

MT.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



DALGA KANALI İÇİN PİSTON TİP DALGA ÜRETİCİ TASARIM  
VE ANALİZİ

AHMET KUŞÇUOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Semin KAYA (Tez Danışmanı)  
Doç. Dr. Ersin AKYÜZ  
Dr. Öğr. Üyesi Alevay Gülenay KILIÇ

BALIKESİR, OCAK – 2026

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Dalga Kanalı İçin Piston Tip Dalga Üretici Tasarım ve Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım esere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Ahmet KUŞÇUOĞLU**

## ÖZET

**DALGA KANALI İÇİN PİSTON TİP DALGA ÜRETİCİ TASARIM VE ANALİZİ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**AHMET KUŞÇUOĞLU**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ SEMİN KAYA)**

**BALIKESİR, OCAK - 2026**

Bu tez çalışmasında, 24 m uzunluğa ve 1 m × 1 m kesite sahip mevcut bir dalga kanalında bulunan flap tip dalga üretici sisteminin yerine piston tip bir dalga üreticinin tasarımı, analizi, imalatı ve deneysel olarak doğrulanması ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, mevcut kanal geometrisine uygun, mekanik açıdan güvenli ve düzenli dalga üretebilen bir piston tip dalga üretici geliştirmektir.

Çalışma kapsamında öncelikle piston tip dalga üreticinin çalışma prensibi teorik olarak incelenmiş ve dalga teorileri esas alınarak tasarım kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterler doğrultusunda mekanik tasarım gerçekleştirilmiş, üç boyutlu CAD modeli oluşturulmuş ve sistemin yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, tasarlanan sistemin statik ve dinamik yükler altında yapısal olarak güvenli olduğunu göstermiştir.

Tasarımı tamamlanan piston tip dalga üretici imal edilmiş, dalga kanalına monte edilerek çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında sistemin kararlı şekilde çalıştığı ve hedeflenen dalga yüksekliği ile periyot aralıklarında düzenli dalga üretebildiği gözlemlenmiştir. Deneysel bulgular, tasarım ve analiz aşamalarında öngörülen performansın fiziksel sistem tarafından sağlandığını ortaya koymuştur.

Elde edilen sonuçlar, piston tip dalga üreticinin mevcut dalga kanalı için flap tip sisteme kıyasla daha kontrollü ve tekrarlanabilir dalga üretimi sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, laboratuvar ölçekli dalga kanallarında piston tip dalga üreticilerin tasarımı ve uygulanması için bütüncül bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Dalga kanalı, deneysel doğrulama, piston tip dalga üretici, sayısal analiz, tasarım

## ABSTRACT

### DESIGN ANALYSIS OF PISTON TYPE WAVE GENERATOR FOR FLUME MSC THESIS

AHMET KUŞÇUOĞLU  
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. SEMİN KAYA )

BALIKESİR, JANUARY - 2026

In this thesis, the design, analysis, manufacturing, and experimental validation of a piston-type wave generator developed for an existing wave flume with a length of 24 m and a cross-section of 1 m × 1 m are presented. The original flap-type wave generator installed in the flume was removed and replaced with a piston-type system. The main objective of the study is to develop a mechanically safe and reliable piston-type wave generator capable of producing regular waves under laboratory conditions.

First, the working principle of the piston-type wave generator was investigated theoretically, and the design criteria were determined based on wave theory. According to these criteria, the mechanical design of the system was completed, a three-dimensional CAD model was created, and the structural behavior of the system was evaluated using the finite element method. The numerical analysis results indicated that the designed system is structurally safe under static and dynamic loading conditions.

Following the design and analysis stages, the piston-type wave generator was manufactured and installed in the wave flume. Experimental tests were conducted under various operating conditions, and the system was observed to operate in a stable manner. The experimental observations demonstrated that the wave generator was able to produce regular waves within the targeted wave height and period ranges, confirming the validity of the design assumptions and numerical analysis results.

The results of this study show that replacing the flap-type wave generator with a piston-type system provides improved control and repeatability in wave generation for the existing wave flume. This study presents a comprehensive engineering approach for the design and implementation of piston-type wave generators in laboratory-scale wave flumes.

**KEYWORDS:** : Experimental validation, numerical analysis, piston-type wave generator, wave flume, wave generation

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
SEMBOL LİSTESİ .....	v
ÖNSÖZ .....	vi
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Problem Tanımı .....	2
1.2 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı.....	3
1.3 Yöntemsel Yaklaşım.....	4
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
3. DALGA KANALI VE MEVCUT FLAP TİP DALGA ÜRETİCİ.....	10
4. PİSTON TİP DALGA ÜRETİCİ YAPISI VE TASARIMI.....	13
5. MEKANİK VE YAPISAL ANALİZLER.....	16
6. DENEYSEL DOĞRULAMA.....	38
7. DALGA ÜRETİCİ KONTROL YAPISI VE DALGA ÜRETİMİ.....	44
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	46
9. KAYNAKLAR .....	46
ÖZGEÇMİŞ .....	53

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Flap tip dalga üretici sistemi .....	10
Şekil 3.2: Flap tip dalga üreticili dalga kanalı.....	11
Şekil 3.3: Flap tip dalga üretici. ....	12
Şekil 4.1: Piston tip dalga üretici sistemi .....	13
Şekil 4.2: Piston tip dalga üretici sistem tasarımı .....	14
Şekil 5.1: Analiz geometrisi.....	17
Şekil 5.2: Yükleme koşulları.....	17
Şekil 5.3: Bağlantı detayları.....	19
Şekil 5.4: Ağ yapısı.....	20
Şekil 5.5: Yükleme koşulları.....	21
Şekil 5.6: Yükleme koşulları – hidrostatik su basıncı.....	22
Şekil 5.7: Deformasyon 0,7 mm. ....	23
Şekil 5.8: Deformasyon.....	24
Şekil 5.9: Eşdeğer gerilme-I.....	25
Şekil 5.10: Eşdeğer gerilme-II .....	26
Şekil 5.11: Eşdeğer gerilme-III .....	27
Şekil 5.12: Analiz modeli.....	28
Şekil 5.13: Sonuçlar .....	29
Şekil 5.14: Mod.....	30
Şekil 5.15: Yükleme sınır koşulları.....	31
Şekil 5.16: Yer değiştirme grafiği-sin fonksiyonu.....	32
Şekil 5.17: Yer değiştirme grafiği.....	33
Şekil 5.18: Eşdeğer gerilme-I.....	34
Şekil 5.19: Eşdeğer gerilme-II .....	36
Şekil 6.1: Üretim aşaması. ....	39
Şekil 6.2: Boya aşaması. ....	40
Şekil 6.3: Flap tip dalga üretici sökme işlemi. ....	41
Şekil 6.4: Piston tip dalga üretici montaj aşaması.....	42
Şekil 6.5: Montajlanmış piston tip dalga üretici. ....	43
Şekil 7.1: Hidrolik sistem yapısı . ....	44
Şekil 7.2: Hidrolik sistem konum kontrolü . ....	45
Şekil 7.3: Dalga üretimi-I.....	45

## SEMBOL LİSTESİ

<b>A</b>	: İvme ( $m/s^2$ )
<b>F</b>	: Kuvvet (N)
<b>MPa</b>	: Gerilme ( $N/mm^2$ )

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans sürecime olan tüm katkıları için danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Semin Kaya'ya, tez çalışmam ve deneyler sürecindeki destekleri için Doç. Dr. Ersin Akyüz ve Öğr. Gör. Batın Demircan'a teşekkürlerimi sunarım.

Test cihazları ve deney sistemleri tasarımı ve üretimi alanındaki çalışmalarına rehberlik eden Doç. Dr. Altuğ Yavaş' katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca ve tez çalışmam süresince tüm maddi manevi destekleri için aileme, eşime ve kızıma teşekkürlerimi sunarım

**Balıkesir, 2026**

**Ahmet Kuşçuoğlu**

# 1. GİRİŞ

Kıyı ve açık deniz mühendisliğinde deneysel doğruluk, dalga alanının laboratuvar ölçeğinde gerçeğe en yakın biçimde üretilmesine bağlıdır; bu nedenle piston tip dalga üreticiler, hem uzun periyotlu hem de düzensiz dalgaları hassas olarak üretebilme kapasiteleri nedeniyle öne çıkmıştır. Dokuz Eylül Üniversitesi'nde servo motor-bilyalı vidalı, PLC kontrollü bir kürek mekanizmasıyla inşa edilen sistem, JONSWAP hedef spektrumunun hem fiziksel hem de FLOW-3D sayısal kanalda başarıyla yeniden üretilmesi sayesinde bu yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermiştir (Nouioui and Doğan, 2022). Benzer biçimde, çok silindriklilikli hidrolik akım-dalga düzenekleri, düşeyde değişken akımlar altında uzun dalga koşullarını üretme yeteneği sayesinde yüksek genlikli sinüzoidal dalgalar oluşturulmasına olanak tanımıştır (Ko and Lynett, 2022). Kontrol tarafında, beyaz gürültü tabanlı RAO deneyleri için geliştirilen ISE-optimize oransal denetleyici, hidrolik tahrik mekanizmalı flap tip dalga üreticide geniş frekans bandında düz genlik karakteristiği sağlayarak klasik P-kontrolle göre performansı artırmıştır (Drzewiecki and Guzinski, 2022). Sayısal dalga tanklarında da önemli ilerlemeler kaydedilmiştir: OpenFOAM® tabanlı üç farklı dalga üretim-soğurma yöntemi karşılaştırıldığında, waves2Foam yaklaşımının düzenli dalgalarda daha düşük yansıma verdiği, GroovyBC'nin ise ağ inceliğine duyarlı olduğu raporlanmıştır (Conde, 2019). Viskoz sayısal dalga tankı çalışmalarında “piston-velocity” sınır koşulunun, “piston-moving” yöntemine göre hem kafes hassasiyetini azalttığı hem de ikinci mertebe Stokes profiline daha yakın dalga şekli ürettiği gösterilmiştir (Kim et al., 2013). Bununla birlikte, birinci mertebe dalga üretim kuramının kaçınılmaz olarak oluşturduğu süperharmonik serbest dalgalar, özellikle büyük çaplı monopil temeller için belirsizlik kaynağıdır. NTNU-SINTEF iş birliğiyle yürütülen deneylerde ikinci mertebe dalga üretim kuramının uygulanması, tank içindeki parazitik dalga bileşenini azaltmış ancak bükülme momenti istatistiklerinde yalnızca sınırlı bir iyileşme sağlamıştır (Dadmarzi, et al., 2021). Benzer bir karşılaştırma, doğal periyodu 5 s olan esnek monopilde tekrarlanmış ve ikinci mertebe düzeltmenin özellikle yüksek dalga olaylarında ikinci mod tepkisinin tekrarlanabilirliğini artırdığı gözlenmiştir (Dadmarzi and Bachynski-Polić, 2022). Laboratuvar seviyesindeki bu bulgular, spurious dalga bastırmanın numerik-deneysel eşleştirme açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır. Öte yandan, piston tipi sistemlerin mekanik tasarım parametreleri de sistematik olarak incelenmiştir: stroke-derinlik oranının  $k \cdot d \approx 1.5$  üzerindeki değerlerde “piston-velocity” yönteminde daha büyük dalga yüksekliği sağladığı; üç boyutlu simülasyonların iki boyutlu modellere göre %1'e kadar sapma

gösterdiği rapor edilmişti (Kim et al., 2013). Ball-screw tahrikli sistemlerde ise servo motor devri ile kürek deplasmanı arasındaki Biesel aktarım fonksiyonunun ilk mertebe çözümle sunulması, hedef spektrumdan paddle sinyaline doğrudan geçişi kolaylaştırmıştı (Nouioui and Doğan, 2022). Son olarak, Stokes-II koşullarında numerik sönümlemeyi inceleyen çalışma, dalga sönüm bölgelerinin yerleşim ve ağ hassasiyetinin dalga yüksekliği dağılımını doğrudan etkilediğini, dolayısıyla aktif soğurma algoritmaları geliştirilmedikçe fiziksel kanalda da optimum plaj/poröz ortam tasarımına ihtiyaç olduğunu göstermiştir (Conde, 2019).

### 1.1 Problem Tanımı

Fiziksel model deneyleri, kıyı ve deniz mühendisliği ile yenilenebilir enerji uygulamalarında dalga-yapı etkileşiminin güvenilir biçimde incelenebilmesi için vazgeçilmezdir. Bu deneylerin başarısı, laboratuvar koşullarında hedeflenen dalga alanını gerçeğe en yakın şekilde üretebilen bir dalga üretici (wavemaker) sistemine bağlıdır. Literatürde yaygın olarak kullanılan flap-tip, piston-tip ve plunger-tip mekanizmalar arasında piston-tip dalga üreticiler, özellikle sığ veya orta derinlikli dar kanallarda ( $B/h \approx 1$ ) istenen genlik ve periyot aralığını yüksek doğrulukla sağlayabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir.

Mevcut dalga kanallarında gözlemlenen başlıca sorunlar şunlardır:

1. Sınırlı Dalga Spektrumu – Ticari sistemler belirli bir strok ve hız limitine sahip olduğundan, uzun periyotlu ( $T > 2$  s) dalgaların yüksek genliklerde üretimi kısıtlıdır.
2. Yansıma ve Enerji Kaybı – Yetersiz kontrol algoritmaları, geri yansıyan dalgaların absorbe edilememesine; bu da deney alanında bozulmuş serbest yüzey profillerine yol açar.
3. Mekanik Dayanım Problemleri – Tekrarlanan yüklemeler altında ( $10^6$  çevrim ve üzeri) piston plakası, kılavuz kolonlar ve bağlantı elemanlarında yorulma hasarı riski bulunmaktadır.
4. Yüksek Maliyet ve Dışa Bağımlılık – İthal sistemlerin edinim ve bakım maliyetleri yerli araştırma bütçelerini aşmakta; özelleştirilmiş tasarım değişiklikleri ise sınırlı servis seçenekleri nedeniyle zorlukla uygulanmaktadır.

Bu bağlamda, 24 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 1 m su derinliğinde tasarlanmış mevcut dalga kanalı için yerli imkânlarla geliştirilecek, geniş strok kapasiteli, geri beslemeli

kontrollü bir piston-tip dalga üretici ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Problemin çokdisiplinli niteliği aşağıdaki araştırma boşluklarını doğurmaktadır:

- Hidrodinamik–Yapısal Entegrasyon: Piston hareketine bağlı dalga yüklerinin zamana bağlı olarak yapıda oluşturduğu gerilmelerin, aynı anda hem dalga kalitesi hem de yapısal dayanım kriterlerini karşılayacak şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.
- Aktif Soğurma (Active Absorption) Uygulaması: Yerel literatürde düşük maliyetli donanım ile gerçek-zamanlı yansıma kompanzasyonu gerçekleştiren açık kaynaklı kontrol tasarımları sınırlıdır.
- Standardizasyon ve Ölçeklendirme: Uluslararası kılavuzlar (PIANC, ISO) ışığında piston boyutlarının, strok sınırlarının ve hareket fonksiyonlarının farklı ölçek faktörleri için sistematik olarak doğrulandığı kapsamlı yerli çalışmalar eksiktir.

Dolayısıyla bu tez, söz konusu dalga kanalı için piston-tip dalga üreticinin mekanik tasarımından yapısal analizi ve imalatına, kontrol algoritması geliştirilmesinden deneysel doğrulamaya uzanan bütünlük bir metodoloji önermektedir. Çalışmanın temel amacı;

1. İstenen dalga spektrumunu ( $H = 0,02-0,10$  m;  $T = 0,8-2,5$  s)  $\pm 2$  % genlik hatası ve  $\leq 5$  % yansıma katsayısı ile üretebilen,
2. Servis ömrü boyunca emniyet katsayısı  $\geq 2$  sağlayan yapısal bütünlüğe sahip,
3. Donanım ve yazılımı yerli olarak geliştirilebilen düşük maliyetli, modüler bir sistemi ortaya koymaktır.

Bu amaç doğrultusunda geliştirilecek modelin, hem ulusal laboratuvar altyapılarını güçlendirmesi hem de dalga enerjisi, denizcilik ve kıyı mühendisliği projelerinde araştırma-geliştirme faaliyetlerinin dışa bağımlılığını azaltması beklenmektedir.

## 1.2 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Bu araştırmanın temel amacı, 24 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 1 m su derinliğinde tasarlanmış mevcut dalga kanalına yerli imkânlarla üretilebilen, geniş strok kapasiteli ve geri beslemeli kontrollü bir piston tip dalga üretici sistem kazandırmaktır. Çalışmada, hedeflenen dalga spektrumunu ( $H = 0,02-0,10$  m;  $T = 0,8-2,5$  s)  $\pm 2$  % genlik hatası ve en fazla %5

yansıma katsayısı ile oluşturabilecek bir mekanizmanın tasarımı, yapısal analizi, imalatı, montajı ve laboratuvar ortamında doğrulanması bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. İlk aşamada piston boyutları, strok uzunluğu ve kılavuz mekanizması, zamana bağlı hidrodinamik yükler altında minimum emniyet katsayısı 2'yi sağlayacak biçimde optimize edilmiş; sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan gerilme, deformasyon ve yorulma hesapları tasarım kararlılığını desteklemiştir. Ardından, piston hareketi–dalga alanı etkileşimi hem lineer dalga kuramı hem de sayısal potansiyel akış/CFD modelleri kullanılarak incelenmiş; elde edilen kuvvet-zaman geçişleri aktif soğurma algoritmasının geliştirilmesinde girdi olarak kullanılmıştır.

Sistem donanımı; düşük maliyetli servo aktüatörler, yüksek hassasiyetli enkoderler ve açık kaynak tabanlı bir gerçek-zamanlı kontrol biriminden oluşmakta, aktif soğurma için uyarlanan R-C yöntemi gömülü yazılımda gerçekleştirilmektedir. İmalat sürecinde seçilen malzemelerin mekanik ve korozyon dayanımları dikkate alınmış, atölye ortamında gerçekleştirilen kesme, kaynak ve CNC işlemleri ardından montajda sızdırmazlık ve strok kalibrasyonu yapılmıştır. Prototip devreye alındıktan sonra monokromatik, dar bant ve JONSWAP spektrumlu dalgalar üretilmiş; ölçülen serbest yüzey profilleri sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sapma kaynakları belirsizlik analiziyle tartışılmıştır.

