

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**HİDROLİK TAHRİKLİ BİR DALGA KANALINDA GERÇEK  
ZAMANLI DALGA ÜRETİMİ İÇİN FPGA TABANLI KONTROLÇÜ  
TASARIMI**

**BATIN DEMİRCAN**

**DOKTORA TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. Sabri BIÇAKÇI (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Murat LÜY  
Prof. Dr. Mustafa KURT  
Doç. Dr. Ersin AKYÜZ  
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin AYDİLEK

**BALIKESİR, ŞUBAT – 2026**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Hidrolik Tahrikli Bir Dalga Kanalında Gerçek Zamanlı Dalga Üretimi İçin FPGA Tabanlı Kontrolcü Tasarımı**” 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 eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

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

**Batın DEMİRCAN**

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2024/042 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**HİDROLİK TAHRİKLİ BİR DALGA KANALINDA GERÇEK ZAMANLI DALGA  
ÜRETİMİ İÇİN FPGA TABANLI KONTROLCÜ TASARIMI  
DOKTORA TEZİ  
BATIN DEMİRCAN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SABRİ BIÇAKÇI)**

**BALIKESİR, ŞUBAT - 2026**

Bu tez çalışmasında, bir dalga kanalında düzenli dalga üretiminin kararlı, tekrarlanabilir ve otonom bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla, hidrolik servo silindir (HSS) tahrikli piston tip dalga üretici (PTWM) için FPGA tabanlı gelişmiş bir kontrol mimarisi tasarlanmış, kontrolcü parametreleri optimize edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Kontrol sistemi, LabVIEW yazılımı ve NI CompactRIO-9074 donanımı kullanılarak geliştirilmiş olup, HSS ile tahrik edilen PTWM'nin davranışı deneysel veriler yardımıyla modellenmiştir. Elde edilen modeller doğrultusunda, öncelikle klasik PI kontrolcü ile konum kontrolü gerçekleştirilmiş, ardından Takagi-Sugeno (TS) bulanık mantık tabanlı bir kontrolcü tasarlanmıştır.

Kontrol yapısı iki katmanlı bir mimari şeklinde ele alınmıştır. İç katmanda HSS'nin konum kontrolü PI/TS bulanık kontrolcülerle sağlanmış, kontrolcülere ait parametreler Particle Swarm, Harris Hawks ve Slime Mould Algoritmaları kullanılarak ITAE tabanlı performans ölçütüne göre optimize edilmiştir. Ayrıca TS denetleyiciye ait 27 parametrelilik kural tabanlı benzerlik analizi ile 9 parametreye indirgenmiştir. Dış katmanda ise dalga yüksekliği ölçümlerine dayalı olarak yüzey dalgallılık oranı (SRI) tabanlı PI dalga kontrolcüsü geliştirilmiştir.

Gerçek zamanlı deneyler sonucunda, HSS konum kontrolü için önerilen TS bulanık denetleyicinin klasik PI denetleyiciye kıyasla daha düşük takip hatası ve daha yüksek kararlılık sağladığı gösterilmiştir. Dalga yüksekliği kontrolü için ise PI kontrolcü parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen FPGA tabanlı iki katmanlı kontrol mimarisi, PTWM'ler için otonom ve yüksek doğruluklu dalga üretimi açısından uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Düzensiz dalga üretimi kapsamında ise kullanıcı tarafından türetilen JONSWAP spektrumuna bağlı olarak elde edilen referans HSS konum sinyalleri HSS'ye FPGA tabanlı olarak gerçek zamanlı kontrol yapısı üzerinden uygulanmış ve düzensiz dalga üretimi sağlanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Dalga Kanalı, FPGA, Hidrolik Sistem, Kontrol teorisi,

Bilim Kod / Kodları : 93423

Sayfa Sayısı : 135

## ABSTRACT

### FPGA-BASED CONTROLLER DESIGN FOR REAL-TIME WAVE GENERATION IN A HYDRAULICALLY DRIVEN WAVE CHANNEL

PH.D THESIS

BATIN DEMİRCAN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. SABRİ BIÇAKÇI)

BALIKESİR, FEBRUARY - 2026

In this thesis, an FPGA-based advanced control architecture is designed, controller parameters are optimized, and the system is experimentally validated to achieve stable, repeatable, and autonomous regular wave generation in a wave channel using a hydraulic servo cylinder (HSS) driven piston-type wave maker (PTWM). The control system is developed using LabVIEW software and NI CompactRIO-9074 hardware, and the dynamic behavior of the HSS-driven PTWM is modeled based on experimental data. Based on the obtained models, position control is first implemented using a classical PI controller, followed by the design of a Takagi–Sugeno (TS) fuzzy logic-based controller.

The control structure is addressed as a two-layer architecture. In the inner layer, the position control of the HSS is achieved using PI and TS fuzzy controllers, whose parameters are optimized according to an ITAE-based performance criterion using Particle Swarm Optimization, Harris Hawks Optimization, and Slime Mould Algorithm. In addition, the 27-parameter rule base of the TS controller is reduced to 9 parameters through similarity analysis, thereby decreasing the computational burden. In the outer layer, a PI wave controller based on the Surface Roughness Index (SRI) is developed using wave height measurements.

Real-time experimental results demonstrate that the proposed TS fuzzy controller provides lower tracking error and higher stability than the classical PI controller for HSS position control. For wave height control, the PI controller parameters are determined experimentally. Overall, the developed FPGA-based two-layer control architecture offers a practical and high-accuracy solution for autonomous wave generation in PTWM systems. Within the scope of irregular wave generation, reference HSS position signals derived from a user-generated JONSWAP spectrum are applied to the HSS through the FPGA-based real-time control structure, enabling the generation of irregular waves.

**KEYWORDS:** : Control Theory, FPGA, Hydraulic System Wave Channel

Science Code / Codes : 93423

Page Number : 135

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Özgün Katkıları .....	2
1.2 Tez Çalışmasının Arka Planı .....	3
<b>2. DALGA KANALI SİSTEMLERİ VE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR..</b>	<b>5</b>
2.1 Dalga Kanalları ve Dalga Üreticili Sistemler .....	5
2.1.1Su Dalgası Üretici Türleri .....	7
2.1.2Su dalgası türleri.....	11
2.2 Dalga Üreticili Yapılarda Tahrik Sistemleri .....	14
2.3 Dalga Kanalı Yapılarında Kullanılan Hidrolik Sistemler ve Sistem Bileşenleri..	15
2.3.1Hidrolik pompalar .....	16
2.3.2Hidrolik kontrol elemanları .....	17
2.3.3Hidrolik akümülatörler .....	17
2.3.4Hidrolik silindirler.....	19
2.3.5Hidrolik borular .....	22
2.4 Hidrolik Sistem Kontrolü Alanında Gerçekleştirilen Çalışmalar .....	22
<b>3. HİDROLİK SERVO SİLİNDİR (HSS) İÇİN KONTROLÇÜ TASARIMI VE</b>	
<b>PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ</b> .....	<b>26</b>
3.1 $PI^{(HSS)}$ Kontrolcü Yapısı.....	26
3.2 Bulanık Mantık Kontrolcü Yapısı.....	28
3.2.1Bulanık mantık sisteminin yapısı ve işleyişi .....	28
3.3 Kontrolcü Parametrelerinin Optimizasyonu .....	32
3.3.1Parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization) .....	33
3.3.2Harris şahinleri optimizasyonu (harris hawks optimization) .....	33
3.3.3Cıvık mantar algoritması (slime mould algorithm).....	35
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>36</b>
4.1 Dalga Kanalı Kontrol Donanımı ve Alt Donanım Bileşenleri.....	37
4.1.1Analog giriş ve analog çıkış modülleri.....	40
4.2 FPGA Programlama.....	41
4.3 Dalga Kanalında Düzenli ve Düzensiz Dalga Üretim Yapısı.....	45
4.4 Dalga Kanalı Yapısı .....	47
4.4.1Flap tür dalga üreticili sistem .....	49
4.4.2Piston tür dalga üreticili sistem .....	51
4.4.3Kıyı tip dalga sönmüleyici yapısı .....	55
4.5 Dalga Ölçüm Sistemi .....	56
4.6 Dalga Kanalı Hidrolik Sistem Yapısı .....	58
4.7 Dalga Kanalı Elektronik Donanım Panosu .....	63

