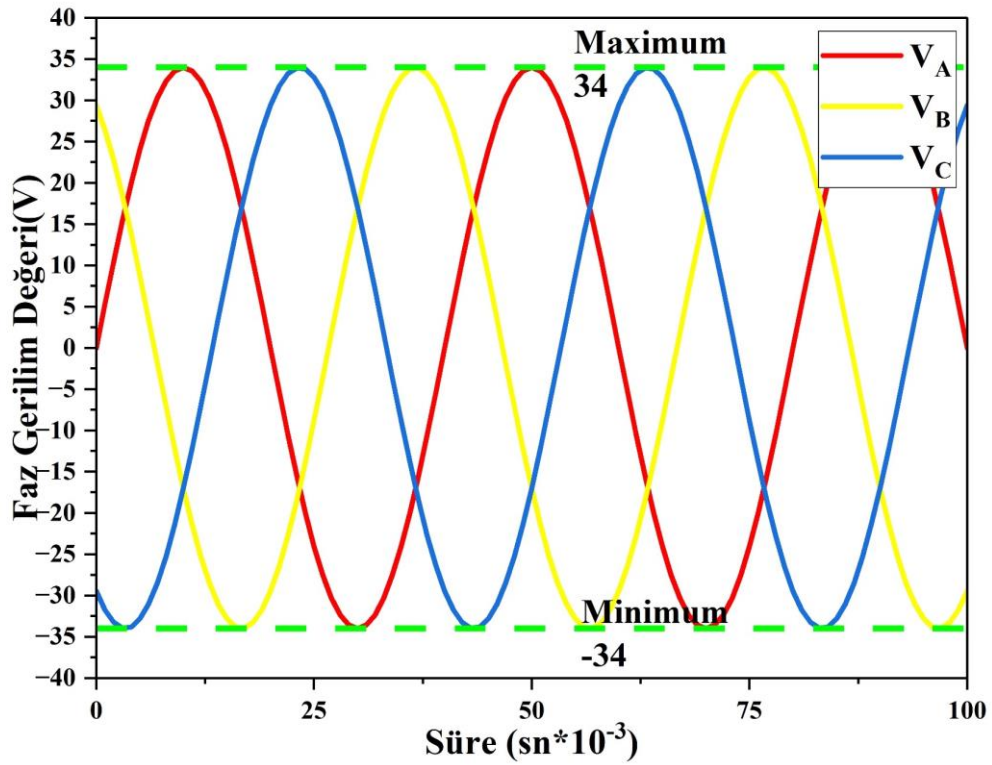
Ek Şekil 9. $T=2,82$ sn $H=0,5$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



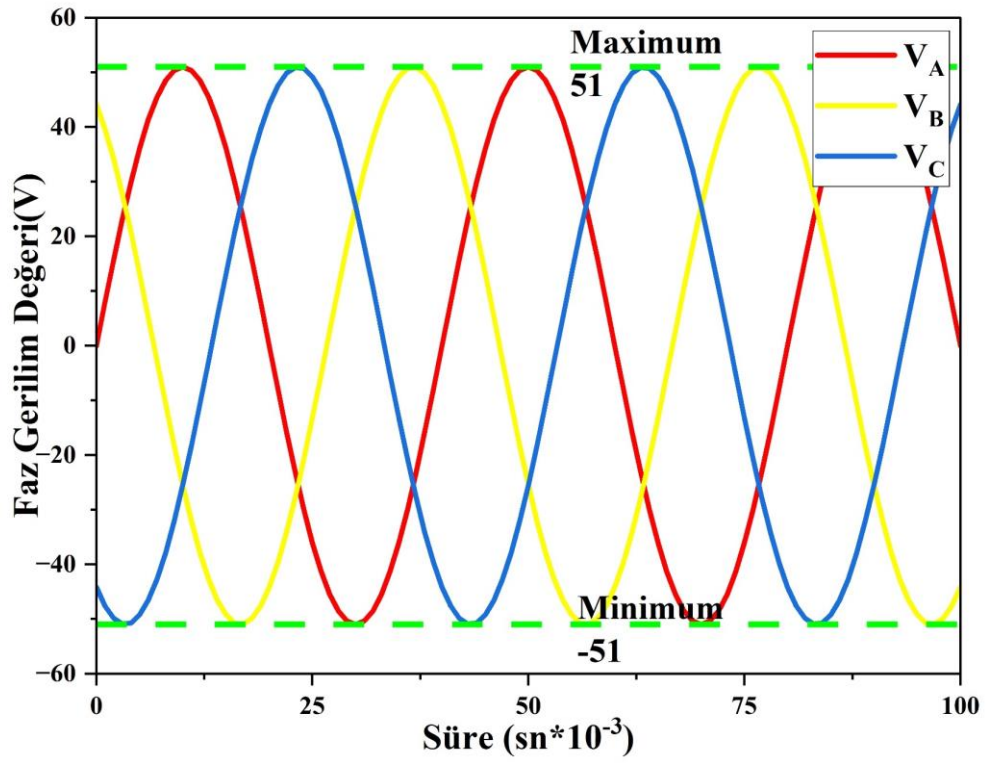
Ek Şekil 10. $T=2,82$ sn $H=0,625$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