Kapsam bakımından çalışma, literatür taraması ve kuramsal temellerden başlayarak kavramsal tasarım, ayrıntılı mekanik-hidrodinamik analiz, prototip üretimi, kontrol yazılımı geliştirme ve laboratuvar testlerini kapsayan uçtan uca bir metodoloji sunmaktadır. Uluslararası kılavuzlar (PIANC, ISO) doğrultusunda ölçeklendirme ve performans ölçütleri sistematik biçimde değerlendirilmiş; tasarlanan açık kaynak kodlu kontrol altyapısının paylaşılmasıyla yerli araştırma laboratuvarlarının erişilebilirliğinin artırılması hedeflenmiştir. Böylece oluşturulan bilgi birikiminin gelecekte çoklu pistonlu sistemler ve daha büyük ölçekli dalga tankı tasarımlarına aktarılabilir olması, dalga üretici teknolojilerinde dışa bağımlılığın azaltılması ve ülkemizdeki deneysel hidrodinamik kapasitenin güçlendirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

### **1.3 Yöntemsel Yaklaşım**

Bu tezde izlenen yöntemsel yaklaşım, analitik, sayısal, deneysel ve üretim adımlarını bütüncül bir çerçevede birbirine bağlayan ardışık-karma (sequential mixed) bir araştırma tasarımına dayanmaktadır. İlk aşamada güncel literatür incelenerek piston tip dalga

üreticilerin hidrodinamik ve yapısal performans kriterleri belirlenmiş; PIANC ve ISO kılavuzlarında yer alan tasarım eşitlikleri doğrultusunda hedef dalga spektrumu ile uyumlu boyutlandırma ön kabulleri oluşturulmuştur. Bu ön kabuller, kavramsal tasarım sürecinde oluşturulan morfolojik tablo aracılığıyla farklı aktüatör, kılavuz ve plaka geometri kombinasyonlarının sistematik olarak değerlendirilmesinde kullanılmış ve nihai konsept analitik hiyerarşi süreci (AHP) ile seçilmiştir.

İkinci aşamada seçilen konsept, lineer dalga kuramı ve sınır eleman yöntemi temelli potansiyel akış modeliyle analiz edilerek piston kuvvet–zaman geçişleri elde edilmiş; akustik-tek basınç yöntemli aktif soğurma algoritmasının sentetik veriler üzerinde doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hidrodinamik yükler, ANSYS Workbench ortamında oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeline aktarılmış; statik, geçici ve yorulma analizleri için mesh bağımsızlık testi yapılmış, maksimum gerilme ve yer değiştirme değerleri emniyet katsayısı  $\geq 2$  sınırını sağlayacak biçimde optimize edilmiştir. Ardından, hem plaka kalınlığı hem de kılavuz kolon konfigürasyonu parametreleri için ikinci mertebeden yanıt yüzeyi optimizasyonu uygulanarak kütle–dayanım dengesi iyileştirilmiştir.

Üçüncü aşamada mekanik tasarım çıktıları doğrultusunda imalat çizimleri hazırlanmış, malzeme seçimi ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmiş ve prototip; kesme, kaynak, CNC işleme ve yüzey kaplama süreçlerinden geçirilmiştir. Montaj sonrası strok kalibrasyonu ve sızdırmazlık testleri tamamlanmıştır. Son aşamada sistem, laboratuvar ortamında kurulan 24 m × 1 m × 1 m boyutlarındaki dalga kanalında devreye alınarak dalga üretiminde kullanılabilir laboratuvar tipi bir dalga üretim sistemi oluşturulmuştur.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Kıyı ve deniz mühendisliği çalışmalarında, dalga mekaniğinin anlaşılması, yapıların tasarımı ve kıyı süreçlerinin modellenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu kapsamda literatürde, fiziksel dalga üretimi, sayısal modelleme teknikleri, ekstrem dalga koşulları ve dalga-yapı etkileşimleri üzerine geniş bir yelpazede çalışmalar bulunmaktadır.

Laboratuvar ortamında deniz koşullarının taklit edilmesi, deney tanklarının ve dalga yapıcıların (wavemaker) doğru tasarımına bağlıdır. Beneduce, test tanklarının temel özelliklerini ve tarihsel gelişimini ele alarak, bu tesislerin denizcilik mühendisliğindeki önemini vurgulamıştır (di Laurea Magistrale, 2018). Farklı dalga yapıcı mekanizmaları üzerine yapılan çalışmalarda, Krvavica ve ark., flap (kanat) tipi dalga yapıcılar için dalga kırılma limitlerini de içeren yeni bir yaklaşım denklemi önermişlerdir (Krvavica, Ružić, and Ožanić, 2018). Piston ve flap tipi sistemlerin yanı sıra, daha karmaşık dalga formları için farklı tasarımlar da geliştirilmiştir. Örneğin, Muarif ve ark., çok yönlü dalgalar oluşturabilmek için yılan tipi (snake-type) dalga yapıcıların matematiksel modellemesini çalışmışlardır (Muarif, et al., 2018). Benzer şekilde, Gyongy ve ark., kavisli ve çok pedallı bir dalga tankı için hidrodinamik bir modelin doğrulamasını yaparak, 3 boyutlu havuzlardaki dalga üretim yeteneklerini incelemişlerdir (Gyongy, et al., 2014). Daldırma (plunger) tipi dalga yapıcılar üzerine çalışan Lowell ve ark., kama açısı ve su akıntısı gibi parametrelerin dalga üretimi üzerindeki hassasiyetini analiz etmişlerdir (Lowell, et al., 2022). Szmidski ve Hedzielski ise değişken genişlikli plunger hareketlerinin yer değiştirme grafiklerini sunarak bu mekanizmanın kinematik özelliklerine değinmişlerdir (Szmidski and Hedzielski, 2016).

Geleneksel yöntemlerin ötesinde, özellikle tsunami araştırmaları için yeni nesil dalga yapıcılar da tasarlanmaktadır. Lomonaco ve ark., taban eğimi (bottom-tilting) hareketiyle çalışan ve tsunami dalgalarını taklit eden yeni bir dalga yapıcı sistemini tanıtmışlardır (Lomonaco, et al., 2023). Ayrıca Hiraishi, sığ sularda tsunami ve fırtına kabarmalarını yeniden oluşturmak için piston, akıntı üretici ve düşü tankını birleştiren hibrit bir sistem geliştirmiştir (Tetsuya Hiraishi, et al., 2016)

Dalga kanallarında istenilen dalga formunun hassas bir şekilde üretilmesi ve yansımaların engellenmesi gelişmiş kontrol stratejileri gerektirir. Li, dalga yapıcı servo mekanizmalarının kontrolü ve düzensiz dalga serilerinin üretimi üzerine teorik bir çerçeve sunmuştur (Li,

2005). Nouioui ve Doğan ise piston tipi bir dalga yapıcı ile hedef JONSWAP spektrumuna uygun düzensiz dalgaların üretilmesi için "rastgele faz yöntemi"ni (random phase method) kullanarak sayısal ve fiziksel modelleri karşılaştırmışlardır (Nouioui and Doğan, 2022).

Tsunamilerin yıkıcı etkileri, solitary dalga mekaniği üzerinden sıklıkla incelenmektedir. Schimmels ve ark., büyük ölçekli dalga kanallarında piston tipi dalga yapıcılar kullanarak gerçek tsunami kayıtlarını (örneğin 2004 Hint Okyanusu tsunamisi) solitonların kombinasyonu şeklinde üretmişlerdir (Schimmels, et al., 2014). Song ve ark., basamaklı bir kanalda solitary dalgaların yayılım özelliklerini ve piston hareketi ile üretimini OpenFOAM kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir (X. Song, et al., 2022). Aljber ve ark., karmaşık kıyı yapısına sahip Onagawa kasabası modelinde tsunami taşkınlarını simüle etmek için Basilisk çözücüsü ile adaptif ağ (AMR) yöntemini kullanmışlardır (Aljber et al., 2023).

Yapı etkileşimleri açısından, Lin ve ark., yarı batık yapılarla solitary dalgaların etkileşimini SPH yöntemi ile incelemiş ve dalga yüklerini analiz etmişlerdir (Lin et al., 2023). Gedik, doktora tezinde uzun dalgaların ve solitary dalgaların kıyıya tırmanma (run-up) yüksekliklerini deneysel olarak incelemiş ve kaplamalı/kaplamasız yüzeylerin etkisini araştırmıştır (Wang and Chan, 2020). Hess ve ark. ise barajların üzerinden aşan (overtopping) solitary impuls dalgalarının dikey yapılara uyguladığı kuvvetleri deneysel olarak ölçmüşlerdir (Hess, Boes, and Evers, 2023).

Dalga mekaniğinde ekstrem olayların istatistiksel analizi de önemli bir yer tutmaktadır. Canard ve ark., deneysel ve sayısal dalga tanklarında ekstrem dalga istatistiklerini (kurtosis vb.) kontrol etmek için yeni bir prosedür önermişlerdir (Canard, et al., 2024). Bu bağlamda, odaklanmış dalga gruplarının (focused wave groups) tırmanma ve aşma olaylarında, Orszaghova ve ark. (2014) birinci merteye yerine ikinci merteye dalga üretim sinyallerinin kullanılmasının hataları azalttığını göstermişlerdir (Orszaghova, et al., 2014). Fiziksel açıdan, derin sulardaki "rogue" (dev) dalgaların oluşumu ve modülasyon kararsızlığı gibi lineer olmayan dinamikler üzerine teorik tartışmalar da mevcuttur (El Koussaifi et al., 2018).

Yenilenebilir enerji ve açık deniz yapıları, dalga araştırmalarının ana uygulama alanlarındandır. Zullah ve ark., gergi ayaklı platformların (TLP) modifikasyonlarını ve dalga yükleri altındaki hareketlerini incelemişlerdir (J. Song and Lim, 2019). Yu ve ark., su altı

yumuşak boyunduruklu (soft yoke) bağlama sistemlerinin davranışı üzerinde çalkalanma (sloshing) etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır (Yu et al., 2019).

Dalga enerjisi dönüştürücüleri (WEC) kapsamında, Ahmed ve ark., Salınlı Su Sütunu (OWC) cihazlarının performansını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (ANSYS-CFD) ile analiz etmişlerdir (Prasad, et al., 2025). Benzer şekilde Elhanafi ve ark., OWC cihazlarında güç aktarım sönümlenmesinin etkilerini incelemek için 3 boyutlu CFD modellerini doğrulamışlardır (Shalby, et al., 2019). Le ve Truong ise açık dalga kanalı sistemlerinde rüzgarla üretilen dalgaların etkisini ANSYS Fluent kullanarak modellemişlerdir (Thai Le, et al., 2025). Kıyı yapılarında darbe yükleri açısından, Xu ve ark., kıyı köprülerinin üst yapılarına etkileyen dalga çarpma kuvvetlerini (slamming) piston tipi dalga yapıcı kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir (Xu, Wei, et al., 2020). Delacroix ve ark., gemi gövdelerinde gözlemlenen kabarcık sürüklenmesi (bubble sweep-down) fenomenini dalga ve akıntı tanklarında araştırmışlardır (Mallat et al., 2016).

Son olarak, kıyı süreçleri ve sediment taşınımı üzerine yapılan çalışmalarda, Divinsky ve ark., dalga spektrumunun formunun taban sedimentinin askıya alınması üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Divinsky and Kosyan, 2019). Yan ve ark., hafif eğimli plajlarda kıyı boyu akıntı profillerini ve kararsızlıklarını deneysel olarak analiz etmişlerdir et al., 2023). Marin Diaz ve ark., deniz çayırlarının (eelgrass) tortu taşınımı ve sedimentin yeniden askıya alınması üzerindeki rolünü araştırmışlardır (Marin-Diaz, et al., 2020). Blenkinsopp ve ark. ise büyük ölçekli kıyı adaptasyonu deneylerinden (DynaRev) elde edilen kapsamlı bir veri setini sunarak, morfodinamik süreçlerin anlaşılmasına katkıda bulunmuşlardır (Blenkinsopp et al., 2021).

Fiziksel deneylerin maliyeti ve ölçek etkileri, araştırmacıları Sayısal Dalga Tankları (NWT) geliştirmeye yöneltmiştir. Zhang ve ark., geçirgen resif ortamlarında dalga-yapı etkileşimini incelemek için viskoz etkileri de içeren sayısal modellerin (FLUENT gibi) önemini ve farklı sayısal yöntemlerin (FDM, FEM, BEM, FVM) sınıflandırmasını tartışmışlardır (Zhang, Lv, et al., 2024). Viskoz etkilerin dahil edildiği çalışmalarda, Anbarsooz ve ark., piston ve flap tipi dalga yapıcıların hareketini modelleyerek tam lineer olmayan viskoz dalga üretimini simüle etmişlerdir (Anbarsooz, et al., 2013). Duan ve ark. da benzer şekilde, piston ve flap tipi hareketleri modelleyerek STAR-CCM+ yazılımı ile sayısal dalga tankı oluşturmuşlardır (K. Yan, et al., 2025a). Elangovan ise hesaplamalı modellerde serbest yüzey takibi için

kullanılan VOF (Volume of Fluid) metodolojisinin temellerini aktarmıştır (Hafsa, Abdellatif, and Mounir, 2020).

Daha geniş ölçekli ve 3 boyutlu simülasyonlar için Wang ve ark., L-tipi (iki taraflı) dalga yapıcı düzenlemesini sayısal modele entegre ederek, eğik ve çok yönlü dalgaların simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Jia, Liu, et al., 2020). Jung ve ark., sığ su denklemlerine dayalı, yüksek mertebeden WENO şeması kullanan ve piston tipi dalga yapıcı ile donatılmış bir sayısal dalga tankı geliştirerek uzun süreli simülasyonlarda kütle korunumunu sağlamışlardır (Jung, Hwang, and Borthwick, 2020). Wang ve Chan, taban eğimli (bottom-tilting) dalga yapıcıların dalga üretim özelliklerini RANS tabanlı olaFlow modeli ile sayısal olarak incelemiş ve laboratuvar verileriyle doğrulamışlardır (Cho, et al., 2020).

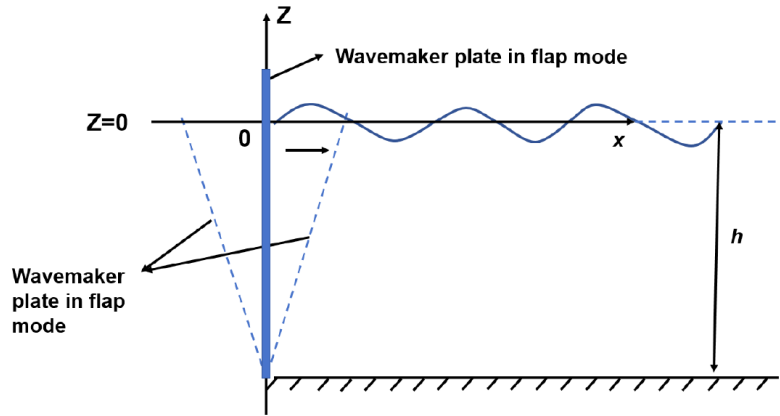
Farklı bir yaklaşım olarak parçacık tabanlı yöntemler de kullanılmaktadır. Lee ve ark., kıyı bölgelerindeki kırılan dalgaları ve "run-up" (tırmanma) olaylarını modellemek için ağsız (mesh-free) bir yöntem olan SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) metodunu kullanmışlardır ("Numerical Simulation of Two-Dimensional Nonlinear Waves on Beaches Using a Smoothed Particle Hydrodynamics Method," 2010). Prayogo ve Wiryanto da SPH yöntemini kullanarak flap tipi dalga yapıcı ile lineer su dalgalarının yayılımını simüle etmişlerdir (Prayogo and Wiryanto, 2013).

Sığ su ve Boussinesq modelleri üzerine yapılan çalışmalarda, Orszaghova ve ark. (2012), kırılmayan dalgalar için Boussinesq denklemlerini, kırılan dalgalar için ise lineer olmayan sığ su denklemlerini kullanan hibrit bir model geliştirmişlerdir (Orszaghova, Borthwick, and Taylor, n.d.). Liu ve ark. ise sığ sularda lineer olmayan dalgaların (solitary ve cnoidal) üretimi ve yayılımı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yaparak, Green-Naghdi denklemlerinin performansını değerlendirmişlerdir (Ramos et al., 2023).

### 3. DALGA KANALI VE MEVCUT FLAP TİP DALGA ÜRETİCİ

Laboratuvar ölçekli dalga kanallarında hedef dalga koşullarının kontrollü ve tekrarlanabilir biçimde üretilmesi amacıyla farklı dalga üretici (wavemaker) mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar arasında piston tip ve flap tip dalga üreticiler, hem fiziksel hem de sayısal dalga tanklarında en yaygın kullanılan sistemler olarak öne çıkmaktadır. Yan ve arkadaşları (2025), bu iki temel mekanizmayı ve bunların türevlerini aynı sayısal dalga tankı koşulları altında karşılaştırarak dalga üretim performanslarını ayrıntılı biçimde incelemiştir.

Şekil 3.1’de flap tip dalga üreticili bir dalga üretim sistemi verilmiştir. Flap tip dalga üretici sistemi, düşey bir plakanın su tabanına yakın bir noktadan mafsallanarak açısal (dönel) hareket yapması esasına dayanmaktadır. Bu sistemde dalga üretici plaka, belirli bir açısız genlik ve frekansta ileri–geri salınım hareketi yaparak su kütleğinde periyodik serbest yüzey deformasyonları oluşturur. Plakanın dönel hareketi sırasında üst su kolonunda oluşan yatay hız bileşenleri, dalga tepesi ve çukurunun meydana gelmesine neden olur. Bu süreç süreklilik kazandığında, dalgalar dalga kanalı boyunca ilerleyen düzenli bir dalga trenine dönüşmektedir.