<b>5. PİSTON TÜR DALGA ÜRETİCİLİ HİDROLİK SİSTEM MODELİ.....</b>	<b>65</b>
5.1 Kara Kutu Modelleme Yaklaşımı .....	65
5.1.1 Transfer fonksiyonu modeli .....	67
5.1.2 Dışsal girişli otoregresif modeli .....	69
5.1.3 Durum uzayı modeli .....	70
5.1.4 Model seçimi .....	72
<b>6. KONTROLCÜ PERFORMANSLARI .....</b>	<b>79</b>
6.1 $PI^{(HSS)}$ Kontrolcü Parametre Optimizasyonu .....	81
6.2 TS Bulanık Mantık Kontrolcü .....	87
6.2. $TS^{(HSS)}$ kontrolcü parametre optimizasyonu .....	90
<b>7. LABVIEW TABANLI KONTROL VE DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>	<b>96</b>
7.1 FPGA Tabanlı Kontrol.....	96
7.2 HSS Gerçek Zamanlı Konum Kontrolü.....	98
7.3 Üretilen Dalga Frekansının Spektral Doğrulanması .....	103
7.4 Otonom Dalga Üretiminde Dalga Yüksekliği Kontrolü .....	105
<b>8. SONUÇLAR .....</b>	<b>125</b>
<b>9. KAYNAKLAR .....</b>	<b>126</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>135</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: Temel bir dalga kanalı yapısı.....	5
Şekil 2.2: Dikdörtgen kesitli dalga kanalı.....	6
Şekil 2.3: Dairesel yapıli dalga kanalı.....	6
Şekil 2.4: Kare kesitli dalga kanalı. ....	7
Şekil 2.5: “C” tipi dalga kanalı. ....	7
Şekil 2.6: Dalga üretici türleri (a-Flap tür, b-Piston tür, c-Plunger tür, d-Duck tür). ....	8
Şekil 2.7: Örnek düzenli dalga yapısı. ....	11
Şekil 2.8: Farklı frekans ve genlikli düzenli dalga sinyalleri.....	12
Şekil 2.9: Örnek düzensiz dalga formu. ....	12
Şekil 2.10: Hidrolik pompa yapıları.....	17
Şekil 2.11: Membran akümülatör, balon akümülatör ve pistonlu akümülatör yapıları .....	18
Şekil 2.12: Temel hidrolik silindir yapısı.....	19
Şekil 2.13: Tek etkili hidrolik silindir yapısı .....	19
Şekil 2.14: Tek etkili hidrolik silindir sembolleri .....	20
Şekil 2.15: Çift etkili hidrolik silindir yapısı .....	20
Şekil 2.16: Çift etkili hidrolik silindir sembolü .....	20
Şekil 2.17: Çift etkili ve çift milli hidrolik silindir yapısı.....	21
Şekil 2.18: Çift etkili ve çift milli hidrolik silindir sembolü.....	21
Şekil 2.19: Hidrolik tandem silindir .....	21
Şekil 2.20: Hidrolik teleskopik silindir .....	22
Şekil 3.1: Genel bir ikinci dereceden sistemin birim basamak girişine verdiği tipik zamana bağlı tepki eğrisi. ....	28
Şekil 3.2: Bulanık arabirim sistemi.....	29
Şekil 4.1: Laboratuvar tip dalga kanalı sistem şeması. ....	36
Şekil 4.2: Laboratuvar tip dalga kanalı sistemi elektronik ve hidrolik bileşen şeması. ....	37
Şekil 4.3: FPGA kod dönüşümü ve programlama. ....	39
Şekil 4.4: CRIO-9074 donanımı. ....	40
Şekil 4.5: CRIO-9074 ve modül kullanımı. ....	41
Şekil 4.6: FPGA tabanlı proje yapısı.....	42
Şekil 4.7: FPGA dosya derleme aşaması-I.....	42
Şekil 4.8: FPGA dosya derleme aşaması-II. ....	43
Şekil 4.9: Dalga kanalı otonom düzenli dalga üretimi kontrolör yapısı. ....	45
Şekil 4.10: Dalga kanalı otonom düzenli dalga üretimi kontrolör yapısı. ....	46
Şekil 4.11: Dalga kanalı düzensiz dalga üretimi kontrolör yapısı. ....	47
Şekil 4.12: Laboratuvar tip dalga kanalı-I.....	48
Şekil 4.13: Laboratuvar tip dalga kanalı-II. ....	49
Şekil 4.14: Flap tür dalga üretici yapısı. ....	49
Şekil 4.15: Flap tür dalga üretici ile dalga üretimi şematik yapı .....	50
Şekil 4.16: Flap tür dalga üreticili sistemde dalga üretimi. ....	51
Şekil 4.17: PTWM ile dalga üretimi şematik yapı.....	52
Şekil 4.18: PTWM yapısı-I. ....	53

## ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 4.19: PTWM yapısı-II.....	53
Şekil 4.20: Dalga kanalında PTWM ile dalga üretimi .....	54
Şekil 4.21: PTWM fiziksel limitleme yapısı.....	55
Şekil 4.22: Kıyı tip dalga sönümleyici yapısı .....	55
Şekil 4.23: Dalga kanalı su seviye ölçüm şeması .....	56
Şekil 4.24: Wallingford su seviye ölçüm sistemi.....	56
Şekil 4.25: Dalga kanalında bulunan ölçüm probu .....	57
Şekil 4.26: Dalga ölçümü için fiziksel doğrulama yapısı .....	57
Şekil 4.27: Prob kalibrasyon ölçümleri.....	58
Şekil 4.28: Çift etkili ve çift milli HSS.....	58
Şekil 4.29: Hidrolik güç ünitesi .....	59
Şekil 4.30: Hidrolik sistem şeması.....	60
Şekil 4.31: HSS'nin ileri yön ve geri yön çalışma yapısı .....	61
Şekil 4.32: Hidrolik sistem elektronik panosu .....	62
Şekil 4.33: Hidrolik sistem uzak kontrol elektronik panosu.....	62
Şekil 4.34: Hidrolik sistem uzak kontrol elektronik panosu.....	63
Şekil 5.1: MATLAB yazılımı SIT modülü. ....	66
Şekil 5.2: Farklı sistem tanımlama modellerinin zaman-konum tepkileriyle deneysel veriye uyumlarının karşılaştırılması. ....	67
Şekil 5.3: HSS sürekli zaman 3.dereceden durum uzayı modeli-bode diyagramı. ....	73
Şekil 5.4: HSS ayrık zaman 3.dereceden durum uzayı modeli-bode diyagramı.....	73
Şekil 5.5: HSS ayrık zaman ARX modeli-bode diyagramı.....	74
Şekil 5.6: HSS ayrık zaman 3.dereceden transfer fonksiyonu modeli-bode diyagramı.....	75
Şekil 5.7: HSS sürekli zaman 3.dereceden transfer fonksiyonu modeli-bode diyagramı... 76	
Şekil 5.8: HSS sürekli zaman 3.dereceden transfer fonksiyonu modeli-kutuplar ve sıfırlar haritası.....	77
Şekil 6.1: $PI^{(HSS)}$ kontrolcü Matlab/Simulink modeli.....	79
Şekil 6.2: $PI^{(HSS)}$ kontrolcü grid search algoritması sonuçları.....	80
Şekil 6.3: $PI^{(HSS)}$ kontrolcü için PSO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı . 81	
Şekil 6.4: $PI^{(HSS)}$ kontrolcü için HHO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı 83	
Şekil 6.5: $PI^{(HSS)}$ kontrolcü için SMA algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı. 84	
Şekil 6.6: $TS^{(HSS)}$ kontrolcü Matlab/Simulink modeli .....	87
Şekil 6.7: $TS^{(HSS)}$ kontrolcü tasarım adımları.....	89
Şekil 6.8: $TS^{(HSS)}$ kontrolcü için PSO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı. 92	
Şekil 6.9: $TS^{(HSS)}$ kontrolcü için HHO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı. ....	94
Şekil 6.10: $TS^{(HSS)}$ kontrolcü için SMA algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı. ....	95
Şekil 7.1: RT Target GUI ön panel. ....	96
Şekil 7.2: RT Target GUI arka panel. ....	97
Şekil 7.3: FPGA yazılımı GUI ön panel. ....	97
Şekil 7.4: FPGA yazılımı arka panel.....	98
Şekil 7.5: HSS gerçek zamanlı basamak sinyal yanıtı. ....	99
Şekil 7.6: HSS sinüzoidal sinyal konum cevabı.....	101
Şekil 7.7: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-I.....	103
Şekil 7.8: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-II. ....	104
Şekil 7.9: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-III. ....	104

## ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 7.10: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-IV .....	105
Şekil 7.11: Farklı frekanslarında otonom dalga üretimi dalga yüksekliği değişimleri-I...	108
Şekil 7.12: Farklı frekanslarda otonom dalga üretimi dalga yüksekliği değişimleri-II. ...	109
Şekil 7.13: Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-I .....	110
Şekil 7.14: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-I .....	110
Şekil 7.15: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-I .....	111
Şekil 7.16: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-I. .....	112
Şekil 7.17: Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-II .....	112
Şekil 7.18: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-II.....	113
Şekil 7.19: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-II.....	113
Şekil 7.20: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-II .....	114
Şekil 7.21: Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-III.....	114
Şekil 7.22: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-III .....	115
Şekil 7.23: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-III .....	115
Şekil 7.24: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-III. .....	116
Şekil 7.25: Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-IV .....	116
Şekil 7.26: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-IV .....	117
Şekil 7.27: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-IV .....	117
Şekil 7.28: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-IV. .....	118
Şekil 7.29: Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-V .....	118
Şekil 7.30: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-V.....	119
Şekil 7.31: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-V.....	119
Şekil 7.32: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-V. .....	120
Şekil 7.33: Otonom dalga üretimi su yüksekliği değişimi-V .....	120
Şekil 7.34: Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-VI .....	121
Şekil 7.35: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-VI .....	121
Şekil 7.36: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-VI .....	122
Şekil 7.37: Otonom dalga üretimi su yüksekliği değişimi-VII .....	122
Şekil 7.38: Düzenli dalga üretimi dalga kanalı görüntüsü. ....	123
Şekil 7.39: Düzensiz dalga üretimi su yüzeyi değişimi-I.....	123
Şekil 7.40: Düzensiz dalga üretimi HSS konum değişimi-I .....	124
Şekil 7.41: Düzensiz dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-I .....	124

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Uluslararası örnek dalga üretim sistemleri.....	10
<b>Tablo 2.2:</b> Düzensiz dalga üretim yapısı. ....	13
<b>Tablo 4.1:</b> FPGA Yapısında Kullanılan FIFO Özellikleri.....	44
<b>Tablo 4.2:</b> FPGA Yapısında Kullanılan FIFO1 Yapılandırma Ayarları .....	44
<b>Tablo 4.3:</b> FPGA FIFO2 Yapılandırma Ayarları.....	45
<b>Tablo 5.1:</b> Hidrolik sistem modelleri.....	72
<b>Tablo 5.2:</b> Seçilen sistem modeli için Routh–Hurwitz tablosu. ....	77
<b>Tablo 6.1:</b> $PI^{(HSS)}$ kontrolcü için optimizasyon sonucunda bulunan değerler.....	86
<b>Tablo 6.2:</b> $TS^{(HSS)}$ Kontrolcü için optimizasyon sonucunda bulunan değerler.....	95
<b>Tablo 7.1:</b> $PI^{(HSS)}$ ve $TS^{(HSS)}$ kontrolcü hidrolik sistem basamak sinyal sonuçları. ....	99
<b>Tablo 7.2:</b> $PI^{(HSS)}$ ve $TS^{(HSS)}$ kontrolcü hidrolik sistem sinüzoidal sinyal sonuçları. ....	101
<b>Tablo 7.3:</b> $PI^{(HSS)}$ ve $TS^{(HSS)}$ kontrolcü karşılaştırması.....	102
<b>Tablo 7.4:</b> Farklı $PI^{(Dalga)}$ katsayıları için hesaplanan SRI sonuçları .....	107

## ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam sürecinde birlikte çalışma fırsatını yakaladığım ve tüm bilgi birikimini açıkça ortaya koyan ve kritik noktalarda önemli yönlendirmeler ile destek olan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Sabri BIÇAKÇI'ya.

Tez çalışmasının ortaya konulmasında önemli katkıları bulunan; uzun yıllardır akademik yaşamımın yanı sıra özel hayatımda da her aşamada desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren ve benim için daima en iyisini gözetten çok kıymetli hocam Doç. Dr. Ersin AKYÜZ'e.

Tez çalışmalarına tecrübeleriyle katkıda bulunup, beni yönlendiren ve destekleyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin AYDİLEK'e,

Deneysel sistemin kurulumu ve yürütülmesi sürecinde laboratuvar olanaklarını eksiksiz şekilde sunarak her türlü desteği sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Nuray GEDİK ve Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ'a,

Destek ve katkılarını süreç boyunca esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Süleyman UZUNER'e,

Çalışma sürecim boyunca karşılaştığım güçlüklerin aşılmasında, bilgisi ve desteğiyle her zaman yanımda olan Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe YAREN'e

BAP 2024/042 no'lu proje kapsamında sağladıkları destek için Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne,

Dalga kanalının mekanik tasarım, üretim ve montaj kısımlarına kadar sağladıkları büyük desteklerden dolayı MK Makina Genel Müdürü İlker KARANFİL'e, MK Makina Proje Yöneticisi Ahmet KUŞÇUOĞLU'na ve MK Makina personeline,

İniş ve çıkışları ile birlikte uzun bir süreç olan doktora sürecim boyunca anlayışı, sabrı ve sürekli desteğiyle yanımda olan eşim Neriman ÇOBANOĞLU DEMİRCAN'a; varlığı ve sevgisiyle bana güç veren oğlum Bulut'a,

en içten duygularıyla sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2026**

**Batın Demircan**

# 1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan enerji ihtiyacı ve iklim değişikliğinin etkilerini azaltma zorunluluğu, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Bu bağlamda, deniz tabanlı yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde dalga enerjisi, sahip olduğu yüksek enerji yoğunluğu ve öngörülebilir dalga hareketleri sayesinde dikkat çeken bir alternatif hâline gelmiştir (Ezpeleta, Ulazia, Aristondo, and Ibarra-Berastegi, 2025). Dünya yüzeyinin yaklaşık %70'ini oluşturan okyanuslar, termal gradyan, gelgit akıntıları ve özellikle yüzey dalgaları gibi farklı fiziksel prensiplere dayanan enerji dönüşüm sistemleri için büyük bir potansiyel sunmaktadır (Cao et al., 2025).

Dalga enerjisi sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamak amacıyla elektrik üretimi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji araştırmaları kapsamında geliştirilen Dalga Enerjisi Dönüştürücüleri (Wave Energy Converter-WEC), salınlı su sütunu sistemleri, taşma tipi yapılar ve noktasal emiciler gibi farklı yapılarla deniz ortamında enerji dönüşümünü mümkün kılmaktadır (Rubio-Clemente, Velásquez, and Chica, 2022). Örnek olarak WEC'ler noktasal emiciler (point absorber), salınlı su sütunu sistemleri (Oscillating Water Column-OWC), taşma tipi yapılar (overtopping devices) gibi farklı tiplerde tasarlanmaktadır (Rizal and Ningsih, 2020). Ancak bu sistemlerin performanslarının optimize edilebilmesi için kontrollü laboratuvar koşullarında test edilmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaç, dalga üretiminin kontrollü biçimde gerçekleştirilebildiği dalga kanalları gibi deneysel altyapıların önemini artırmaktadır. Su dalgası üretici sistemlerin performansları ve dalga parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, bu kanalların tasarım ve işletiminde temel belirleyiciler arasında yer almaktadır (Rubio-Clemente et al., 2022). Bu sistemler deniz tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi bakımından da önemli bir yere sahiptir. Sonuç olarak, tarihsel süreçte çekme tankları, gemi hidrodinamiği alanında temel deneysel altyapılardan biri haline gelmiş, günümüzde ise hem klasik direnç deneylerinde hem de trim, dalga ve hareket etkileşimlerinin modellenmesinde vazgeçilmez bir unsur olmuştur. Ayrıca, deneysel verilerle beslenen sayısal modellerin geliştirilmesi, yeni nesil enerji verimli gemi tasarımlarında da önemli katkılar sağlamaktadır.

Aktarılan dalga üretim sistemleri özelinde kontrol mühendisliği, dalga etkisi altındaki açık deniz yapılarının dinamik tepkilerini incelemek ve bu yapılarda ortaya çıkan titreşimleri bastırmak amacıyla geliştirilen sistemlerin tasarımında kritik bir rol üstlenmektedir.

Dalga kanalı sistemleri deniz mühendisliği uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri, petrol ve doğal gaz platformları ile dalgakıran gibi açık deniz yapılarının, çeşitli dalga koşulları altında maruz kalacakları hidrodinamik yüklerin ve yapısal tepkilerin belirlenmesi için bu sistemler kontrollü bir deney ortamı sunmaktadır. Böylece, yapıların yorulma ömrü, stabilite sınırları ve tasarım parametreleri gerçekçi dalga senaryoları altında değerlendirilerek daha güvenli ve verimli mühendislik çözümleri geliştirilebilmektedir (M. Li, Zhang, and Guan, 2011; G. J. Liu, Farooq, Jiao, Wang, and Zhang, 2014; Muthukkumaran and Arun, 2015; Yuan and Wang, 2022). Ayrıca gemi mühendisliği alanında da dalga üretim sistemleri büyük bir öneme sahiptir. Özellikle “yüzen üretim, depolama ve boşaltma” (Floating Production, Storage and Offloading - FPSO) gibi yüzer deniz yapılarında gövdeye etki eden dalga kaynaklı yüklerin analizi için kullanılan bu sistemler, deniz taşıtlarının yapısal bütünlüğünün sağlanması ve denizcilik standartlarına uygunluklarının değerlendirilmesi açısından temel teşkil etmektedir (Kim, Mujeeb-Ahmed, Cabrera, and Paik, 2022).

