



**DALGA ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE
ENERJİ HASATI İÇİN PIEZOELEKTRİK MALZEME
KULLANILMASI DURUMUNDA SİSTEMLERİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİNİN YAPILMASI**

Halil İbrahim YAMAÇ

**Yüksek Lisans Tezi
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet KOCA
TEMMUZ-2016**

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DALGA ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE ENERJİ HASATI İÇİN
PIEZOELEKTRİK MALZEME KULLANILMASI DURUMUNDA SİSTEMLERİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİNİN YAPILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Halil İbrahim YAMAÇ
(132134101)

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı: Mekanik Sistemler

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Temmuz 2016

Tezin Savunulduğu Tarih: 25 Temmuz 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet KOCA (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Aydın DİKİCİ (F.Ü.)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)

TEMMUZ-2016

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince her türlü bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, bana yol gösteren ve destek olan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Ahmet KOCA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitime başladığım ilk günlerden itibaren kendisine her danıştığım da ilgisini eksik etmeyen, her fikrime değer vererek dinleyen ve fikirleri ile ufkumu açan, kendisinden çok şey öğrendiğim çok değerli hocam Arş. Gör. Dr. Mert GÜRTÜRK'e,

Akademik hayata dair düşünceleri ve bakış açısı ile bana yol gösteren, mesaim süresince aynı odayı paylaştığım, her sıkıntıma ortak olan, bazen çalışmasına engel olduğum çok sevgili hocam Arş. Gör. Deniz KORKMAZ'a,

Her ihtiyacım olduğunda, maddi manevi her konuda yardımını esirgemeyen çok kıymetli dostum Otomotiv Yüksek Mühendisi Mehmet Cem MENTEŞ'e,

Tez döneminde desteklerini hiç esirgemeyen, başarmak için kendime güvenmem gerektiğini sürekli hatırlatan hocam Arş. Gör. Ali TAŞKIRAN'a, arkadaşım Öğr. Gör. Çetin YAVUZ'a, çalışmalarım esnasında tez konumla ilgili sürekli olarak destek aldığım ve bilgi alışverişinde bulunduğum Seda YETKİN ve Kübra ERDOĞAN'a,

Üzerimde emekleri olan eşimin ailesine, eğitim hayatımın tüm evrelerinde bana destek olan ve beni bugünlere getiren aileme, evlatları olmaktan gurur duyduğum sevgili annem Ayşe YAMAÇ ve babam Fuat YAMAÇ'a,

Her an yanımda olup desteğini esirgemeyen, varlığıyla bana güç veren, hayatı paylaştığım çok değerli sevgili eşim Özge ERDOĞAN YAMAÇ'a teşekkür ederim.

Halil İbrahim YAMAÇ

ELAZIĞ – 2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLOLAR LİSTESİ.....	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1. 1. Dalga Enerjisi	3
1. 1. 1. Dünyada Dalga Enerjisi Potansiyeli	4
1. 1. 2. Türkiye’de Dalga Enerjisi Potansiyeli	6
1. 2. Piezoelektrik Malzemeler	8
1. 2. 2. Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri	8
1. 2. 2. Piezoelektrik Malzemelerin Enerji Üretiminde Kullanıldığı Uygulamalar	10
1. 3. Piezoelektrik Malzemelerin Dalga Enerjisi Hasadında Kullanılması	12
1. 4. Sayısal Dalga Tankı ile İlgili Çalışmalar	14
2. MATERYAL ve METOT	18
2. 1. Dalga Teorisi	18
2. 2. Sayısal Çözümleme	22
2. 2. 1. Sonlu Hacimler Yöntemi	24
2. 2. 2. Fluent Yazılımı.....	24
2. 2. 3. Transient Structural Modülü	25
2. 3. Sayısal Dalga Tankı.....	27
2. 3. 1. Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (User Defined Function)	28
2. 3. 2. Volume of Fluid (VOF) Metodu	29
2. 3. 3. PISO Solver	30
2. 3. 3. 1. Komşu Düzeltimi	30

2. 3. 3. 2. Çarpıklık Düzeltimi	31
2. 3. 3. 3. Çarpıklık-Komşu Düzeltimi Çifti	31
2. 3. 3. k-epsilon Turbulence Modeli	31
2. 3. 5. Dinamik Mesh Teorisi ve Sayısal Ağ Yapısı	32
2. 4. Doğrulama.....	32
2. 5. Enerji Üretim Denklemleri (Root Man Square Değeri)	33
3. BULGULAR	36
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	47
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ	54

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan dalga enerjisinden piezoelektrik malzemeler kullanılarak enerji hasatı yapmak (elektrik gücü elde etmek) için dalga enerjisi dönüşüm sistemi benzetimi yapılarak geliştirilen sistem sayısal olarak incelenmiştir.

Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri; konumlandırıldıkları okyanus ve denizlerin özelliklerine göre, belirli aralıklardaki dalga boyları ile genliklerinde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Kullanılmayan ölçekteki dalga enerjisinden yararlanabilmek için yapılan araştırmalarda, dalga hareketlerinin oluşturduğu titreşimlerin dalga enerjisi hasadında piezoelektrik malzeme kullanılmasına imkân verdiği görülmüştür. Piezoelektrik malzemeler, etkiyen kuvvetler sonucu iç yapılarında oluşan yer değiştirmeler sebebiyle voltaj üretmektedirler. Bu voltaj uygun bir çevirici devreden geçirilerek enerji elde edilir.

Bu tezin amacı, piezoelektrik malzemeler kullanılarak tasarlanan enerji dönüşüm sistemine değişken özelliklere sahip dalgaların etki etmesi sonucu oluşacak güç miktarının sayısal analizler ile hesaplamaktır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programı olan ANSYS'in Fluent modülünde sayısal yöntemlerle incelenmesi dalga hareketlerinin sistem üzerine etki eden değişken basınç ve kuvvet değerleri için zamana bağlı modellenmesi ile yapılmıştır. ANSYS'in Transient Structural modülünde piezoelektrik malzemelerin bağlı olduğu levhaya etkiyen basınç sonucu meydana gelen şekil değiştirme, piezoelektrik malzemelerin ürettiği gücün hesaplanılmasında kullanılmıştır. Dalgadan üretilen enerji için kullanılan bağıntı ile üretilen elektrik gücü Root Mean Square (RMS) değerine ulaşılmıştır. RMS değerleri genliği 2 m altındaki dalgalar için 1.4 W değerinden az bulunmuştur. Dalga üreticinin su altındaki konum değişikliği, dalga boyu, su derinliği, dalga periyodu üretilen güç miktarını değiştirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dalga Enerjisi, Enerji Hasatı, Piezoelektrik Malzemeler, Dalga Üretici, Sayısal Dalga Tankı, Sıvı Hacmi Methodu.

SUMMARY

Modeling and Analysis of The Wave Energy Converting Systems in case of Using Piezoelectric Materials for Harvesting Energy

Wave energy conversion system is developed to harvest energy (gain electrical power) from wave energy, which is one of the renewable energy sources, by using piezoelectric materials. Developed system is analyzed numerically.

The wave energy transition systems are designed to work on specified wave length and amplitude in accordance with constructed on ocean and sea properties. The investigations about the small scale wave using showed that the vibrations of wave allowed to use piezoelectric material. Some of force impressions on the piezoelectric material so the internal structure removes and product voltage. This voltage is passed the possible converter circuit and get the energy.

The purpose of this thesis is to calculate the electrical power which is made by the effect of waves at different parameters on energy generation system designed by using piezoelectric materials by using numerical analysis.

Computational Fluid Dynamics Fluent software package in which it is performed with ANSYS Fluent module examination by numerical methods for time-dependent modeling of wave pressure and forces affecting variable values on the system. ANSYS Transient Structural module is used to calculate the power produced by the piezoelectric materials with the effect that the result of pressure occurring strain on the plate piezoelectric materials placed. Electric power generated by the power is calculated from the wave equation used to Root Mean Square (RMS) value has been reached . Amplitudes were less than 1.4 W RMS values for waves under 2 m. Underwater position change of the wave generator, wave height, water depth, wave period and cause the changes in amount of power produced.

Key Words: Wave Energy , Energy Harvesting , Piezoelectric Materials, Wave-Maker, Numerical Wave Tank, Volume of Fluid (VOF) Method.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Türkiye dalga enerjisi potansiyeli haritası	6
Şekil 1. 2. Şamandıra bağlantılı ve piezoelektrik malzeme yamalı enerji hasatçısı	13
Şekil 1. 3. Piezoelektrik malzeme yamalı enerji hasatçısı	13
Şekil 1. 4. Dairesel kesitli, piezoelektrik malzeme yamalı enerji hasatçısı	14
Şekil 2. 1. x yönünde ilerleyen dalga profili.....	19
Şekil 2. 2. Dalga enerjisi hasatçısı.....	26
Şekil 2. 3. Dalga enerjisi hasatçısı ağ yapısı	26
Şekil 2. 4. Sayısal dalga tankı.....	27
Şekil 2. 5. $x = 20$ m'de zamana bağlı su seviyesi grafiği	32
Şekil 2. 6. $x = 20$ m'de zamana bağlı su seviyesi grafiği	33
Şekil 3. 1. Durumlar ve değişkenler	37
Şekil 3. 2. Durum 4 için $t = 0$ s anında su hacim fraksiyonu.....	38
Şekil 3. 3. Durum 4 için $t = 25$ s anında su hacim fraksiyonu.....	38
Şekil 3. 4. Durum 4 için $t = 50$ s anında su hacim fraksiyonu.....	38
Şekil 3. 5. Durum 4 için $t = 0$ s anında x doğrultusundaki hız	39
Şekil 3. 6. Durum 4 için $t = 25$ s anında x doğrultusundaki hız	39
Şekil 3. 7. Durum 4 için $t = 50$ s anında x doğrultusundaki hız	39
Şekil 3. 8. Durum 4 için $t = 0$ s anında y doğrultusundaki hız	40
Şekil 3. 9. Durum 4 için $t = 25$ s anında y doğrultusundaki hız	40
Şekil 3. 10. Durum 4 için $t = 50$ s anında y doğrultusundaki hız	40
Şekil 3. 11. Durum 7 için $t = 30$ s anında su hacim fraksiyonu.....	41
Şekil 3. 12. Durum 8 için $t = 30$ s anında su hacim fraksiyonu.....	41
Şekil 3. 13. Durum 9 için $t = 30$ s anında su hacim fraksiyonu.....	41
Şekil 3. 14. Durum 1 için $t = 50$ s anında dinamik basınç değerleri	42
Şekil 3. 15. Durum 4 için $t = 50$ s anında dinamik basınç değerleri	42
Şekil 3. 16. Durum 1 için $t = 50$ s anında türbülans kinetik enerjisi değerleri	43
Şekil 3. 17. Durum 4 için $t = 50$ s anında türbülans kinetik enerjisi değerleri	43
Şekil 3. 18. Durum 4 için $t = 50$ s mutlak basınç değerleri	44
Şekil 3. 19. Durumların RMS değerleri.....	44

Şekil 3. 20. Su yüzeyine uzaklık RMS bağlantısı.....	45
Şekil 3. 21. Su derinliği RMS bağlantısı	46



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 1. Dalga tipleri ve nedenleri	4
Tablo 1. 2. Karadeniz, Akdeniz ve okyanuslarda dalga gücü	7
Tablo 1 .3. İstasyonlardan alınan ölçüm değerleri	7
Tablo 1. 4. Piezoelektrik malzemelerin aktif katmanlarının ölçüm sonuçları	9
Tablo 1. 5. Farklı tür piezoelektrik malzemeler için deneysel sonuçlar	10
Tablo 1. 6. Farklı yapıda seçilmiş piezoelektrik panellerin test sonuçları	10
Tablo 3. 1. Durumlar ve değişkenler	36

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Dalga genliği (m)
a	: Piezoelektrik yamaların en uzunluğu
B_n	: Yer değiştirmeye bağlı belirlenen değişken
b	: Piezoelektrik yamaların boy uzunluğu
C_m	: Deneme yükü katsayısı
C_V	: Piezoelektrik parçaların elektrik kapasitesi (F)
C'_V	: Birim uzunluk başına piezoelektrik parçaların elektrik kapasitesi (F/m)
E	: Elastisite modülü
e_{31}	: Piezoelektrik katsayısı (nF)
ε	: Kuvvet serisi değişkeni
\vec{F}	: Dış kuvvetler
$f(x, \tau)$: Yer değiştirme için yatay kuvvet etkisi ile belirlenen fonksiyon
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
H	: Dalga yüksekliği (m)
h	: Su derinliği (m)
h_{pie}	: Piezoelektrik malzemenin kalınlığı (m)
h_{pta}	: Piezoelektrik malzemelerin üzerine montaj yapıldığı plakanın kalınlığı (m)
i	: Piezoelektrik yama numarası
k	: Dalga numarası
k_b	: Birim vektörü
L	: Dalga boyu (m)
l	: Plaka boyu (m)
\dot{m}_{qp}	: q fazından p fazına kütle transferi
\dot{m}_{pq}	: p fazından q fazına kütle transferi
N	: Normal dış birim vektörü
n	: Koordinat düzleminin tabana göre normal
o	: Piezoelektrik yama sayısı
P	: Basınç (Pa)
p	: Statik basınç (Pa)

P_e	: Üretilen güç değeri (W)
P_e^{rms}	: Üretilen ortalama güç değeri (W)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
ρ_1	: Plakanın özkütlesi
ρ_w	: Suyun özkütlesi
Q_g^i	: Yük (C)
$q_n(t)$: Genelleştirilmiş koordinat
S	: Piston yer değiştirmesi (m)
S_0	: Piston yer değiştirmesi en büyük değeri (m)
T	: Dalga Periyodu (s)
t	: Zaman (s)
τ	: Yatay gerilme
u	: Yatay (x yönündeki) hız bileşeni (m/s)
V	: Hız (m/s)
$V_g^i(t)$: Voltaj (V)
$W(x, t)$: Enine yer değiştirme fonksiyonu
$W_n(x)$: Yer değiştirme miktarı (m)
w	: Düşey (y yönündeki) hız bileşeni (m/s)
ω	: Dalga frekansı (1/s)
ω_n	: Açısal frekans
x	: Dalgaların kontrol uzunluğundaki yatay konumu (m)
Z	: Deniz tabanına göre su yüzeyindeki değişim (m)
z	: Su yüzeyinden boyuna yönde pozisyon
η	: Su yüzeyi profili
ϕ	: Potansiyel fonksiyonu
α_q	: Hacim fraksiyonu
μ	: Viskozitedir.

KISALTMALAR LİSTESİ

<i>AIN</i>	: Alüminyum nitrit
<i>CFD</i>	: Computational Fluid Dynamics
<i>DMT</i>	: Dynamic Mesh Technique
<i>HAD</i>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<i>FSI</i>	: Fluid Structure Interaction
<i>FVM</i>	: Finite Volume Method
<i>KTF</i>	: Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon
<i>N-S</i>	: Navier Stokes
<i>NWT</i>	: Numerical Wave Tank
<i>PDVF</i>	: Polivinilidin difluoride
<i>PEC</i>	: Piezoelektrik cantilever
<i>PISO</i>	: Pressure Implicit with Splitting of Operator
<i>PMN-PT</i>	: Kurşun magnezyum nionat-kurşun titanat
<i>PP</i>	: Polipropilen
<i>PZT</i>	: Kurşun zirkonyum titanyum
<i>RANS</i>	: Reynolds Averaged Navier-Stokes
<i>SIMPLE</i>	: Semi-Implicit Method
<i>SIMPLEC</i>	: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation-Consistent
<i>UDF</i>	: User Defined Function
<i>VOF</i>	: Volume of Fluid
<i>ZnO</i>	: Çinko oksit

1. GİRİŞ

Enerji, günümüzde insan hayatına etkisi düşünüldüğünde sosyal ve ekonomik anlamda ilerlemeye katkı sağlayan dolayısıyla ekonomik gelişmeye de etkisi olan en önemli faktörlerden biridir. Dünyada enerji ihtiyacı, artan nüfusa bağlı olarak doğrudan ve insanların gereksinimlerinin karşılanabilmesi için üretim alanında kullanımı ile her geçen gün artış göstermektedir. Kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil kökenli yakıtların yaklaşık % 90'ını; hidrolik ve nükleer enerjinin ise yaklaşık % 10'unu karşıladığı enerji ihtiyacı bu yakıtların kullanılmasından dolayı küresel ısınma ve iklim değişiklikleri sorunlarına sebebiyet vermektedir. Yeni enerji teknolojilerine, enerji maliyetinin düşürülmesi, fosil yakıtlara bağımlılığın ortadan kaldırılması ve çevresel sorunlara sebebiyet verilmemesi için önem verilmesi ve ticarileşmesi konusunda destek verilmesi gerektiği kabul edilmelidir. Enerji verimliliği yüksek ve çevre kirliliğine neden olmayacak teknolojiler ve ulusal ve uluslararası anlamda bir çok akademik ve ticari çalışmaya konu olmaktadır.

Dünya nüfusunun % 40'ı olan 2.7 milyar insan ise yemek pişirmek için geleneksel yöntemlerle biokütle enerjisinden yararlanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı projeksiyonları bu durumun uzun dönemde de devam edeceğini ve 2030 yılında % 87'si kırsal bölgede yaşayan 1.2 milyar insanın elektriksiz yaşamaya devam edeceğini göstermektedir. Bu insanların büyük kısmı Orta ve Güney Afrika, Hindistan ve gelişmekte olan Asya ülkelerinde (Çin hariç) yaşıyor olacaktır. Bu ülkelerdeki açlık ve yoksullukla mücadelenin başarılı olması, enerjiye erişim konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmesine bağlıdır [1].

Dünyanın var olma süresinin referans olarak alındığı bir sınıflandırmaya göre enerji; tükenen ve kendisini dünya var oldukça yenileyen, yani tükenmeyen enerjiler olarak iki grupta incelenebilmektedir. Enerji ihtiyacının karşılanması hususunda tükenen fosil yakıtlara alternatif, çevreci ve daha ekonomik alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasına önem verilmekte ve yatırım yapılmaktadır. Alternatif enerji kaynakları olarak yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmaktadır [2].

Sürekli olarak yenilenen enerji olarak tanımlanan “Yenilenebilir Enerji”; hidrolik, güneş, jeotermal, biokütle, dalga gibi fosil olmayan enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreklilik teşkil edecek olması ve üretim sistemlerin kurulum sonrası doğrudan doğal etkileri kullanacak olmasının maliyeti azaltacağı yadsınamaz bir gerçektir. Enerji üretim sonucu oluşacak çevresel etkilerin, doğaya verecekleri zarar da fosil yakıtlar kullanılarak enerji üretilmesine kıyasla çok az olacağı söylenebilir.