Şekil 3.1: Flap tip dalga üretici sistemi (K. Yan et al., 2025)

Flap tip sistemlerde mafsız noktası genellikle tabana yakın bir derinlikte konumlandırılmakta olup, bu derinlik dalga üretim karakteristikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yan et al. (2025) tarafından sunulan şematik gösterimde, mafsız derinliği ile su derinliği arasındaki geometrik ilişkinin, üretilen dalga yüksekliği ve dalga sayısı ( $k$ ) ile doğrudan bağlantılı olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle flap tip dalga üreticiler, özellikle derin su koşullarında, dönel hareketin oluşturduğu hız dağılımının teorik dalga profilleriyle daha uyumlu olması sayesinde avantaj sağlamaktadır. Aynı çalışmada gerçekleştirilen sayısal

karşılaştırma sonuçlarına göre, flap tip dalga üreticiler su derinliği arttıkça dalga yüksekliğini daha kararlı biçimde koruyabilmekte ve dalga sönümü piston tip sistemlere kıyasla daha düşük olmaktadır. Bunun temel nedeni, flap sistemlerdeki dönel hareketin derin su dalga teorisine daha uygun bir hız ve basınç dağılımı üretmesidir. Buna karşılık piston tip dalga üreticilerde doğrusal hareketten kaynaklanan enerji kayıpları, dalganın ilerleme mesafesi arttıkça daha belirgin hâle gelmektedir. Bu bağlamda flap tip dalga üretici sistemler, özellikle orta ve derin su koşullarında dalga kalitesinin korunması açısından literatürde yaygın biçimde tercih edilmekte; ancak mekanik açıdan dönel mafsal bölgesinde oluşan momentler, tekrarlı yüklemeler ve yorulma etkileri tasarım sürecinde dikkate alınması gereken önemli sınırlılıklar oluşturmaktadır.

Şekil 3.2’de tez kapsamında kullanılan ve Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik laboratuvarında bulunan dalga kanalı yapısı verilmiştir.



**Şekil 3.2:** Flap tip dalga üreticili dalga kanalı.

Şekil 3.3’de bu tez çalışmasının yürütüldüğü laboratuvar ölçekli dalga kanalında hâlihazırda kullanılan flap tip dalga üretici sistemi gösterilmektedir. Söz konusu sistem, dalga kanalının bir ucuna yerleştirilmiş olup, düşey konumlandırılmış rijit bir flap plakasının tabana yakın bir mafsal noktası etrafında açılma hareketi esasına göre çalışmaktadır. Flap plakasının periyodik dönel hareketi sonucunda su kütlesi içerisinde zamana bağlı basınç ve hız alanları oluşturulmakta, bu alanların serbest yüzeyde meydana getirdiği deformasyonlar düzenli dalga oluşumuna yol açmaktadır.



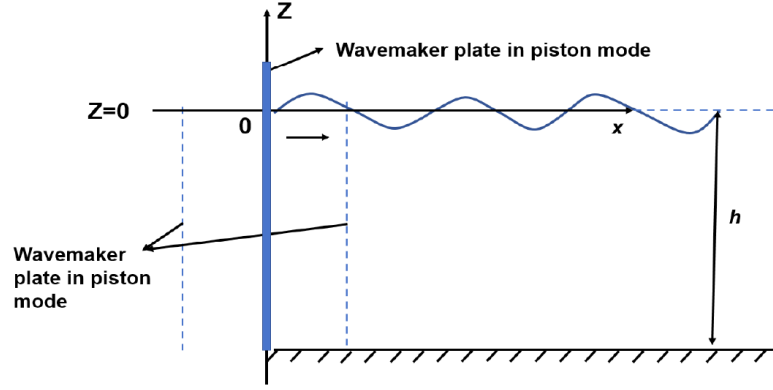
**Şekil 3.3:** Flap tip dalga üretici.

Flap tip sistemin mekanik yapısı incelendiğinde, flap plakasının dönel hareketi sırasında hem hidrodinamik basınca bağlı yüklerin hem de atalet kaynaklı dinamik etkilerin eş zamanlı olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Dalga periyodunun ve genliğinin artmasıyla birlikte flap plakası üzerinde etkiyen hidrodinamik kuvvetler önemli ölçüde büyümekte, bu kuvvetler mafsal bölgesinde yüksek momentler oluşturmaktadır. Tekrarlı dalga üretimi sırasında söz konusu momentlerin sürekli olarak tersinir şekilde uygulanması, flap plakası, mafsal elemanları ve taşıyıcı konstrüksiyon üzerinde yorulma hasarı riskini artırmaktadır.

Mevcut flap tip dalga üretici sistemi, laboratuvar ölçeğinde kısa ve orta periyotlu dalgaların üretiminde yeterli performans sergilemekle birlikte, uzun periyotlu ve yüksek genlikli dalgaların üretilmesi sırasında hem mekanik zorlanmaların artması hem de dalga kalitesinin bozulması gibi sınırlılıklarla karşı karşıya kalmaktadır. Özellikle mafsal bölgesinde oluşan yüksek momentler ve tekrarlı yüklemeler, sistemin servis ömrünü sınırlandıran temel mekanik faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenlerle, mevcut flap tip dalga üreticinin mekanik ve hidrodinamik sınırlılıklarının detaylı biçimde değerlendirilmesi, alternatif dalga üretim mekanizmalarının araştırılmasını gerekli kılmıştır. Bu tez kapsamında, flap tip sistemin söz konusu dezavantajlarını azaltmayı hedefleyen piston tip dalga üretici tasarımına geçişin mühendislik temelleri ele alınmakta; yeni sistemin mekanik yük dağılımı, yapısal dayanımı ve dalga üretim performansı karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

#### 4. PİSTON TİP DALGA ÜRETİCİ YAPISI VE TASARIMI

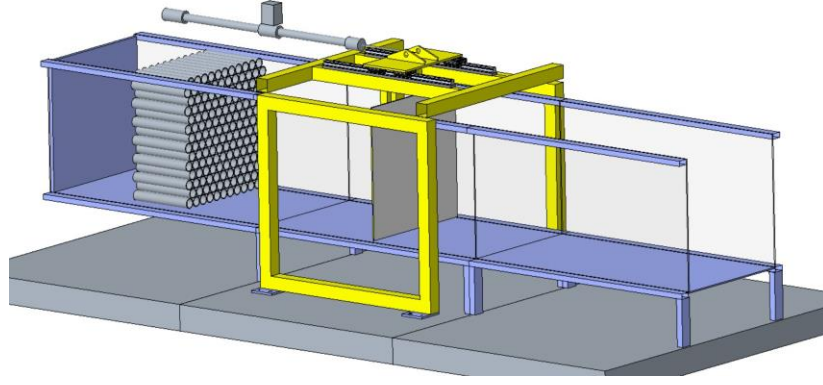
Dalga üretiminde kullanılan bir başka tür dalga üretici yapısı ise piston tip dalga üreticili sistemlerdir. Şekil 4.1’de piston tip dalga üreticili sisteme sahip bir dalga üretici yapısı verilmiştir.



Şekil 4.1: Piston tip dalga üretici sistemi (K. Yan et al., 2025)

Piston tip dalga üretici sistemi de karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Piston tip dalga üreticilerde, düşey bir plaka tabandan serbest yüzeye kadar uzanmakta ve bu plaka yatay doğrultuda doğrusal (öteleme) bir hareket gerçekleştirmektedir. Pistonun ileri hareketi sırasında su kütlesi itilerek dalga tepesi oluşturulurken, geri hareketi sırasında çukur meydana gelmektedir. Bu mekanizma, özellikle sığ su koşullarında hacimsel yer değiştirme açısından yüksek verim sunmakta ve kısa mesafelerde hedef dalga yüksekliğine daha hızlı ulaşılmasını sağlamaktadır (K. Yan et al., 2025).

Bu tez kapsamında, mevcut flap tip dalga üretici sisteminin mekanik ve fonksiyonel sınırlılıklarını aşmak amacıyla piston tip bir dalga üretici sistem tasarlanmıştır. Şekil 4.2’de, geliştirilen piston tip dalga üreticiye ait üç boyutlu mekanik tasarım modeli gösterilmektedir. Tasarım, 24 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve maksimum 1 m su derinliğine sahip laboratuvar ölçekli dalga kanalında çalışacak şekilde boyutlandırılmıştır.



**Şekil 4.2:** Piston tip dalga üretici sistem tasarımı

Şekil 4.2’de verilen ve tasarlanan sistemde piston hareketi sinüzoidal karakterde olup, tekrarlı hareket frekansı 1 Hz olarak belirlenmiştir. Bu frekans değeri, hedeflenen dalga periyot aralığı ve mekanik sistemin dinamik kararlılığı dikkate alınarak seçilmiştir. Piston sisteminin maksimum strok değeri  $\pm 400$  mm olarak tasarlanmıştır. Bu strok kapasitesi, 100 cm’ye kadar su derinliğinde hedeflenen dalga yüksekliklerinin elde edilebilmesini sağlamakta ve aynı zamanda piston hareketi sırasında oluşan hidrodinamik kuvvetlerin kontrol edilebilir sınırlar içinde kalmasına olanak tanımaktadır. Piston plakasının doğrusal hareketi boyunca, su kütlesi ile piston yüzeyi arasında geniş bir temas alanı oluşturulmakta; bu durum, flap tip sistemlerde görülen mafsal noktasına bağlı yüksek moment oluşumlarını ortadan kaldırarak yüklerin daha homojen bir biçimde yapısal elemanlara aktarılmasını sağlamaktadır.

Mekanik yapı, taşıyıcı çerçeve, kılavuz mekanizması ve piston plakası olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Taşıyıcı çerçeve, dalga kanalına rijit biçimde sabitlenmiş olup, piston hareketi sırasında oluşan atalet ve hidrodinamik yüklerin zemine güvenli şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Kılavuz sistemi, piston plakasının yalnızca yatay doğrultuda hareket etmesini garanti altına alacak şekilde tasarlanmış; böylece istenmeyen dönme veya eğilme hareketlerinin önüne geçilmiştir. Bu yaklaşım, sistemin uzun süreli tekrarlı çalışmalarda geometrik kararlılığını koruması açısından kritik öneme sahiptir.

Tasarımda kullanılan tüm ana yapısal elemanlar için malzeme olarak yapısal çelik S235JR seçilmiştir. Bu malzeme, yeterli akma dayanımı, iyi kaynaklanabilirlik ve atölye imkânlarında kolay işlenebilirlik özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca S235JR çeliği, tekrarlı yüklemeler altında öngörülebilir elastik davranış sergilemesi sayesinde yorulma analizlerinin güvenilir biçimde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Tasarım sürecinde malzeme seçimi yapılırken, dalga üretimi sırasında oluşacak dinamik yükler ve

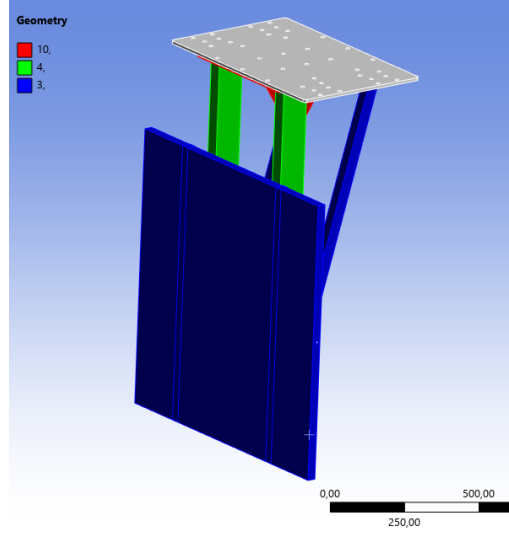
uzun süreli çevrim sayıları göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak geliştirilen piston tip dalga üretici tasarımı, yüksek strok kapasitesi, doğrusal hareket prensibi ve rijit yapısal kurgusu sayesinde flap tip sistemlere kıyasla daha dengeli bir yük dağılımı sunmakta; mekanik dayanım, bakım kolaylığı ve uzun servis ömrü açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu özellikler, tasarlanan sistemin laboratuvar ölçekli dalga deneylerinde güvenilir ve sürdürülebilir bir çözüm olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

## 5. MEKANİK VE YAPISAL ANALİZLER

Gerçekleştirilen ilk mekanik değerlendirme kapsamında, piston tip dalga üretici sistemin kritik yapısal elemanları sadeleştirilmiş bir geometri üzerinden ele alınmıştır. Şekil X'te gösterilen analiz geometrisi, piston plakasını, bu plakaya bağlı taşıyıcı elemanları ve üst bağlantı plakasını içerecek şekilde oluşturulmuştur. Dalga kanalı çerçevesi ve ikincil bağlantı detayları başlangıç analizinde ihmal edilerek, yük aktarımının yoğunlaştığı ana yapısal bileşenlere odaklanılmıştır. Bu sadeleştirme yaklaşımı, sistemin temel yüklenme karakteristiğinin anlaşılması ve kritik bölgelerin önceden tespit edilebilmesi amacıyla tercih edilmiştir.

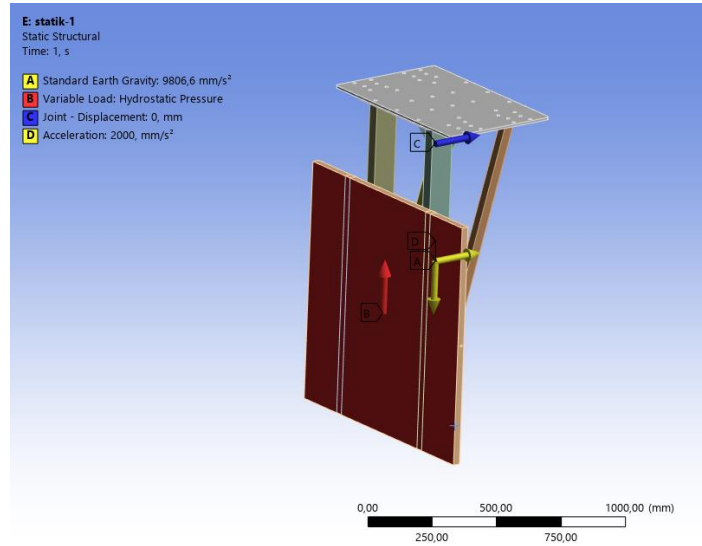
Analizde, piston tip dalga üretici sistemde kullanılan hidrolik silindirin 1 s içerisinde  $\pm 400$  mm strok gerçekleştirdiği kabul edilmiştir. Bu hareketten kaynaklanan maksimum ivme değeri esas alınarak, sistem statik eşdeğer yüklenme yaklaşımıyla çözümlenmiştir. Dinamik hareketten doğan atalet etkilerinin statik bir yüklenme durumu ile temsil edilmesi, başlangıç tasarım aşamasında yaygın olarak kullanılan muhafazakâr bir yaklaşım olup, yapısal elemanlar üzerinde oluşabilecek en olumsuz yüklenme durumlarının güvenli tarafta değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Şekil 5.1'de sunulan analiz geometrisinde, piston plakasının doğrusal hareketi sırasında oluşan atalet kuvvetlerinin, bağlantı elemanları aracılığıyla üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlara aktarıldığı görülmektedir. Bu nedenle, analiz modelinde piston plakası ile taşıyıcı elemanlar arasındaki bağlantı bölgeleri özellikle korunmuş; bu bölgelerde oluşabilecek gerilme yığılmalarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Geometrik renk ayrımı ile gösterilen parçalar, farklı yapısal fonksiyonlara sahip elemanları temsil etmekte olup, yük aktarım yolunun görsel olarak izlenebilmesine olanak tanımaktadır. Başlangıç analizinde kullanılan bu sadeleştirilmiş model, piston tip dalga üretici sistemin yüksek ivmeli hareketi altında maruz kalabileceği genel yapısal davranışı ortaya koymayı amaçlamaktadır. Elde edilecek sonuçlar, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek ayrıntılı statik, geçici ve yorulma analizleri için bir referans niteliği taşımakta; kritik bölgelerin belirlenmesi ve tasarımın bu doğrultuda revize edilmesine zemin hazırlamaktadır.



**Şekil 5.1:** Analiz geometrisi

Şekil 5.2’de, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen statik yapısal analizde kullanılan yükleme ve sınır koşulları gösterilmektedir. Analiz, ANSYS ortamında statik çözüm yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, piston sistemin tekrarlı hareketi sırasında maruz kaldığı en olumsuz yükleme durumu statik eşdeğer yükler yardımıyla temsil edilmiştir. Çözüm süresi 1 s olarak tanımlanmış ve bu süre zarfında sistem üzerine etkiyen ivme ve basınç yükleri birlikte değerlendirilmiştir.



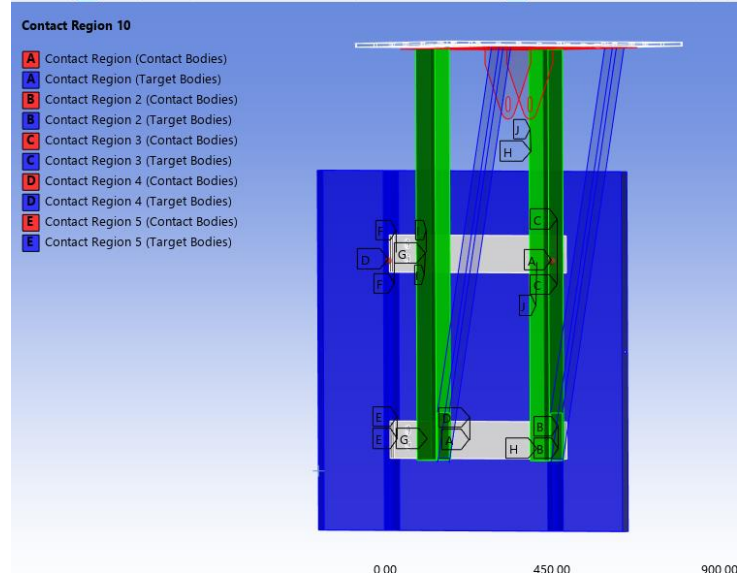
**Şekil 5.2:** Yükleme koşulları

Şekil 5.2’de verilen analiz görselinde, yerçekimi etkisi standart yerçekimi ivmesi değeri olan 9806.6 mm/s<sup>2</sup> olarak tüm yapıya uygulanmıştır (A). Bu yükleme, sistemin kendi ağırlığından kaynaklanan etkilerin yapısal davranış üzerindeki katkısını temsil etmektedir. Yerçekimi

yükü, özellikle piston plakası ve taşıyıcı elemanlar üzerinde oluşan düşey yöndeki gerilme bileşenlerinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Piston plakasına etkiyen akışkan kaynaklı yükler, değişken hidrostatik basınç (B) olarak tanımlanmıştır. Bu yükleme, piston yüzeyinin su ile temas eden bölgesinde derinliğe bağlı olarak değişen basınç dağılımını temsil etmekte olup, dalga üretimi sırasında pistonun su kütlesiyle etkileşiminden doğan temel yükleme bileşenlerinden biridir. Hidrostatik basınç yükü, piston plakasının alt ve orta bölgelerinde daha yüksek etki oluşturacak şekilde uygulanmıştır. Piston sisteminin üst bağlantı bölgesinde yer alan bağlantı noktalarında yer değiştirme sınır koşulu tanımlanmıştır (C). Bu bölgelerde yer değiştirme değeri sıfır olarak atanmış ve sistemin taşıyıcı çerçeveye rijit biçimde bağlandığı varsayılmıştır. Bu sınır koşulu, piston hareketi sırasında oluşan kuvvetlerin üst yapı üzerinden zemine aktarılmasını temsil etmekte ve sistemin global rijitliğini belirleyen temel kabullerden birini oluşturmaktadır.