Sonuç olarak, dalga enerjisi ve dalga kanalı içerisinde yer alan su dalgası üretim sistemleri, kontrol mühendisliğinden yenilenebilir enerji sistemlerine, deniz yapılarının tasarımından gemi mühendisliğine kadar çok disiplinli bir etkileşim alanında kritik görevler üstlenmektedir. Söz konusu sistemlerin hem fiziksel hem de kontrol temelli olarak modellenmesi, gerçek zamanlı kontrolcü yapılarla yönetilmesi ve performanslarının deneysel olarak değerlendirilmesi hem bilimsel literatüre hem de uygulamaya doğrudan katkı sunmaktadır.

### **1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Özgün Katkıları**

Bu tez çalışmasının temel amacı, laboratuvar tipi bir dalga kanalında, piston tür dalga üreticili (Piston Type Wave Maker – PTWM) hidrolik bir sistem kullanılarak kullanıcı tarafından istenilen dalga yüksekliği ve dalga genliğine sahip su dalgalarının yüksek hassasiyetli bir biçimde gerçekleştirilmesi için iki katmanlı bir kontrol yapısının geliştirilmesidir. Bu kapsamda alt kontrol yapısı, doğrudan piston konumunu denetleyen yüksek hızlı bir kapalı çevrim kontrol döngüsü olarak tasarlanmış; üst seviye kontrol ise ölçülen dalga verilerini gerçek zamanlı olarak analiz ederek, hedeflenen dalga karakteristiklerini sağlayacak şekilde sistem davranışını uyarlayan bir adaptif kontrol mekanizması olarak yapılandırılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan tüm kontrol algoritmaları ve program yapıları özgün biçimde geliştirilmiştir. Dalga üretim sistemi NI CRIO-9074 donanımı üzerinde çalışan “Alan programlanabilir kapı dizileri” (Field-Programmable Gate Array – FPGA) temelli olacak biçimde LabVIEW yazılım platformu ile gerçekleştirilmiş olup, kontrol kısmında yüksek döngü hızları ve yüksek örnekleme hızına sahip bir kontrol altyapısı sunmaktadır. Üst düzey kontrol birimi, ölçülen dalga yüksekliği verilerini sürekli olarak değerlendirerek, yalnızca hidrolik silindire bağlı bulunan PTWM’nin konumunu değil, aynı zamanda dalga kanalında üretilen dalga formunun hedeflenen parametrelere uygunluğunu da kontrol etmektedir. Geliştirilen kontrol sistemi ile dalga yüksekliği verileri gerçek zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarabilmekte ve bu veriler analiz amacıyla dijital ortamda kaydedilebilmektedir. Geliştirilen bu yapı, laboratuvar ölçekli dalga üretim sistemlerinde adaptif geri besleme tabanlı kontrol yaklaşımının uygulanabilirliğini göstermesi açısından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

## **1.2 Tez Çalışmasının Arka Planı**

Kontrol mühendisliği açısından incelendiğinde, klasik açık çevrim sistemlerden farklı olarak, ölçülen sistem çıktısına bağlı geri besleme üzerinden çalışan kapalı çevrim adaptif kontrol sistemlerinin pratikteki başarısını göstermektedir. Bu yapı sayesinde dalga üretim sistemi dış bozucular, hidrolik gecikmeler ve yapısal belirsizlikler gibi etmenlere karşı direnç kazanmakta, hedeflenen dalga üretim görevini kararlılıkla yerine getirebilmektedir. Gerçek zamanlı ölçüm ve kontrol sistemi entegrasyonu, hem dalga üretim sisteminin performansını artırmakta hem de kıyı mühendisliği uygulamalarında deneysel verilerin güvenilirliğini önemli ölçüde yükseltmektedir.

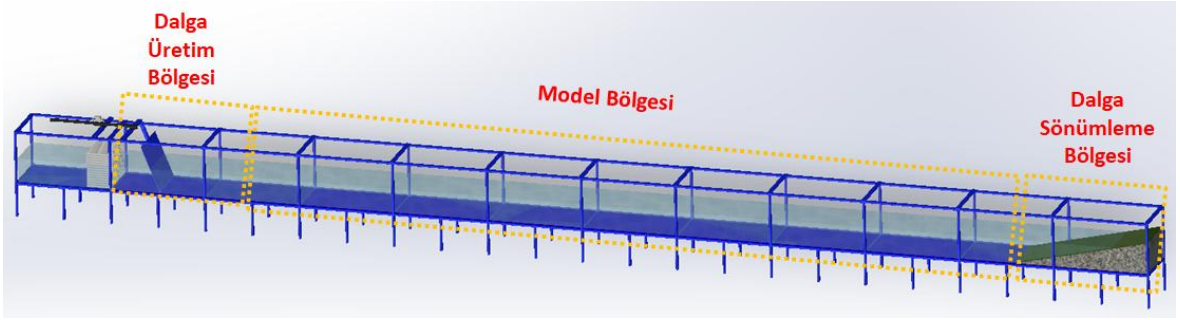
Kıyı mühendisliği açısından incelendiğinde ise dalga dinamiklerinin doğru şekilde modellenmesi ve laboratuvar koşullarında hassas biçimde yeniden üretilebilmesi, kıyı yapılarının tasarımı, boyutlandırılması ve güvenlik analizlerinin sağlıklı biçimde gerçekleştirilebilmesi için kritik öneme sahiptir. Dalga kanalında üretilen dalga formunun hedeflenen özelliklere uygunluğu, model deneylerinin geçerliliği ve doğruluğu açısından belirleyicidir. Gerçek zamanlı dalga ölçümüne dayalı bir kontrol mekanizması, üretilen dalgaların sürekli olarak izlenmesini ve ölçülen dalga yüksekliği ile hedeflenen profil arasındaki farklara göre dalga üretim sisteminin kendini anlık olarak uyarlamasını mümkün kılarak, deneysel koşullarda yüksek doğruluk sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, her iki

disiplinin kesişiminde yer alan özgün ve uygulamaya dönük bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır.

## 2. DALGA KANALI SİSTEMLERİ VE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

### 2.1 Dalga Kanalları ve Dalga Üreticili Sistemler

Laboratuvar tip temel bir dalga kanalı yapısı Şekil 2.1’de verilmiştir. Burada sunulan dalga kanalı sistemi dalga üretim bölgesi, model bölgesi ve dalga soğurma (sönümlenme) bölgesi olmak üzere üç temel işlevsel bölgeden oluşmaktadır. Bu yapılandırma, farklı dalga koşullarında yapılan deneylerin kontrollü, tekrarlanabilir ve güvenilir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Dalga üretim bölgesi, dalga kanalının bir ucunda yer almakta olup, hidrolik silindirik kontrollü bir flap tür dalga üretici sistem içermektedir. Bu sistem, farklı frekans ve genliklerde hassas dalga üretimi gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Dalga kanalındaki model bölgesi ise ana deney alanıdır. Dalga sönümlenme bölgesi, kanalın karşı ucunda yer almakta ve üretilen dalgaların yansımalarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu bölgede yer alan sönümleyici eğimli yapı, gelen dalga enerjisini emerek, deney alanına yansımalarını en aza indirmektedir.



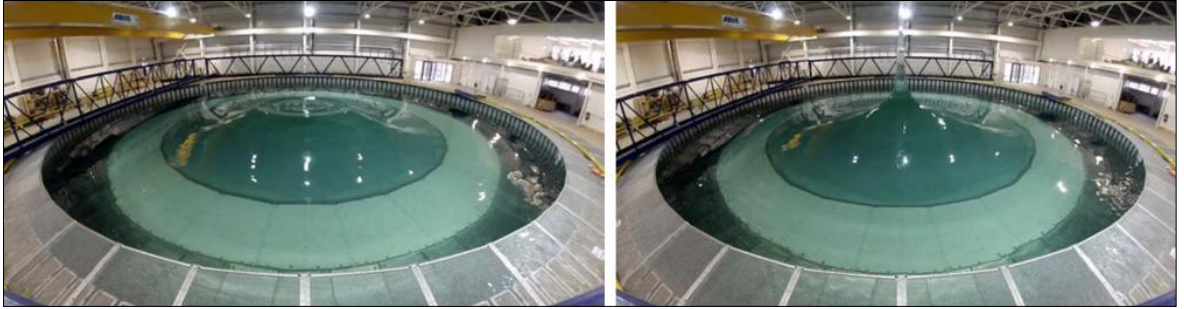
Şekil 2.1: Temel bir dalga kanalı yapısı

Dalga kanalı türleri geometrik yapılarına göre farklılıklar göstermektedir. En çok uygulama gerçekleştirilen ve karmaşıklığı diğer türlere göre daha az olan dalga kanalı türü Şekil 2.2’de (edinburghdesign, 2024) verilen dikdörtgen kesitli dalga kanalı yapısıdır.