Yenilenebilir enerji kaynakları sağladıkları avantajların yanı sıra, bir takım dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Günümüzde ilk yatırım maliyeti yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretim miktarları çevresel etkilere doğrudan bağlı olup zamana bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin, rüzgardan elde edilebilecek enerji, rüzgar türbin kanatlarının kapsama alanı ile sınırlı olup, hava şartlarına bağımlılığı istenilen seviyede üretim yapılamamasına sebep olmaktadır. Barajlar ve termik santraller çok büyük yatırımlarla inşa edilmektedir. Güneş enerji sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve sistemin gece çalışmaya uygun olmaması verimlerini büyük oranda düşürmektedir.

Alternatif enerji kaynaklarının kullanılması konusundaki dezavantajların enerji üretimine etkisini en aza indirebilmek için sistemlerinin geliştirilmesi ve yenilenmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Yapılan tez çalışması, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan dalga enerjisinden elektrik üretilmesi konusundadır. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde enerji hasatı için piezoelektrik malzeme kullanılması durumunda sistemlerin modellenmesi ve analizinin yapılması başlığı altında sayısal çözümler yapılarak elde edilebilecek enerji miktarının bulunmasıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programları modelleme sırasında kullanılarak dalga modeli oluşturulmuş ve dalganın katı ile etkileşimi sırasında aktarılan dalga enerjisine bağlı olarak oluşan elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır.

Piezoelektrik malzemeler kullanılarak yeni bir dalga enerjisi dönüşüm sisteminin geliştirilmesi konusunda sayısal çözümler yapılan çalışmaların bulunduğu kaynakların sayısı çok az olduğundan literatür araştırması; dalga enerjisi, piezoelektrik malzemeler, piezoelektrik malzemelerin dalga enerjisi hasadında kullanılması ve sayısal dalga tankı ile ilgili çalışmalar başlıkları altında incelenebilir.

1. 1. Dalga Enerjisi

Rüzgâr, denizlerdeki hareketli taşıtlar, denizlerin altındaki depremler ile ay ve güneşin çekim kuvveti gibi dış etmenlerle dengesi bozulan sakin su yüzeyinin yerçekimi etkisiyle tekrar orijinal konumuna dönebilmesi için yapmış olduğu hareketler dalga hareketini oluşturur. Rüzgâr etkisiyle oluşan deniz dalgaları, rüzgâr dışındaki etmenlerle oluşan deniz dalgalarına göre sürekli dirler ve bu nedenle de enerji eldesinde öncelikle dikkate alınırlar [3].

Deniz yüzeyinde oluşan su dalgaları; üç boyutlu karakterde ve karışık rastgele özelliklere sahip, periyodik su hareketleridir. Bahsedilen bu dalgaların matematiksel açıdan ifade edilmeleri güçtür. Bu tip dalgalar, oluşmalarındaki esas etken nedeniyle, yerçekimi dalgaları olarak adlandırılır. Buna karşılık olarak, su yüzeyinde hafif esintilerin meydana getirdiği çok küçük genlikli çarpıntılı dalgalarında yerçekimi etkisi çok az olup, esas etken sudaki yüzey gerilim kuvvetidir. Bu tür dalgalar, yüzey gerilim dalgaları olarak adlandırılır. En basit yerçekimi dalga teorisi küçük genlikli dalgalar teorisi veya bir başka adıyla Lineer Dalga Teorisi olup, ilk olarak Airy tarafından 1845 yılında geliştirilmiştir. Teorinin uygulanmasındaki kolaylık ve sonuçlarındaki güvenilirliğin yanında ek olarak bu tür dalgaların, karışık dalgalarında birer basit bileşenleri olmaları sebebiyle incelenmeleri büyük önem taşır. Lineer dalga teorisinde sinüzoidal dalga adı verilen bu tür dalgalarda, dalga profili sinüs veya kosinüs eğrileriyle temsil edilir [4].

Lineer dalga teorisi çok basit olmakla birlikte birçok probleme çok iyi çözüm getirmekte ve mühendisler tarafından kullanılmaktadır. Ancak bu kullanım lineer teorinin her zaman uygulanabilir olduğu anlamına gelmemektedir. Süperpoze edilebilme imkânının sağlanması avantajına karşılık, bu teori sadece küçük genlikli dalgalar için geçerlidir. Büyük genlikli dalgalarda görülen dalga tepesi ve çukuru arasındaki asimetri ve kütle taşınımı lineer dalga teorisi ile açıklanamamakta ve bunun sonucunda lineer olmayan dalga teorilerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgâr etkisiyle oluşan dalganın, rüzgâra karşı ve ona ters oluşan sırtları arasında basınç farkı doğar ve bunun neticesinde rüzgâr enerjisi su yüzeyine geçer. Meydana gelen rüzgâr dalgalarının yüksekliklerinin değişmesine karşın periyotları korunarak uzun mesafeler sonucu kıyıya ulaşarak dispersiyon olayı oluşur. Uzunluğu yüksekliğine oranla fazla olan en basit dalga sinüzoidal tipte olarak ifade edilir [5].

Periyodik dalgaların kendilerini oluşturan ağırlık, yüzey gerilimi gibi kuvvetlere, periyotlarına, yayıldıkları ortamın derinliğine vb. göre sınıflandırılması Tablo 1.1’ de verilmiştir.

Tablo 1. 1. Dalga tipleri ve nedenleri [5].

Dalga Tipi	Periyot	Sebeup
Rüzgâr Dalgası	$\leq 15s$	Rüzgâr Gerilmesi
Ölü Deniz Dalgası, Soluğan (Swell)	$\leq 30s$	Rüzgâr Dalgası
Surf Salınımı (Surf Beat)	1-5 dak	Dalga Grubu
Seiche	2-40 dak	Rüzgâr Değişimi
Çalkantı	2-40 dak	Tsunami, Surf
Tsunami	5-60 dak	Deprem
Gel-Git	12-24 saat	Güneş ve Ay Çekimi
Fırtına Kabarması (Strom Surge)	1-30 gün	Rüzgâr Gerilmesi ve Atmosfer Basıncındaki Azalma

1. 1. 1. Dünyada Dalga Enerjisi Potansiyeli

Yapılan çalışmalar elektrik enerjisinin maliyetinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla dalga enerjisi için göreceli olarak oldukça düşük olduğunu göstermiş ve bunun sonucunda dalga enerjisi çalışmaları birçok ülkenin yatırım programı kapsamına alınmıştır. Dalga enerjisi üzerine değişik ölçeklerdeki modeller kullanılarak yapılan çalışmalarda dalgaların sahip oldukları enerji farklı bir forma (elektrik enerjisine) dönüştürülmeye çalışılmıştır [6].

“Dalga enerjisi potansiyelinin; doğada mevcut haline potansiyel, olduğu potansiyelin teknoloji aracılığı ile kullanılabilir enerjiye dönüştürülmüş şekline teknik potansiyel ve diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırılması neticesinde ekonomik olarak nitelendirilen miktarına da ekonomik potansiyel denilir. Dünya deniz kaynaklı olduğu enerji potansiyelinin 7.621.000 (milyar kWh) değeri ile hidrolik ve biokütle enerjisinin sahip olduğu potansiyelden fazla, rüzgâr enerjisinin sahip olduğu potansiyelinin ise % 25’i kadar olduğu anlaşılmaktadır” [3].

Dalgalar bir kere oluştuktan sonra çok az enerji kayıpları ile binlerce kilometre seyahat ederler. Atlantik'in Amerika tarafında oluşan bir dalga, batı rüzgârlarının da etkisiyle batı Avrupa sahillerine ulaşır. Derin (açık) denizlerdeki enerji akımı çok büyük olmaktadır. Sahillere yakın bölgelerde ise deniz tabanı etkileşiminden dolayı ortalama enerji yoğunluğu düşüş gösterir. Kıyı bölgelerdeki oluşan enerji kayıpları; kırılma, kırınım, yansıma, sapma gibi olaylarla belli noktalarda enerji oluşumuna neden olur. Atlantik'in fırtınalı kısımlarındaki bu bölge batı Avrupa sahilleri ve yüksek enerji bölgesi olarak karakterize edilir. Buna karşın sadece Güney Amerika'nın güney kısmı ve Antipodelarda Atlantik'teki kutupsal fırtınalardan dolayı daha yüksek enerji bölgesi olarak nitelendirilebilirler.

Son araştırmalara göre Atlantik'in kuzey batı sahilleri ve kuzey denizi bölgesinde 2906 W'lık enerji kaynağı bulunmaktadır. Avrupa'nın güney Atlantik sahillerinde 25 kW/m' a kadar ulaşan İrlanda ve İskoçya sahillerinde ise yıllık bazda 75 kW/m'ye kadar ulaşan güç kaynakları vardır. Daha kuzeye gidildikçe Norveç sahillerinde güç kaynakları yıllık bazda 30 kW/m'ye kadar düşmektedir. Kuzey denizine gidildiğinde korunmasız bölgelerdeki yıllık 21 kW/m güç potansiyeli, korumalı güney sahillerine gidildiğinde bu değerlerin yarısına inmektedir. Akdeniz'de ise güç kaynağı yıllık 4-11 kW/m aralığında değişip en yoğun, güçlü kaynak bölgesi Ege denizi bölgesi olmaktadır. Bu bölge yüksek rüzgâr enerji potansiyeli taşıması ve limanlara vuran uzun dalgalarıyla karakterize edilir.

Dalga enerjisi potansiyeli ile ilgili rakamlarda dikkat edilmesi gereken nokta, bu tahminlerin belli kabullere dayandığı ve bu kabullerin her zaman tartışmaya açık olduğudur. Dalga enerjisi potansiyelinin daha gerçekçi olarak saptanabilmesi için, dalga enerjisinden yararlanılacak olan bölgede uzun yıllara dayanan oldukça pahalı olan ölçümlerin yapılması gerekliliğidir. Bu ölçümlerin yapılamadığı durumlarda buna nazaran daha ekonomik olan rüzgâr ölçümleri yapılmakta, rüzgâr-dalga arasındaki bağıntıyı veren ve bir çok ölçüm sonucundan elde edilmiş yarı ampirik formüllerle dalga enerjisinin hesaplanması mümkün olmaktadır [7].

Dalga gücünün, genliğinin karesi ve hareket periyodu ile orantılı olması nedeniyle uzun periyotlu (~7-10 s), büyük genlikli (~2 m) dalgaların metre olarak genişliğinin başına 40-70 kW enerji oluşmaktadır. Bunun yanında dalga enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi dünyada düzenli dağılıma sahip değildir.

Dünyada yüksek dalga potansiyeline sahip birkaç bölge bulunmakta ve her iki yarımkürede $\sim 30^\circ$ ve $\sim 60^\circ$ enlemler arasında dalga hareketi batı rüzgârlarının hâkimiyeti sebebiyle yüksek değere ulaşmaktadır. Dünya genelinde, elektrik üretiminde dalga enerjisi potansiyelinin 2000 TWh/yıl olduğu tahmin edilmektedir [8].

1. 1. 2. Türkiye’de Dalga Enerjisi Potansiyeli

Dalga enerjisi üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde yararlanılması gereken enerji kaynağı olup, gerek ülkemiz gerekse dünyada büyük dalga enerjisi potansiyeli mevcuttur. Dalga enerjisinin kullanılması, Türkiye’nin gündemine henüz girmemiş olup, Marmara denizi dışındaki açık deniz kıyıları 8210 km’yi bulmasına rağmen dalga rasatları ve bunlara ilişkin ölçüm verileri mevcut değildir. Dalga cephesinin gücü Akdeniz kıyıları için ortalama 13 kW/m olarak verilmektedir. Türkiye dışında Akdeniz’de yapılmış ölçümler, bu gücün yıl boyunca 8.4 – 15.5 kW/m arasında değiştiğini göstermektedir. Bu değerler iç denizlerde daha da düşmektedir. Türkiye kıyılarının beşte birinden yararlanılarak sağlanabilecek dalga enerjisi teknik potansiyeli 18.5 milyar kWh olarak tahmin edilmektedir [9]. Türkiye dalga enerjisi potansiyeli haritası Şekil 1.1’de gösterilmiştir [10].



Şekil 1. 1. Türkiye dalga enerjisi potansiyeli haritası

Delaware Üniversitesi tarafından yapılan dalga enerji hesaplamalarına göre, okyanuslarda meydana gelen dalga gücü 122-485 kW/m, Karadeniz’de meydana gelen dalga gücü 1.92 kW/m ve Akdeniz’de meydana gelen dalga gücü 2.06 kW/m olarak ölçülmüştür. Karadeniz ile Akdeniz’de yapılan ölçümlere göre birim alandaki mevcut deniz dalga enerjisi miktarları Tablo 1.2 ’de gösterilmiştir [11].

Tablo 1. 2. Karadeniz, Akdeniz ve okyanuslarda dalga gücü [11].

	Bölge Dalga Yüksekliği (m)	Dalga Periyodu (s)	Deniz Derinliği (m)	Güç (kW/m)
Karadeniz	1.25	4.0	50	1.92
Akdeniz	1.30	6.0	50	2.06
Okyanus	10	10	10	122
Okyanus	2	15	200	485

İzmir Çeşme yöresine yönelik olarak yapılan bir çalışmada dalga enerjisinin en fazla olduğu ayın Şubat ayı olduğu tespit edilmiş, Kasım - Mart aylarından oluşan 5 ayda diğer aylara nazaran daha fazla dalga elektriği üretilebileceği ortaya çıkmıştır. Ortalama dalga gücünün 7.16 – 39.66 kW/m arasında değiştiği ve birim genişliğe etkiyen ortalama dalga gücünün 14.84 kW/m olarak alınabileceği tespit edilmiştir [12].

İstanbul Teknik Üniversitesi ve Yıldız Teknik Üniversitesi tarafından yapılmış olan çalışmalarda konumları verilen Alanya Feneri, Bozcaada Polente Feneri [13]. Hopa Ana Mendirek Feneri ve Ambarlı Limanı [14]. Ölçüm istasyonlarından alınan verilere göre dalga yükseklikleri, dalgaların periyot değerleri ve deniz derinlikleri bahsi geçen çalışmalardan bir araya getirilerek Tablo 1.3’te gösterilmiştir.

Tablo 1 .3. İstasyonlardan alınan ölçüm değerleri [13][14].

	Dalga Yüksekliği (m)		Periyot (s)		Konum		Derinlik (m)
	En az	En çok	En az	En çok	Enlem	Boylam	
Hopa	0.30	4.50	0.17	8.80	24°05’16’’N	41°25’47’’E	100
Ambarlı	0.08	0.73	0.10	9.80	40°57’54’’N	28°41’28’’E	17
Bozcaada	0.20	3.20	1.90	5.80	39°42’14’’N	26°02’57’’E	62
Alanya	0.20	3.40	0.00	7.30	36°32’30’’N	31°58’30’’E	100

Deniz kıyıları 8 bin 200 km'yi bulan ülkemiz gündemine henüz girmeyen dalga enerjisini en kısa zamanda kullanma ve değerlendirme yoluna gidilmelidir [15].

Dalga hareketlerinin oluşturduğu titreşimden enerji elde etmekte kullanılan yöntemlerden biri piezoelektrik malzemeleri kullanarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektir. Enerji hasadı ile anlık üretilen enerjinin birçok cihaz için yeterli olmadığı ve bu enerjinin ancak depolanarak kullanıldığı takdirde yaygın uygulama alanı bulabileceği görülmüştür. Titreşim kaynaklarından enerji hasadı çalışmalarına paralel olarak akışkanların kinetik enerjilerini elektrik enerjisine piezoelektrik malzemeleri kullanarak dönüştürme çalışmaları da son yıllarda yoğunluk kazanmıştır. Ayrıca piezoelektrik transduserler çalışmaları için dışarıdan bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymamaları sebebiyle, enerji hasadı amacıyla kullanılan elektromanyetik ve elektrostatik transduserlere göre oldukça büyük avantaj sağlamaktadırlar. Piezoelektrik malzemelerle denizlerdeki kıyılara kurulacak sistemler sayesinde dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü mümkündür.

1. 2. Piezoelektrik Malzemeler

Tez çalışması kapsamında piezoelektrik malzemeler; piezoelektrik malzemelerin özellikleri, piezoelektrik malzemelerin enerji üretiminde kullanıldığı uygulamalar ve piezoelektrik malzemelerin dalga enerjisi hasatında kullanılması başlıkları altında ele alınabilir.

1. 2. 2. Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri

Piezoelektrik etki ilk defa 1880'de Jaques ve Pierre Curie tarafından Rochelle tuzunda keşfedilmiştir. Temel olarak piezoelektrik etki, mekanik basınç altında bırakılan bazı yalıtkan kristallerin bir yüzünde pozitif, karşı yüzünde ise negatif elektrik yüklerinin çıkması şeklinde tanımlanır [16].

Piezoelektrik malzemeler üzerlerinde oluşan yer değiştirmeler sebebiyle voltaj üretmektedirler. Bu voltaj uygun bir çevirici devreden geçirilerek enerji elde edilebilir.

Yer değiştirmelerin s¼rekliliđinin meydana getirdiği titreşimin ¼zellikleri (frekans, dalga boyu vb.) mekanik enerjinin elektrik enerjisine d¼n¼řt¼r¼lmesinde en ¼nemli değişken olarak kabul edilmektedir. Uygun piezoelektrik malzeme/yapı kullanımı, geometri seğimi ve piezoelektrik malzemenin yapı ¼zerinde konumlandırılacakları yerin optimum belirlenmesi ile enerji elde edinimi y¼kseltilebilir.

Piezoelektrik ¼zellik g¼steren malzemeler kristaller (Kuvars, Kurşun, Kurşun-Zirkonyum-Titanyum, vb.) veya polimerler (Polivinilidinde difl¼roide, Polipropilen, vb.) olabilir. Seramiklerde piezoelektrik mekanizması bir elektrik alanı uygulandığında birbirlerini iten ve ¼eken i¼ i¼e ge¼miř olan uzun zincirli molek¼ller bağıntılı ise polimerlerde etki b¼t¼n kristal yapısını i¼erir ve kristallerde g¼zlenenden daha g¼çl¼ olduğu g¼r¼lm¼řt¼r [17].