Buna ek olarak, piston tip dalga üretici sistemde hidrolik silindirin 1 s içerisinde  $\pm 400$  mm strok gerçekleştirmesinden kaynaklanan maksimum ivme etkisi, yapıya ivme yükü olarak uygulanmıştır (D). Analizde kullanılan ivme değeri  $2000 \text{ mm/s}^2$  olarak tanımlanmış olup, bu değer piston hareketi sırasında oluşabilecek atalet kuvvetlerinin statik eşdeğerini temsil etmektedir. Bu yaklaşım, dinamik hareketin yapısal etkilerinin güvenli tarafta değerlendirilmesini sağlayan muhafazakâr bir yöntemdir. Şekil 5.3'te, piston tip dalga üretici sistemin statik yapısal analizinde dikkate alınan bağlantı detayları ve temas (contact) bölgeleri gösterilmektedir. Analiz modelinde, piston plakası, kılavuz elemanlar ve üst taşıyıcı plaka arasındaki etkileşimler, ayrı ayrı tanımlanan temas bölgeleri aracılığıyla temsil edilmiştir.

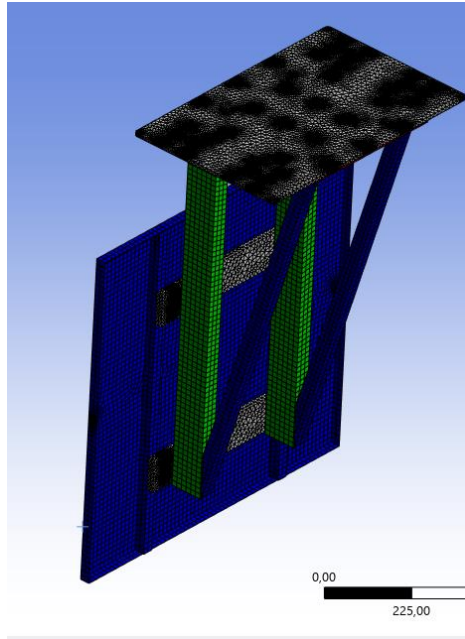


**Şekil 5.3:** Bağlantı detayları

Modelde tanımlanan temas bölgeleri, “contact body” ve “target body” olarak sınıflandırılmış olup, her bir temas çifti ilgili yapısal elemanlar arasındaki görelî hareketi ve yük aktarımını temsil etmektedir. Şekil üzerinde farklı renklerle ve harflerle gösterilen bu temas bölgeleri, piston hareketi sırasında oluşan atalet ve hidrostatik yüklerin piston plakasından kılavuz elemanlara ve oradan da üst taşıyıcı yapıya iletilmesini sağlayan temel bağlantı noktalarını oluşturmaktadır. Üst taşıyıcı plaka ile kılavuz elemanlar arasındaki temas bölgeleri, sistemin global rijitliğini belirleyen kritik bağlantılar olarak modellenmiştir. Bu bölgelerde tanımlanan temaslar sayesinde, piston hareketinden kaynaklanan kuvvetlerin üst yapı üzerinden güvenli biçimde zemine aktarılması mümkün hâle gelmektedir. Şekil 5.3’te bu temasların özellikle kılavuz elemanların üst uçlarında yoğunlaştığı görülmektedir.

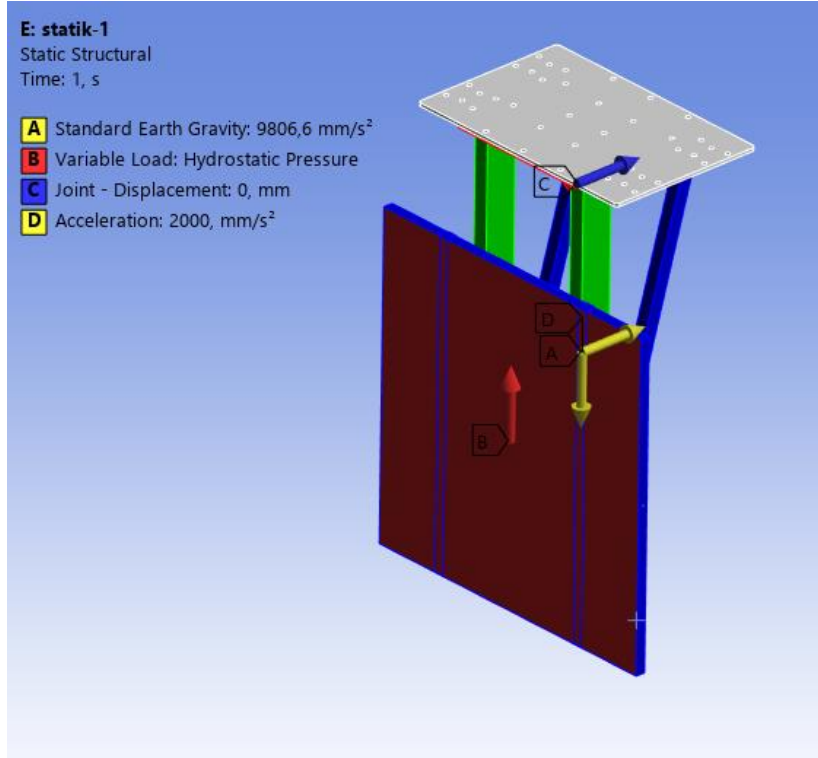
Piston plakasının kılavuz elemanlar ile olan bağlantıları da ayrı temas bölgeleri şeklinde tanımlanmıştır. Bu temaslar, piston plakasının yalnızca doğrusal hareket yapmasını sağlayan kinematik kısıtlamaları temsil etmekte; aynı zamanda yatay yönde oluşan hidrodinamik kuvvetlerin yapıya dağıtılmasında önemli rol oynamaktadır. Şekil üzerinde alt ve orta bölgelerde konumlanan temas çiftleri, piston hareketi sırasında oluşabilecek yerel gerilme yığılmalarının doğru şekilde hesaplanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Temas bölgelerinin bu şekilde ayrıntılı olarak modellenmesi, bağlantı noktalarında oluşabilecek görelî yer değiştirmelerin, yük yoğunlaşmalarının ve potansiyel zayıf noktaların analiz sonuçlarına yansıtılmasını sağlamaktadır. Bu sayede, piston tip dalga üretici sistemin bağlantı detayları yalnızca rijit bir bütün olarak değil, gerçek çalışma koşullarına daha yakın bir şekilde değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Şekil 5.3’te sunulan temas tanımları, piston tip

dalga üretici sistemin yapısal analizinde yük aktarım mekanizmasının doğru biçimde temsil edilmesine katkı sağlamış; bağlantı elemanlarının tasarım güvenilirliğinin değerlendirilmesi için gerekli altyapıyı oluşturmuştur. Şekil 5.4'te, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen statik yapısal analizde kullanılan sonlu elemanlar ağı gösterilmektedir. Analiz modeli, yapısal davranışın yeterli hassasiyetle temsil edilebilmesi amacıyla uygun boyutlarda sonlu elemanlara ayrılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı toplam 227 503 düğüm noktası ve 144 202 elemandan oluşmaktadır.



**Şekil 5.4:** Ağ yapısı

Şekil 5.4'de verilen ağ yapısı incelendiğinde, piston plakası, kılavuz elemanlar ve üst taşıyıcı plaka gibi yük aktarımının yoğunlaştığı bölgelerde daha sık bir eleman dağılımının tercih edildiği görülmektedir. Bu yaklaşım, özellikle bağlantı bölgelerinde ve geometrik süreksizliklerin bulunduğu alanlarda oluşabilecek yerel gerilme yığılmalarının daha doğru şekilde hesaplanmasını amaçlamaktadır. Görece daha az zorlanan geniş yüzeylerde ise daha kaba elemanlar kullanılarak çözüm süresi ile hesaplama doğruluğu arasında dengeli bir yapı oluşturulmuştur. Ağ elemanlarının şekil ve dağılımı, piston tip dalga üretici sistemin doğrusal hareketi sırasında oluşan yük aktarım yollarını temsil edecek biçimde düzenlenmiştir. Şekil 5.4'te görülen düzgün ve süreklilik arz eden eleman geçişleri, modelde ani eleman boyutu değişimlerinden kaçınıldığını ve çözüm kararlılığının gözetildiğini göstermektedir. Bu durum, analiz sonuçlarının sayısal olarak kararlı ve güvenilir olmasına katkı sağlamaktadır. Şekil 5.5'te, piston tip dalga üretici sistemin statik yapısal analizinde uygulanan yükleme ve sınır koşulları ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



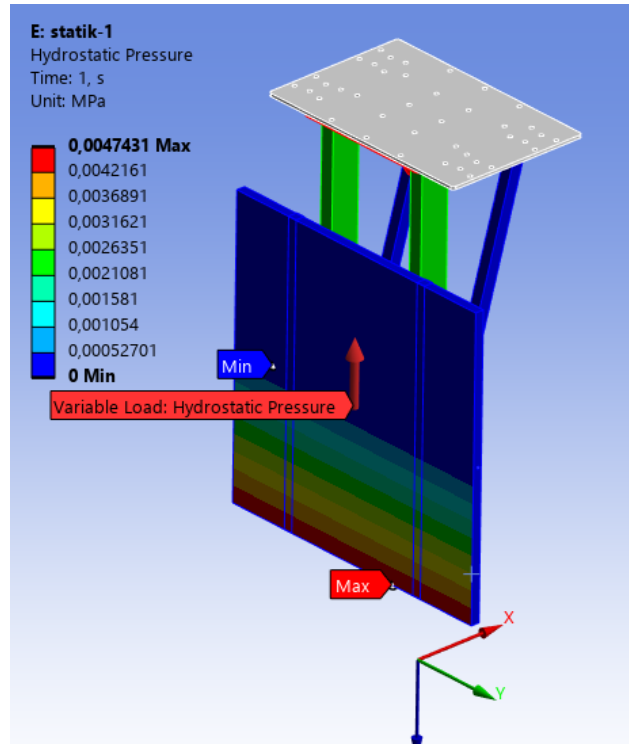
**Şekil 5.5:** Yükleme koşulları

Şekil 5.5, piston mekanizmasının çalışma sırasında maruz kaldığı en olumsuz yükleme durumunu temsil edecek şekilde tanımlanmış olup, dinamik etkiler statik eşdeğer yükler yardımıyla modele dâhil edilmiştir. Çözüm süresi 1 s olarak belirlenmiştir.

Analizde, tüm yapısal bileşenlere standart yerçekimi ivmesi  $9806.6 \text{ mm/s}^2$  olacak şekilde uygulanmıştır (A). Bu yükleme, sistemin kendi ağırlığından kaynaklanan etkilerin değerlendirilmesini sağlamakta ve özellikle piston plakası ile taşıyıcı elemanlar üzerindeki düşey gerilme bileşenlerinin hesaba katılmasına olanak tanımaktadır. Piston plakasının su ile temas eden yüzeyine değişken hidrostatik basınç yükü uygulanmıştır (B). Bu basınç yükü, su derinliğine bağlı olarak değişen akışkan basıncını temsil etmekte olup, piston hareketi sırasında su kütlesi ile etkileşimden doğan temel hidrodinamik yükleme bileşenlerinden biridir. Hidrostatik basınç, piston plakasının alt bölgelerinde daha yüksek olacak şekilde tanımlanarak gerçekçi bir basınç dağılımı elde edilmiştir.

Sistemin üst taşıyıcı plaka ile bağlantılı bölgelerinde yer değiştirme sınır koşulu tanımlanmış ve bu bölgelerde yer değiştirme değeri sıfır olarak atanmıştır (C). Bu sınır koşulu, piston tip dalga üretici sistemin taşıyıcı çerçeveye rijit biçimde bağlandığı varsayımını temsil etmekte ve yüklerin üst yapı üzerinden zemine aktarılmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, piston

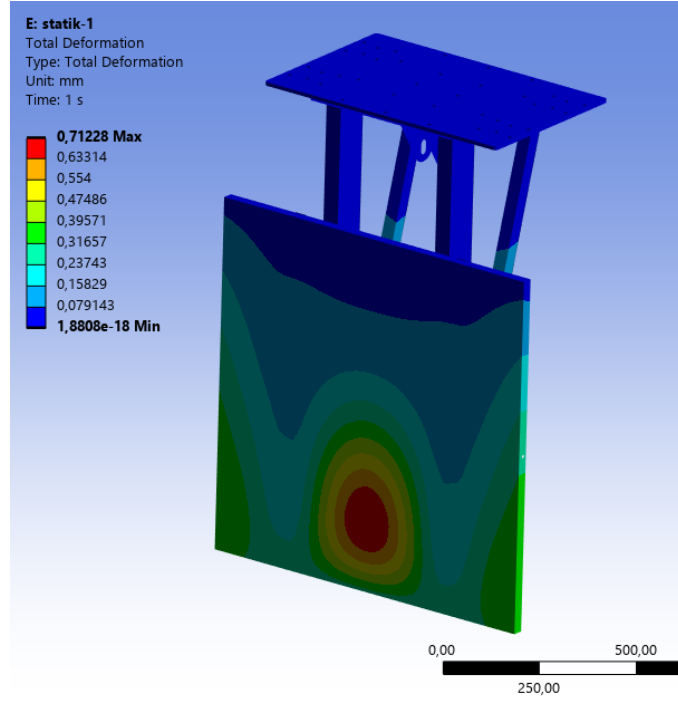
tip dalga üretici sistemde hidrolik silindirin çalışma koşullarını temsil etmek amacıyla, yapıya ivme yükü uygulanmıştır (D). İvme değeri  $2000 \text{ mm/s}^2$  olarak tanımlanmış olup, pistonun 1 s içerisinde  $\pm 400 \text{ mm}$  strok gerçekleştirmesinden kaynaklanan atalet etkilerinin statik eşdeğerini ifade etmektedir. Bu yaklaşım, dinamik hareketin yapısal etkilerinin muhafazakâr bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Şekil 5.6'da, piston tip dalga üretici sistemin statik yapısal analizinde piston plakasına uygulanan değişken hidrostatik su basıncı yüklemesinin dağılımı gösterilmektedir.



**Şekil 5.6:** Yükleme koşulları – hidrostatik su basıncı

Şekil 5.6, 1 s çözüm süresi için gerçekleştirilmiş olup basınç birimi MPa olarak tanımlanmıştır. Görselde sunulan renk skalası, piston plakasının su ile temas eden yüzeyinde derinliğe bağlı olarak değişen basınç büyüklüklerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Hidrostatik basınç dağılımının, serbest yüzeye yakın bölgelerde minimum değerlere, tabana yaklaşıldıkça ise maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum, hidrostatik basıncın su derinliği ile doğrusal olarak artması prensibiyle uyumludur. Şekil üzerinde minimum basınç değerinin piston plakasının üst bölgelerinde, maksimum basınç değerinin ise alt kenara yakın bölgelerde olduğu açıkça izlenebilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen maksimum hidrostatik basınç değeri yaklaşık  $0.0047 \text{ MPa}$  seviyesindedir. Basınç konturlarının piston plakasının yüzeyi boyunca düzgün ve süreklilik arz eden bir dağılım sergilemesi, yüklemenin model üzerinde doğru ve kararlı biçimde tanımlandığını

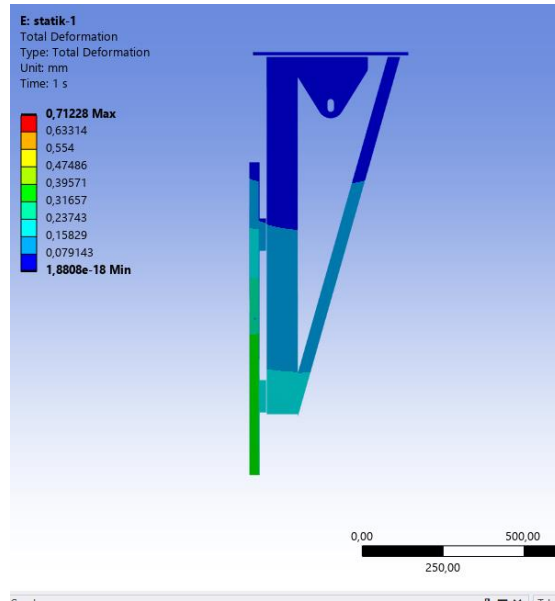
göstermektedir. Bu dağılım, piston tip dalga üretici sistemin çalışma sırasında su kütlesiyle etkileşiminden kaynaklanan temel hidrodinamik yükleme bileşenini temsil etmektedir. Şekil 5.7’de, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen statik yapısal analiz sonucunda elde edilen toplam deformasyon dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 5.7: Deformasyon 0,7 mm.