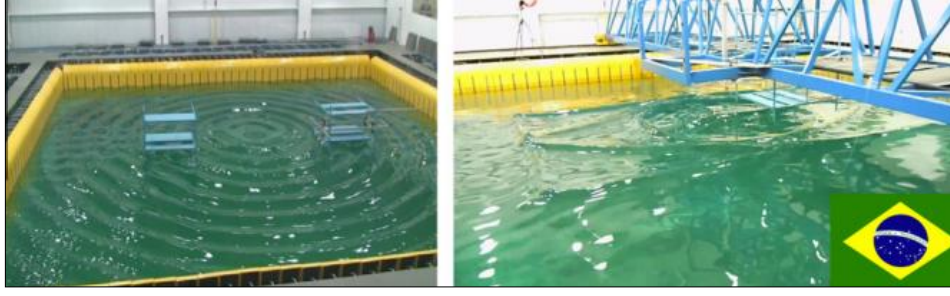
**Şekil 2.2:** Dikdörtgen kesitli dalga kanalı

Dairesel dalga kanalı yapılarının en gelişmiş örneklerinden biri FloWave TT test havuzudur. Edinburgh Üniversitesi'nde konumlandırılan bu yapı, çapı 25 metre olan dairesel bir şekildedir ve hem çok yönlü dalga üretimi hem de akım simülasyonu gerçekleştirebilen entegre bir sistem olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.3'de verilen havuzda toplam 168 adet kuvvet geri beslemeli dalga üretici bulunmaktadır (Ingram, Wallace, Robinson, and Bryden, 2014).



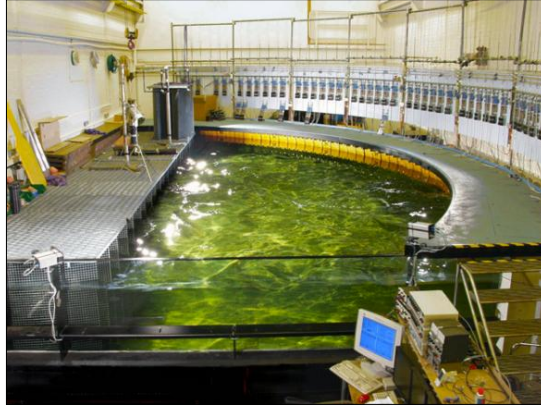
**Şekil 2.3:** Dairesel yapılı dalga kanalı

Şekil 2.4'de ise kare kesitli dalga kanalı yapısı verilmiştir. Bu dalga kanalı yapısı Brezilya'daki São Paulo Üniversitesi bünyesinde bulunan deneysel dalga kanalıdır. Kare kesitli dalga tankı her biri bağımsız olarak kontrol edilebilen toplam 148 adet dalga üretici ile donatılmıştır ve  $14\text{ m} \times 14\text{ m}$  boyutlarındadır (De Mello et al., 2013).



**Şekil 2.4:** Kare kesitli dalga kanalı

C tipi dalga kanalları, kavisli ve yarım daire biçimindeki geometrik yapılarıyla karakterize edilmektedir. Bu yapılandırma, dalga yayılımı sırasında oluşabilecek enerji kayıplarını ve yansımaları en aza indirerek dalga desenlerinin etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır (L. Zhang et al., 2020). Şekil 2.5’de görülen Edinburgh Üniversitesi’nde bulunan C-tipi dalga kanalındaki temel amaç, dalga kanalının hidrodinamik karakteristiğinin anlaşılması ve bu yapıyı temsil edebilecek sayısal model çalışmalarının gerçekleştirilmesi olarak aktarılmıştır (Gyongy, Richon, Bruce, and Bryden, 2014).

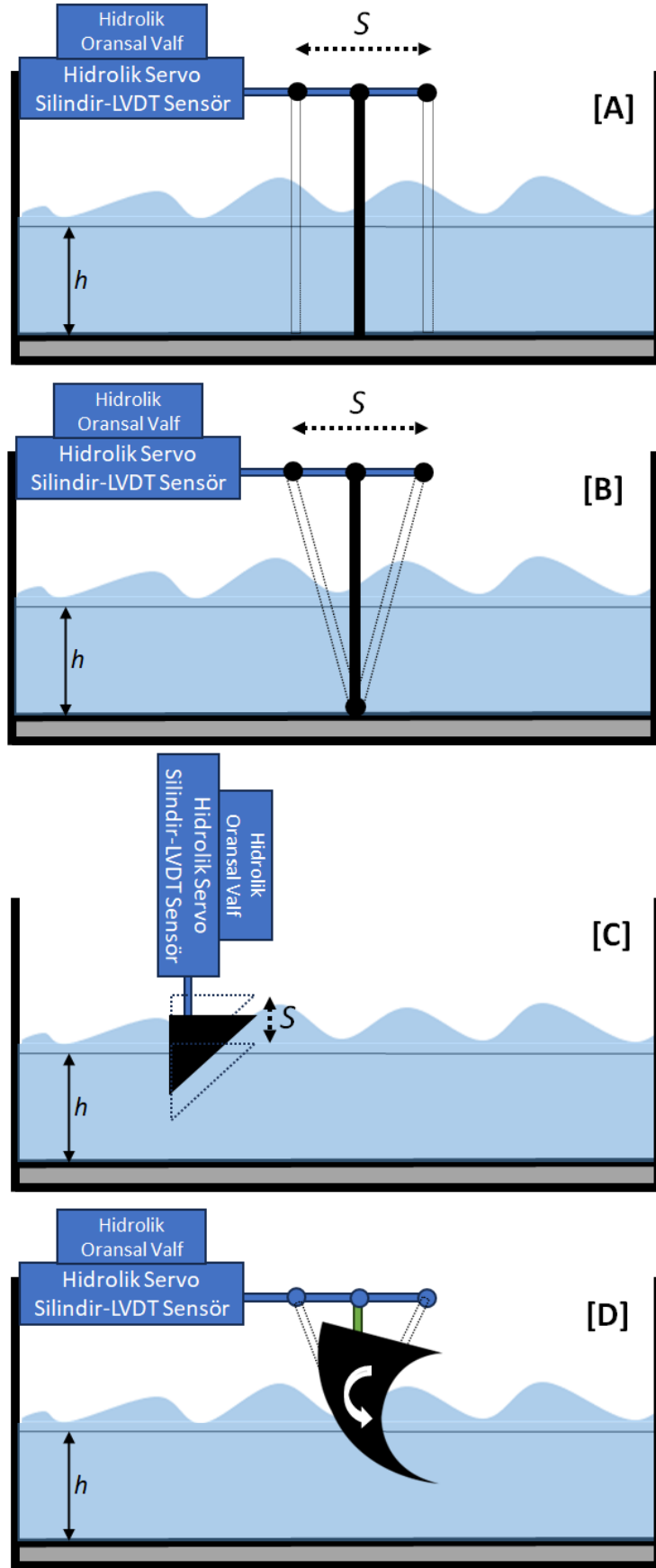


**Şekil 2.5:** “C” tipi dalga kanalı

Farklı türde bulunan dalga kanalı yapıları geometrik çeşitliliklerinin haricinde dalga üretiminin gerçekleştirildiği su dalgası üretici türlerine göre de sınıflandırılabilir.

### 2.1.1 Su Dalgası Üretici Türleri

Dalga kanallarında bulunan dalga üreticilerin temel işlevi hedef dalga yapısının üretilmesidir. Bu noktada flap tür, piston tür, plunger tür ve duck tür olmak üzere kullanılan dalga üretici türleri Şekil 2.6’da verilmiştir. Her bir dalga üreticili sistem için “ $h$ ” sistem kapalı haldeyken sabit su derinliğini ve “ $S$ ” ise dalga üretici sistemin hareket mesafesini temsil etmektedir.