Vatansever ve arkadaşları basın¼, titreşim, hareket ve sıcaklık gibi dış etkilerle değişim ger¼ekleřtiren akıllı malzemeleri incelemişlerdir. Elektrik ¼retmek i¼in farklı kaynaklar kullanarak enerji hasat sistemlerinin verimlerini bulmuşlardır. Bant genişliği, hızlı elektromekanik tepkisi, nispeten d¼ř¼k g¼ç gereksinimleri ve y¼ksek ¼retkenlikleri nedeniyle piezoelektrik malzemenin r¼zg¼r, yağmur, dalgalar ve gelgit olaylarıyla enerji ¼retmek i¼in kullanılabilir en uygun malzeme olduğuna karar vermişlerdir [18].

Bardaweel ve arkadaşları piezoelektrik malzeme ile en y¼ksek enerji d¼n¼ř¼m verimliliğini sağlayabilmek i¼in AlN (Al¼minyum nitr¼r), ZnO (¼inko oksit), PZT (Kurşun-Zirkonyum-Titanyum alaşımı)'nın ve PMN-%33 PT (Kurşun Magnezyum Niobat-Kurşun) aktif katmanlar olarak elektromekanik akuplaj katsayısı bağlamında incelemişlerdir. Sonlu eleman modeli uygulayarak performanslarını karşılaştırmışlardır. En y¼ksek enerji d¼n¼ř¼m verimliliğinin PZT ile sağlandığı sonucuna varmışlardır. Tablo 1.4' te aktif katmanların ¼l¼¼m sonu¼ları verilmiştir [19].

Tablo 1. 4. Piezoelektrik malzemelerin aktif katmanlarının ¼l¼¼m sonu¼ları [19].

	$D_{31(-)}-10^{-12}$ (C/m ²)	$\epsilon_{33}^T \epsilon_0$	S_{11}^E 10 ⁻¹² (m ² /N)
AlN	1.5	0.5	2.9
ZnO	2.2	4.6	7.7
PZT	88	1000	12.1
PMN-33%PT (¼oklu)	1335	8200	70.5
PMN-33%PT (Tek)	90	640	62.2

Gökhasan ve arkadaşları titreşim tabanlı piezoelektrik malzeme kullanarak elektrik enerjisi üretiminin farklı malzemeler için karşılaştırmalı analizlerini yapmak suretiyle üretim sisteminin prototip modelini gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan modelde kullanılacak farklı malzeme yapılarına sahip piezoelektrik blokların karşılaştırmalı sonuçlarına ulaşmışlardır. Tablo 1.5'te farklı tip malzemeler için deneysel sonuçlar verilmektedir [20].

Tablo 1. 5. Farklı tür piezoelektrik malzemeler için deneysel sonuçlar [20].

Metot	Element	Boy	Alan (mm ²)	Güç (mW)	Güç/Alan (mW/mm ²)
1	PZT	25 mm disk	491	4.6	9.37×10^{-3}
2	PVDF	40X40 mm	1600	0.85	5.31×10^{-4}
3	PDVF	15x40 mm	1800	0.23	1.27×10^{-4}

Tablo 1.6'da farklı yapıda seçilmiş piezoelektrik panellerin test sonuçları verilmektedir [20].

Tablo 1. 6. Farklı yapıda seçilmiş piezoelektrik panellerin test sonuçları [20].

Malzeme	Dayanıklılık	Rezonans Frekansı (kHz)	Hassasiyet	Model Uygunluğu	Çıkış Gerilimi (V)
Blok	Yüksek	200	Düşük	Düşük	3.1
Kare	Yüksek	740	Düşük	Düşük	4.2
Disk	Yüksek	45	Düşük	Düşük	3.19
Panel	Düşük	2	Yüksek	Yüksek	15-20

1. 2. 2. Piezoelektrik Malzemelerin Enerji Üretiminde Kullanıldığı Uygulamalar

Özpak'ın yaptığı çalışmada çarpmanın enerji hasadı üzerindeki etkilerini incelemek için, uç noktasında piezoelektrik yığına sahip çarpma altındaki kirişin analitik olarak modellenmesi geliştirilmiştir. Sistem karakteristiğini değiştirerek, sabit tahrik enerji altında hasatçının daha yüksek seviyelerde enerji çıktısını sağlaması amaçlanmıştır [21].

Avşar ve Şahin, sabit mesnetli bir kirişin üzerine yerleştirilmiş olan piezoseramik yamadan elde edilebilecek enerji miktarını sonlu elemanlar ve deneysel yöntemlerle incelemiştir. Sonuç olarak titreşen yapıların üzerine yerleştirilen piezoelektrik malzemeler ile sürekli voltaj elde edilebilmekte ve bu voltaj uygun bir devreden geçirilerek kullanılabilir enerji haline dönüştürülebilmektedir. Bu enerji ile piller şarj edilebilir yada yapının enerji ihtiyacı direkt karşılanabilir [22].

Şenyürek ve Demetgül, yaptıkları deneyler sonucunda klavye tuşları üzerine uygulanan 5 N kuvvetin yay vasıtasıyla tüm yüzeye ileterek farklı tiplerde yerleştirilen piezoelektrik malzemelerin atomları arasındaki hareket sağlanarak çeşitli gerilimler üretilmesi sağlanmışlardır. Kablosuz klavyede yer alan pil sorunu ve pillerin çevreye verdiği zarar önlenmiş olup kendi enerjisini üretebilen piezo elektrik yapılı bir klavye tasarlanmışlardır [23].

Ertürk ve Inman iki örtülü (bimorph) olarak yerleştirilmiş piezoseramik içeren bir akıllı yapı için analitik model oluşturmuşlardır ve bu analitik model deneysel yöntemler ile doğrulanmıştır [24].

Noaman Makki ve arkadaşları, piezoelektrik malzemenin esnekliğinden yararlanarak araç tekerleklerinin içine piezoelektrik malzeme yerleştirilmesiyle ve tekerleklerin dönmesiyle beraber yere uyguladığı basıncı değerlendirmek istemişlerdir. Bu fikri öne sürerlerken, yapılacak olan piezoelektrik seramiğin tekerlek sıcaklığına ve esnekliğine uygun üretilmesi durumunda, tekerleklerden gelen enerjinin araç içinde alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceğini söylemişlerdir. Tekerlek yüklü durumda iken, piezoelektrik malzemenin devreye girmesiyle basınç ve titreşimin elektrik enerjisine dönüştürülmesi istenmiştir [25].

Oğuz Gökhasan ve arkadaşları, otoyol üzerine döşenen ışıklar ile yolun aydınlatılması amacıyla uygun olarak oluşturulan prototip platform üzerine şerit ledler yerleştirilerek uygulama gerçekleştirmişlerdir. Mevcut model üzerinde en uygun malzeme yapısının panel tipi piezoelektrik sensörlerinin olacağı sonucunu elde etmişlerdir. Otoyollarda bağlantı yapılabilecek bir sistem ile gerek aydınlatma elemanlarının bir kısmının gerekse raylı sistemler de hemzemin geçit bölgelerinde traverslere yerleştirilecek disk paneller sayesinde flaşör devrelerinin desteklenebilirliğini, oluşturdukları bu model üzerinden göstermişlerdir [20].

Liu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ucunda belirli bir kütle bulunan ve PZT biformun Pt/Ti elektrotlar arasında bulunduğu yapı kullanılmış, bu yapının bağlı bulunduğu cihaz, çevredeki titreşimlerin etkisiyle hareketlendiğinde elektrik enerjisi elde edilmiştir. Hareketin genliği arttıkça elde edilen elektrik enerjisinin artacağı kabul edilmiştir [26].

Piezoelektrik malzemelerin hava araçlarının enerji ihtiyaçları için alternatif kaynaklar olabileceği konusundaki en önemli çalışmalardan birisi de “Clean Sky” adlı projedir. Bu kapsamda hava yapılarının aero-dinamik yüzeylerine piezoelektrik yapılar kullanarak yakıt tüketiminin azaltılması planlanmaktadır. Şu anki teknoloji ile büyük çaptaki hava araçlarının enerji ihtiyacını karşılamak pek mümkün gözükmesine de mini boyutlardaki hava araçlarının enerji ihtiyacı bu akıllı yapılar aracılığı ile karşılanabilir [27].

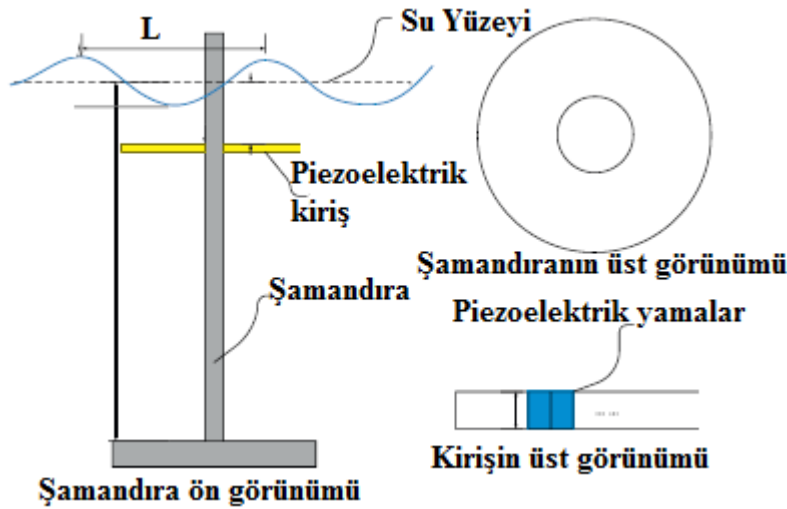
Ovejas ve Quadras laminar rüzgar tüneline ince piezoelektrik filmlerle elektrik güç üretimini deneysel çalışmışlardır [28]. Li ve arkadaşları biyoesinlenme yaparak piezo-yaprak yapısı ile rüzgar enerjisini 0.61 mW elektrik enerjisine boyutları 72 mm x 16 mm x 0.41 mm olan bir enerji hasatçısı ile elde etmişlerdir [29]. Gao ve arkadaşları akış enerji hasatçısı olarak silindirik uzayan PEC kullanmıştır. PEC dalga ve rüzgârı akış kaynaklı titreşim oluşturmak için kullanılmıştır [30]. Zurkinden dalga frekansının enerji hasatına etkisinin incelemek için piezoelektrik bir polimer geliştirmiştir [31].

1. 3. Piezoelektrik Malzemelerin Dalga Enerjisi Hasadında Kullanılması

Ott ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada sığ denizlerde dibe mafsalla sabitlenmiş üzerinde piezoelektrik malzemeler bulunan enerji hasatçısının su yüzeyindeki kısmında sistemi hareket ettirmek için kullanılan ağırlığın küre veya silindir olmasının enerji üretimine etkisini incelemişlerdir. [32].

Xie ve arkadaşları, Airy linear wave teorisini ve elastic beam modeli göz önünde bulundurarak su zerreciklerinin enine dalga hareketlerinden elektrik enerjisi üretimi ve depolanması sistemini matematiksel model olarak geliştirmişlerdir. Piezoelektrik toplayıcının boyutları ve dalganın tipi gibi uygulanabilirlik açısından enerji toplama verimini etkileyen faktörler incelenmiştir Yaptıkları dalga dönüşüm sisteminin tasarımı Şekil 1.2’de gösterilmiştir [33].

Wu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada okyanus dalgalarından enerji elde etmek için önerilen piezoelektrik-şamandıra çifti geliştirmişlerdir. Enerji toplayıcı, okyanuslarda şamandıralara konsollarla bağlı piezoelektrik malzemelerden oluşturulmuştur. Enerji elde edilme veriminin artırılması, şamandıra yapısının geliştirilmesi ile yüzen ve su altında kalan kısımların boyutlarının etkisine bağlanmıştır. Şamandıradan elde edilen elektrik enerjisi miktarının hesaplanabilmesi için analitik bir model sunulmuştur. Yaptıkları dalga dönüşüm sistemi tasarımı Şekil.1.4' te gösterilmiştir [35].



Şekil 1. 4. Dairesel kesitli, piezoelektrik malzeme yamalı enerji hasatçısı [35].

1. 4. Sayısal Dalga Tankı ile İlgili Çalışmalar

Deniz yüzeyinde oluşan su dalgaları; üç boyutlu karakterde ve karışık rasgele özelliklere sahip, periyodik su hareketleridir. Bu su hareketleri sonucunda oluşan momentum karşı karşıya geldiğinde katı yüzeye aktarılmaktadır. Bu kuvvetlerin ve oluşan basınçların analizine gerek dalga enerjisinden elektrik üretmek, gerek kıyıları için dalgaların büyüklüğünü azaltmak gerekse su içerisine inşa edilecek yapıların özelliklerini belirlemek gibi bir çok alanda deneysel çalışmaların maliyetinin yüksek olması sebebiyle Sayısal Dalga Tankı (Numerical Wave Tank NWT) modelleri HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) paket programlarında farklı kabuller gerçekleştirilerek yapılmaktadır.

Liang ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada ikizkenar yamuk çift dalga kırın kullanılarak non-hidrostatik sistemin sayısal ve deneysel sonuçlarını incelemişlerdir. Dalgaların dalga kırınlara etkisi ve dalga kırınlardan dolayı dalga profilinde oluşan değişimleri gözlemlemişlerdir [36].

Dong ve arkadaşları, çalışmalarında Navier-Stokes (N-S) denklemlerine dayanan akma (viscous), sıkıştırılmaz ve Volume of Fluid (VOF) metodlarını kullanarak iki boyutlu ve üç boyutlu sayısal dalga tanklarında doğrusal olmayan sığ dalgalar üretmişlerdir. Dalga oluşturulurken dinamik ağ yapısı kullanılmıştır. Yüksek mertebeden yaklaşımlarla yüksek kalitede knoidal dalgaların benzetimi yapılmıştır. Dalgaların bir katı cisme çarparken oluşturduğu şekiller incelenmiştir [37].

Finnegan ve Goggins sıvı/katı etkileşimlerini incelemek için okyanus dalgalarının modellenmesini sayısal dalga tankında yapmışlardır. Doğrusal dalgaların oluşturulmasında Fourier analizlerinden ve Lineer Dalga Teorisinden faydalanmışlardır. Su parçacığı hareketlerini zamana bağlı olarak değerlendirmişlerdir. Belirli bölgelerin dalga özelliklerine uygun dalgalar sayısal olarak üretilmiştir. Modelin düşük frekans ve yüksek genliğe sahip dalgalar için daha iyi oluşturulabildiği belirtilmiştir [38].

Zhu ve arkadaşları, NWT modellemesinde RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) denklemlerinden faydalanmışlardır. Bunun yanı sıra benzetimde farklı hareket ve kuvvetlerin etkisinde olan bölgeleri oluşturmak için UDF (User Defined functions) kullanılan HAD programına momentum kaynakları ekleneceğini tanımlamışlardır. Dalga üretici, dalga oluşumu ve dalga sönümlenmesi ile dalgaların en uygun modele sahip olduğu çalışma bölgesi olmak üzere tankı bölgelere ayırmışlardır. Oluşturulan dalgaların dalga kırına olan etkisi sayısal ve deneysel olarak tespit edilmiştir [39].

Oijeh ve arkadaşları, ekstrem dalga modelinin RANS ile kinematik incelemesini yapmışlardır. RANS ve VOF benzetimlerini kullanmışlardır. Deniz yüzeyinde görülen en yüksek (ekstrem) dalgaların incelenmesini içeren geleneksel model ile diğer değişkenlik gösteren ve hepsi aynı değişkenlere sahip olmayan dalgaların üretildiği benzetimi birlikte değerlendirmişlerdir [40].

Liu ve Lin FVM (Finite Volume Method)'yi DMT (Dynamic Mesh Technique) ve VOF modelleri kullanarak NWT benzetimine uygulamışlardır. UDF yardımıyla pedal dalga üreticisi olarak kabul ettiği yüzeyi hareket ettirmişlerdir. Bu işlemi farklı ağ yapılarında değerlendirerek kıyaslamalarda bulunmuşlardır. Üretilen dalgaların genliği 0.02 m civarındadır. Dalga tankı hesaplamaları periyodun altı katı süre kadar yapılmıştır.

Süre sonunda tankın içerisindeki dalga yüzeyi görünümüleri dalga serbest yüzeyi değişkenine dönüştürülerek havuz uzunluğu boyunca oluşan eğriler kıyaslanmıştır. Modelin üç boyutlu modele emsal teşkil edeceği ve düzensiz ağ yapısının dalga sönümlenmesinde etkili olduğu bunun yanı sıra sönümleme için yeni yöntemler geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir [41].

Wu ve arkadaşları, piston tipi dalga üreticisi ile tekil düzenli dalga üretilmesine dair sayısal ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Araştırma sonuçları tekil dalga üretilmesinde pedal hareketi için Fenton Tekil hesaplamalarının Goring teoremi ile birleştirilerek kullanılmasının diğer yöntemlerden daha az bileşen içerdiğini göstermektedir [42].

Saincher ve Banerjee flap type (çarpma tipi) dalga üreticini dalga kanalında sayısal benzetimler kullanarak ve deneysel olarak gözlemlemiştir. Orta derinlikli ve derin dalgalar üretilmiştir. Sayısal benzetim NWT VOF modeli kullanılarak N-S denklemleri doğrultusunda yapılmıştır [43].

Liaghat ve ayrıca Raja yüksek lisans tez çalışmalarında katı-sıvı kuvvet etkileşim analizlerini malzeme yapısının akışkan etkisi ile değişimini yaptıkları benzetimlerle incelemiştir [44].

Liu ve arkadaşları, RANS denklemlerine dayanan sayısal benzetimini VOF metodu kullanarak 2 boyutlu tanka uygulamışlar. Dalgaların tank bitiminden yansımaması için poroz yapıyı dalga üreticinin karşısında kalan duvara koymuşlardır [45].

Wang ve Liu çalışmalarında zamana bağlı dalga üretimi gerçekleştirerek yüzey yüksekliği parametresinin zamana bağlı değişimini modellemiştir. Boussinesq yaklaşımı ile teorik ve sayısal bir çözüm ortaya koymuşlardır [46].

Liang ve arkadaşları, çalışmalarında NWT içerisinde oluşacak ekstrem dalga modellemiştir. Oluşturulan düzgün olmayan dalgaların değişken özelliklerinin uygun olduğu görülmüştür. Hesaplanan ve deneysel sonuçlarla elde edilen yatay hızlar birbirini güvenilir kılmaktadır [47].

Bhinder ve arkadaşları, HAD analizlerini kullanarak dalga enerjisi üretim sistemlerine akışkan kuvvetlerinin etkisini bulmuşlardır. Akışkan ortam içerisinde zamana bağlı olarak sistemin veriminin etkiyen kuvvetlerle olan bağlantısı incelenmiştir [48].