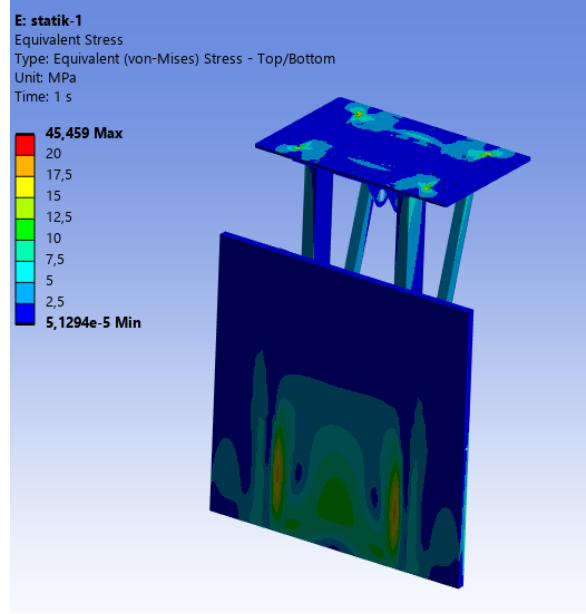
Şekil 5.7, 1 s çözüm süresi için gerçekleştirilmiş olup deformasyon birimi milimetre (mm) olarak ifade edilmiştir. Renk skalası, yapısal elemanlar üzerinde oluşan yer değiştirme büyüklüklerini minimumdan maksimuma doğru kademeli olarak sunmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, sistemde oluşan maksimum toplam deformasyon değeri yaklaşık 0.7 mm seviyesindedir. Maksimum deformasyonun, piston plakasının orta-alt bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bölge, hidrostatik basınç yüklemesinin en yüksek olduğu alanlarla örtüşmekte olup, basınç kaynaklı yüklerin yapısal tepkiye doğrudan yansıdığını göstermektedir. Buna karşılık, üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlar boyunca deformasyon seviyelerinin oldukça düşük olduğu ve bu bölgelerin yüksek rijitlik sergilediği gözlemlenmektedir. Deformasyon konturlarının piston plakası üzerinde düzgün ve süreklilik arz eden bir dağılım göstermesi, yükleme ve sınır koşullarının model üzerinde kararlı biçimde tanımlandığını işaret etmektedir. Üst bağlantı bölgelerinde yer değiştirme sınır koşulu tanımlanmış olması nedeniyle, bu bölgelerde deformasyon değerleri minimum seviyelerde kalmıştır. Şekil 5.8’de, piston tip dalga üretici sistemin statik yapısal analizinde

elde edilen toplam deformasyonun sistem rijitliği açısından değerlendirilmesi sunulmaktadır.



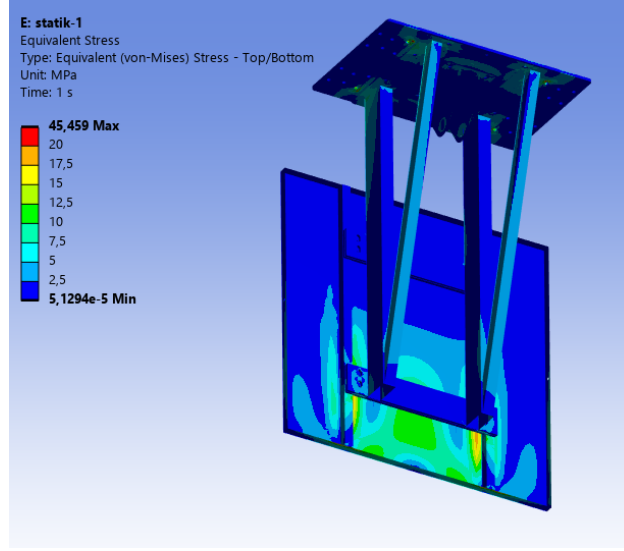
Şekil 5.8: Deformasyon

Şekil 5.8, 1 s çözüm süresi için hesaplanmış olup deformasyon birimi milimetre (mm) cinsinden ifade edilmiştir. Renk skalası, minimumdan maksimuma doğru artan yer değiştirme büyüklüklerini göstermektedir. Şekil 5.8 incelendiğinde, deformasyonun ağırlıklı olarak piston plakasına yakın bölgelerde ve yük aktarımının gerçekleştiği taşıyıcı elemanlar boyunca dağıldığı görülmektedir. Üst taşıyıcı plaka ve bağlantı bölgelerinde ise deformasyon seviyelerinin oldukça düşük kaldığı ve bu bölgelerin yapısal olarak yüksek rijitlik sergilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, sınır koşullarının ve bağlantı tanımlarının yapısal davranışı doğru şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Analiz sonucunda elde edilen maksimum toplam deformasyon değeri yaklaşık 0.7 mm olup, bu değer tasarım aşamasında hedeflenen 1/1000 rijitlik kriterini sağlamaktadır. Başka bir ifadeyle, sistemde oluşan maksimum yer değiştirme, karakteristik geometrik boyutlara oranla ihmal edilebilir düzeyde kalmakta ve dalga üretim hassasiyetini olumsuz yönde etkileyecek bir şekil değiştirme oluşmamaktadır. Bu rijitlik seviyesi, piston tip dalga üretici sistemin çalışma sırasında geometrik kararlılığını koruyacağını göstermektedir. Şekil 5.9'da, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen statik yapısal analiz sonucunda elde edilen eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı gösterilmektedir.



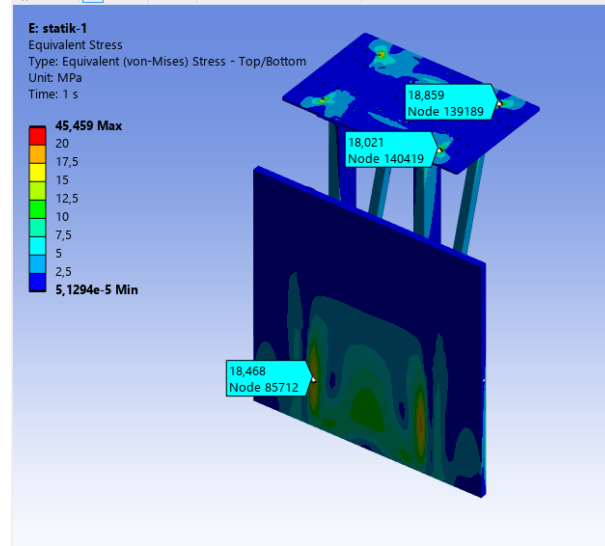
**Şekil 5.9:** Eşdeğer gerilme-I

Şekil 5.9, Analiz 1 s çözüm süresi için gerçekleştirilmiş olup, gerilme birimi MPa cinsinden ifade edilmiştir. Renk skalası, yapısal elemanlar üzerinde oluşan gerilme seviyelerinin minimumdan maksimuma doğru değişimini ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, sistemde oluşan maksimum eşdeğer gerilme değeri yaklaşık 45.5 MPa seviyesindedir. Bu maksimum gerilmenin, piston plakasının alt ve orta bölgelerinde, hidrodinamik basınç yüklemesinin ve ivme kaynaklı atalet etkilerinin birlikte etkili olduğu alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bölgeler, yük aktarımının en yoğun olduğu ve yapısal davranış açısından kritik kabul edilen alanlar olarak öne çıkmaktadır. Üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlar üzerinde oluşan gerilme seviyelerinin ise görece düşük olduğu ve geniş alanlara yayılmış biçimde dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, piston hareketi sırasında oluşan yüklerin yapı içerisinde dengeli bir şekilde aktarıldığını ve taşıyıcı sistemin yeterli rijitliğe sahip olduğunu göstermektedir. Gerilme konturlarının süreklilik arz eden bir dağılım sergilemesi, bağlantı ve temas tanımlarının analiz modelinde tutarlı biçimde tanımlandığını da işaret etmektedir. Elde edilen maksimum eşdeğer gerilme değeri, tasarımda kullanılan S235JR yapısal çeliğin akma dayanımı ile karşılaştırıldığında, sistemin güvenli çalışma sınırları içerisinde kaldığını göstermektedir. Şekil 5.10'da, piston tip dalga üretici sistemin statik yapısal analizi sonucunda elde edilen eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı farklı bir bakış açısından gösterilmektedir.



**Şekil 5.10:** Eşdeğer gerilme-II

Şekil 5.10, 1 s çözüm süresi için gerçekleştirilmiş olup, gerilme değerleri MPa cinsinden ifade edilmiştir. Renk skalası, sistem üzerindeki gerilme seviyelerinin minimumdan maksimuma doğru dağılımını ortaya koymaktadır. Görsel incelendiğinde, eşdeğer gerilmenin piston plakasının alt ve orta bölgelerinde yoğunlaştığı, buna karşılık üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlar boyunca gerilme seviyelerinin daha düşük değerlerde seyrettiği görülmektedir. Özellikle piston plakasının alt kenarlarına yakın bölgelerde oluşan görece yüksek gerilme alanları, hidrostatik basınç yüklemesinin ve ivme kaynaklı atalet etkilerinin birlikte etkili olduğu alanları temsil etmektedir. Kılavuz elemanlar boyunca gerilmenin düzgün ve süreklilik arz eden bir dağılım sergilemesi, yüklerin bu elemanlar aracılığıyla dengeli biçimde üst taşıyıcı yapıya aktarıldığını göstermektedir. Eğik taşıyıcı elemanlarda gözlenen gerilme seviyelerinin sınırlı kalması, bu elemanların piston hareketi sırasında oluşan eğilme ve kesme etkilerine karşı yeterli dayanımı sağladığını ortaya koymaktadır. Şekil 5.10'da sunulan sonuçlar, daha önce elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı ile tutarlılık göstermekte ve maksimum gerilme değerinin yaklaşık 45.5 MPa seviyesinde kaldığını doğrulamaktadır. Bu değer, tasarımda kullanılan yapısal çeliğin malzeme dayanım sınırlarının güvenli bir şekilde altında olup, piston tip dalga üretici sistemin belirlenen yükleme koşulları altında mekanik açıdan güvenli bir tasarıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.11'de, piston tip dalga üretici sistemin statik yapısal analizi sonucunda elde edilen eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı ve seçilmiş düğüm noktalarındaki sayısal gerilme değerleri gösterilmektedir.

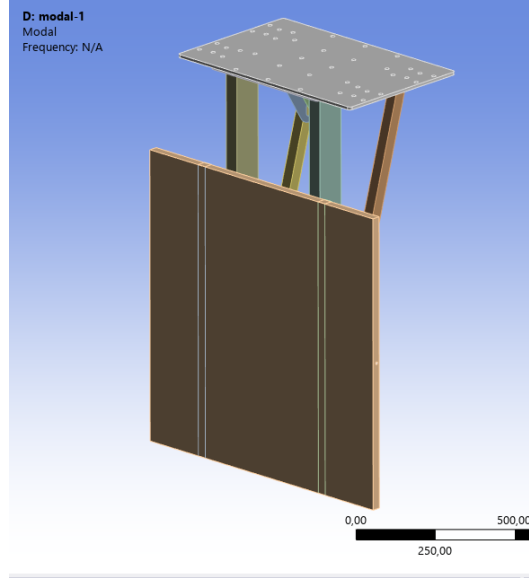


**Şekil 5.11:** Eşdeğer gerilme-III

Şekil 5.11, üzerinde işaretlenen düğüm noktalarında ölçülen gerilme değerlerinin yaklaşık 18–20 MPa aralığında yoğunlaştığı, sistem genelinde elde edilen maksimum eşdeğer gerilme değerinin ise yaklaşık 45 MPa seviyesinde kaldığı görülmektedir. Elde edilen bu gerilme değerleri, tasarımda kullanılan S235 yapısal çeliğin akma dayanımı dikkate alındığında oldukça güvenli bir aralıktadır. S235 yapısal çeliğin nominal akma dayanımı göz önüne alındığında, analiz sonucunda elde edilen maksimum eşdeğer gerilmenin akma sınırının çok altında kaldığı açıkça görülmektedir. Bu durum, tanımlanan yükleme koşulları altında yapısal elemanlarda plastik şekil değiştirme riskinin bulunmadığını göstermektedir. Buna ek olarak, piston tip dalga üretici sistemin tekrarlı çalışma karakteri dikkate alındığında, yorulma davranışı açısından da değerlendirme yapılması önem taşımaktadır. Şekil 5.11’de elde edilen 20–45 MPa aralığındaki eşdeğer gerilme değerleri, kaynaklı çelik konstrüksiyonlar için literatürde yaygın olarak kabul edilen sonsuz ömür yorulma sınırının (yaklaşık 50–80 MPa ve  $2 \times 10^6$  çevrim) altında kalmaktadır. Bu durum, sistemin tekrarlı yüklemeler altında yorulma hasarına maruz kalmadan uzun süreli çalışabileceğini göstermektedir.

Gerilme dağılımının hem piston plakası hem de taşıyıcı elemanlar üzerinde geniş alanlara yayılmış olması, lokal ve ani gerilme yığılmalarının sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, bağlantı detaylarının ve yapısal kurgunun yorulma açısından da dengeli bir yük paylaşımı sağladığını desteklemektedir. Sonuç olarak, Şekil 5.11’de sunulan eşdeğer gerilme değerlendirmesi, piston tip dalga üretici sistemin hem statik dayanım hem de yorulma ömrü açısından güvenli bir tasarıma sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, sistemin

hedeflenen çalışma koşullarında yapısal bütünlüğünü uzun süre koruyabileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 5.12’de, piston tip dalga üretici sistemin modal analizinde kullanılan analiz modeli gösterilmektedir. Bu analiz, sistemin doğal frekanslarının belirlenmesi ve bu frekansların çalışma koşullarında oluşabilecek uyarıcı frekanslar ile çakışıp çakışmadığının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.12:** Analiz modeli

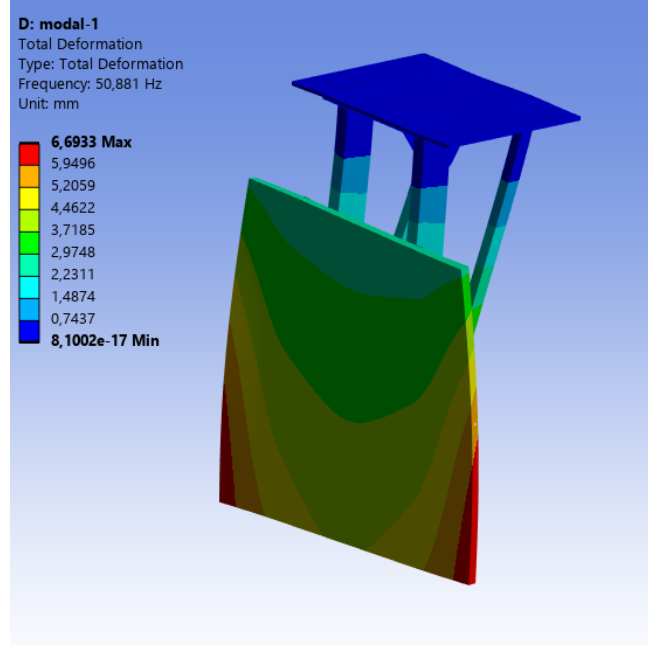
Şekil 5.12, Analiz modeli, piston plakası, kılavuz elemanlar, eğik taşıyıcı elemanlar ve üst taşıyıcı plaka dâhil olmak üzere sistemin ana yapısal bileşenlerini içerecek şekilde oluşturulmuştur. Statik analizlerde olduğu gibi, modal analizde de yük aktarımının gerçekleştiği temel yapısal elemanlar korunmuş; ikincil ve yapısal davranışa etkisi sınırlı olan detaylar modele dâhil edilmemiştir. Bu yaklaşım, modal özelliklerin doğru biçimde yakalanmasını sağlarken çözüm verimliliğini artırmaktadır. Şekil 5.12’de sunulan model üzerinde, sistemin ilk altı doğal mod şekli incelenmiştir. Bu mod şekilleri, piston tip dalga üretici sistemin düşük frekanslı küresel davranışlarını temsil etmekte olup, sistemin genel rijitliği ve kütle dağılımı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle piston plakasının doğrusal hareketi ve taşıyıcı elemanların eğilme davranışları, düşük mertebeli modlarda baskın olarak ortaya çıkmaktadır. Modal analiz kapsamında elde edilen doğal frekanslar, sistemin nominal çalışma koşulları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu sayede, piston hareketinden kaynaklanan tekrarlı uyarı frekanslarının, yapının doğal frekansları ile çakışma ihtimali kontrol edilmiştir. Bu değerlendirme, sistemin rezonans etkilerine maruz kalmadan güvenli ve kararlı bir şekilde çalışabileceğinin doğrulanması açısından önem taşımaktadır. Sonuç olarak, Şekil 5.12’de sunulan analiz modeli ve gerçekleştirilen modal analiz, piston

tip dalga üretici sistemin dinamik davranışının anlaşılmasına katkı sağlamış; tasarımın çalışma frekansları açısından güvenli bir aralıkta yer aldığının değerlendirilmesine imkân tanımıştır. Şekil 5.13'te, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen modal analiz sonucunda elde edilen ilk altı doğal frekans değeri grafiksel ve sayısal olarak sunulmaktadır.