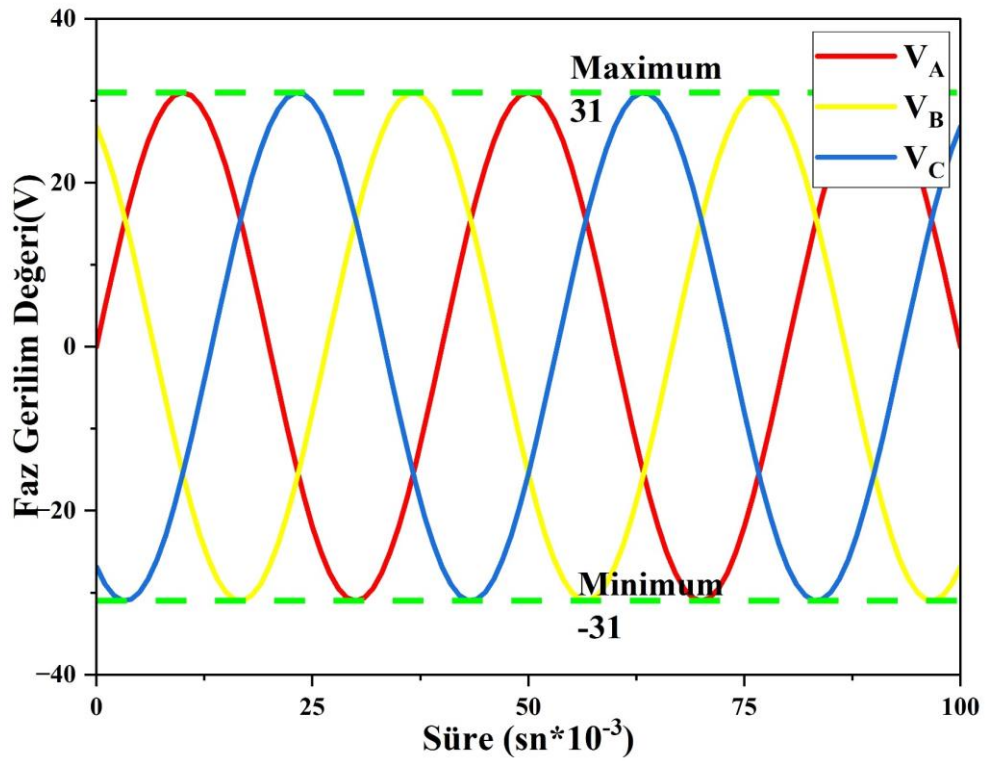
Ek Şekil 11. $T=2,82$ sn $H=0,75$ m dalga değerinde analiz sonucu alternatörde oluşan devir