Gomes ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada VOF metodu kullanarak Ansys paket programı Fluent modülünde değişken özelliklerde dalgaların zamana bağlı benzetimini yapmıştır. Dalga enerjisinden elektrik üretimi yapılması konusunda sayısal çalışmalarda kullanılacak benzetimin sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırarak güvenilirliğini ortaya koymuşlardır. Sayısal dalga tankında sönümlenme etkeni olmaksızın belli bölgelerde uygun dalga özelliklerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir [49].

Bu çalışmada piezoelektrik malzemeler, dalga enerjisi, piezoelektrik malzemelerden enerji üretimi, dalgaların sayısal paket programlar yardımıyla sayısal olarak modellenmesi, piezoelektrik malzemelerden dalga enerjisi hasatı konularına dair çalışmalar incelenmiştir. Dalga enerjisi hasatçısı tasarlanmış, bu tasarım değiştirilmeden su içindeki konumu değiştirilerek farklı durumlar için hasat edilen enerji miktarları hesaplanmıştır.

2. MATERYAL ve METOT

Dalga Teorisi ve Sayısal Çözümleme başlıkları altında materyal ve metot incelenebilir. Temel olarak Dalga üretimi ANSYS Fluent modülünde gerçekleştirilmiştir. Dalga havuzu içindeki katı cisim (piezoelektrik yamaların monte edildiği plaka) üzerine düşen basınç değişimleri ANSYS Transient Structural modülüne yüklenerek zaman bağlı şekil değişimleri (burkulma sonucu yerdeğiştirme miktarları) verileri elde edilmiştir. Şekil değiştirmeye ve malzeme özelliklerine dair veriler enerji üretim denklemlerinde yerine yazılarak üretilen elektrik enerjisi miktarı bulunmuştur.

2. 1. Dalga Teorisi

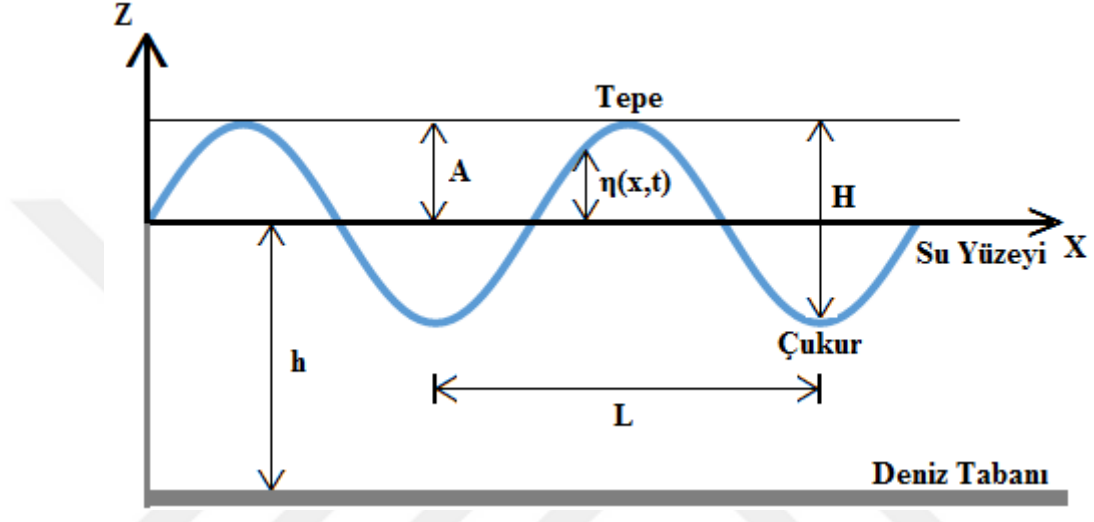
Çalışmada, düzenli yerçekimi dalgaları (yüzey dalgaları) benzetimi gerçekleştirilmiştir. Düzenli dalgalar ifadesi davranışları iyi tanımlanmış ve her zaman diliminde sabit dalgalar olduğu anlamına gelmektedir. Yerçekimi dalgalarıyla ilgili iki teori ele alınmıştır. Lineer Dalga Teorisi genlikleri ve uzunlukları küçük dalgalar için geçerlidir. İkinci dereceden Nonlinear Stokes denklemi genlikleri ve uzunlukları büyük dalgalar için geçerlidir.

McCornick'e göre, serbest yüzeyde oluşan dalgaların sebebi akışkanların dengede kalması için sahip oldukları doğal eğilimdir. Su dolu bir tank içerisine herhangi bir cisim atıldığında düzensizliğe sebebiyet verilir ve yüzey dalgaları oluşur. Sonrasında su yüzeyinde oluşan hareketler yerçekimi ivmesinden dolayı suyun eski haline dönmesi için gösterdiği yönelimden kaynaklanır, yerçekimi dalgaları ismi de buradan gelmektedir [50].

Dean ve Darlymple'a göre, yüzeyde bozulma olmasında başka bir etken de rüzgarların etkisidir. Dalgalar suya etkiyen kuvvetlerin büyüklük ve yönlerine bağlı olarak farklı boy ve şekillerde oluşurlar [51].

Sinüzoidal tipte bir dalga üzerinde dalgaya ait değişkenler incelendiğinde iki boyutlu dalga teorisine göre dalga tepe ve çukurlarının geometrik yerlerinin birbirlerine paralel ve eşit aralıklı sonsuz uzunluktaki doğrulardan oluştuğu görülür. Bu doğrulara dik herhangi bir düzlemsel kesit, iki boyutlu dalga dizisine ait profil şeklini ifade eder.

x eksenini yönünde ilerleyen basit bir dalgaya ait dalga profili Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Basit bir dalgayı belirleyen dalga değişkenleri aşağıda ifade edilmektedir. “ h ” su derinliği (taban ile su yüzeyi arası uzaklık), “ L ” dalga boyu (ardışık iki tepe veya çukur arası uzaklık), “ H ” dalga yüksekliği (tepe ile çukur arası uzaklık), “ A ” dalga genliği (tepe ile su yüzeyi arası uzaklık), “ η ” herhangi bir anda ortalama su seviyesinden itibaren su yüzeylerinin düşey doğrultudaki değişimlerini ifade etmektedir.



Şekil 2. 1. X yönünde ilerleyen dalga profili

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.1)$$

“ g ” yerçekimi ivmesi, “ T ” dalga periyodudur. Dalga periyodu bir dalganın oluşması için gereken süre olarak tanımlanır. Bu süre bir dalga boyunun oluşması için gereken süredir.

Dalgaların oluşumu, sınır şartlarına ve fiziksel olgulara bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan parametrelere göre değişkenlik gösterir. Bu parametreler dalga denklemini oluşturmaktadır.

Yerçekimi dalgaları üç farklı sınır şartına uymalıdır [50]:

Kinematik su yüzeyi sınır koşulu: Bu sınır koşuluna göre serbest su yüzeyinde akışkan bu yüzeyi terk edemez ve serbest su yüzeyinde her noktada akışkan normal hızı yüzey normal hızına eşittir. Parçacık hızı koşulunun sağlanması için “ $Z = \eta$ ” su yüzeyi hızının normaline eşit olmalıdır.

$$V|_{z=\eta} \approx \frac{\partial \eta}{\partial t} k_b = \frac{\partial \phi}{\partial Z} \Big|_{z=0} k_b \quad (2.2)$$

“ ϕ ” potansiyel fonksiyonu, “ k_b ” normal birim vektörü, “ V ” ise hızdır.

Dinamik su yüzeyi sınır koşulu: Bu sınır koşuluna göre su yüzeyindeki bir su tanecigi, “ η ” ile belirtilen bir düşey yer değiştirme sırasında su derinliğine göre dairesel veya eliptik yörüngeleri izler. Su yüzeyindeki basınç herhangi bir “ x ” pozisyonu ve “ t ” zamanı için sıfır olmalıdır. Su yüzeyine bernoulli denkleminin uygulanması ile elde edilecek denklem:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2}V^2 = 0 \quad (2.3)$$

Bu sınır şartı dinamik lineerleştirme durumu kullanılarak doğrusallaştırılırsa:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=\eta} \quad (2.4)$$

Yatay taban sınır koşulu: Bu sınır koşuluna göre, dipte taban boyunca akışkana ait düşey hızlar sıfırdır. “ $Z = -h$ ” olması durumunda:

$$V \cdot n = \frac{\partial \phi}{\partial N} = 0 \quad (2.5)$$

“ n ” koordinat düzleminin tabana göre normalidir. “ N ” normal dış birim vektörüdür. Akışkan hareketi dalga içerisinde sürekli olduğundan süreklilik denklemi kullanılabilir. Eğer akış çevrintisiz ise hızı potansiyelin bir fonksiyonu olarak yazabiliriz [49].

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.6)$$

Sınır koşullarını sağlayan hız potansiyelini ifade etmek istersek [49]:

$$\phi = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} + \sec(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

“ ω ” dalga frekansı, “ k ” dalga numarası, “ t ” zamandır. “ $\omega = 2\pi/T$ ”, “ $k = 2\pi/L$ ” dir. Yukarıdaki denklemden çıkarılacak hız bileşenlerinin matematiksel formülü:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{agk}{\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} + \cos(kx - \omega t) \quad (2.8)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{agk}{\omega} \frac{\operatorname{sech}[k(z+h)]}{\cosh(kh)} + \sec(kx - \omega t) \quad (2.9)$$

x yönündeki hız bileşeni “ u ”, z yönündeki hız bileşeni “ w ” olarak kabul edilmektedir. Yüzey hareketini tanımlayan denklem ifadesi:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (2.10)$$

Stokes Teorisi’ne göre dalga hareketi özellikleri dalga hızı potansiyeline bağlı olarak küçük düzensizlikler serisi olarak ifade edilebilir [50]. Derin sular ve yüksek dalga boyları için Lineer Dalga Teorisi de Stokes Teorisi de uygulanabilir. Hız potansiyelleri Stokes denkleminde güç serisi olarak ifade edilmiştir.

$$\phi = \varepsilon \phi_1 + \varepsilon^2 \phi_2 + \varepsilon^3 \phi_3 \dots \quad (2.11)$$

“ ε ” kuvvet serisi değişkenidir. Birinci dereceden “ ϕ_1 ” terimini içeren çözüm lineer teoriyi temsil etmektedir. İkinci terim “ ϕ_2 ” nin açılımı, Stokes ikinci derece denklemini temsil etmektedir.

Lineer dalga teorisinin aksine oluşan dalgaların yörünge hareketleri gerçekte doğrusal olmayan yapıyla ifade edilmeye daha uygundur. Kapalı bir çevrim izlemezler. Okyanus akıntıları dalga oluşumu doğrultusunda kütle transferi yaratarak dalga davranışlarını doğrusal olmayan bir hale getirir.

Stokes ikinci derece denklemi içerisinde serbest yüzeydeki hareketleri ifade eden denklem [49-51]:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \dots + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \operatorname{sech}^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

Hız bileşenleri ise:

$$u = Agk \frac{\cosh[k(z+h)]}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k+z)}{\operatorname{sech}^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

$$w = Agk \frac{\operatorname{sech}[k(z+h)]}{\omega \operatorname{sech}(kh)} \sec(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\operatorname{sech} 2k(k+z)}{\cos^4(kh)} \sec 2(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

“Z” deniz tabanına göre serbest su yüzeyindeki değişimdir.

2. 2. Sayısal Çözümleme

HAD, temel olarak akışkan davranışının etkili olduğu problemlerin, sayısal yöntem ve algoritmalar ile bilgisayar üzerinde çözülerek analiz edildiği, akışkanlar mekaniğinin bir koludur. Uluslararası çalışmalarda Computational Fluid Dynamics (CFD) anahtar kelimesi kullanılmaktadır. Akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerinin bileşenlerini oluşturan (vizkozite, momentum, hız vb.) değişkenlerin farklı geometrilere uygulanarak çözüm elde edilmesi zor, hatta karmaşık geometriler söz konusu olduğunda çoğunlukla imkânsızdır.

Akışkanlar mekaniğinin genel uygulamalarında basite indirgenmiş geometrilerle sonuca ulaşılabilmektedir. Geriye kalan gerçek problemlerin tamamına yakınında sonuç elde edebilmek için HAD kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Akışın bulunduğu bölge, akışa ait temel diferansiyel denklemlerin çözüldüğü küçük düzgün elemanlardan ve noktalardan meydana gelen ağ yapılarına ayrılır. Ayrılan bu ağ yapılarından iterasyonlar ile adım adım bütün çözüme varılır.

Kararlı rejim ve zamana bağlı akışkan davranışları, sıkıştırılabilir ve yoğunluğu sabit akışkanlar, basınç, hız ve sıcaklık dağılımları, tek ve çok fazlı akışlar alanlarında HAD işlem yapılabilmesine olanak verir [52].

HAD'ın kullanımının sağladığı avantajların öncelik zaman ve maliyet konusunda olduğu söylenebilir. HAD programlarının kullanımı ulaşılması ve çalışılması çok güç olan bölgelerdeki akışkan davranışlarının incelenmesine imkan vermektedir. HAD bilgisayarda bulunan ve kolayca yeniden kurgulanabilecek deney laboratuvarı olarak adlandırılabilir. HAD programları tasarım, benzetim veya çözümlenme yapılmak istenmesi durumunda, katı modelleme çizim programları ile de uyumlu çalıştırılabilmektedir. Sanal prototip oluşturma ve oluşturulan bu prototipler üzerinde deney yapma olanağı vermektedir.

Sayısal benzetimlerin HAD yazılımları ile yapılması, elde edilen sonuçların ve deneyin sanal ortamının kararlı halde veya zamana bağlı çözümlerde istenilen zaman adımında görüntülenmesine olanak sağlar. Deneysel çalışmalarda toplanan veriler haricinde herhangi bir veri elde etmek istenildiği takdirde, deney düzeneğinin tekrar kurulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak HAD yazılımlarında birçok değişkene ait olan bilgiler de çözüm içerisinde yer almaktadır.

Geleneksel ölçüm yöntemleri ile akış özelliklerini incelerken kullanılan ölçüm cihazları, sensörler vb. akışı bozmaktadır. Ancak HAD ile bu olumsuzluk ortadan kalkar. Örneğin; hız ölçümü yapmak için akış içerisinde bir pitot tüpü yerleştirilir. Bu durum gerçekte doğal akışı bozmaktadır. Bunun yanı sıra bir pompanın performans ölçümü yapılırken debimetre ve manometre gibi cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlarda akışın doğal davranışlarını olumsuz yönde etkilemekte ve bozmaktadır. Fakat HAD programlarında yapılan bir çözümlenme, ölçüm, hesaplama vb. durumlarda her bir sayısal ağ elemanı başlı başına bir ölçüm noktasıdır. Bu nedenle yukarıda anlatılan cihazların etkileri gibi bir durum söz konusu değildir ve bu cihazların oluşturduğu etkilerden bağımsız olan verilen elde edilir.

Deneysel kullanılmakta olan sensörlerin sınırlı sayıda olması ve ölçüm cihazları kullanımını deney sonuçlarının her noktadan alınamaması sonucu doğurmakta ve çalışma süresini uzatmaktadır [53].

2. 2. 1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yönteminde asıl amaç çözümü yapılacak olan geometrinin belirli hacimlere bölmek, daha sonra bölünen bu parçaları ayrı ayrı ele alarak çözüm yapmak ve yapılan bu çözümlerin tekrar birleştirilerek var olan problemin genel çözümüne ulaşmaktır.

Bu yöntem korunum denklemlerini sayısal şekilde çözülmesi mümkün olan cebirsel denklem sistemlerine dönüştürür. Bunun için ise kontrol hacim esasına dayanan bir teknik kullanır. Bu teknik ile ayrık eşitlikler elde edilir. Bu eşitliklerin elde edilmesinin amacı ise kontrol hacmini sağlamaktır. Daha sonra ayrık eşitlikler doğrusallaştırılır. Bu doğrusallaştırma sonucu doğrusal olan denklem sistemleri elde edilir. Elde edilen bu denklem sistemlerinin zamana bağlı çözümünün yapılması ile basınç, sıcaklık ve hız gibi değişkenler, daha önceden verilen yakınsaklık değerini sağlayıncaya kadar güncellenir. Sonlu hacimler yöntemi ile problemin çözülmesi işleminde aşağıda verilen adımlar kullanılmaktadır.

Çalışma yapılacak bölgenin, ağ programları ile sayısal analize uygun ağ yapıları oluşturulması ve daha sonra oluşturulan bu ağ yapılarının belirli hacimlere bölünmesi.

Sırasıyla momentum, süreklilik denklemlerinin çözümlerinin yapılması ve bununla birlikte enerji gibi istenilen diğer denklemlerin çözümünün yapılması

Çözülen denklem veya denklem takımlarının daha doğru değerlere yükseltilmesi için iteratif çözücünün kullanılması

Yakınsaklığın kontrolü ve son olarak çözümün sonuçlandırılıp elde edilmesi [54].

2. 2. 2. Fluent Yazılımı

DeneySEL süreç içerisinde meydana gelen zaman sıkıntısı, maliyet, iş gücü ihtiyacı vb. durumları ve analitik çözümlerde oluşacak zorluklar sayısal çözümleme çalışmalarına olan yönelimi artırmıştır. İşte bu noktada ise HAD yazılımları devreye girmektedir. Bu yazılımlardan biri olan Fluent birçok problemin çözümünde kullanıcıya büyük oranda kolaylık göstermektedir. Bu çalışmada, yapılan dalga özelliklerinin oluşturulması ve katı ile olan etkileşimlerinin incelenmesi hususunda sayısal çözümünde, ANSYS Fluent' in en doğru sonuçlara sahip olan yazılım olduğu literatür araştırmaları sonucunda tespit edilmiştir.

Fluent, sonlu hacim formülasyonunu kullanır. Denklemleri ise sayısal olarak çözer ve matematiksel denklemlere dönüştürerek de yapılan çözümün daha çabuk elde edilmesi olanağını sağlar.