Şekil 5.13: Sonuçlar

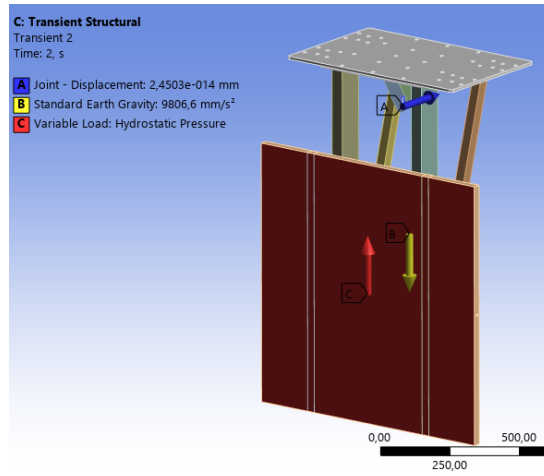
Şekil 5.13'deki grafik üzerinde her bir mod için hesaplanan doğal frekans değerleri çubuk grafik şeklinde gösterilmiş; tablo kısmında ise bu değerlere karşılık gelen frekanslar Hertz (Hz) cinsinden listelenmiştir. Modal analiz sonuçlarına göre, sistemin ilk altı doğal frekansı sırasıyla yaklaşık 50.9 Hz, 56.9 Hz, 57.3 Hz, 75.9 Hz, 87.1 Hz ve 95.8 Hz olarak belirlenmiştir. Bu frekanslar, piston tip dalga üretici sistemin düşük mertebeli küresel titreşim davranışlarını temsil etmekte olup, yapının kütle ve rijitlik dağılımının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Elde edilen doğal frekans değerleri, sistemin nominal çalışma koşulları ile karşılaştırıldığında, piston hareketinden kaynaklanan uyarıcı frekansların oldukça üzerinde yer almaktadır. Tasarlanan sistemde pistonun çalışma frekansının 1 Hz mertebesinde olduğu dikkate alındığında, doğal frekanslar ile çalışma frekansı arasında yeterli bir frekans ayrımı bulunduğu görülmektedir. Bu durum, sistemin çalışma sırasında rezonans etkilerine maruz kalma riskinin düşük olduğunu göstermektedir. Grafikte doğal frekansların mod sırasına bağlı olarak artış eğilimi göstermesi, yapının rijitliğinin üst modlarda daha baskın hâle geldiğini ve yüksek frekanslı modların daha lokal titreşim karakteri sergilediğini işaret etmektedir. İlk altı modun tamamının çalışma frekans aralığının dışında kalması, piston tip dalga üretici sistemin dinamik açıdan kararlı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Şekil 5.13'te sunulan modal analiz sonuçları, piston tip dalga üretici sistemin doğal frekanslarının çalışma koşulları ile çakışmadığını ve tasarımın dinamik açıdan güvenli bir frekans aralığında çalışacağını göstermektedir. Şekil 5.14'te, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen modal analiz sonucunda elde edilen birinci doğal frekansa karşılık gelen mod şekli gösterilmektedir.



**Şekil 5.14: Mod**

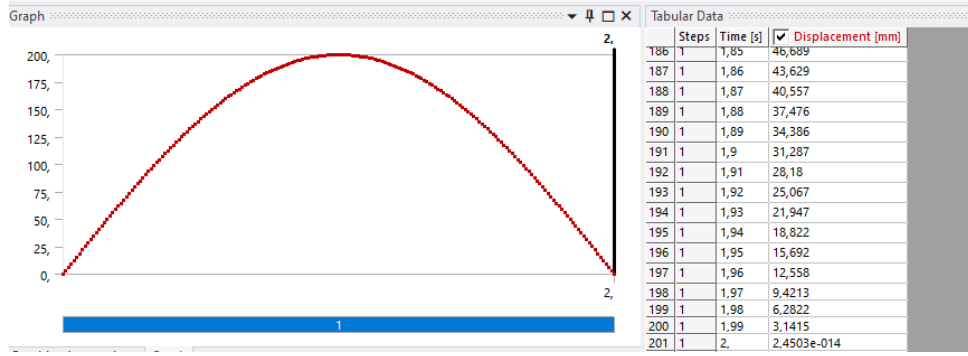
Şekil 5.14’de verilen mod, yaklaşık 50.88 Hz doğal frekans değerine sahip olup, sistemin en düşük frekanslı ve dolayısıyla dinamik davranış açısından en kritik modunu temsil etmektedir. Görselde sunulan deformasyon dağılımı, modal analiz kapsamında normalize edilmiş göreceli yer değiştirmeleri ifade etmektedir ve mutlak deformasyon olarak değerlendirilmemelidir. Mod şekli incelendiğinde, deformasyonun ağırlıklı olarak piston plakasının alt ve yan bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, piston plakasının sistemin kütleli olarak baskın elemanı olması ve düşük frekanslı titreşimlerde küresel hareket davranışına daha yatkın olması ile ilişkilidir. Buna karşılık, üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlar boyunca deformasyon seviyelerinin daha düşük olduğu ve bu bölgelerin modal davranışta görece rijit kaldığı gözlemlenmektedir. Birinci modda gözlenen deformasyon şekli, piston plakasının öteleme ve eğilme bileşenlerinin birlikte etkili olduğu bir küresel titreşim karakterine işaret etmektedir. Kılavuz ve eğik taşıyıcı elemanlar boyunca deformasyonun süreklilik arz etmesi, sistemin bu modda bütüncül bir yapısal davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durum, lokal titreşimlerden ziyade sistem genelini etkileyen bir mod şeklinin baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.14’te elde edilen birinci mod şekli, daha önce belirlenen çalışma frekansları ile karşılaştırıldığında, piston tip dalga üretici sistemin nominal çalışma frekansının bu doğal frekanstan oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu frekans ayrımı, sistemin normal çalışma koşullarında rezonans riskine maruz kalmayacağını göstermektedir. Sonuç olarak, Şekil 5.14’te sunulan birinci mod şekli ve buna karşılık gelen doğal frekans değeri, piston tip dalga üretici sistemin dinamik açıdan kararlı bir yapısal tasarıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.15’te, piston tip

dalga üretici sistem için gerçekleştirilen zamana bağlı (transient) yapısal analiz kapsamında kullanılan yükleme ve sınır koşulları gösterilmektedir.



**Şekil 5.15:** Yükleme sınır koşulları

Şekil 5.15’de verilen bu analiz, sistemin çalışma koşullarında piston hareketinin zamanla değişen etkilerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Transient analiz, statik eşdeğer yaklaşımlardan farklı olarak, hareket boyunca oluşan deformasyon ve gerilme değişimlerinin zaman ekseninde izlenmesine olanak tanımaktadır. Analiz kapsamında, dalga kanalının normal çalışma koşullarında kontrolcü tarafından pistonu gönderilen konum referansı, pistonun üst bağlantı noktasına zamana bağlı yer değiştirme olarak tanımlanmıştır (A). Bu tanım sayesinde, piston tip dalga üretici sistemin gerçek çalışma senaryosuna karşılık gelen ileri–geri hareketi analiz modeline doğrudan yansıtılmıştır. Görselde, bağlantı noktasında tanımlanan yer değiştirme değeri, pistonun hareketini kısıtlayan ve yönlendiren temel sınır koşulu olarak gösterilmektedir. Buna ek olarak, sistemin kendi ağırlığını temsil eden yerçekimi ivmesi tüm yapıya standart değer olan  $9806.6 \text{ mm/s}^2$  olacak şekilde uygulanmıştır (B). Ayrıca piston plakasının su ile temas eden yüzeyine değişken hidrostatik basınç yükü tanımlanmıştır (C). Bu yükleme, piston hareketi sırasında su kütlesiyle etkileşimden kaynaklanan hidrodinamik etkilerin zamana bağlı olarak yapıya aktarılmasını temsil etmektedir. Şekil 5.15’te tanımlanan bu yükleme ve sınır koşulları sayesinde, piston tip dalga üretici sistemin tüm hareket çevrimi boyunca oluşan deformasyonlar ve gerilme dağılımları zaman ekseninde takip edilebilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle pistonun hızlanma ve yavaşlama evrelerinde ortaya çıkabilecek geçici yük etkilerinin değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Şekil 5.16’da, zamana bağlı (transient) yapısal analiz kapsamında piston tip dalga üretici sisteme uygulanan yer değiştirme girdisi grafiksel olarak gösterilmektedir.

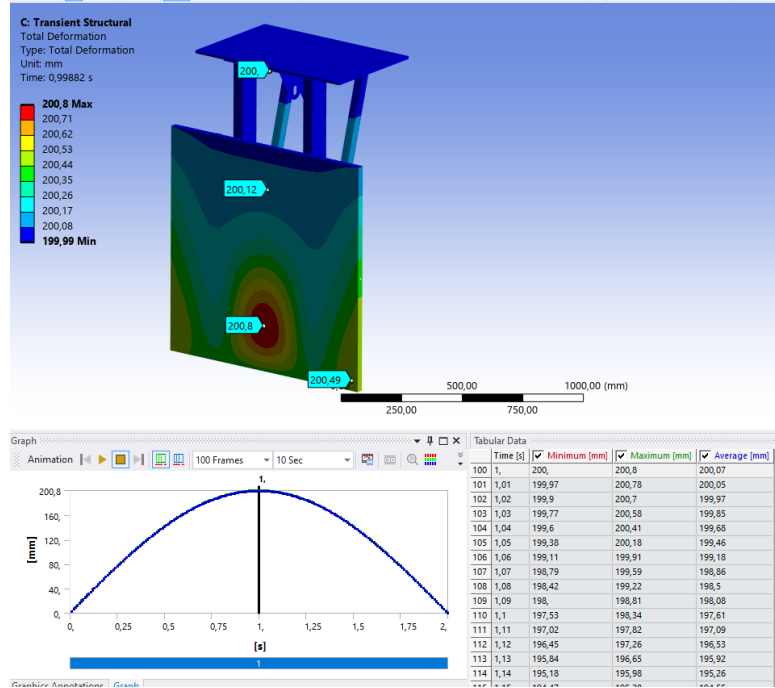


**Şekil 5.16:** Yer değiştirme grafiği-sin fonksiyonu

Şekil 5.16’da verilen grafik, piston bağlantı noktasına tanımlanan yer değiştirmenin zamanla değişimini ifade etmekte olup, yer değiştirme girdisinin sinüzoidal bir fonksiyon şeklinde tanımlandığı görülmektedir. Bu fonksiyon, pistonun çalışma sırasında gerçekleştirdiği ileri–geri hareketi temsil etmektedir.

Analiz kapsamında tanımlanan yer değiştirme girdisi, sinüs fonksiyonu ile tanımlanmış ve genliği 200 mm olacak şekilde uygulanmıştır. Buna göre, pistonun hareketi bir çevrim boyunca düzęün ve süreklilik arz eden bir hızlanma ve yavaşlama karakteri sergilemektedir. Grafik üzerinde yer değiştirme değerinin başlangıçta sıfırdan başlayarak maksimum değere ulaştığı, ardından tekrar sıfıra döndüğü açıkça görülmektedir. Bu hareket profili, ani hız veya ivme değişimlerinden kaçınılarak, yapısal sistem üzerinde oluşabilecek geçici yüklerin kontrollü biçimde incelenmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 5.16’da sunulan tablo verileri incelendiğinde, yer değiştirme değerlerinin zaman adımları boyunca sinüzoidal karakteri doğru şekilde takip ettiği ve çevrimin sonunda yer değiştirmenin tekrar sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, tanımlanan yer değiştirme fonksiyonunun analiz modeline doğru biçimde aktarıldığını ve sınır koşullarının zamana bağlı olarak tutarlı bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Zamana bağlı yapısal analizde bu tür bir yer değiştirme girdisinin kullanılması, piston tip dalga üretici sistemin gerçek çalışma koşullarına benzer bir hareket profili altında değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, tüm hareket çevrimi boyunca oluşan deformasyonlar ve gerilme değişimleri zaman ekseninde izlenebilmiş ve sistemin dinamik çalışma sürecindeki yapısal tepkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Şekil 5.17’de, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen zamana bağlı (transient) yapısal analiz sonucunda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımı ve buna karşılıık gelen zamana bağlı yer değiştirme grafiği gösterilmektedir.

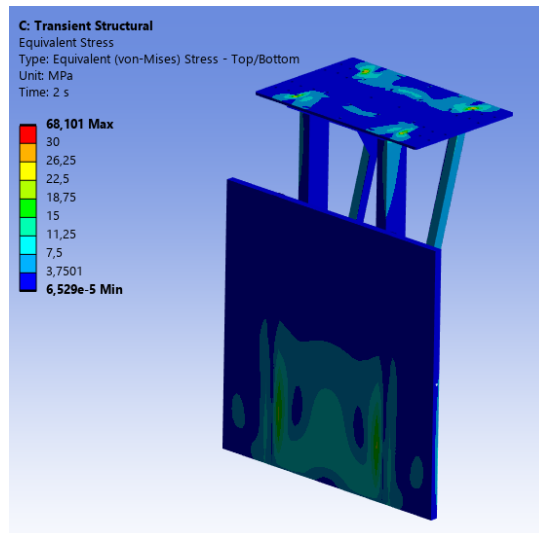


Şekil 5.17: Yer değiştirme grafiği.

Şekil 5.17’de verilen analiz, piston bağlantı noktasına sinüzoidal karakterde tanımlanan yer değiştirme girdisi altında geręekleřtirilmiř olup, sistemin tüm hareket çevrimi boyunca verdiği yapısal tepki ayrıntılı olarak incelenmiştir. Görselde sunulan deformasyon dağılımı incelendiğinde, sistemde oluşan maksimum toplam yer değiştirme değerinin yaklaşık 200.8 mm seviyesinde olduğu görölmektedir. Bu değer, analize giriş olarak tanımlanan 200 mm genliğindeki sinüzoidal piston hareketi ile uyumlu olup, analiz modelinin yer değiştirme sınır koşulunu doğru şekilde takip ettiğini göstermektedir. Deformasyonun piston plakasının orta-alt bölgelerinde yoğunlaştığı, üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlarda ise görelî yer değiştirme seviyelerinin sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.17’nin alt kısmında sunulan zamana bağlı yer değiştirme grafiği, piston hareketinin sinüzoidal karakterini açık biçimde ortaya koymaktadır. Grafik üzerinde yer değiştirme değerinin zamanla düzgün bir artış göstererek yaklaşık 1s civarında maksimum değere ulaştığı, ardından simetrik biçimde azalarak çevrim sonunda tekrar başlangıç konumuna döndüğü görölmektedir. Bu davranış, piston hareketinin süreklilik arz ettiğini ve sistem üzerinde ani veya düzensiz bir yer değiştirme tepkisi oluşmadığını göstermektedir. Tablo verileri incelendiğinde, maksimum, minimum ve ortalama yer değiştirme değerlerinin zaman adımları boyunca sinüzoidal giriş fonksiyonunu kararlı bir şekilde takip ettiği görölmektedir. Bu durum, zamana bağlı analizde

tanımlanan yer değiştirme sınır koşulunun modele doğru biçimde uygulandığını ve çözümin sayısal olarak kararlı olduğunu desteklemektedir. Şekil 5.18’de, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen zamana bağlı (transient) yapısal analiz sonucunda elde edilen eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı gösterilmektedir. Analiz, 2 s çözümler süresi sonunda elde edilen durumu temsil etmekte olup, gerilme birimi MPa cinsinden ifade edilmiştir. Renk skalası, yapısal elemanlar üzerinde oluşan gerilme seviyelerinin minimumdan maksimuma doğru dağılımını sunmaktadır.

Görsel incelendiğinde, sistemde oluşan maksimum eşdeğer gerilme değerinin yaklaşık 68 MPa seviyesinde olduğu görölmektedir. Bu maksimum gerilme değerinin, ağırlıklı olarak piston plakasının alt ve orta bölgelerinde yoğunlaştığı; hidrostatik basınç yüklemesi ile zamana bağlı piston hareketinden kaynaklanan atalet etkilerinin birlikte etkili olduğu alanlarda ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Bu bölgeler, transient analiz sırasında gerilme seviyelerinin zamana bağlı olarak en yüksek değerlere ulaştığı kritik alanlar olarak öne çıkmaktadır. Üst taşıyıcı plaka ve kılavuz elemanlar boyunca gerilme seviyelerinin görece düşük olduğu ve geniş alanlara yayıldığı görölmektedir. Bu durum, piston hareketi süresince oluşan geçici yüklerin taşıyıcı sistem tarafından dengeli biçimde dağıtıldığını ve yapının küresel rijitliğinin yeterli olduğunu göstermektedir. Gerilme konturlarının süreklilik arz eden bir dağılım sergilemesi, zamana bağlı analizde tanımlanan sınır koşullarının ve yüklemelerin kararlı bir şekilde çözüme yansıtıldığını işaret etmektedir.

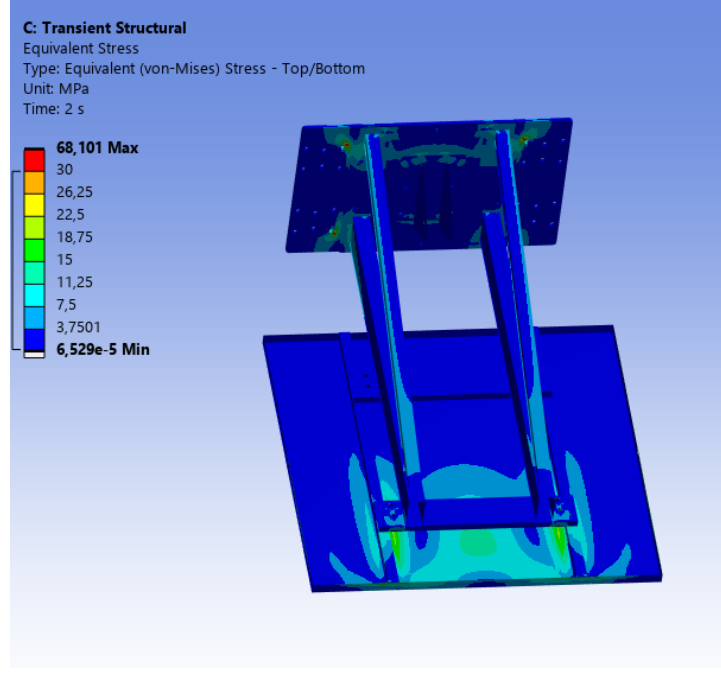


**Şekil 5.18:** Eşdeğer gerilme-I

Şekil 5.18’de elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı, statik analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında, transient analiz sırasında gerilme seviyelerinin belirli zaman

adımlarında artış gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, pistonun hızlanma ve yavaşlama evrelerinde oluşan atalet etkilerinin yapısal tepki üzerindeki katkısını açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, elde edilen maksimum gerilme değerinin tasarımda kullanılan yapısal çeliğin dayanım sınırları içerisinde kaldığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.19’da, piston tip dalga üretici sistem için gerçekleştirilen zamana bağlı (transient) yapısal analiz sonucunda elde edilen eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı, farklı bir bakış açısından sunulmaktadır. Analiz, 2 s zaman adımına karşılık gelen durumu temsil etmekte olup, gerilme değerleri MPa cinsinden ifade edilmiştir. Renk skalası, sistem üzerinde oluşan gerilme seviyelerinin minimumdan maksimuma doğru dağılımını göstermektedir. Görsel incelendiğinde, eşdeğer gerilmenin özellikle piston plakasının alt bağlantı bölgelerinde ve kılavuz elemanların piston plakasına bağlandığı noktalarda yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bölgeler, zamana bağlı analiz sırasında pistonun hareket yön değiştirdiği ve ivme etkilerinin maksimuma yaklaştığı anlarda yük aktarımının yoğunlaştığı kritik alanları temsil etmektedir. Maksimum eşdeğer gerilme değeri bu analiz adımında yaklaşık 68 MPa olarak belirlenmiştir. Kılavuz elemanlar boyunca gerilme dağılımının düzgün ve süreklilik arz eden bir karakter sergilediği gözlemlenmektedir. Bu durum, pistonun zamana bağlı hareketi sırasında oluşan geçici yüklerin taşıyıcı elemanlar aracılığıyla dengeli bir biçimde üst taşıyıcı yapıya aktarıldığını göstermektedir. Üst taşıyıcı plaka üzerinde yer yer lokal gerilme artışları görülmekle birlikte, bu bölgelerdeki gerilme seviyeleri maksimum değerinin altında kalmaktadır.