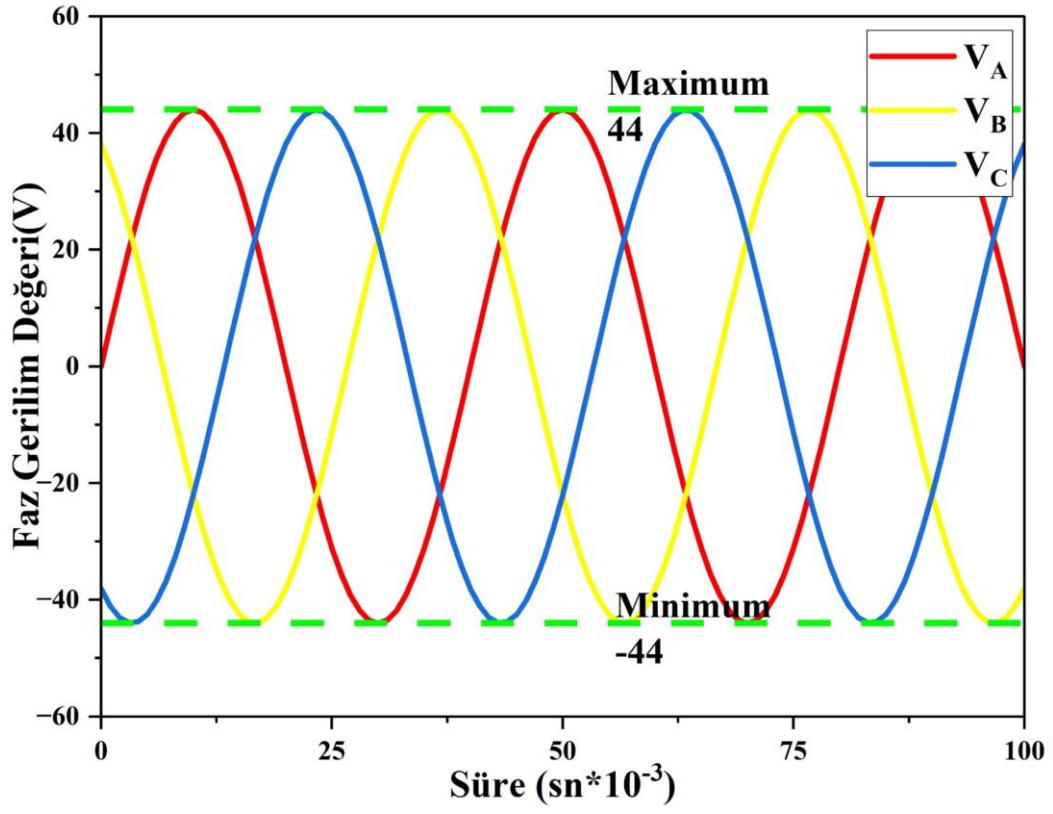
Ek Şekil 12. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 261 dev/dk üç faz gerilimi



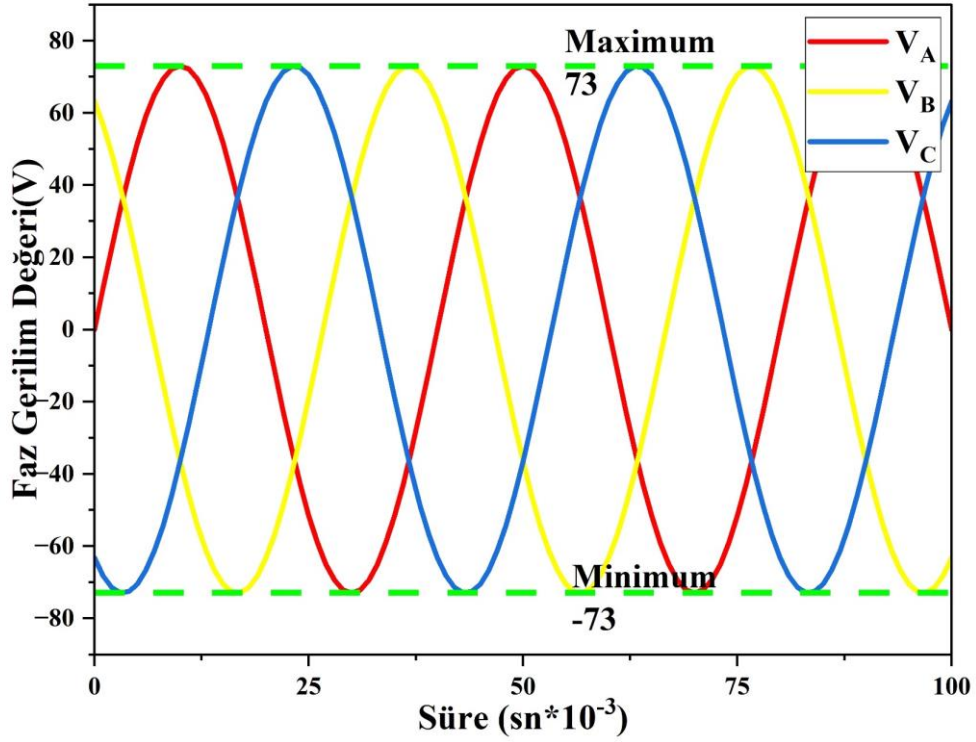
Ek Şekil 13. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 313 dev/dk üç faz gerilimi