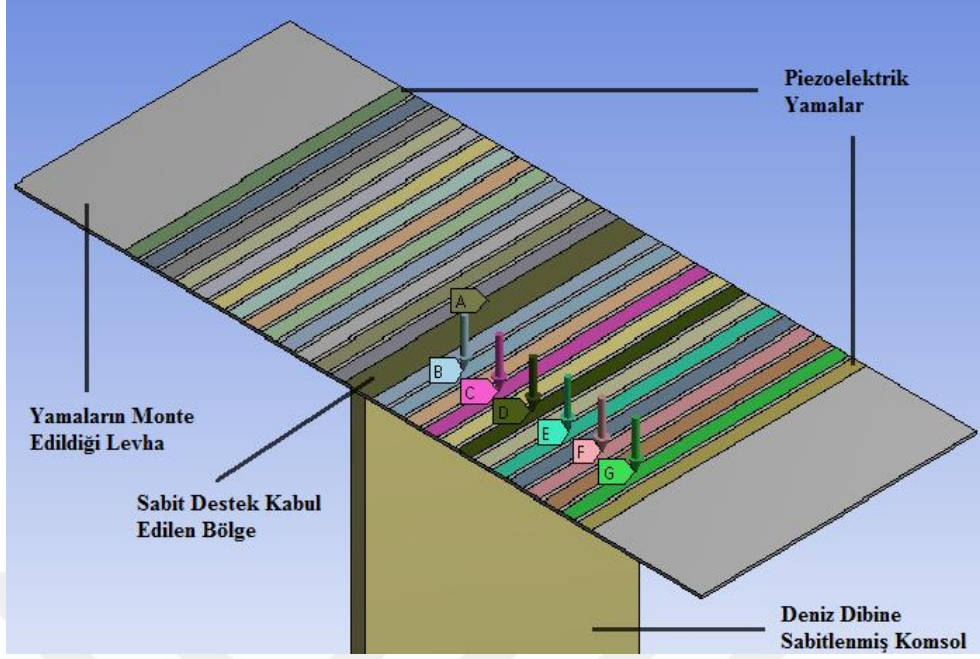
Sonlu hacim yöntemi çözümü yapılacak geometriyi parçalara bölen, daha sonra bu parçaların her biri için ayrı ayrı çözüm yaparak yapılan bu çözümleri birleştiren bir çözüm yöntemi olarak ifade edilebilir [53].

2. 2. 3. Transient Structural Modülü

ANSYS Transient Structural Modülü katı cisimler üzerine zamana bağlı olarak uygulanan basınç ve kuvvetler sonucu malzemenin şekil değiştirmelerinin incelenildiği modüldür. Bu modül sonlu elemanlar metodu kullanarak çalışır. Program içerisinde oluşturulan katı cisim sonlu elemanlara bölünerek her bir eleman için işlemler yapılır. Burkulma ve burulma analizlerinin yanı sıra hareket analizlerinin yapılabildiği modül FSI analizleri yapılması durumunda Fluent modülü ile eş zamanlı çalışabilmektedir.

Çalışmada Fluid-Structure Interaction (FSI) analizleri yapılamamasının ve modüllerin ayrı ayrı kullanılmasının sebebi, burkulma analizleri sonuçlarının alınabilmesi ve dalga modelinin oluşturulabilmesi için gereken ağ yapılarının birbirinden farklı olmasıdır. Dalgaların Fluent modelinde oluşturulması sonucu basınç değişimlerinin katı cisim üzerine etkisi incelenmek istenmektedir. Ancak Transient Structural modülü pasif çalıştırılmamaktadır. FSI analizleri genellikle katının akışkan üzerine etkisinin incelenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır. Transient Structural Modül içerisinde belirlenen noktalara basınç ve/veya kuvvet değerlerinin girilmesi istenmektedir. Basınç değerleri doğrudan Fluent modülünden alınamadığı için FSI analizi yapılamamıştır.

Fluent modülünden alınan zamana bağlı basınç değişimi değerleri Şekil 2.2'de görüldüğü gibi piezoelektrik yamaların ve üzerine yerleştirildikleri levhanın üzerine uygulanmaktadır. Suyun içerisinde olduğu kabul edilen dalga üreticinin levhasının ve üzerindeki piezoelektrik malzemelerin basınç etkisi sonucu şekil değiştirmesi sonucuna dair veriler piezoelektrik malzemenin özelliklerini de içerisinde parametre olarak bulunduran denklemler yardımıyla üretilen elektrik gücüne ulaşılmıştır.

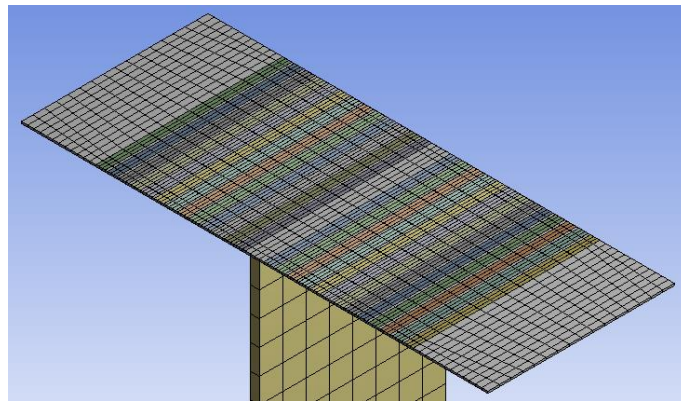


Şekil 2. 2. Dalga enerjisi hasatçısı

Analizler sırasında dalga enerjisi hasatçısının geometrik yapısı değiştirilmemiş farklı durumlar için ve hasatçının su içerisindeki konumu değiştirilerek incelenmiştir. Hesaplamalar yapılırken çelik levhanın izotropik elastisiteye sahip olduğu kabul edilmiştir.

Poisson oranı = 0.3, çelik özkütlesi = 7850 kg/m^3 , Young modülü = 2×10^{11} olarak sisteme tanımlanmıştır.

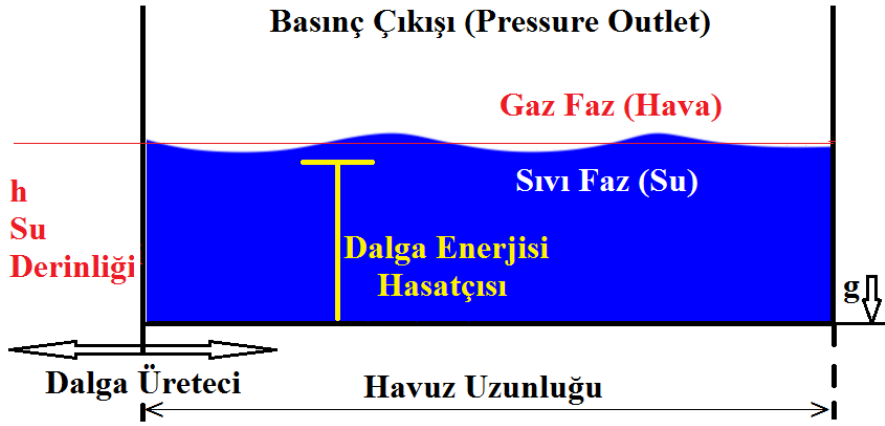
Şekil 2.3'te farklı durumların analizlerinin yapılması sırasında kullanılan ortak ağ yapısı görülmektedir. Prizmatik ağ yapısının güvenilirliği ağ yapısı istatistiklerin Orthogonal Quality değerine bağlı olup bu değer 1'e mümkün olduğunca yakın olması istenmektedir. Çalışmadaki analiz için bu değer 0.99 ile 1 arasındadır.



Şekil 2. 3. Dalga enerjisi hasatçısı ağ yapısı

2. 3. Sayısal Dalga Tankı

Fluent modülünde oluşturulan iki boyutlu dalga havuzunun benzetimi yapılırken, piezoelektrik yamaların üzerinde bulunduğu levha yatay bir çizgi olarak su fazı içerisine konumlandırılmıştır. Ancak dalga hasatçısının tabana sabitlenmiş konsolu sıvı geçişine engel olmaması için analiz geometrisinde bulunmamaktadır. Sayısal dalga tankında dalgalar oluşturulurken piston tipi dalga üretici kullanılmıştır. Havuzun sol duvarı dalga üretici olması amacıyla hareket etmektedir. Duvarın hareketi için User Defined Function (Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon KTF) kullanılmıştır. Analiz yapılırken Pressure Based, Transient, Volume of Fluid (VOF), k-epsilon (k-ε) Turbulence Model, Realizable Wall Functions, Dynamic Mesh ayarları ile PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) algoritması kullanılmıştır. Sayısal dalga tankı Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2. 4. Sayısal dalga tankı

Dalga üretimi yapılırken, piston tipi dalga üretici kabulü yapılmıştır. Sol duvarın hareket fonksiyonu dalganın karakteristik özelliklerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Su derinliği “ h ”, dalga genliği “ H ”, piston yer değiştirmesi “ S ”, dalga numarası “ $k = 2\pi/L$ ” parametreleri kullanılarak, piston yer değiştirmesi hesaplanabilir. Piston yer değiştirmesi için gerekli denklem [51]:

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{piston} = \frac{2(\cosh(2kh) - 1)}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (2.15)$$

Denklem zamana bağılı olduğundan herhangi bir dalga yükseltisi pistonun hareketine bağılı olarak ifade edilmiştir. H dalga genliği olarak hesaplandığında yani en büyük dalga yüksekliği değerine eş kabul edildiğinde S değeri pistonun en büyük yer değiştirmesi " S_0 " olarak yazılabilir. Dalga deriyodu ve dolayısıyla frekansına bağılı piston yer değiştirmesine dair denklemi ele almak gerekirse [55]:

$$X(t) = \frac{S_0}{2} \left(1 - e^{-\frac{5t}{2T}}\right) \sin(\omega t) \quad (2.16)$$

Denklem (2.16)'nın zamana bağılı olarak türevi alındığında, zamana bağılı hız denklemi elde edilebilir. Elde edilen Denklem (2.17) KTF yazımında kullanılacaktır [49]:

$$V(t) = \left(\frac{S_0}{2}\right) \left(1 - e^{-\frac{5t}{2T}}\right) \omega \cos(\omega t) + \frac{5}{2T} e^{-\frac{5t}{2T}} \sin(\omega t) \quad (2.17)$$

2. 3. 1. Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (User Defined Function)

Hareketli ağ yapısında Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar (User Defined Function-UDF) C programlama dilinde yazılarak programın Fluent modülü içerisine tanıtılmıştır. "DEFINE_CG_MOTION" başlığı altında sistemdeki dinamik değişkenler dalga elde etmek için programa tanımlanmıştır. UDF kodunda kullanılan T değişkeni periyot, S değişkeni pistonun yer değiştirme miktarıdır. $vel[0]$ ise x doğrultusundaki hızdır.

```
#include "udf.h"
#include "dynamesh_tools.h"
DEFINE_CG_MOTION(wave,dt,vel,omega,time,dtime)
{ Thread *t;
face_t f;
t = DT_THREAD(dt);
float T,S;
begin_f_loop(f,t)
{ vel[0]=(S/2)* ((1-exp((-2*time)/(5*T)))*(1/T)*cos((1/T)*time)+
((2*time)/(5*T)*exp((-2*time)/(5*T)))*sin((1/T)*time)); } end_f_loop(f,t)}
```

2. 3. 2. Volume of Fluid (VOF) Metodu

The Volume of Fluid Methodu (VOF) genellikle ANSYS Fluent paket programının zamana bağlı çözümlerinde kullanılır. VOF methodu birden çok karışmayan akışkanın modellenmesinde kullanılmaktadır. Modele eklenen her faz için hesaplamalı hücrelerde hacim fraksiyonu bir değişken olarak tanımlanır. Her kontrol hacminde hacim fraksiyonları bir araya toplanır. Fazlar ve ortalama hacim değerleri tarafından alanlar tüm değişkenler ve özellikleri için paylaşılır. Her bölgenin hacim fraksiyon değerleri her faz için farklı bölgede tanımlanır. Hücrelerdeki özellikler ve değişkenler, fazların birisi veya karışım olarak temsil edilmektedir. Hacim fraksiyonu α_q olarak ifade edilebilir. α_q için üç durum söz konusudur.

$\alpha_q = 0$ hücre q (q=1,2,3...) numaralı akışkan için boştur.

$\alpha_q = 1$ hücre q (q=1,2,3...) numaralı akışkan için tamamen doludur.

$0 < \alpha_q < 1$ hücre q (q=1,2,3...) numaralı akışkan için arayüze sahip ve hücre içerisinde bir veya daha fazla farklı fazlar bulunmaktadır. Bölgesel değerlere dayanan “ α_q ” uygun değişkenler ve özelliklerin ilgili alandaki her kontrol hacmine uygulanmaktadır.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_q \alpha_q) + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.18)$$

“ \dot{m}_{qp} ” “q” fazından “p” fazına kütle transferi “ \dot{m}_{pq} ” “p” fazından “q” fazına kütle transferi “ S_{α_q} ” değeri öncelikli olarak sıfırdır. ancak KTF kullanılarak bir değer eklenebilir. Momentum Denklem (2.19)’da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.19)$$

“p” statik basınç “ $\rho \vec{g}$ ” yer çekimi kuvveti, “ \vec{F} ” dış kuvvetler, “ μ ” viskozitedir [56].

2. 3. 3. PISO Solver

Basınç-hız bağlantı şeması, basınç ve hız arasındaki yüksek dereceden yaklaşık ilişkisine dayanan SIMPLE algoritma ailesinin bir parçasıdır. SIMPLE ve SIMPLEC algoritmalarının sınırlaması basınç doğrulama denklemi çözüldükten sonra yeni hız ve yaklaşık akış değerlerinin momentum dengesini sağlamamasıdır. Sonuç olarak denge sağlanana kadar çözüm tekrar edilmelidir. Bu hesaplamamın verimini artırmak için PISO algoritması iki ek düzeltim ile çalışmaktadır. Bunlar komşu düzeltimi ve asimetri düzeltimidir. SIMPLE ve SIMPLEC algoritmaları Navier-Stokes denklemlerini kullanıcı tarafından yapılan seçimler sonrasında eklenen parametrelerle birlikte doğrudan sistemin çözümüne uygularlar. Navier-Stokes denklemleri:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial y} - \rho g \quad (2.22)$$

İki boyutlu sayısal dalga tankı için, “ x ” and “ y ” koordinat sistemindeki konum, “ ρ ” akışkanın özkütlesi, “ t ” zaman, “ u ” yatay hız bileşeni, “ v ” dikey hız bileşeni, “ μ ” türbülans akma zılgı (vizkozitesi), “ g ” yerin çekim ivmesidir.

2. 3. 3. 1. Komşu Düzeltimi

PISO algoritmasının ana fikri SIMPLE and SIMPLEC tarafından ihtiyaç duyulan tekrarlanan hesaplamaları çözümün basınç doğrulama denklemleri basamağı içerisinde yerleştirmektir. Bir veya daha fazla PISO döngüsü eklenmesi sonrası düzeltilmiş hızlar süreklilik ve momentum denklemlerini daha yakından sağlamaktadır. Bu tekrarlanan sürece komşu düzeltimi denir. PISO algoritması işlemcinin her iterasyonda daha fazla çözüm zamanına ihtiyaç duymasına sebep olmaktadır. Fama özellikle zamana bağlı çözüm yapılırken önemli ölçüde çözüm için gerekli iterasyon sayısını düşürmektedir.

2. 3. 3. 2. Çarpıklık Düzeltimi

Bir dereceye kadar çarpıklığa sahip ağ yapısı bileşenleri için hücre yüzeyindeki kütle akısı ve komşu hücrelerin basınç düzeltimindeki farklar kaba olarak kabul edilebilir. Hücre yüzeyleri boyunca basınç doğrulama gradyanları bileşenleri önceden bilinmemektedir. Basınç düzeltim denkleminin ilk adım çözümünden sonra basınç düzeltim gradyanı tekrar hesaplanır ve kütle akısını güncellemek için kullanılır. Çarpıklık düzeltimi olarak adlandırılan bu işlem bozuk ağ yapısından kaynaklanan yakınsama problemlerini büyük ölçüde azaltmaktadır. PISO çarpıklık düzeltimi, ANSYS Fluent programının yüksek çarpıklığa sahip ağ yapısının çözüme ulaşmasını daha karesel yapıların çözüme ulaşması için gereken iterasyon sayısına yakın değerlerde sağlamasına yardımcı olmaktadır.

2. 3. 3. 3. Çarpıklık-Komşu Düzeltimi Çifti

Yüksek dereceden çarpıklığa sahip ağ yapısı bileşenleri için aynı basınç doğrulama denklemi kaynağını çarpıklık ve komşu düzeltimlerinin anlık bağlantısı sapma ya da sonuç doğruluğunda eksikliğe sebep olabilir. Bunu engellemek için daha uzun sürmesine sebebiyet verse de düzeltimlerin her iterasyon için ayrı ayrı yapılması uygulanabilir [56].

2. 3. 3. k-epsilon Turbulence Modeli

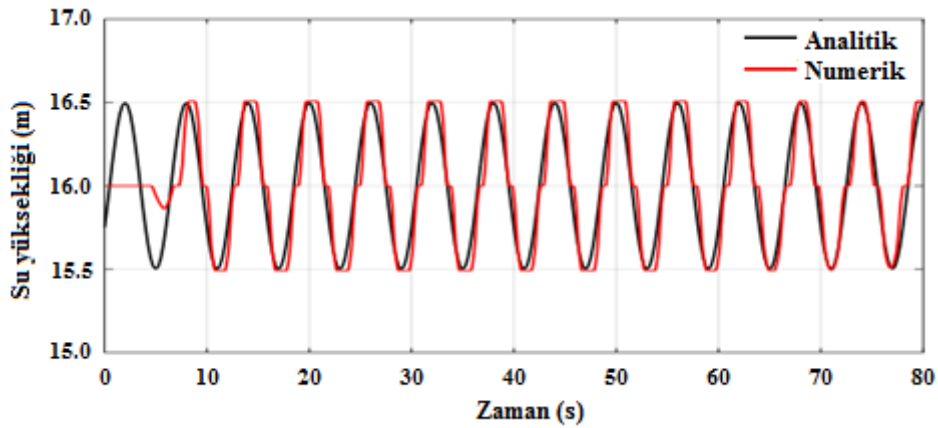
Dalga üretimi sırasında duvarın hareketinden kaynaklı akışkan içerisinde turbulans oluşmaktadır. Bunu yanı sıra piezoelektrik malzemelerin üzerinde bulunduğu kabul edilen yüzey engeli ile akışkanın karşılaşması da türbülanslı akışa sebebiyet verecektir. Aşağıda belirtilen denklemler Fluent modülünün çalışması sırasında kullanılan Navier-Stokes denklemlerinin özelleştirilmiş halleridir [56].