**Şekil 5.19:** Eşdeğer gerilme-II

Şekil 5.19’da sunulan sonuçlar, Şekil 5.18’de verilen zamana bağlı eşdeğer gerilme dağılımı ile tutarlılık göstermekte ve gerilme artışlarının geçici ve sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Zamana bağlı analizde elde edilen bu gerilme seviyeleri, sistemin hızlanma ve yavaşlama evrelerinde ortaya çıkan atalet etkilerinin yapısal davranış üzerindeki etkisini açık biçimde yansıtmaktadır.

Tasarlanan piston tip dalga üreticinin analizleri kapsamında, piston tip dalga üretici sistemin mekanik ve yapısal davranışı; statik, zamana bağlı (transient) ve modal analizler aracılığıyla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, sistemin hem en olumsuz yükleme koşulları altında hem de gerçek çalışma senaryosunu temsil eden zamana bağlı hareket boyunca sergilediği yapısal tepkiler değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, tasarımın yalnızca teorik dayanım açısından değil, aynı zamanda işletme koşullarındaki davranışı açısından da güvenilirliği ortaya konulmuştur.

Statik yapısal analizler sonucunda, piston hareketinden kaynaklanan ivme etkileri ve hidrostatik su basıncı altında oluşan deformasyonların sınırlı düzeyde kaldığı ve sistemin hedeflenen rijitlik kriterlerini sağladığı görülmüştür. Elde edilen maksimum deformasyon değerlerinin, dalga üretim hassasiyetini olumsuz etkilemeyecek seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımları incelendiğinde ise, maksimum gerilme değerlerinin S235 yapısal çeliğin akma dayanımının oldukça altında kaldığı ve yapının statik dayanım açısından güvenli bir çalışma aralığında yer aldığı tespit edilmiştir.

Yorulma açısından yapılan değerlendirmeler, statik analizlerde elde edilen gerilme seviyelerinin, kaynaklı çelik konstrüksiyonlar için kabul edilen sonsuz ömür sınırlarının altında kaldığını göstermiştir. Bu bulgu, piston tip dalga üretici sistemin tekrarlı çalışma koşullarında uzun süreli kullanım için uygun bir yapısal tasarıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bağlantı ve temas bölgelerinde gerilme yığılmalarının sınırlı kalması, yük aktarım mekanizmasının dengeli biçimde çalıştığını desteklemektedir.

Modal analiz sonuçları, sistemin ilk doğal frekanslarının çalışma frekansının oldukça üzerinde olduğunu göstermiştir. Bu durum, pistonun nominal çalışma koşullarında rezonans riskinin bulunmadığını ve sistemin dinamik açıdan kararlı bir davranış sergileyeceğini ortaya koymaktadır. İlk altı mod şeklinin incelenmesi, yapının küresel titreşim karakterinin kontrol altında olduğunu ve kritik bir modun çalışma frekansı ile çakışmadığını doğrulamıştır.

Zamana bağlı (transient) yapısal analizler ise, kontrolcü tarafından pistonu uygulanan sinüzoidal konum girdisi altında sistemin tüm hareket çevrimi boyunca sergilediği deformasyon ve gerilme davranışlarını ortaya koymuştur. Bu analizlerde, geçici yüklemeye etkileri nedeniyle gerilme seviyelerinde artışlar gözlemlenmiş olmakla birlikte, elde edilen maksimum gerilme değerlerinin yapısal güvenlik sınırları içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca sistemin tanımlanan yer değiştirme girdisini kararlı ve öngörülebilir bir şekilde takip ettiği görülmüştür.

Sonuç olarak, Şekil 5.1–Şekil 5.19 aralığında sunulan tüm analizler birlikte değerlendirildiğinde, tasarlanan piston tip dalga üretici sistemin statik dayanım, rijitlik, yorulma ömrü ve dinamik davranış açısından güvenli ve dengeli bir yapısal tasarıma sahip olduğu ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, piston tip sistemin mevcut flap tip dalga üretici sistemlere kıyasla mekanik açıdan daha kontrollü, öngörülebilir ve uzun süreli çalışmaya uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, tasarımın imalat ve gerçek sistem uygulamasına geçilmesi için yeterli mühendislik altyapısının sağlandığını doğrulamaktadır.

## 6. DENEYSSEL DOĞRULAMA

Tasarım aşamasında belirlenen geometrik özellikler, malzeme seçimleri ve yapısal gereksinimler doğrultusunda gerçekleştirilen imalat işlemleri; sistemin analizlerde öngörülen dayanım, rijitlik ve çalışma performansını gerçek sistemde sağlayacak şekilde planlanmıştır. Bu kapsamda, piston plakası, taşıyıcı çerçeve, kılavuz elemanlar ve bağlantı bileşenleri atölye koşullarında imal edilmiş ve dalga kanalı üzerine adım adım monte edilmiştir.

İmalat sürecinde, yapısal elemanların boyutsal doğruluğu, kaynaklı bağlantıların kalitesi ve montaj toleransları özellikle gözetilmiştir. Montaj aşamasında ise, piston tip dalga üretici sistemin dalga kanalı eksenine olan hizalanması, kılavuz mekanizmasının düzgün çalışması ve hareketli parçalar arasındaki uyum detaylı biçimde kontrol edilmiştir. Bu bölümde sunulan görseller aracılığıyla, tasarımdan imalata ve montaja uzanan sürecin deneysel uygulaması adım adım açıklanmakta; sistemin gerçek çalışma ortamında güvenli ve kararlı biçimde çalışabilmesi için izlenen mühendislik yaklaşımı ortaya konulmaktadır.

Şekil 6.1'de, piston tip dalga üretici sistemin imalat sürecine ait genel görünüm sunulmaktadır. Görselde, sistemin ana taşıyıcı çerçevesi, piston plakasını taşıyan kılavuz ve eğik destek elemanları ile üst bağlantı yapıları atölye ortamında bir araya getirilmiş hâlde görülmektedir. İmalat süreci, önceki bölümlerde gerçekleştirilen mekanik ve yapısal analizlerde belirlenen tasarım parametrelerini birebir karşılayacak şekilde planlanmış ve uygulanmıştır.



**Şekil 6.1:** Üretim aşaması.

Şekil 6.2’de, piston tip dalga üretici sistemin imalatı tamamlanan yapısal bileşenlerinin yüzey koruma ve boya işlemi gösterilmektedir. İmalat sonrası tüm çelik parçalar, yüzeydeki yağ, kir ve oksit tabakalarının giderilmesi amacıyla uygun ön işlemlerden geçirilmiş; ardından korozyona karşı yüksek dayanım sağlayan paslanmaya karşı koruyucu özel boya ile kaplanmıştır. Bu boya uygulaması, sistemin sürekli nemli ortamda ve suya yakın koşullarda çalışacak olması dikkate alınarak tercih edilmiştir. Boya işlemi sayesinde, yapısal elemanların uzun süreli kullanımda korozyona karşı korunması, bakım gereksiniminin azaltılması ve mekanik dayanımın zamanla zayıflamasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.



**Şekil 6.2:** Boya aşaması.

Şekil 6.3'te, mevcut dalga kanalı üzerinde yer alan flap tip dalga üretici sistemin söküm süreci gösterilmektedir. Bu aşamada, piston tip dalga üretici sistemin montajına geçilebilmesi için flap tip sistemin tüm mekanik bağlantıları kontrollü bir şekilde çözülmüş ve yapı dalga kanalından tamamen ayrılmıştır. Söküm işlemi sırasında, dalga kanalı yapısına zarar verilmemesi ve ilerleyen montaj aşamalarında yeniden kullanılacak bağlantı yüzeylerinin korunması temel öncelik olarak ele alınmıştır. Kaynaklı ve cıvatalı bağlantılar, güvenlik önlemleri altında kademeli olarak sökülmüş; flap mekanizmasına ait taşıyıcı ve hareketli elemanlar sistemden uzaklaştırılmıştır. Bu işlemin tamamlanmasının ardından, dalga kanalı piston tip dalga üretici sistemin montajına uygun hâle getirilmiş ve imalatı tamamlanan yeni sistemin entegrasyon aşamasına geçilmiştir.



**Şekil 6.3:** Flap tip dalga üretici sökme işlemi.

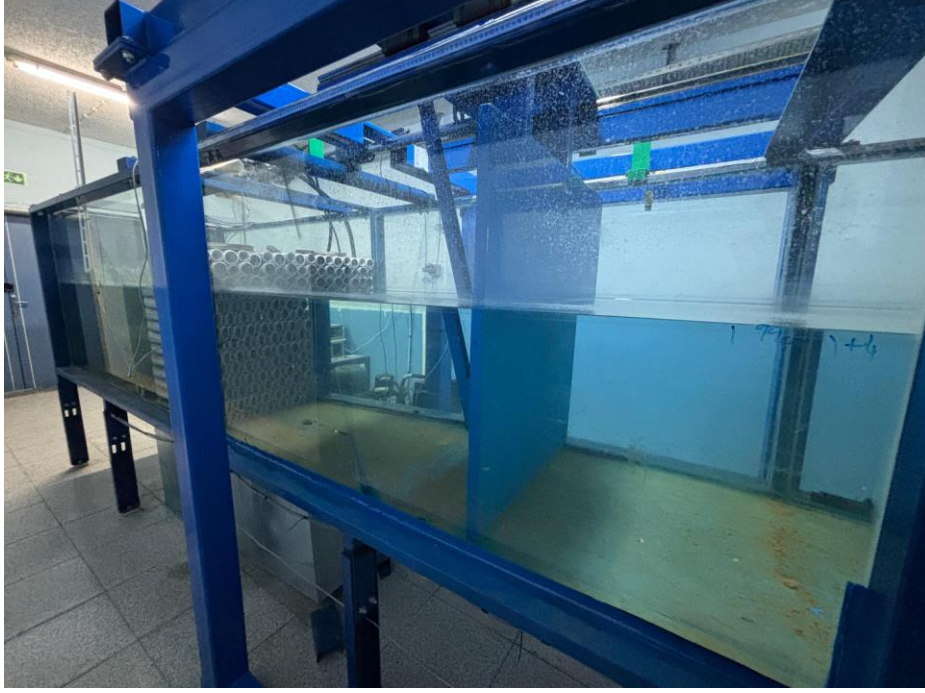
Şekil 6.4’te, imalatı tamamlanan piston tip dalga üretici sistemin dalga kanalı içerisine montaj aşaması gösterilmektedir. Flap tip dalga üretici sistemin sökülmesinin ardından, dalga kanalı montaj yüzeyleri temizlenmiş ve yeni sistemin yerleştirileceği bölge montaja hazır hâle getirilmiştir. Piston tip dalga üretici, taşıyıcı çerçevesi ile birlikte dalga kanalına yerleştirilmiş ve kanal eksenini ile doğrusal hizalama sağlanacak şekilde konumlandırılmıştır.

Montaj sürecinde, piston plakasının kanal duvarları ile paralelliği ve kılavuz elemanların düşey doğrultuda düzgün çalışması özellikle kontrol edilmiştir. Bu hizalama işlemleri, pistonun ileri-geri hareketi sırasında istenmeyen sürtünme, dönme veya eksen kaçıklıklarının önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Görselde, piston plakasının kanal kesiti içerisinde merkezi bir konumda yer aldığı ve kılavuz mekanizmasının taşıyıcı yapı ile uyumlu biçimde monte edildiği görülmektedir.



**Şekil 6.4:** Piston tip dalga üretici montaj aşaması.

Şekil 6.5'te, dalga kanalı içerisine montajı tamamlanan piston tip dalga üretici sistemin nihai durumu gösterilmektedir. Taşıyıcı çerçeve, piston plakası, kılavuz elemanlar ve bağlantı bileşenleri bir bütün olarak dalga kanalı yapısına entegre edilmiş olup, sistemin mekanik montajı eksiksiz şekilde tamamlanmıştır. Montaj sonrasında piston plakasının kanal eksenine ile olan hizası, kılavuz mekanizmasının serbest ve düzgün çalışması ile birlikte kontrol edilmiştir. Görselde, piston plakasının kanal kesiti içerisinde merkezi ve simetrik bir konumda yer aldığı, taşıyıcı elemanların ise rijit bir yapı oluşturacak şekilde bağlandığı görülmektedir.

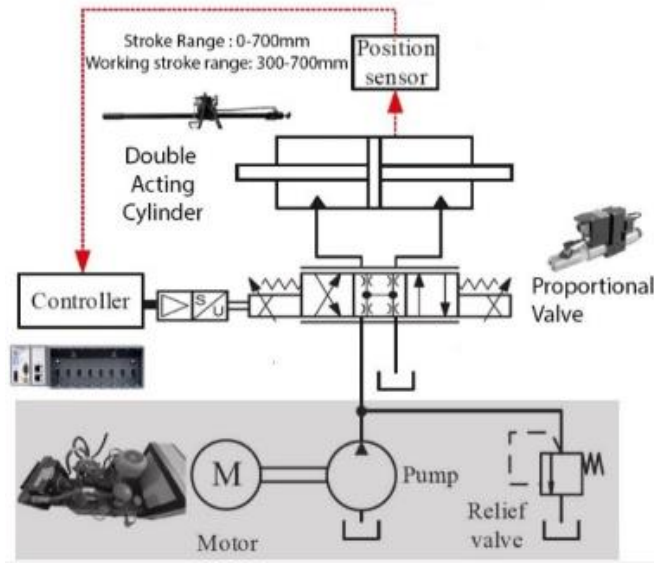


**Şekil 6.5:** Montajlanmış piston tip dalga üretici.

Bu bölüm kapsamında, tasarımı ve mekanik–yapısal analizleri önceki bölümlerde doğrulanan piston tip dalga üretici sistemin imalat ve montaj süreci başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yapısal elemanlar analizlerde öngörülen boyut ve toleranslara uygun olarak üretilmiş, korozyona karşı koruyucu boya uygulaması ile uzun süreli kullanım için hazırlanmıştır. Mevcut flap tip dalga üretici sistemin sökülmesinin ardından piston tip sistem dalga kanalına entegre edilmiş ve mekanik montaj işlemleri tamamlanmıştır. Montaj sonrası yapılan hizalama ve mekanik kontroller sonucunda, piston plakasının kanal içerisinde düzgün ve serbest hareket edebildiği doğrulanmıştır.

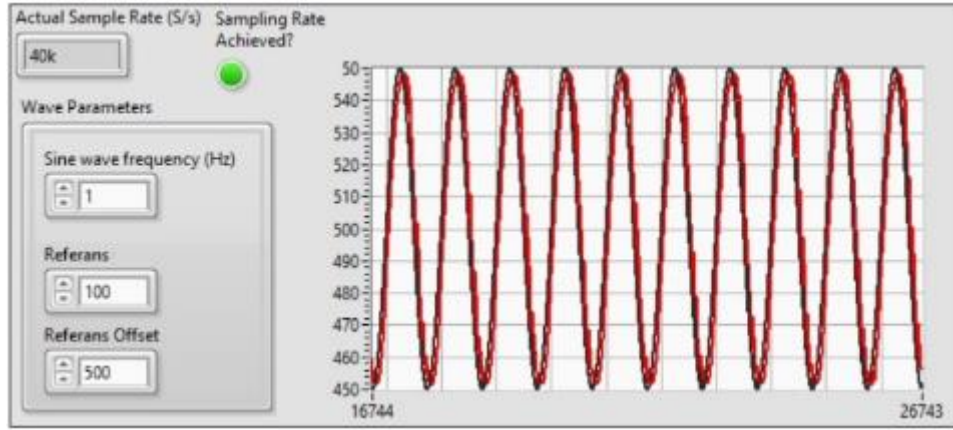
## 7. DALGA ÜRETİCİ KONTROL YAPISI VE DALGA ÜRETİMİ

Bu çalışmada piston tip dalga üretici sistemin kontrolü, FPGA tabanlı bir gerçek zamanlı kontrol mimarisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalga üretim süreci, hidrolik bir servo silindir tarafından tahrik edilen piston mekanizmasının konum kontrolüne dayanmaktadır. Kontrol yapısının temel amacı, hidrolik silindirin piston konumunu istenen genlik ve frekansta hassas bir şekilde takip etmesini sağlayarak dalga kanalında düzenli (regular) dalgaların üretilmesidir (Demircan and Bıçakçı, 2025). Şekil 7.1’de kontrol edilen piston tip dalga üretici sisteme bağlı bulunan hidrolik yapı verilmiştir.



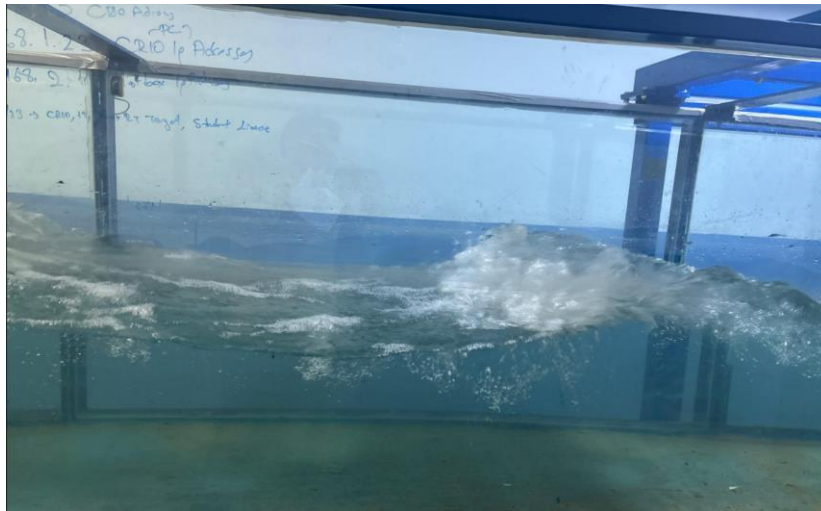
Şekil 7.1: Hidrolik sistem yapısı (Demircan and Bıçakçı, 2025).