Şekil 2.6: Dalga üretici türleri (a-Flap tür, b-Piston tür, c-Plunger tür, d-Duck tür)

Piston tipi dalga üreteçleri, genellikle tüm su kolonunu yatay doğrultuda ileri-geri hareket ettirerek dalga üretmektedir. Bu sistemler, özellikle sığ su koşullarında ve düşük frekanslı, uzun dalgaların oluşturulmasında etkilidir. Piston mekanizması, doğrusal raylar üzerinde hareket eden düzlemsel bir panelden oluşur ve bu panelin ileri-geri hareketiyle tek yönlü ve düzgün dalga cepheleri elde edilir.

Piston tipi sistemler, genellikle kapalı uçlu dalga kanallarında tercih edilmekte olup, yansıyan dalgaların kontrolü amacıyla özel soğurma yapılarına ihtiyaç duymaktadır. Flap tipi dalga üreteçleri, kanal tabanına sabitlenmiş menteşeli bir paletin dairesel salınımı ile çalışmaktadır. Bu yapılar ise daha çok derin su koşullarında ve yüksek frekanslı dalgaların üretiminde tercih edilmektedir. Flap, menteşe noktasından yukarı doğru açılarak suyu yüzeye yönlendirir ve bu sayede ilerleyen dalga cepheleri oluşturur. Flap tipi sistemlerin, dalga soğurma kapasitesinin yüksek olduğu ve çoklu flap düzenekleriyle çok yönlü dalga alanlarının üretilebildiği literatürde belirtilmiştir (Guillouzouic, 2014).

Plunger tipi dalga üreteçleri, su yüzeyine dik doğrultuda yukarı-aşağı hareket eden silindirik ya da prizmatik bir eleman aracılığıyla çalışmaktadır. Bu tür sistemler, özellikle küçük hacimli veya dar dalga tanklarında, yerel su seviyesi değişimlerini tetikleyerek dalga üretimi sağlamaktadır. Yapısal olarak basit olmalarına rağmen, düşük enerji verimlilikleri nedeniyle daha az tercih edilmektedir. Ancak bazı laboratuvar uygulamalarında, kompakt ve düşük maliyetli bir alternatif olarak kullanılabilir.

Duck tipi dalga üreteçleri ise, su yüzeyinde dönen bir yapının hareketinden yararlanarak dalga üretir. Genellikle kuş gövdesine benzeyen aerodinamik bir forma sahip olan bu yapılar, dalga ile etkileşim sırasında salınım hareketiyle hem düşey hem de yatay bileşenler üretmektedir. Bu yönüyle, yalnızca dalga üreticisi olarak değil, aynı zamanda bir dalga enerjisi dönüştürücüsü olarak da değerlendirilmektedir. Belirli test sistemlerinde dalga üretici işleviyle de kullanıldıkları belirtilmiştir (Guillouzouic, 2014). Gerek geometrik yapı olarak gerekse dalga üretici sistemi farklılıkları açısından kullanılan dalga kanalı yapıları fiziksel boyutlar ve kullanım amaçları açısından da farklılık göstermektedir. Tablo 2.1’de uluslararası olarak hizmet veren ve farklı ölçeklerdeki dalga üretim yapıları özetlenmiştir.

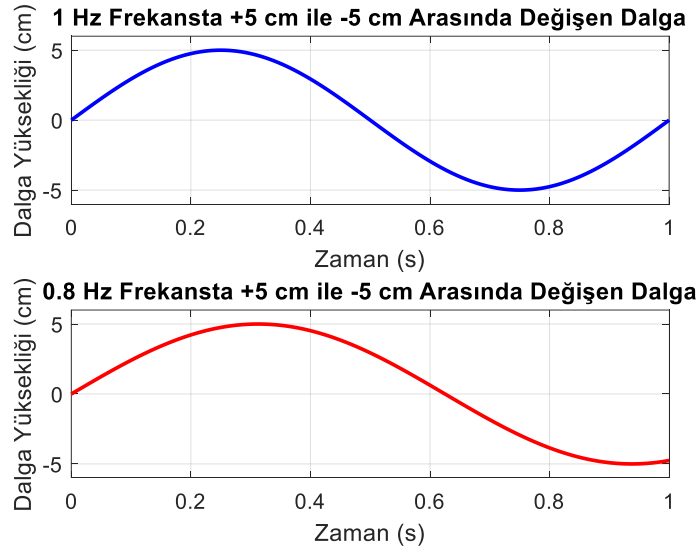
**Tablo 2.1:** Uluslararası örnek dalga üretim sistemleri.

<b>ÜLKE VE KURUM</b>	<b>DALGA KANALI BOYUTLARI</b>	<b>DALGA ÜRETİCİ</b>
Almanya University of Hannover	300m x 5m x 7m	Piston Tür
Fransa École centrale de Nantes	50m x 30m x 5m	Piston Tür
Danimarka Aalborg University	14.6m x 19.3m x 1.5m	Piston Tür
İspanya University of Cantabria	44m x 30m x 4m	Piston Tür
Portekiz University of Porto	28m x 12m x 1.2m	Piston Tür
İtalya Università degli studi di Firenze (LABIMA)	37m x 0.8m x 0.8m	Piston Tür
İtalya Università degli studi di Padova	35m x 1m x 1.3m	Piston Tür
İtalya Università degli studi di Padova	20.6m x 17.8m x 0.8m	Piston Tür
İran National Iranian Marine Laboratory	400m x 6m x 4m	Piston Tür
İrlanda Lir National Ocean Test Facility	25m x 18m x 1m	Flap Tür
ABD Naval Surface Warfare Center, Carderock Division	106m x 76m x 6m	Flap Tür
Rusya Krylov State Research Centre	162m x 37m x 5m	Flap Tür
Çin China Ship Scientific Research Center	69m x 46m x 4m	Flap Tür
Japonya National Maritime Research Institute	80m x 40m x 4.5m	Flap Tür
Güney Kore Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering	221m x 16m x 7m	Flap Tür
Avustralya Australian Maritime College	100m x 3.5m x 1.5m	Flap Tür
Hindistan Naval Science and Technological Laboratory	135m x 37m x 5m	Flap Tür
Brezilya Brazilian Ocean Technology Laboratory	40m x 30m x 15m	Flap Tür
İtalya INSEAN	220m x 9m x 3.5m	Flap Tür
İtalya Università Federico II Napoli	140.2 m x 9m x 4.25m	Flap Tür

Su dalgası üretim sistemleri fiziksel ve mekanik olarak sınıflandırılmakla birlikte bu sistemlerde üretilen su dalgası türleri bakımından da farklılık göstermektedir.

### 2.1.2 Su dalgası türleri

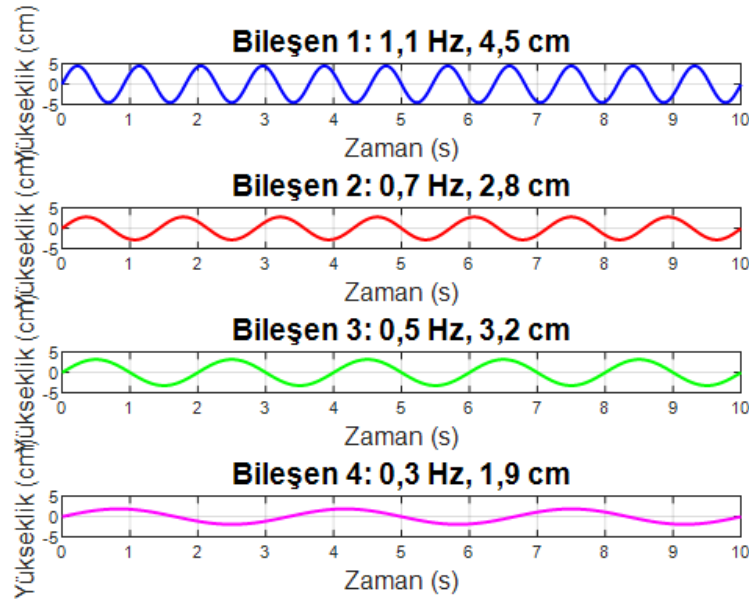
Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen dalga üretim çalışmalarında, dalga formunun zamanla değişen karakteristikleri ve bu karakteristiklerin deneysel doğruluğa etkisi büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda dalgalar, genellikle düzenli (sinüzoidal) ve düzensiz (spektral tabanlı) olmak üzere iki ana kategori altında incelenmektedir. Düzenli dalgalar; sabit periyot, sabit genlik ve sinüzoidal şekil özelliklerine sahip, deterministik dalga formlarıdır. Bu tür dalgalar, genellikle tek bir frekans bileşeni içerir ve teorik çözümlerle modellenmektedir (Evers and Hager, 2015) (Lykke, 2010) Şekil 2.7’de verilen örnek düzenli dalga yapıları, 1Hz ve 0.8Hz frekansta, genliği  $\pm 5$  cm olan iki farklı düzenli dalga formu sunulmuştur. Her iki dalga da sabit bir sinüzoidal yapıdadır ve zaman eksenini boyunca periyodik olarak tekrarlanmaktadır.