2. 3. 5. Dinamik Mesh Teorisi ve Sayısal Ağ Yapısı

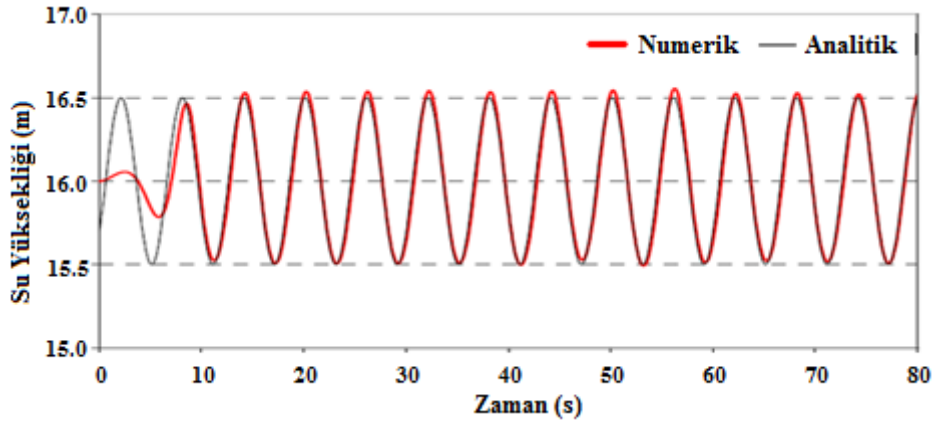
Dalga üretimi yapılırken kullanılan ağ yapısı olan dinamik ağ yapısı “Layering” olarak seçilmiştir. Bu ağ yapısında model küçük karelere bölünmüştür. Her karenin bir kenarı 0.1 m olarak benzetim alanlara ayrılmıştır. Ağ yapısı içerisinde bu alanlar birbirleriyle yer değiştirebilmektedir. Su taneciklerinin yer çekimi etkisi ile hareketli ağ yapısında davranışlarını çözümde kullanılan program ortaya koymaktadırlar.

2. 4. Doğrulama

Sayısal çalışmaların güvenilirliği deneysel, analitik sonuçlarla ya da literatürdeki başka bir çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılarak sağlanmaktadır. Tez çalışmasında 200 m uzunluğundaki başlangıçta 16 m derinliğinde su bulunan sayısal dalga tankı benzetimi yapılmıştır. Sayısal dalga tankının sol kenarından 20 m uzaklıkta örneklemeler alınan bir doğru üzerinde su seviyesinin zamana bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Üretilmek istenen dalganın periyodu 6 s, dalga genliği 1 m’ dir. Şekil 2.5’te tez çalışmasının; Şekil 2.6’da doğrulama için kullanılan Gomes ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın analitik ve sayısal (numerik) olarak zamana bağlı su yüksekliği grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 2. 5. $x = 20$ m’de zamana bağlı su seviyesi grafiği



Şekil 2. 6. $x = 20$ m’de zamana bağlı su seviyesi grafiği [49].

2. 5. Enerji Üretim Denklemleri (Root Man Square Değeri)

Konsolun eğilme hareketi nedeniyle, kirişin iki yüzü pozitif ve negatif ekseni alternatif gerilmeler sergiler. Sonuç olarak, oluşturulan yük “ Q_g^i ” ve gerilim “ V_g^i ” piezoelektrik parça yüzeyinde verilen şartlarla sağlanır [57].

$$Q_g^i(t) = -\frac{e_{31}b(h_{pla} + h_{pie})}{2}x \left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=ia} - \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=(i-1)a} \right) \quad (2.23)$$

$$V_g^i(t) = -\frac{e_{31}(h_{pla} + h_{pie})}{2C_V'}x \left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=ia} - \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=(i-1)a} \right) \quad (2.24)$$

“ e_{31} ” piezoelektrik sabitidir, “ C_V ” piezoelektrik parçaların elektrik kapasitesi ve “ C_V' ” piezoelektrik parçaların birim genlik başına elektrik kapasitesidir ($C_V' = C_V / b$). “ i ” değeri piezoelektrik yama numarası, “ h_{pie} ” piezoelektrik malzemenin kalınlığı, “ h_{pla} ” piezoelektrik malzemelerin montaj yapıldığı plakanın kalınlığıdır. “ $w(x,t)$ ” yer değiştirme fonksiyonudur. “ $W_n(x)$ ” değeri yer değiştirme miktarıdır. “ $q_n(t)$ ” genelleştirilmiş koordinattır. Genelleştirilmiş koordinat-yer değiştirme miktarı bağıntısı Denklem (2.35)’te görülmektedir.

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n(x).q_n(t) \quad (2.25)$$

Dalga basıncının oluşturduğu enerji toplama işleminin genellenmiş koordinatta ifadeleri verilmiştir [33-35]:

$$q_n = \frac{1}{(C_m \rho_W b h_{pla} + \rho_1 b h_{pla}) B_n \omega_n} \int_0^t Q_n(\tau) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau \quad (2.26)$$

“ C_m ” eklenen kütle katsayısı, “ ρ_W ” suyun özkütlesi, “ b ” plakanın en uzunluğu, “ h_{pla} ” plakanın kalınlığı, “ ω_n ” açısal frekans, “ ρ_1 ” plakanın özkütlesi, “ τ ” yatay gerilmedir.

Denklem (2.26)’da değişken olarak kullanılan “ B_n ” yerdeğiştirmeye bağlı belirlenen değişken; “ $Q_n(\tau)$ ” değişkeni yer değiştirme miktarı ile “ $f(x, \tau)$ ” ye bağlıdır. “ $f(x, \tau)$ ” yerdeğiştirme için yatay kuvvet etkisi ile belirlenen karmaşık bir fonksiyondur [39]:

$$Q_n(\tau) = \int_0^l f(x, \tau) W_n(x) dx \quad (2.27)$$

$$B_n = \int_0^1 W_n^2(x) dx \quad (2.28)$$

Son olarak, “ t ” zamanında dalga basıncına maruz kalan piezoelektrik enerji hasat sistemi üzerinde üretilen yük ve denklemlerine “ $q_n(t)$ ” ve “ $W_n(x)$ ” denklemleri konularak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$Q_g^i(t) = -\frac{e_{31}(h_{pla} + h_{pie})}{2} \sum_{o=1}^{\infty} \left(\frac{dW_n(x)}{dx} \Big|_{x=ia} - \frac{dW_n(x)}{dx} \Big|_{x=(i-1)a} \right) \times q_n(t) \quad (2.29)$$

$$V_g^i(t) = -\frac{e_{31}(h_{pla} + h_{pie})}{2C_V} \sum_{o=1}^{\infty} \left(\frac{dW_n(x)}{dx} \Big|_{x=ia} - \frac{dW_n(x)}{dx} \Big|_{x=(i-1)a} \right) \times q_n(t) \quad (2.30)$$

Burada “ o ” piezoelektrik yamaların sayısıdır ve “ i ” değeri $1 \leq i \leq o$ aralığında olmalıdır. Sonuçta elektrik üretimi sağlanır. Sistem enine dalga etkisiyle “ T ” süre içinde bir salınım yapar ve bir salınımda üretilen elektrik enerjisi RMS olarak verilebilir. Çalışmada kullanılan “ e_{31} ” değeri -2.8 nano Farad olarak kabul edilmiştir [33-35].

$$P_e^{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P_e(t)]^2 dt} \quad (2.31)$$

“ $P_e(t)$ ” sistemde “ t ” sürede konsolların üzerinde üretilen elektrik enerjisidir. Dalga T bir süre için salınmaya girdiğinde, $0 - T$ zaman aralığında üretilen elektrik enerjisi RMS olarak verilebilir ($0 < t < T$). “ $P_e(t) = \sum_{i=1}^m \frac{dQ_g^i(t)}{dt} V_g^i(t)$ ” bu değer in yeterince kısa zaman aralıklarına bölünmesiyle birim zamanda üretilen elektrik enerjisi hesaplanır. Sonuç olarak eşitlik ifadesi Denklem (2.32) şeklinde yazılır [23].

$$P_e^{rms} = 4 \sqrt{\frac{\Delta t}{2(T - \Delta t)} \sum_{i=2}^j ([P_e(t_i)]^2 + [P_e(t_{i-1})]^2)} \quad (2.32)$$

Piezoelektrik malzemelerin yerleştirildiği levhanın en uzunluğu ve piezoelektrik yamaların boy uzunluğu $b = 1$ m, levhanın boy uzunluğu $l = 1.2$ m, piezoelektrik yamaların kalınlığı $h_{pie} = 0,003$ m levhanın kalınlığı $h_{pla} = 0.01$ m, piezoelektrik yamaların en uzunluğu $a = 0.05$ m olarak hesaplamalar yapılmıştır. Levhanın bir tarafının üst ve alt yüzüne 13'er, hasatçıya toplam 52 yama yerleştirildiği kabul edilmiştir.

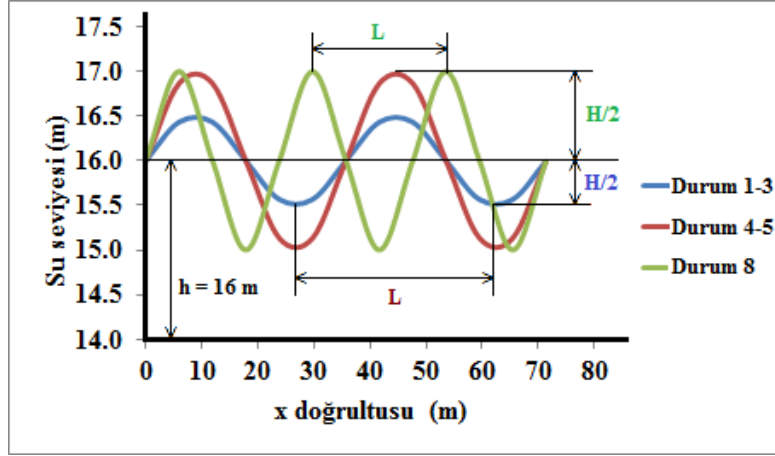
3. BULGULAR

Analizler yapılırken piezoelektrik malzemelerin yerleştirildiği enerji hasatçısı geometrik olarak değişikliğe uğratılmamıştır. Hasatçının üst kısmındaki levhanın su içerisindeki konumu ile üretilen dalgaların yükseklikleri, periyotları, boyları ve su derinliği farklı farklı durumlarda değiştirilerek sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Durumlara dair dalga özellikleri ve konumlandırmalar Tablo 3.1’de görülmektedir.

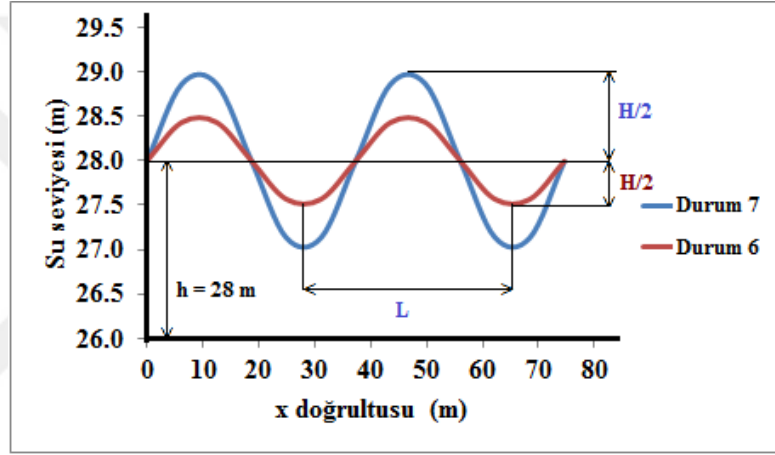
Tablo 3. 1. Durumlar ve değişkenler

	Dalga Genliği H (m)	Su derinliği h (m)	Dalga Boyu L (m)	Periyot T (s)	Serbest Su Yüzeyine Olan Mesafe (m)
Durum 1	1	16	53.6	6	0,5
Durum 2	1	16	53.6	6	1
Durum 3	1	16	53.6	6	1.5
Durum 4	2	16	53.6	6	1
Durum 5	2	16	53.6	6	1.5
Durum 6	1	28	56	6	0,5
Durum 7	2	28	56	6	1
Durum 8	2	16	25	4	1
Durum 9	2	5.11	53.6	8	1

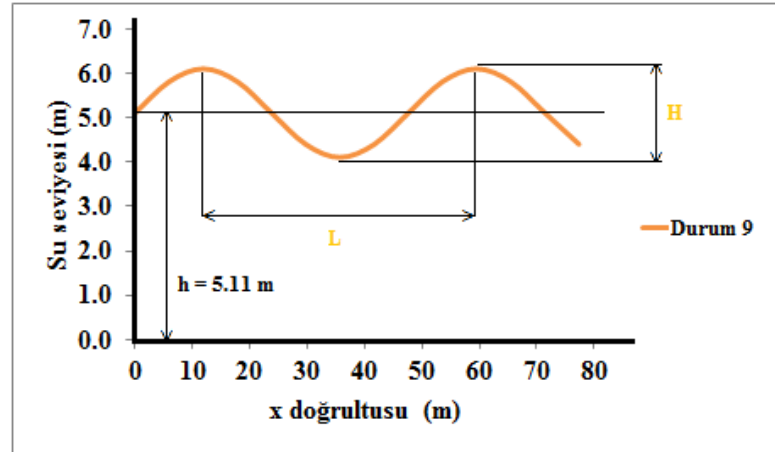
Durumlar belirlenirken ve benzetimler yapılırken kullanılan sayısal dalga tankının uzunluğu 200 m’dir. Dalga havuzu içerisinde üzerinde piezoelektrik malzemelerin olduğu kabul edilen plakanın kalınlığı 0.01 m sonuç görsellerinde görülememektedir. Sonuçlar ve tartışma kısmında tüm durumlar sıralamalar göz önünde bulundurulmadan temsilen seçilen durumlarla ve durumlar arası kıyaslamalar yapılarak aktarılacaktır. Dalga değişkenleri Şekil 3.1’de görsel olarak ifade edilmiştir. Şekilde periyot değerleri görülememektedir. Profili görünen durumlarda dalgaların hızı farklılık göstermektedir.



(a)

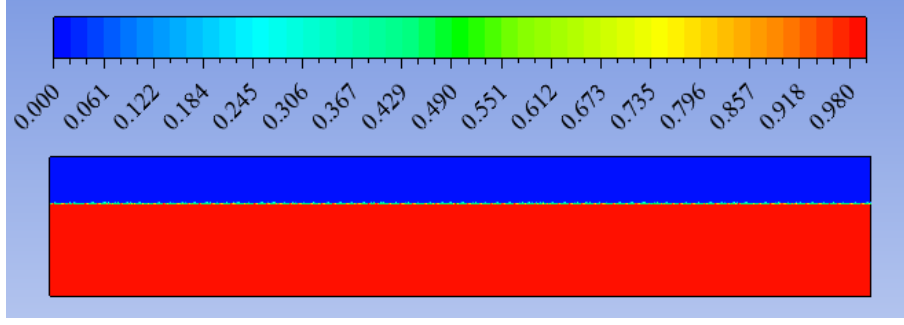


(b)

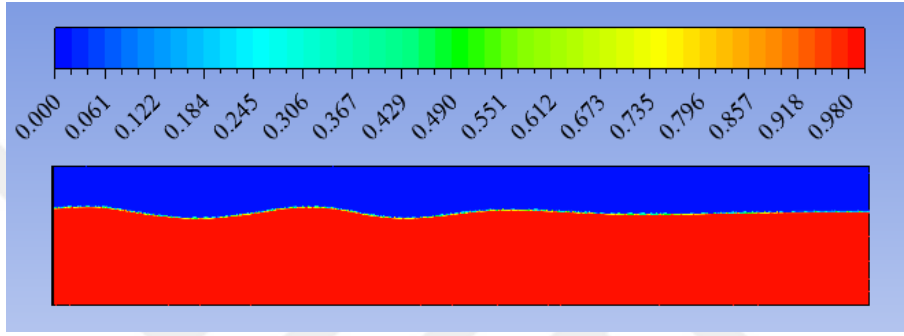


(c)

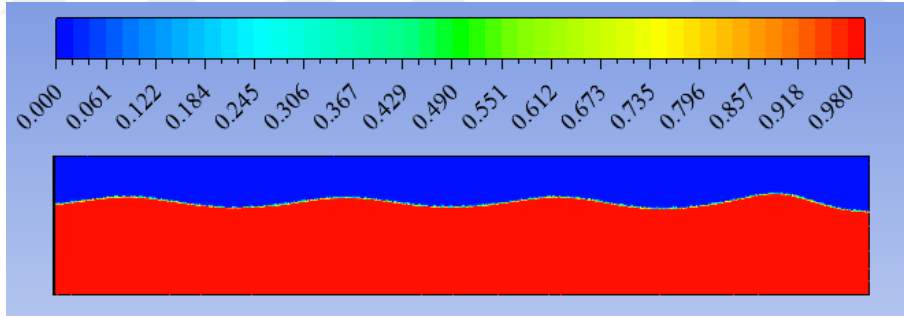
Şekil 3. 1. Durumlar ve değişkenler
(a) Durum 1-5, 8 dalga parametreleri
(b) Durum 6-7 dalga parametreleri
(c) Durum 9 dalga parametreleri



Şekil 3. 2. Durum 4 için $t = 0$ s anında su hacim fraksiyonu

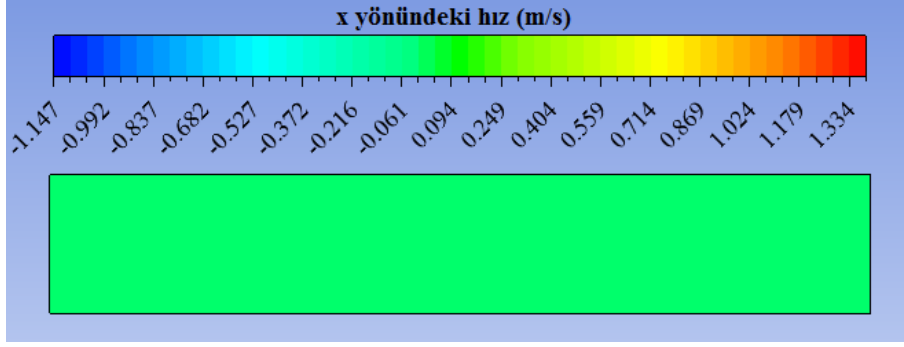


Şekil 3. 3. Durum 4 için $t = 25$ s anında su hacim fraksiyonu

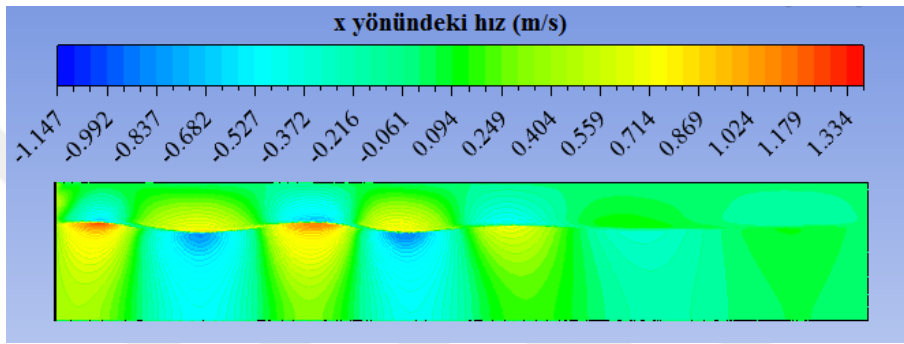


Şekil 3. 4. Durum 4 için $t = 50$ s anında su hacim fraksiyonu

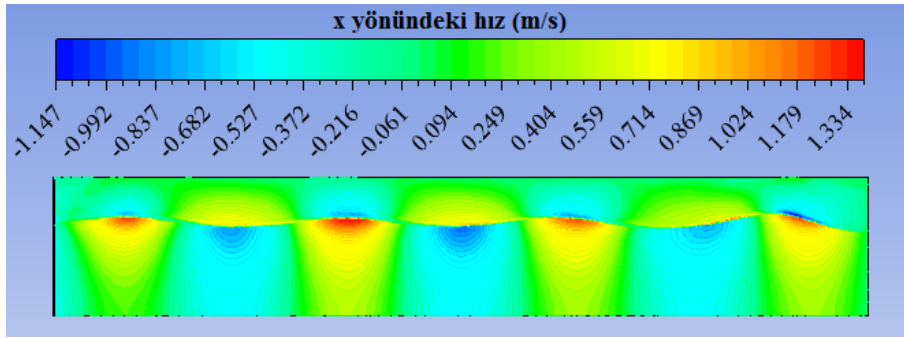
Şekillerde zamana bağlı olarak sayısal dalga tankı içerisindeki sıvı ve gaz hacmin yerdeğiştirmesi görölmektedir. Kırmızı kısım tamamen su fazını, mavi kısım tamamen hava fazını temsil etmektedir. Hava-su arasındaki renkler ağ yapısı içerisindeki karışımı temsil etmektedir. İki faz arasındaki yüzeyde oranlara bağlı olarak farklı renkler görölmektedir. Havuzun sağ duvarına herhangi bir sönümle fonksiyonu ve geçirgen yapı tanımlanmamıştır. Havuzun boyunun su derinliğine oranla bir hayli büyük oluğu, sol duvara yakın alınan ölçümlerde hata oluğuşmasının önüne geçmektedir. Şekiller 3.1-3.3'te göröldüğu gibi eđ yükselteli dalgalar oluğuşmaktadır.