Dalga üretimi için referans piston konumu, FPGA üzerinde çalışan LabVIEW tabanlı kontrol yazılımı içerisinde sinüzoidal bir konum sinyali olarak oluşturulmuştur. Kullanıcı tarafından belirlenen genlik, frekans ve ofset parametreleri doğrultusunda üretilen bu sinyal, hidrolik silindirin piston hareketini doğrudan belirlemektedir (Demircan and Bıçakçı, 2025). Böylece pistonun ileri-geri hareketi sırasında su kütlesi itilip çekilerek dalga kanalında istenen karakteristiklere sahip düzenli dalgalar oluşturulmaktadır. Kontrol yazılımının FPGA üzerinde çalıştırılması sayesinde, sistem mikrosaniye mertebesinde çevrim süreleri ile yüksek çözünürlüklü ve kararlı bir kontrol performansı sunmaktadır. Şekil 7.2’de Labview yazılımında kullanılan program parçacığı verilmiştir.



**Şekil 7.2:** Hidrolik sistem konum kontrolü (Demircan and Biçakçı, 2025).

Şekil 7.3'te, piston tip dalga üretici sistemin kontrol yapısı altında çalıştırılması sonucunda dalga kanalında elde edilen düzenli dalga oluşumu gösterilmektedir. Görselde, pistonun ileri-geri hareketi ile su kütlelerinin kontrollü biçimde itilip çekildiği ve bu etkileşim sonucunda kanal boyunca ilerleyen belirgin bir serbest yüzey dalgasının meydana geldiği görülmektedir. Dalga cephesinin piston plakasına yakın bölgede daha enerjik bir karakter sergilemesi, piston hareketi ile su kütlesi arasındaki doğrudan momentum aktarımını açıkça ortaya koymaktadır. Üretilen dalgaların süreklilik ve tekrarlanabilirlik göstermesi, kontrol sisteminin piston konumunu referans sinyali doğrultusunda kararlı bir şekilde takip ettiğini göstermektedir. Dalga tepe ve çukur yapılarının belirginliği, hidrolik pistonun genlik ve frekans parametrelerinin dalga kanalına etkin biçimde aktarıldığını işaret etmektedir. Ayrıca dalga formunun düzensiz kırılmalar veya ani yüzey bozulmaları içermemesi, sistemin düşük titreşimli ve kararlı bir mekanik davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.



**Şekil 7.3:** Dalga üretimi-I.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında,  $24\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$  boyutlarındaki laboratuvar ölçekli dalga kanalı için yerli imkânlarla geliştirilen piston tip dalga üretici sistemin tasarımı, yapısal analizi, imalatı, kontrolü ve deneysel doğrulaması bütüncül bir mühendislik yaklaşımıyla ele alınmıştır. Gerçekleştirilen statik, zamana bağlı ve modal analizler sonucunda, tasarlanan sistemin hem en olumsuz yükleme koşulları altında hem de gerçek çalışma senaryolarında yeterli rijitlik, dayanım ve dinamik kararlılık sağladığı ortaya konulmuştur. Maksimum deformasyonların dalga üretim hassasiyetini olumsuz etkilemeyecek seviyelerde kaldığı, eşdeğer gerilme değerlerinin kullanılan S235JR yapısal çeliğin akma ve yorulma sınırlarının altında olduğu belirlenmiştir. Modal analizler, sistemin doğal frekanslarının çalışma frekansından oldukça yüksek olduğunu göstermiş ve rezonans riskinin bulunmadığını doğrulamıştır. Deneysel uygulama aşamasında ise piston tip dalga üreticinin, FPGA tabanlı gerçek zamanlı konum kontrolü altında düzenli dalgaları kararlı ve tekrarlanabilir biçimde üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, piston tip sistemin mevcut flap tip dalga üreticilere kıyasla mekanik yük dağılımı, uzun periyotlu dalga üretim kapasitesi ve yapısal öngörülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalar için, geliştirilen piston tip dalga üretici sistemin aktif dalga soğurma (active absorption) algoritmaları ile desteklenerek yansıma katsayısının daha da düşürülmesi önerilmektedir. Ayrıca, düzensiz dalga spektrumlarının (JONSWAP, Pierson–Moskowitz) sistematik olarak üretilmesi ve ölçülmesi, kontrol algoritmalarının performansını daha kapsamlı biçimde değerlendirme imkânı sağlayacaktır. Çoklu pistonlu veya segmentli dalga üretici konfigürasyonlarının incelenmesi, üç boyutlu dalga alanlarının üretimi açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Son olarak, geliştirilen açık kaynaklı kontrol altyapısının ve tasarım metodolojisinin farklı ölçeklerdeki dalga kanallarına uyarlanması, ülkemizde deneysel kıyı ve açık deniz mühendisliği altyapısının güçlendirilmesine ve dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

## 9.KAYNAKLAR

- Aljber, M., Aljber, M., Nogami, K., Jeong, J.-S., Cabrera, J. S., and Lee, H. S.** (2023). Tsunami modelling in a built-in coastal environment with adaptive mesh refinement and varying bottom friction. *Coastal Engineering Proceedings*, (37), management.40. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.management.40>
- Anbarsooz, M., Passandideh-Fard, M., and Moghiman, M.** (2013). Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks. *Ocean Engineering*, 59, 73–85. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2012.11.011>
- Blenkinsopp, C. E., Bayle, P. M., Conley, D. C., Masselink, G., Gulson, E., Kelly, I., ... Schimmels, S.** (2021). High-resolution, large-scale laboratory measurements of a sandy beach and dynamic cobble berm revetment. *Scientific Data 2021 8:1*, 8(1), 22-. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00805-1>
- Canard, M., Ducrozet, G., and Bouscasse, B.** (2024). Generation of controlled irregular wave crest statistics in experimental and numerical wave tanks. *Ocean Engineering*, 310, 118676. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.118676>
- Cho, Y. H., Nakamura, T., Mizutani, N., and Lee, K. H.** (2020). An Experimental Study of a Bottom-Hinged Wave Energy Converter with a Reflection Wall in Regular Waves—Focusing on Behavioral Characteristics. *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 6734*, 10(19), 6734. <https://doi.org/10.3390/APP10196734>
- Conde, J. M. P.** (2019). Comparison of different methods for generation and absorption of water waves. In *Science Engenharia Térmica (Thermal Engineering)* (Vol. 18).
- Dadmarzi, F. H., and Bachynski-Polić, E. E.** (2022). Comparison of laboratory wave generation techniques on response of a large monopile in irregular sea. *Journal of Physics: Conference Series*, 2362(1). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2362/1/012011>
- Dadmarzi, F. H., Tonnel, M., Thys, M., Bachynski-Polić, E. E., and Kristiansen, T.** (2021). Experimental study on the effect of second order wavemaker theory on the response of a flexible large diameter monopile in irregular sea. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018(1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2018/1/012010>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Demircan, B., and Biçakçı, S.** (2025). Generation of regular waves with FPGA based controller in a wave channel. *Araştırma Makalesi BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 27(2), 519–536. <https://doi.org/10.25092/baunfbcd>
- Beneduce, M.** (2018). Politecnico di torino collegio di ingegneria meccanica, aerospaziale, dell'autoveicolo e della produzione Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica Design of a wavemaker for the water tank at the Politecnico di Torino.
- Divinsky, B. V., and Kosyan, R. D.** (2019). Spectral structure of surface waves and its influence on sediment dynamics. *Oceanologia*, 61(1), 89–102. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2018.07.003>
- Drzewiecki, M. A., and Guzinski, J.** (2022). Application of the ISE Optimized Proportional Control of the Wave Maker in a Towing Tank. *IEEE Access*, 10, 42137–42148. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3168047>
- El Koussaifi, R., Tikan, A., Toffoli, A., Randoux, S., Suret, P., and Onorato, M.** (2018). Spontaneous emergence of rogue waves in partially coherent waves: A quantitative experimental comparison between hydrodynamics and optics. *Physical Review E*, 97(1). <https://doi.org/10.1103/PHYSREVE.97.012208>
- Gyongy, I., Richon, J. B., Bruce, T., and Bryden, I.** (2014). Validation of a hydrodynamic model for a curved, multi-paddle wave tank. *Applied Ocean Research*, 44, 39–52. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2013.11.002>
- Hafsa, B., Abdellatif, E. M., and Mounir, H.** (2020). Wave generation in an OWC system for wave energy conversion. *MATEC Web of Conferences*, 307, 01012. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/202030701012>
- Hess, F., Boes, R. M., and Evers, F. M.** (2023). Forces on a Vertical Dam due to Solitary Impulse Wave Run-Up and Overtopping. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(7). <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13200>
- Jia, W., Liu, S., Li, J., and Fan, Y.** (2020). A Three-Dimensional Numerical Model with an L-Type Wave-Maker System for Water Wave Simulations by the Moving Boundary Method. *Water* 2020, Vol. 12, Page 161, 12(1), 161. <https://doi.org/10.3390/W12010161>
- Jung, J., Hwang, J. H., and Borthwick, A. G. L.** (2020). Piston-Driven Numerical Wave Tank Based on WENO Solver of Well-Balanced Shallow Water Equations. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(7), 1959–1982. <https://doi.org/10.1007/S12205-020-1875-3>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim, K.-M., Heo, J.-K., Jeong, S.-M., Park, J.-C., Kim, W.-J., and Cho, Y.-J.** (2013). Estimation of Wave Loads Acting on Stationary Floating Body Using Viscous Numerical Wave Tank Technique. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(3), 43–52. <https://doi.org/10.5574/ksoe.2013.27.3.043>
- Ko, H. S., and Lynett, P.** (2022). *Development of the Hydraulic-Control Wave-Maker for Study of Vertically-Variable Oceanographic Flows*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-1814369/V1>
- Krvavica, N., Ružić, I., and Ožanić, N.** (2018). New approach to flap-type wavemaker equation with wave breaking limit. *Coastal Engineering Journal*, 60(1), 69–78. <https://doi.org/10.1080/21664250.2018.1436242>
- Li, M.** (2005). An optimal controller of an irregular wave maker. *Applied Mathematical Modelling*, 29(1), 55–63. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2004.07.008>
- Lin, J., Hu, L., He, Y., Mao, H., Wu, G., Tian, Z., and Zhang, D.** (2023). Verification of solitary wave numerical simulation and case study on interaction between solitary wave and semi-submerged structures based on SPH model. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2023.1324273>
- Lomonaco, P., Robertson, B., and Rea, I.** (2023). A Removable elevated-hinge wave generator for testing marine energy devices. *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference*, 15. <https://doi.org/10.36688/EWTEC-2023-212>
- Lowell, S., McPhee, J., and Irani, R. A.** (2022). Plunger-type wavemakers with flow: Sensitivity analysis and experimental validation. *Applied Ocean Research*, 121, 103065. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2022.103065>
- Mallat, B., Germain, G., Billard, J., Gaurier, B., Facq, J.-V., Bacchetti, T., ... Bacchetti, T.** (2016). Visualisation 3D du phénomène de bullage autour de deux modèles d'étraves. *15èmes Journées de l'Hydrodynamique. 22 Au 24 Novembre 2016, Brest*. Retrieved from <https://archimer.ifremer.fr/doc/00412/52332/>
- Marin-Diaz, B., Bouma, T. J., and Infantes, E.** (2020). Role of eelgrass on bed-load transport and sediment resuspension under oscillatory flow. *Limnology and Oceanography*, 65(2), 426–436. <https://doi.org/10.1002/LNO.11312>
- Muarif, Halfiani, V., Rusdiana, S., Munzir, S., and Ramli, M.** (2018). Mathematical model of snake-type multi-directional wave generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 300(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/300/1/012047>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nouioui, B., and Doğan, M.** (2022). Irregular wavemaker (piston type) in a numerical and physical wave tank. *Usak University Journal of Engineering Sciences*, 5(2), 95–116. <https://doi.org/10.47137/UUJES.1180866>
- Kim, C., Lee, Y., Jeong, K.** (2010) Numerical Simulation of Two-dimensional Nonlinear Waves on Beaches Using a Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), 525–532. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2010.47.4.525>
- Orszaghova, J., Borthwick, A. G. L., and Taylor, P. H.** (2012). From the paddle to the beach—a Boussinesq shallow water numerical wave tank based on Madsen and Sørensen’s equations. *Journal of Computational Physics*, 231(2), 328–344. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2011.08.028>
- Orszaghova, J., Taylor, P. H., Borthwick, A. G. L., and Raby, A. C.** (2014). Importance of second-order wave generation for focused wave group run-up and overtopping. *Coastal Engineering*, 94, 63–79. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2014.08.007>
- Prasad, D. D., Ahmed, M. R., and LEE, Y. H.** (2025). Performance improvement of a full-scale oscillating water column device by employing a novel double oscillating water column. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 239(3), 635–648. [https://doi.org/10.1177/14750902241299585/SUPPL\\_FILE/SJ-XLSX-1-PIM-10.1177\\_14750902241299585.XLSX](https://doi.org/10.1177/14750902241299585/SUPPL_FILE/SJ-XLSX-1-PIM-10.1177_14750902241299585.XLSX)
- Prayogo, R. D., and Wiryanto, L. H.** (2013). Numerical simulation of linear water waves using Smoothed Particle Hydrodynamics. *Numerical Simulation of Linear Water Waves Using Smoothed Particle Hydrodynamics*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/343818215\\_Numerical\\_simulation\\_of\\_linear\\_water\\_waves\\_using\\_Smoothed\\_Particle\\_Hydrodynamics](https://www.researchgate.net/publication/343818215_Numerical_simulation_of_linear_water_waves_using_Smoothed_Particle_Hydrodynamics)
- Ramos, H. M., Antonio, J., Díaz, R., Matos, J., Shemer, L., Liu, J., Cengiz Ertekin, R.** (2023). A Comparative Study on Generation and Propagation of Nonlinear Waves in Shallow Waters. *Journal of Marine Science and Engineering 2023, Vol. 11, Page 917, 11(5)*, 917. <https://doi.org/10.3390/JMSE11050917>
- Schimmels, S., Sriram, V., and Didenkulova, I.** (2014). *On the generation of tsunami in a large scale wave flume.*

## **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Shalby, M., Elhanafi, A., Walker, P., and Dorrell, D. G.** (2019). *CFD modelling of a small-scale fixed multi-chamber OWC device.*
- Song, J., and Lim, H. C.** (2019). Study of Floating Wind Turbine with Modified Tension Leg Platform Placed in Regular Waves. *Energies 2019, Vol. 12, Page 703, 12(4), 703.* <https://doi.org/10.3390/EN12040703>
- Song, X., Yao, J., Liu, W., Shu, Y., and Xu, F.** (2022). Numerical Generation of Solitary Wave and Its Propagation Characteristics in a Step-Type Flume. *Journal of Marine Science and Engineering 2023, Vol. 11, Page 35, 11(1), 35.* <https://doi.org/10.3390/JMSE11010035>
- Szmidt, K., and Hedzielski, B.** (2016). Transformation of Long Waves in a Canal of Variable Section. *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics, 63(1), 3–18.* <https://doi.org/10.1515/HEEM-2016-0001>
- Tetsuya Hiraishi, Ryohei Azuma, Nobuhito Mori, Toshihiro Yasuda, and Hajime Mase.** (2016). A New Generator for Tsunami Wave Generation. *Journal of Energy and Power Engineering, 10(3).* <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2016.03.004>
- Thai Le, H., Hoang Truong, H., Chi Minh City, H., Trung Ward, L., and Duc City, T.** (2025). Analysis of Wind-Wave Impact on Open Wave Channel Systems. *J. Phys, 12033.* <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2949/1/012033>
- Wang, H. E., and Chan, I. C.** (2020). Numerical Investigation of Wave Generation Characteristics of Bottom-Tilting Flume Wavemaker. *Journal of Marine Science and Engineering 2020, Vol. 8, Page 769, 8(10), 769.* <https://doi.org/10.3390/JMSE8100769>
- Xu, B., Wei, K., Qin, S., and Hong, J.** (2020). Experimental study of wave loads on elevated pile cap of pile group foundation for sea-crossing bridges. *Ocean Engineering, 197.* <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.106896>
- Yan, K., Dou, H., Oh, J., and Seo, D.** (2025). Numerical Comparison of Piston-, Flap-, and Double-Flap-Type Wave Makers in a Numerical Wave Tank. *Journal of Marine Science and Engineering 2025, Vol. 13, Page 2273, 13(12), 2273.* <https://doi.org/10.3390/JMSE13122273>
- Yan, S., Zou, Z., Wang, D., and You, Z.** (2023). Longshore Current Profiles and Instabilities on Plane Beaches with Mild Slopes. *Journal of Marine Science and Engineering 2023, Vol. 11, Page 172, 11(1), 172.* <https://doi.org/10.3390/JMSE11010172>

- Yu, Y., Zhao, T., Duan, M., Zhou, T., Xu, J., Su, Y., Liu, H.** (2019). Experimental investigation on the underwater soft yoke mooring system considering sloshing. *Ships and Offshore Structures*, *14*(3), 309–319. <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1498569>
- Zhang, X., Lv, J., Hui, R., He, D., and Wang, K.** (2024). The hydrodynamic study of the interaction between waves and objects in permeable reef environment. *Ocean Engineering*, *305*, 118000. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.118000>

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ahmet KUŞÇUOĞLU

Doğum tarihi ve yeri : 04/08/1987- Balıkesir

E-posta : kuscuogluahmet@outlook.com

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Üniversite / Bölüm		Yıl
Yüksek Lisans	Balıkesir Üniversitesi	Makine Mühendisliği	
Lisans	Balıkesir Üniversitesi	Makine Mühendisliği	2019
Lise	Özel Nilüfer Fen Lisesi	Fen Lisesi	2004