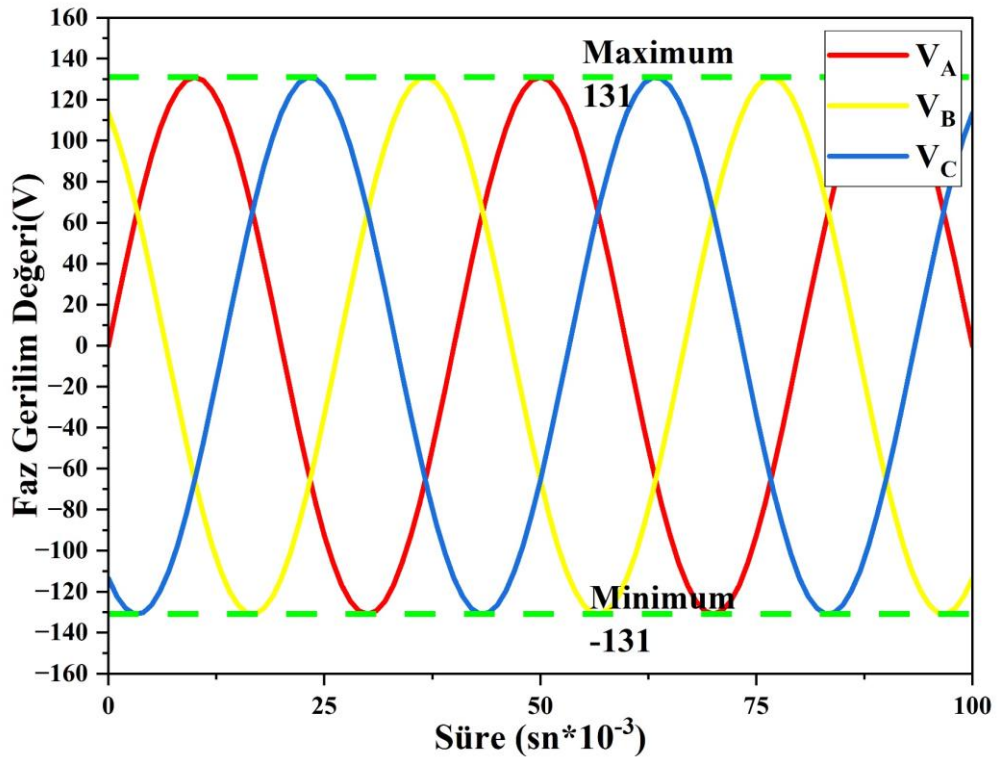
Ek Şekil 14. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 182 dev/dk üç faz gerilimi