Şekil 3. 5. Durum 4 için $t = 0$ s anında x doğrultusundaki hız

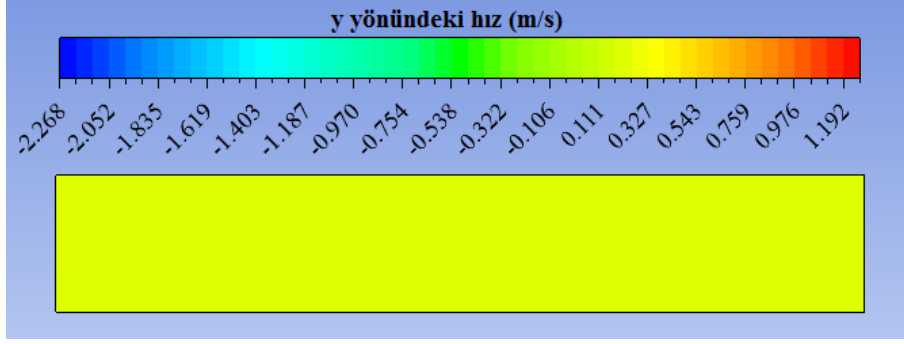


Şekil 3. 6. Durum 4 için $t = 25$ s anında x doğrultusundaki hız

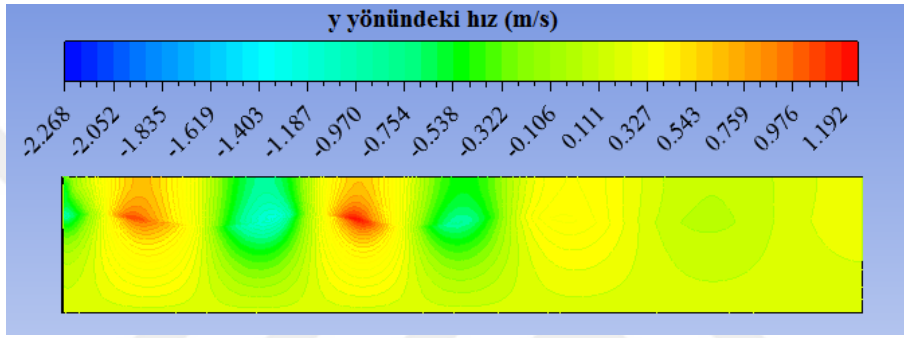


Şekil 3. 7. Durum 4 için $t = 50$ s anında x doğrultusundaki hız

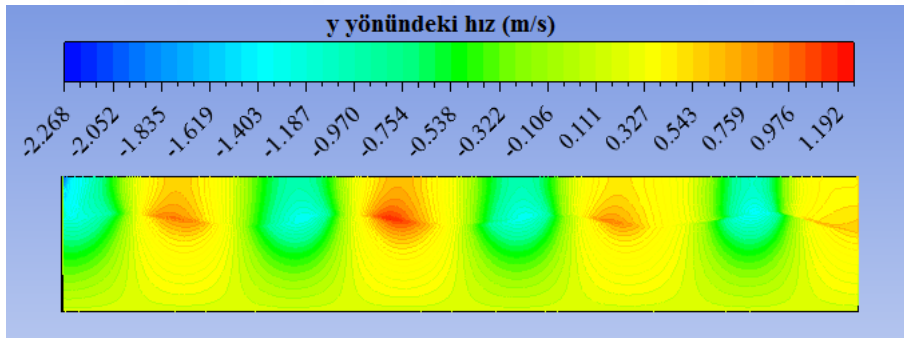
Durum 4 için x doğrultusundaki hızlar Şekiller 3.4-3.6'da görülmektedir. Negatif hızların oluşma sebebi sayısal dalga tankının sol duvarının sürekli olarak gidip gelmesidir. Bu durum vakum oluşmasına sebep olmaktadır. Görüldüğü üzere x yönünde negatif yöndeki hız dalga çukuruna yaklaşıldıkça, pozitif yöndeki hız dalga tepesine yaklaşıldıkça artmaktadır. Başlangıçta havuzun her noktasında sıfır olan hız değeri analizde zaman ilerledikçe havuzun sonuna kadar değişim göstermektedir.



Şekil 3. 8. Durum 4 için $t = 0$ s anında y doğrultusundaki hız

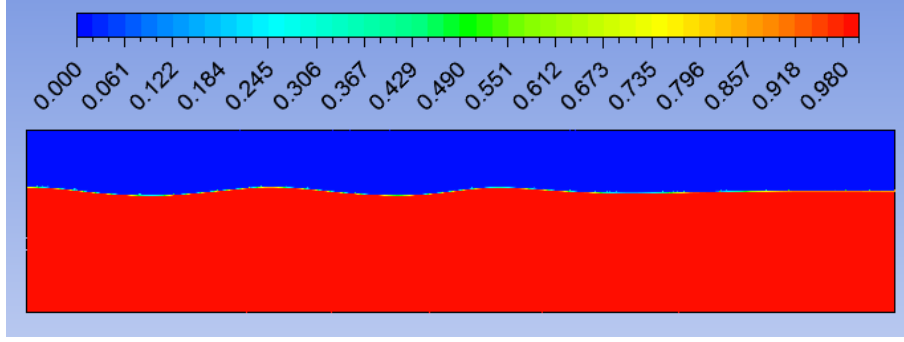


Şekil 3. 9. Durum 4 için $t = 25$ s anında y doğrultusundaki hız

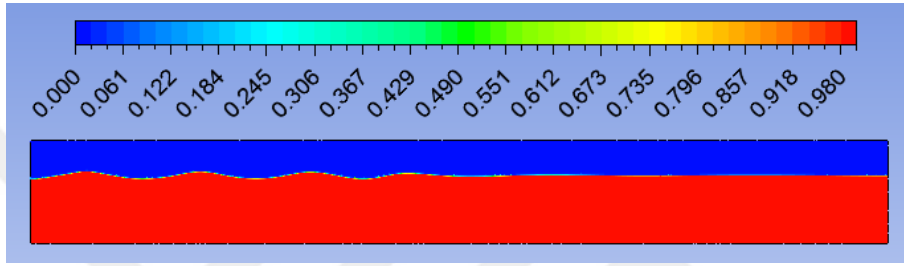


Şekil 3. 10. Durum 4 için $t = 50$ s anında y doğrultusundaki hız

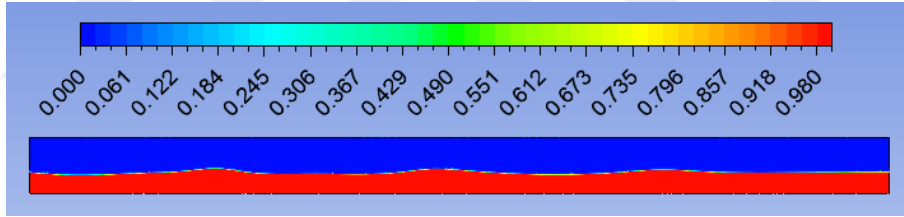
Navier-Stokes denklemleri momentum ve hıza bağlı olarak çözüm elde etmekte kullanılmaktadır, y yönündeki hız değişimleri sonucu oluşan momentum analizlerimizde basınç değeri olarak piezoelektrik yamaların üzerinde bulunduğu levhaya uygulanmıştır. Durum 4'te diğer tüm durumları temsilen y doğrultusundaki hızın analiz başlangıcında sıfır olduğu sonrasında en büyük değerlere dalgaların tepe ve çukurlarına yakın yerlerde ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 3. 11. Durum 7 için $t = 30$ s anında su hacim fraksiyonu

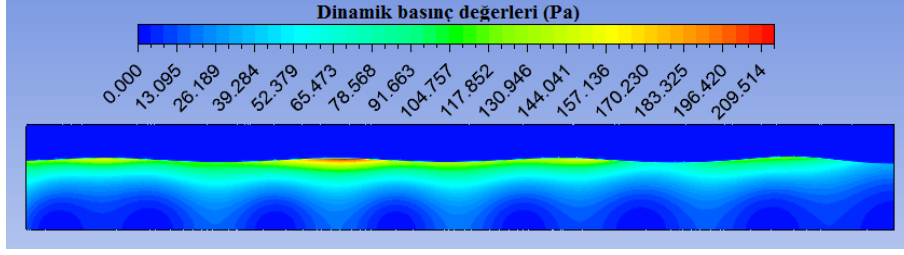


Şekil 3. 12. Durum 8 için $t = 30$ s anında su hacim fraksiyonu

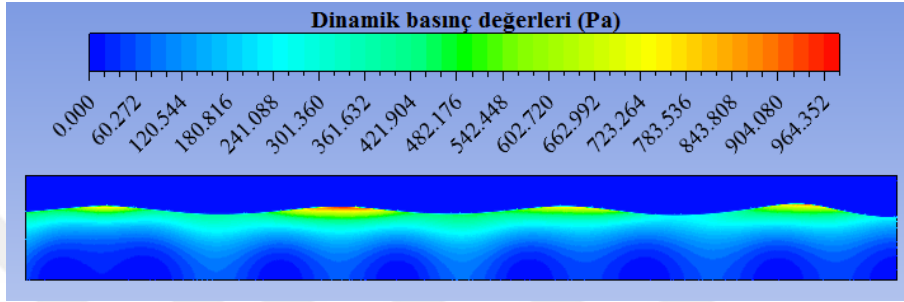


Şekil 3. 13. Durum 9 için $t = 30$ s anında su hacim fraksiyonu

Şekiller 3.10-3.12'de farklı su derinliklerine sahip sayısal dalga havuzlarında oluşan farklı periyotları ve uzunlukları olan dalgalar görülmektedir. Bu sonuçlar sisteme girilen KTF'nin istenilen özelliklerde farklı değişkenlere sahip dalgalar oluşturmakta kullanılabildiğini göstermiştir. Su derinliği arttıkça oluşan dalgaların birbirine daha fazla benzediği görülmektedir. Oluşturulan dalgaların farklı periyotta ve uzunlukta oluşu 30.saniyeye gelindiğinde farklı sayıda dalga oluşması ile doğrulanmıştır.



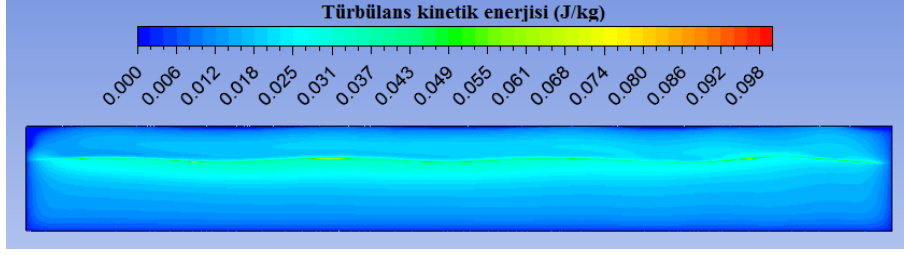
Şekil 3. 14. Durum 1 için $t = 50$ s anında dinamik basınç değerleri



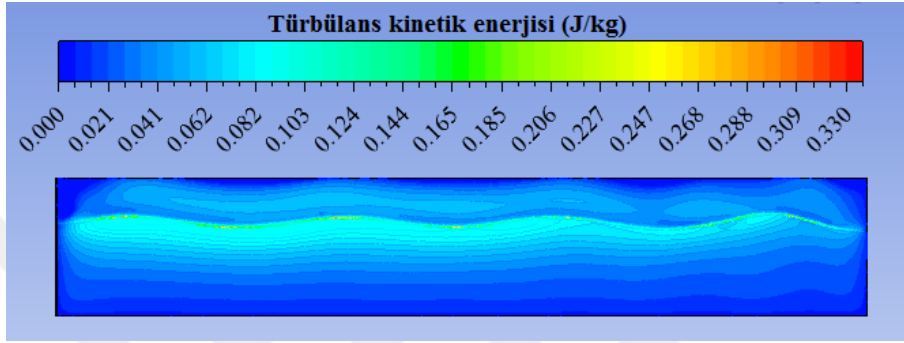
Şekil 3. 15. Durum 4 için $t = 50$ s anında dinamik basınç değerleri

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te sayısal dalga tankındaki dinamik basınç değerleri görülmektedir. Dinamik basınç değerleri hız ile doğrudan bağlantılıdır. Durum 1 için dalga yüksekliği 1 m iken Durum 4 için 2 m'dir. Bunun sonucu olarak dinamik basınç değeri Durum 4'te Durum 1'in 4 katına yakın değerlere ulaşmaktadır.

Dalga yükseliğinden kaynaklı sonuçlardaki farklılıkların gözlemlenmesi için Durum 1 ve Durum 4 karşılaştırılması diğer durumlar için de temsili anlam ifade edecektir. Bu iki durumun ortak yanı hasatçının hemen serbest su yüzeyi altında dalga oluşumuna en yakın yerde konumlandırılmış olmasıdır.

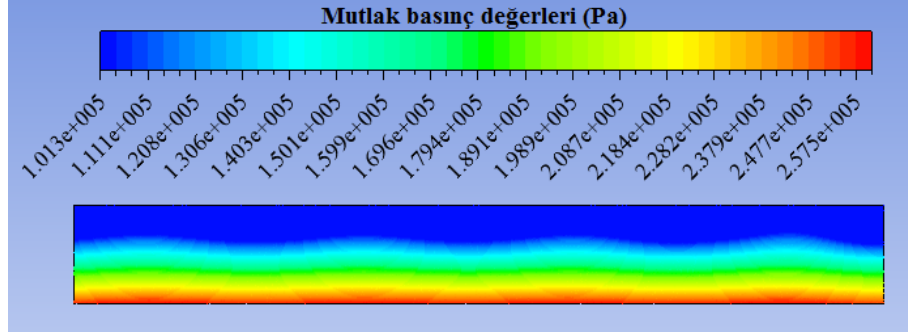


Şekil 3. 16. Durum 1 için $t = 50$ s anında türbülans kinetik enerjisi değerleri



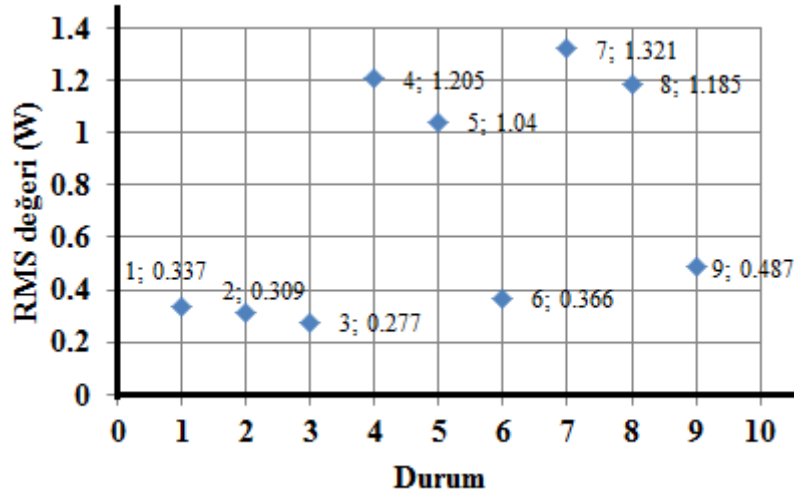
Şekil 3. 17. Durum 4 için $t = 50$ s anında türbülans kinetik enerjisi değerleri

Şekil 3.15 ve Şekil 3.14'te türbülans kinetik enerjisi değerleri görülmektedir. Durum 4 için bu değerler Durum 1'e kıyasla kat kat daha yüksektir. Bu sonuç üretilecek enerji miktarının fazla olacağına da işaret etmektedir. Çünkü temel prensipte elektrik enerjisi dalgaların kinetik enerjisinin dönüştürülmüş halidir. Kinetik enerji dalga yüksekliğinin daha fazla olmasından dolayı hızların daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Su derinlerine doğru gidildikçe su parçacık hareketi azaldığından en yüksek kinetik enerji değerlerine dalga oluşan bölgelerde yaklaşılmaktadır. Sıvı faz hareketinden dolayı gaz fazda da kinetik enerji oluşumu görülmüştür. Renk konturları kinetik enerjinin kütleye oranını içerdiğinden dalganın üstü ve altındaki renkler aynıdır ancak orana değil toplam kinetik enerji miktarına bakıldığında sıvı fazın kinetik enerjisi gaz faza göre oldukça yüksektir ki enerji üretimine dahi olanak vermektedir.