Şekil 2.7: Örnek düzenli dalga yapıları

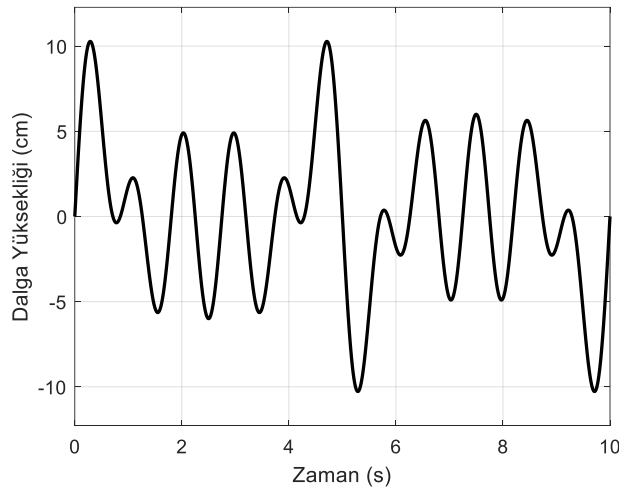
Düzensiz dalgalar ise doğada karşılaşılan karmaşık deniz koşullarını taklit etmek amacıyla geliştirilmiş, istatistiksel ve spektral tabanlı dalga formlarıdır. Bu dalgalar, Ortak Kuzey Denizi Dalga Projesi (Joint North Sea Wave Project – JONSWAP) veya Pierson–Moskowitz gibi deneysel verilerle türetilmiş spektral dağılımlar kullanılarak modellenir. Düzensiz dalga üretimi, genellikle birden fazla sinüzoidal bileşenin genlik ve faz açısından rastgele süperpozisyonu ile gerçekleştirilir. Bu sayede, dalga yüksekliği ve periyodu zamanla değişen, gerçek deniz durumlarına benzer dalga dizileri elde edilmektedir (Lykke, 2010).

Şekil 2.8’de, 1.1Hz, 0.7Hz, 0.5Hz ve 0.3Hz frekanslarında, farklı genliklere sahip dört adet düzenli bileşenin ayrı ayrı dalga formları verilmiştir.



**Şekil 2.8:** Farklı frekans ve genlikli düzenli dalga sinyalleri

Şekil 2.9’da ise bu bileşenlerin süperpozisyonu sonucu elde edilen düzensiz dalga formu görülmektedir. Görüldüğü üzere, toplam dalga formu hem frekans hem de genlik açısından zamanla değişen, kompleks bir yapıya sahiptir. Bu durum, düzensiz dalgaların enerjisinin farklı frekans bileşenlerine dağıldığını ve zamanla değişen “dalga grup yapıları” oluşturduğunu göstermektedir.



**Şekil 2.9:** Örnek düzensiz dalga formu

Dalga kanalında dalga üretici tarafından düzenli ve düzensiz dalgaların üretilmesi ve üretilen dalgaların kalibrasyonu için doğrusal dalga teorisi esas alınmaktadır (Dean and Dalrymple, 1991).

Doğrusal dalga teorisinde kullanılan dalga üretici teorisi ile (Madsen, 1970a), dalga yapıcının periyot ve strok değerlerine bağlı olarak üretilmesi beklenen dalga yüksekliği belirlenmektedir. Deniz durumunu temsil eden enerji spektrumlarının oluşturulmasında JONSWAP (Hasselmann, Muller, Olbers, and Wegener, 1973) ve farklı yapıda (Goda, 2010) spektrumlar kullanılmıştır. Bu spektrumlar, düzensiz dalga üretici yazılımlarında kullanılarak, farklı deniz durumlarını temsil eden zaman serileri elde edilmektedir (Goda, 2010). Yapılar üzerindeki dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında ve yapıların tasarımında da bu kaynaklardan yararlanılmaktadır (Dean and Dalrymple, 1991; Goda, 2010; Hudspeth, 2006).

Düzensiz dalga üretimi, enerji içeriğinin tek bir frekansa değil geniş bir frekans bandına dağılması ile karakterize edilir. Dolayısıyla giriş sinyali tekil zamanda tanımlı deterministik bir fonksiyon olarak verilmez; bunun yerine dalga spektrumunun istatistiksel özelliklerine göre spektral tabanlı bir sentez yapılması gerekmektedir (Goda, 2010). Düzensiz dalga üretimi üzerinde kullanılan yapısal karşılaştırmalar Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2.2:** Düzensiz dalga üretim yapısı.

ÖZELLİK	DÜZENSİZ DALGA	REFERANS
Frekans yapısı	Çoklu frekans bileşeni	(Dean and Dalrymple, 1991)
Referans sinyal oluşturma	Enerji spektrumuna dayalı rastgele süreç sentezi	(Goda, 2010; Hasselmann et al., 1973)
Silindir konumu-dalga yüksekliği ilişkisi	Frekans bağımlı hidrodinamik aktarım zorunludur	(Hughes, 1993)
Matematiksel üretim yöntemi	Spektral sentez ve hidrodinamik transfer gereklidir	(Goda, 2010)

Tablo 2.2 incelendiğinde düzensiz dalga üretimi otonom düzenli dalga üretimindeki gibi tekil sinüs referansı ile gerçekleştirilememektedir. Kullanıcı tarafından türetilen rastgele

frekanslar içeren dalga üretimlerinin ise otonom şekilde tekrar edilebilirliği mümkün değildir.

## 2.2 Dalga Üreticili Yapılarda Tahrik Sistemleri

Dalga üretici yapılarında, mekanik tahrik sistemi olarak genellikle hidrolik sistemler tercih edilmektedir. Bu sistemler, yüksek güçlü ve hızlı konumlama gerektiren piston veya flap türü dalga üreticilerde etkin kontrol sağlamaktadır (Y. Liu, Zheng, Song, Chen, and Jin, 2020). Öte yandan dalga kanalı yapılarında kullanılan PTWM'ler, mekanik tahrik sistemleri arasında en yaygın olarak tercih edilen sistemlerdir. Özellikle düşük frekanslı ve büyük genlikli dalga üretiminde, hidrolik servo sistemler ile entegre edildiğinde yüksek kontrollü, doğrusal hareketler sergileyebilmektedir (Gyongy, Bruce, and Bryden, 2014; Madsen, 1970b). Ayrıca modern laboratuvarlarda, farklı tür dalgaların üretilmesinde başarılı performans göstererek geniş spektrum kontrolüne imkân sunmaktadır (Wu, Tsay, and Chen, 2014). PTWM'lerin sayısal olarak modellenmesine odaklanan bir çalışmada, su ve hava fazları arasındaki etkileşim Navier–Stokes denklemleri temelinde ele alınmış ve dalga üretim süreci piston hareketine bağlı olarak detaylı biçimde analiz edilmiştir. Kullanılan Volume-of-Fluid (VOF) yöntemi sayesinde, piston kaynaklı yüzey dalgalarının şekli ve genliği başarıyla yakalanmış ve elde edilen dalga profilleri teorik modellerle yüksek uyum gösterdiği aktarılmıştır (Windt, Davidson, Schmitt, and Ringwood, 2019). PTWM'nin hareketi, su ve hava olmak üzere iki akışkanın etkileşimini esas alan Navier–Stokes denklemleri çerçevesinde sayısal olarak modellendiği bir çalışmada ise dalga üretici yüzeyinin hareketine bağlı olarak hem su yüzey dalgalarının gelişimi hem de hava-su ara yüzeyinde meydana gelen dinamik davranışlar detaylı olarak çözümlenmiştir. İki fazlı akış modeline dayanan bu tür simülasyonlar hem düzenli hem de düzensiz dalga üretim süreçlerinde piston tipi mekanizmaların hidrodinamik etkilerini değerlendirmek açısından yüksek doğruluk sağlamaktadır (Gu, Causon, Mingham, Qian, and Chen, 2011).