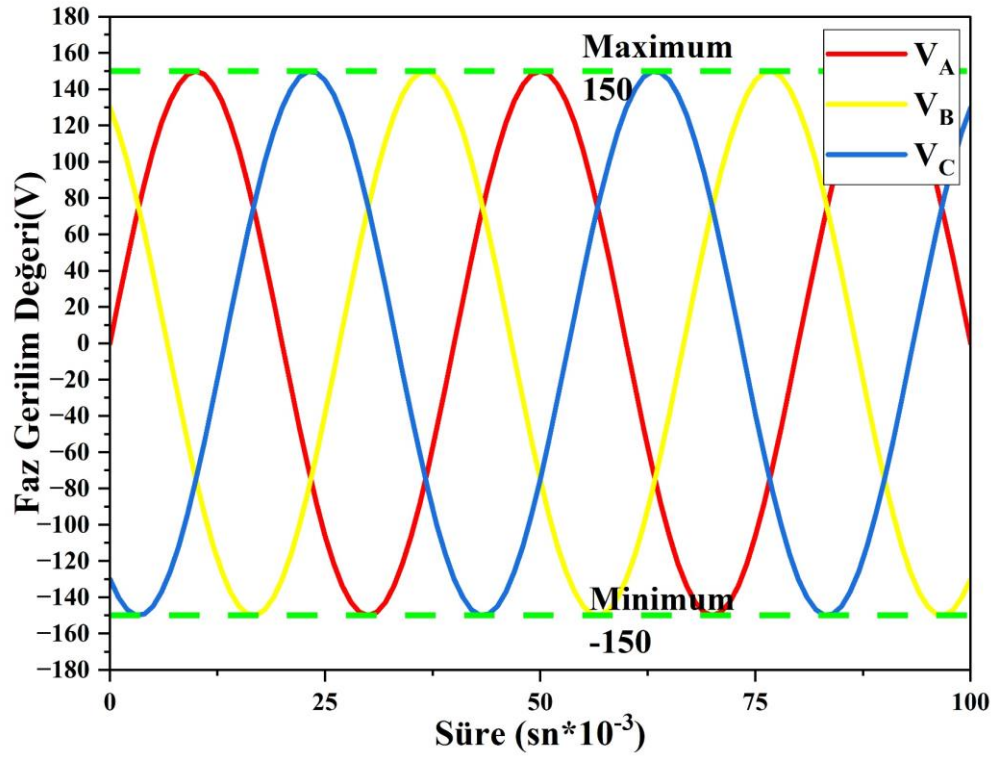
Ek Şekil 15. Eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 266 dev/dk üç faz gerilimi



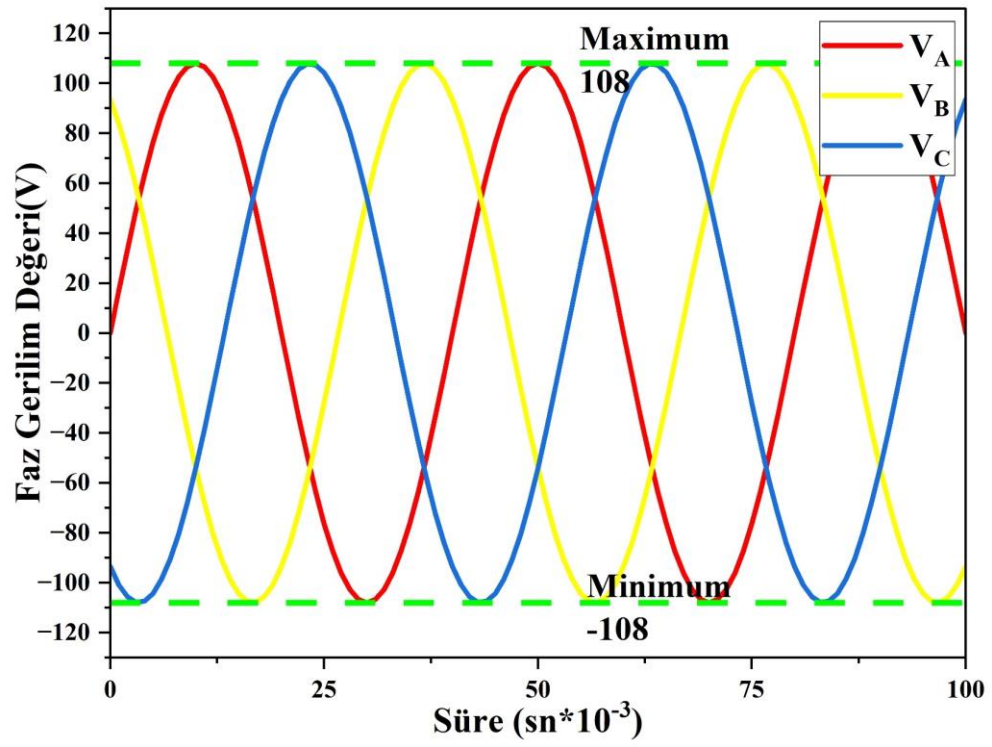
Ek Şekil 16. Eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 320 dev/dk üç faz gerilimi