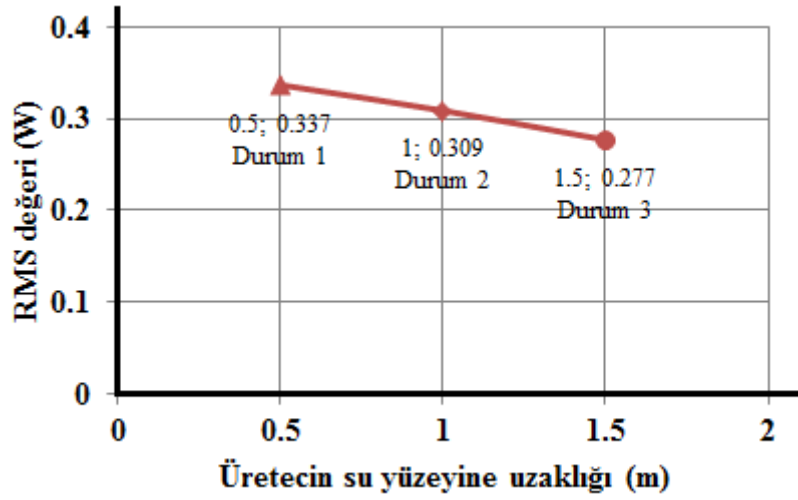
Şekil 3. 18. Durum 4 için t = 50 s mutlak basınç değerleri

Şekil 3.16'da mutlak basınç değerleri görülmektedir. Basınç çıkışı olarak belirlene bölgenin açık hava basıncına eşit değerde renklendirilmiş olması durumların benzetiminin doğruluğunu ortaya koyar niteliktedir.



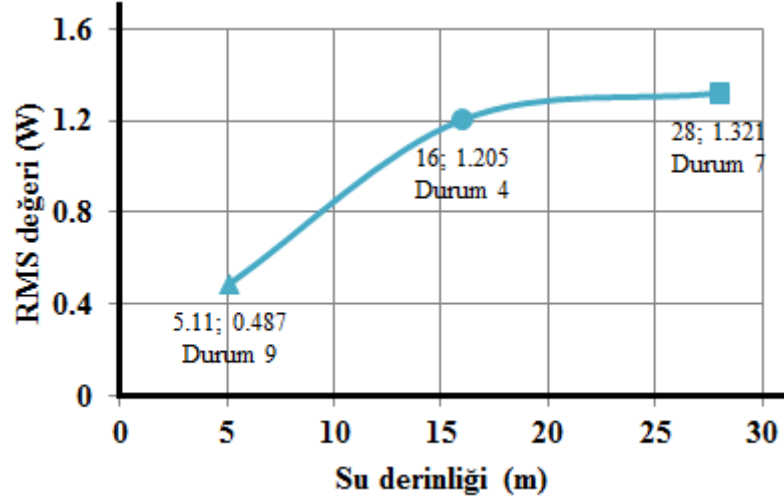
Şekil 3. 19. Durumların RMS değerleri

Şekil 3.17'de Durum 1-9 için hesaplanan RMS değerleri görülmektedir. En yüksek elektrik gücü Durum 7'de, en düşük elektrik gücü Durum 3'te hesaplanmıştır. Durum 1-3 ve Durum 6'da 1 m dalga yüksekliğinde elde edilen enerji miktarı dalga yüksekliği 2 m olan her durumdan az olarak bulunmuştur. Durum 9 dalga yüksekliği 2 m olan ancak en az elektrik üretilen durumdur. Bu doğrudan su derinliğinin diğer durumlara kıyasla çok az olmasından kaynaklanmaktadır. Su derinliğinin diğer durumlara kıyasla yüksek oranda düşük olmasına rağmen dalga yüksekliğinin Durum 1, 2, 3 ve 6'dan daha büyük oluşu daha fazla elektrik üretilmesi sonucunu doğurmuştur. Yani dalga yüksekliği parametresi su derinliği parametresinden daha önemli ve etken bir değişken olarak kabul edilebilir.



Şekil 3. 20. Su yüzeyine uzaklık RMS bağlantısı

Şekil 3.18'deki grafik incelendiğinde aynı özelliklere sahip dalgalardan üretilen enerji miktarının, hasatçının su içerisindeki konumlandırılmasına göre değiştiği görülmektedir. Su yüzeyinden derinlere inildikçe tabiki basınç artmaktadır. Ancak elektrik üretimindeki temel etken olan basınç değişimlerinin şiddetleri azaldığından dolayı derinlere inildikçe üretilen enerji miktarının azaldığı söylenebilir. Yani hasatçı su yüzeyinde oluşan dalga çukurlarına ne kadar yakın konumlandırılırsa sistemimiz o kadar verimli kabul edilebilir.



Şekil 3. 21. Su derinliği RMS bağlantısı

Şekil 3.19'deki grafik incelendiğinde su derinliğinin üretilen enerji miktarına etkisi yorumlanabilir. Dalga yüksekliğine yakın değerlere sahip su derinliklerinde üretilen enerji miktarı birkaç kat daha fazla su derinliklerinde üretilen enerji miktarına kıyasla küçüktür. Ancak enerji üretimi arasındaki oran su yüksekliğindeki değişim oranına kıyasla Durum 4 ile Durum 9'a bakıldığında düşüktür. Su yüksekliği dalga boyunun yarısına yaklaştıktan ve geçtikten sonra ise elektrik üretimindeki değişim oranı su derinliğindeki değişim oranından kat ve kat küçük olarak gözlenmektedir. Sonuç olarak su derinliği belirli bir noktadan sonra enerji üretimini çok fazla etkilememektedir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizde dalga enerjisi göz ardı edilemeyecek seviyededir. Ancak ülkemiz etrafında ki denizlerin iç denizler olmaları nedeniyle, mevcut dalga dönüşüm sistemleri sahip olduğumuz dalga enerjisini kullanılabilir hale getirmek için uygun değildir.

Bu çalışmada, piezoelektrik malzemelerin enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılabilir olmaları ile ilgili yapılan deney ve sayısal analizler incelenerek piezoelektrik malzemenin dalga enerjisi dönüşüm sistemlerine uygunluğu araştırılmış ve bilgi birikimi sağlanmaya çalışılmıştır.

Piezoelektrik malzeme ile oluşturulan enerji dönüşüm sistemi her türlü titreşimden faydalanabileceği için küçük genlik ve dalga boyunda olan dalgalardan da enerji üretilmesi imkânı verecektir.

Piezoelektrik malzeme kullanılarak oluşturulacak olan dalga enerjisi, dönüşüm sistemleri kullandıkları kaynağın doğal kaynak olması nedeniyle çevreye zarar vermeyen sistemler olacaktır.

Dalga hasatçısının su yüzeyindeki dalga çukurlarına mümkün olduğunca yakın yerleştirilmesi gerekmektedir. Dalga yüksekliklerinden 2 metreden daha az olduğu uygulamalarda üretilen anlık ortalama elektrik gücü, tezde konusu işlenen dibe sabitlenmiş sistem için 1.4 Watt değerini geçmemektedir. Dalga yüksekliğinin değişimi, üretilen elektrik enerjisi değerini dalga yüksekliği değişim oranından daha yüksek oranda artırmakta veya azaltmaktadır. Su derinliği çok sığ olmadığı sürece üretilen elektrik enerjisi miktarını çok fazla etkilememektedir. Su derinleştikçe üretilen elektrik artmaktadır.

Dalga enerjisi konusunda küçük genlikli dalgaların frekanslarının enerji üzerine olan etkisi ile ilgili sayısal ve deneysel çalışmalar çok az sayıdadır ve ülkemizde konuyla ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, yapılan bu çalışmanın yeni çalışmalara sebebiyet vereceği ve konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda kaynak olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] EÜAŞ., 2010. *Elektrik Üretim Sektör Raporu*, Cilt 1.
- [2] **Özdamar, A.**, 2001. Rüzgar enerji ve rüzgar türbinlerine genel bakış, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı*, İzmir.
- [3] **Örer, G., Gürsel, T., Özdamar, A., Özbalta, N.**, 2003. Dalga enerjisi tesislerine genel bakış, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı*, İzmir.
- [4] **Sabuncu, T.**, 1983. *Gemi Hareketleri*, İTÜ Kütüphanesi, No:1248, İstanbul, 412s.
- [5] **Yüksel, Y., Çevik, E., Çelikoglu, Y.**, 1998, *Kıyı ve Liman Mühendisliği*, İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Subesi Yayınları, Alaz Ofset, Ankara, 401s.
- [6] **Gunner, M., Barstow, S., Kabuth, A., Pontes, M. T.**, 2010. Assesing the global wave energy potential, *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Volume 3 Shanghai, China, June 6–11,
- [7] **Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Neilsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.T., Schild, P., Sjöström, B.O., Sorensen, H.C., Thorpe, T.**, 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 405-431.
- [8] **Ün, Ü.T.**, 2003. Dalga enerjisi teknolojisi, ekonomisi, çevresel etkisi ve dünyadaki durumu, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı*, İzmir.
- [9] **Eral, M.**, 1998. Tübitak-TTGV Bilim-Teknoloji-Sanayi Tartışmaları platformu, *Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu Raporu*, Ankara.
- [10] **gooenergy.com.**

- [11] **Çokan, M.**, 2003. Dalga enerjisi (Dalga elektrik santralleri), *II. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı*, **1(439)**, 118 - 125.
- [12] **Özdamar, A.**, 2000. Dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi üzerine bir araştırma, Çeşme örneği, *Su Ürünleri Dergisi*. Cilt No: 17, Sayı 1-2.
- [13] **Alpli, R.**, 2012. Ege Denizi-Akdeniz dalga atlası ve küresel iklim değişiminin dalga iklimine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [14] **Saraçoğlu, K. E.**, 2011. Karadeniz ile Marmara genizi galga modellemesi ve analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [15] **Pehlivan, Y.**, 2003. Bor, Toryum, Neptünyum gerçeği ve Türkiye'deki Enerji Sorununa Bir Bakış, Fen Edebiyat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [16] **Aydıncak, İ.**, *Akıllı Malzemeler ve Havacılık*, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara.
- [17] **Vassiliadis, S., Matsouka, D., Vossou, C., Prekas, K., Potirakis, S., Soin, N.**, 2014. piezoelektrik liflerinden üretilmiş elektriğin ölçülmesi, *XIII. Uluslararası İzmir Tekstil ve Hazır Giyim Sempozyumu*, İzmir, 2-5 Nisan.
- [18] **Vatansever, D., Siores, E., Shah, T.**, 2015. Alternative resources for renewable energy: piezoelectric and photovoltaic smart structures.
- [19] **Bardeweel, H., Al Hattamleh, H. O., Richeards, R., Bahr, D., Richards, C.**, 2006. A comparison of piezoelectric materials for MEMS power generation, *The Sixth International Workshop Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, Berkeley, U.S.A., Nov. 29- Dec.1.

- [20] **Gökhasan, O., Örs, O., Dokur, E., Kurban, M.**, 2013. Ulaşım sistemlerinde titreşim tabanlı enerji hasadı ve uygulamalı analizi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **1**, 2148-2330.
- [21] **Özpak, Y.**, 2014. Energy harvesting from piezoelectric stacks via impacting beam, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [22] **Avşar, A. L., Şahin, M.**, 2012. Piezoelektrik malzemeler yardımıyla enerji hasadı, *SAVTEK, Savunma Teknolojileri Kongresi*, ODTÜ, Ankara.
- [23] **Şenyürek, A., Demetgül, M.**, 2015. Kendi enerjisini üretebilen klavye tasarımı, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, **2**, 9-19.
- [24] **Erturk, A. ve Inman, J.**, **2011**. *Piezoelectric Energy Harvesting* 412 pages April 2011
- [25] **Makki, N. ve Pop, R.**, **2011** *Cansmart Cinde Izfp Piezoelectric Power Generation In Automotive Tires*, Iliev Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology 2000, Simcoe St N, Oshawa, Ontario, Canada L1H7K4
- [26] **Liu, J.Q., Fang, H.B., Xu, Z.Y., Mao, X.H., Shen, X.C., Chen, D., Liao, H., Cai, B.C.** 2008. *A MEMS-Based Piezoelectric Power Generator Array For Vibration Energy Harvesting*, *Microelectronics Journal*, **39**(5), 802 - 806.
- [27] **Jong, P.H. Loendersloot, R. and Boer, A. Hoogt, P.J.M.**, 2011. Power harvesting in a helicopter lag damper, *SMART'11*, , Saarbrücken, Germany, Temmuz 6-8.
- [28] **Ovejas, V. J., Cuadras, A.**, 2011. Multimodal piezoelectric wind energy harvesters, *Smart Materials Structures*, **20** (8), 085030.

- [29] **Li, S., Yuan, J., Lipson, H.**, 2009. Vertical-stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting , *ASME Conference Smart Material Adaptive Structures Intelligent Systems*, Oxnard, CA, 20-24 Eylül.
- [30] **Gao, X. T., Shih, W. H., Shih, W. Y.**, 2013. Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension, *IEEE Trans Ind Electron*.
- [31] **Zurkinden, A., S., Campanile, F., Martinelli, L.**, 2007. Wave energy converter through piezo-electric polymers, *Proceedings of the COMSOL users conference*.
- [32] **Ott, J.**, 2013. Design of a piezoelectric harvesting system for shallow ocean waves, *Master Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, CT.
- [33] **Xie, X. D., Wang, Q., Wu, N.**, 2014. Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves, *Journal of Sound and Vibration*,
- [34] **Xie, X. D., Wang, Q., Wu, N.**, *Energy Harvesting From Transverse Ocean Waves By a Piezoelectirc Plate*, International Journal Engineering Science.
- [35] **Wu, N., Wang, Q., Xie, X. D.**, 2015. *Ocean Wave Energy Harvesting With A Piezoelectric Coupled Buoy Structure*, Ocean Research.
- [36] **Liang, B., Wu, G., Liu, F., Fan, H., Li, H.**, 2015. Numerical study of wave transmission over double submerged breakwaters using non-hydrostatic wave model, *Oceanologia*, **57**, 308-317.
- [37] **Dong, Z., Zhan, J-m**, 2009. Numerical model of wave evolution and runup in shallow water, *Journal of Hydrodynamics Ser B.*, **21**(6), 731-738.
- [38] **Finnegan, W., Goggins, J.**, 2015. Linear irregular wave generation in a numerical wave tank, *Applied Ocean Research*, **52**, 188-200.

- [39] **Zhu, Y., Li, Y., Tao, A., Zhang, J.**, 2015. Numerical modeling of wave interaction with double curtain-wall breakwater, *Procedia Engineering*, **116**, 1009-1018.
- [40] **Oijeh, N. C., Barltrop, N. D. P., Xu, L.**, 2009. RANS investigation of kinematics of an alternative extreme wave, *Ocean Engineering*, **36**, 1415-1525.
- [41] **Liu, L-T., Lin, C-C.**, 2012. Wave-maker stroke design and wave decay methods in numerical wave tank study, *Journal of C.C.I.T.*, **41**, 101-106.
- [42] **Wu, N. J., Tsay, T. K., Chen, Y. Y.**, 2014. Generation of stable solitary waves by a piston-type wave maker, *Wave Motion*, **51**, 240-255.
- [43] **Saincher, S., Banerjee, J.**, 2015. Design of a numerical wave tank and wave flume for low steepness waves in deep and intermediate water”, *Procedia Engineering*, **116**, 221-228.
- [44] **Liaghat, T.**, 2014. Two-way fluid-structure coupling in vibration and damping analysis of an oscillating hydrofoil”, *Yüksek Lisans Tezi*, Université De Montréal Département De Génie Mécanique, Montreal, Fransa.
- [45] **Liu, J.Q., Fang, H.B., Xu, Z.Y., Mao, X.H., Shen, X.C., Chen, D., Liao, H., Cai, B.C.**, 2008. A MEMS-Based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting, *Microelectronics Journal*, **39** (5), 802 - 806.
- [46] **Wang, B., Liu, H.**, 2005. Higher order boussinesq-type equations for water waves on uneven bottom, *Applied Mathematics and Mechanics*, **26** (6), 774-785.
- [47] **Liang, X., Yang, J., Li, J., Li, X.**, 2011. A numerical study on local characteristics of predetermined irregular wave trains”, *Ocean Engineering*, **38**, 651-657.

- [48] **Bhinder, M. A., Babarit, A., Gentaz, L., Pierra Ferrant, P.**, 2015. Potential time domain model with viscous correction and CFD analysis of a generic surging floating wave energy converter, *International Journal of Marine Energy*, **10**, 70-96.
- [49] **Gomes, M. N., Olinto, C. R., Rocha, L. A. O., Souza, J. A., Isaoldi, L. A.**, 2009 ., *Thermal Engineering (Engenharia Termica)*, **8**(1), 44-50.
- [50] **Mc Cornick M. E.**, 1976. Ocean engineering wave mechanics, John Wiley & sons, USA, New York.
- [51] **Dean, R. G., Darlymple R. A.**, 1991. Water wave mechanics for engineer and scientiss, World Scientific, Singapore.
- [52] **Firat, M.**, 2010. Yeni nesil yanma odalarında akış ve ısı transferinin sayısal olarak modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [53] ANSYS Fluent 14.0: User's Guide.
- [54] **Sönmez, N.**, 2007. Buz depolamalı sistemlerde ısı transfer yapılarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, C. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- [55] **Liu, Z., Hyun, B-S., Hong, K-y.**, 2008. Application of numwrical wave tank to OWC air chamber for wave energy conversion, *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, Kanada, 6-11 Temmuz, s.350-356
- [56] ANSYS Fluent 14.0 Theory Guide.
- [57] **Lee, C. K., Moon, F. C.**, 1990. Modal sensors and actuators. *Journal of Applied Mechanics*, **57**, 434-441.

ÖZGEÇMİŞ

Halil İbrahim YAMAÇ, 19 Ocak 1990 yılında Mersin’de doğmuştur. İlköğrenimini Mersin’de tamamlamıştır. Orta Öğrenimini İçel Anadolu Lisesi’nde tamamladıktan sonra, 2007 yılında Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (Otomotiv Mühendisliği Programı)’ne kayıt yapmış ve bu bölümden 2012 yılında mezun olmuştur. 2013 yılında, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma Görevlisi kadrosuna atanmış olup, halen bu görevine devam etmektedir. 2014 yılı Şubat ayında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği (Mekanik) Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.