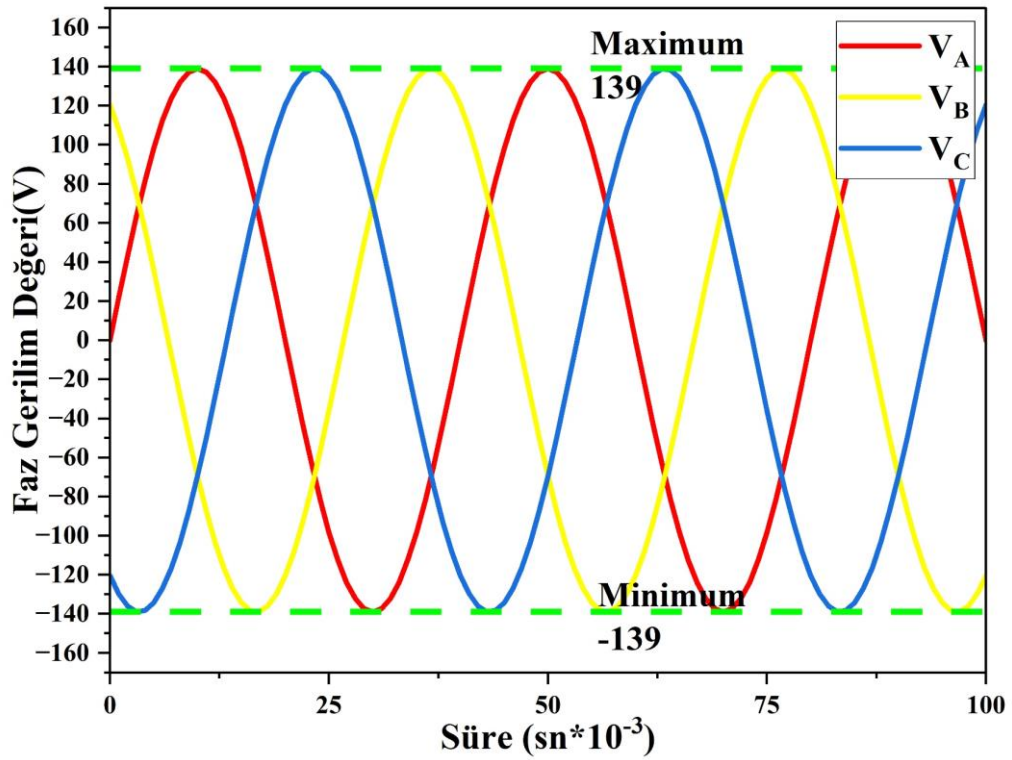
Ek Şekil 17. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 580 dev/dk üç faz gerilimi



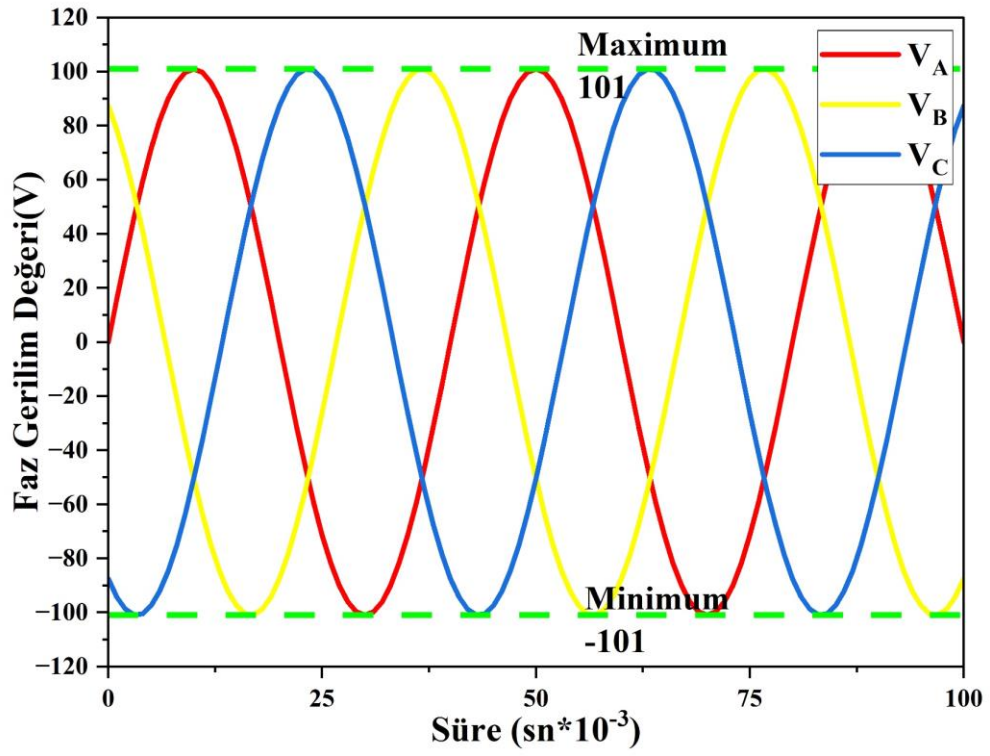
Ek Şekil 18. Eksenel akılı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 710 dev/dk üç faz gerilimi



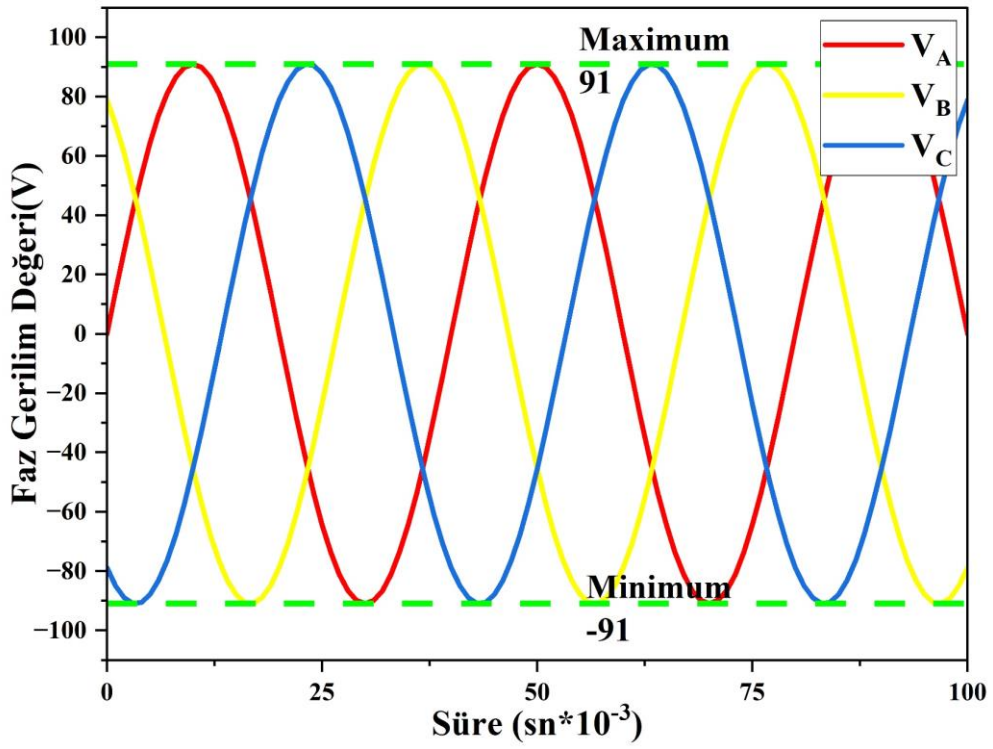
Ek Şekil 19. Eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 390 dev/dk üç faz gerilimi



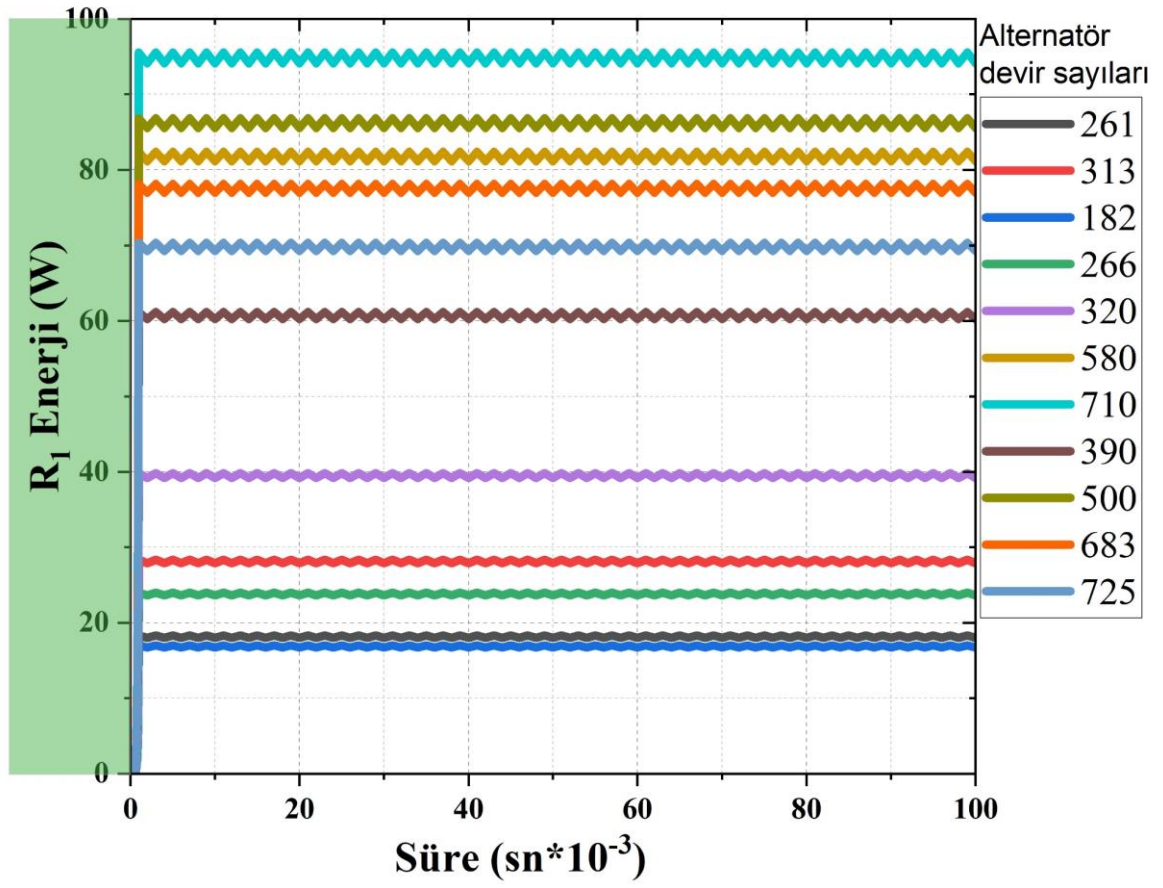
Ek Şekil 20. Eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 500 dev/dk üç faz gerilimi



Ek Şekil 21. Eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 683 dev/dk üç faz gerilimi



Ek Şekil 22. Eksenel akıllı sabit Halbach mıknatıslı alternatörün 725 dev/dk üç faz gerilimi



Ek Şekil 1. Alternatörde oluşan farklı devir sayılarında DC güç çıkışı değerleri

ÖZGEÇMİŞ

Fatih ALVER, İlköğrenimini Utku Acun İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 1999 yılında Ordu Fatih Lisesi'nde tamamladı. 2004-2005 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2009 yılında bu bölümden mezun oldu. 2009-2012 yılları arasında Antalya ilinde yat üretim tersanelerinde mühendis olarak çalıştı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2017 yılında "Samsun Limanı'ndaki Gemi Trafiği Kaynaklı Egzoz Emisyonlarının Envanterinin Çıkarılması" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından 2018 yılında doktora eğitimine başladı. 2013 yılından itibaren Ordu Üniversitesi Fatsa Meslek Yüksekokulu Gemi İnşaatı Programı'nda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.