PTWM'ler, yüksek itme kuvveti ve hızlı tepki kabiliyeti nedeniyle sıklıkla tercih edilmesine karşın bu sistemlerin kontrolü birçok mühendislik problemi barındırmaktadır. Hidrolik tahrikli olan bu sistemler; doğrusal olmayan davranışlar, zamanla değişen yük etkileri ve dalga-yapı etkileşimlerinden kaynaklı dışsal bozulmalar gibi kontrol açısından zorlu özelliklere sahiptir (Drzewiecki and Guzinski, 2022). Hidrolik tabanlı sistemlerin hassas kontrolü oldukça zorlu bir görevdir. Bu sistemler yapıları gereği doğrusal olmayan, zamanla değişen dinamiklere sahiptir ve üretilen dalgaların oluşturduğu dışsal bozulmalara açıktır

(Jang and Sung, 2021). Bu tip sistemlerde özellikle değişken hidrodinamik koşullar altında geleneksel tek katmanlı PID kontrolcüler performans düşüşü yaşayabilmektedir (Walker, Stokes, Kiprakis, and Giorgio-Serchi, 2020). Buna ek olarak, pek çok çalışmada referans sinyali sabit olarak kabul edilmekte ve gerçek zamanlı dalga yüksekliği geri beslemesi sistem yapısına dahil edilmemektedir (Wang et al., 2021). Öte yandan PTWM'lerin kullanıldığı hidrolik sisteme sahip olan yapılarda (Y. Liu et al., 2020) (Demircan, Bicakci, and Akyuz, 2025) ve doğrusal olmayan sistemlerde çok katmanlı kontrol mimarilerinin daha başarılı olduğunu göstermektedir. Özellikle iki katmanlı kontrol sistemleri; alt seviyede aktüatör konum kontrolü ve üst seviyede sistem hedefinin güncellenmesini sağlayarak dinamik koşullara uyumlu bir yapı sunmaktadır (Picasso, De Vito, Scattolini, and Colaneri, 2010). Bu yapı; robotik sistemler, uçuş denetimi ve güç elektroniği gibi alanlarda sıkça kullanılıyor olsa dahi dalga kanalında dalga üretiminin gerçekleştirildiği sistemlerde uygulamaları sınırlıdır (Machado, Garcia-Rosa, and Watanabe, 2021) . Literatürde, PTWM'lerde kullanılan klasik tek katmanlı PID kontrol stratejileri genellikle sabit referans sinyallerine dayanmaktadır ve gerçek zamanlı dalga yüksekliği ölçümüne dayalı geri besleme mekanizmaları büyük ölçüde ihmal edilmektedir (Drzewiecki and Guzinski, 2022) (Khait and Shemer, 2019; Mahjouri, Shabani, Rezazadeh, and Badiei, 2020). Ayrıca mevcut çalışmaların çoğunluğu yalnızca alt seviyede konum kontrolü üzerine odaklanırken, üç parametrelili kaskad yapılar ya da dalga spektrumu bazlı dinamik referans güncellemesi gibi daha yüksek seviyeli kontrol yaklaşımları sayıca azdır. Bu noktada dalga kanalları ve dalga üretim sistemleri ile hidrolik sistem kontrolünün doğrudan entegre edildiği çalışmaların oldukça sınırlı olduğu değerlendirilmiştir. Bununla birlikte dalga kanalı yapılarında kullanılan hidrolik sistemler göz önünde bulundurulduğunda literatür çalışması detaylandırmasında çok daha fazla çalışmanın yalnızca hidrolik sistemler üzerine gerçekleştirildiği ise bilinmektedir.

### **2.3 Dalga Kanalı Yapılarında Kullanılan Hidrolik Sistemler ve Sistem Bileşenleri**

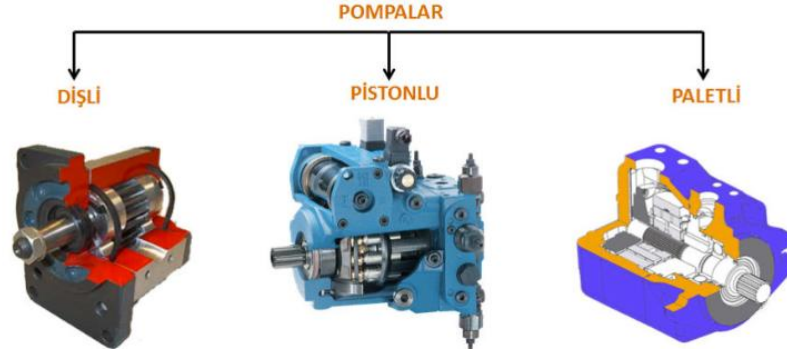
Hidrolik sistemler, zaman içerisinde önemli gelişmeler göstermiş ve çeşitli kontrol teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte daha etkili hale gelmiştir. Tarihsel olarak, ilk hidrolik sistemler daha basit yapılar üzerine kurulmuş, temel hidrolik ilkeler ve mekanik bağlantılar aracılığıyla çalıştırılmıştır (Han, Liu, Ma, Liu, and Quan, 2018; G. Da Liu, Li, and Shen, 2016). 20. yüzyılın başlarından itibaren, akışkan gücü teknolojisi önemli bir gelişim sürecine girmiştir. Bu dönemde geliştirilen ilk nesil hidrolik tahrik sistemleri, genellikle açık çevrim prensibiyle çalışan ve temel olarak hidrolik aktüatörleri basit akış kontrol elemanlarıyla

yöneten yapılardan oluşmaktaydı (Jelali and Kroll, 2003). Ancak, özellikle kapalı çevrim kontrol stratejilerinin gelişmesiyle birlikte, bu sistemler gerek doğruluk gerekse kararlılık açısından önemli ölçüde ilerleme kaydederek endüstriyel uygulamalarda yüksek hassasiyetli kontrol ihtiyaçlarını karşılayabilir düzeye ulaşmıştır (Han et al., 2018; G. Da Liu et al., 2016). Ayrıca hidrolik sistemlerin LabVIEW gibi yazılım platformlarının test ve kontrol amaçlı kullanılması sayesinde sistem performansının simülasyonu, ölçümü ve optimizasyonu etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Xu et al., 2023).

Hidrolik sistemler kullanılacakları uygulama yapılarına göre farklı konfigürasyonlar ile kullanılmaktadır. Ancak temel olarak bir hidrolik sistem alt sınıflarında ayrımlar olsa dahi hidrolik sistemlerin oluşturulmasında kullanılan ortak mekanik ve elektronik bileşenler bulunmaktadır. Hidrolik sistemlerde enerjiyi aktarmak için hidrolik akışkanlar kullanılır. Hidrolik akışkanlar ayrıca ısı transferi, kirlilik giderme, sızdırmazlık ve yağlama işlemlerini gerçekleştirir. Buna göre kullanıldığı sistem yapısına uygun olarak farklı özelliklere sahip akışkanlar geliştirilmiştir. Hidrolik sistemin uzun servis ömrü, sistemde kullanılan uygun akışkanın seçilmesiyle mümkün kılınabilmektedir (Machydraulics, 2025).

### **2.3.1 Hidrolik pompalar**

Hidrolik sistemlerde hidrolik gücün temel kaynağı pompalardır ve bu pompalarla uyumlu basınç kontrolörleri tercih edilmektedir. Bununla birlikte, sistemin gereksinimlerine bağlı olarak yalnızca basınç kontrolü, yalnızca debi kontrolü ve hem basınç hem debi kontrolü ya da giriş gücünü düzenleyen farklı kontrol yapıları da uygulanabilmektedir. (Younkin, 2002). Hidrolik sistemlerde farklı kontrol yapıları kapsamında kullanılan güç pompaları genellikle pistonlu, dişli ve helisel tipler olarak tercih edilmektedir. Hidrolik üniteye pompalar, mekanik enerjiyi alıp hidrolik akışkana ileterek basınç ve debi oluşturulması için gerekli hidrolik enerjiye dönüştürülmesinde kullanılmaktadır (Hidroman, 2025). Şekil 2.10'da farklı yapıya sahip olan hidrolik pompa örnek yapıları verilmiştir.



Şekil 2.10: Hidrolik pompa yapıları (Akder, 2020)

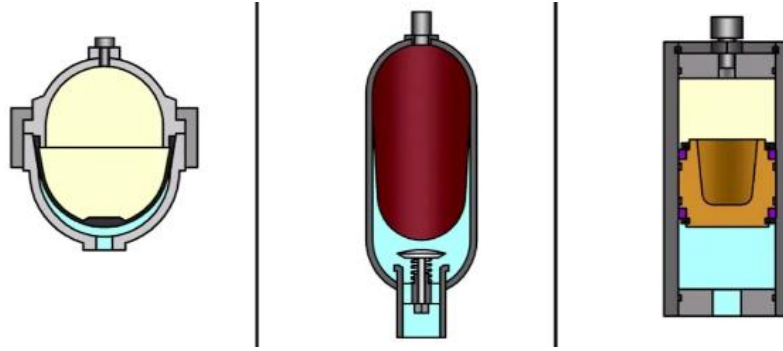
### 2.3.2 Hidrolik kontrol elemanları

Hidrolik kontrol valfleri, akışkan gücü kaynağını mekanik hareket aracılığıyla kontrol eden elemanlardır. Hidrolik sistemlerde kullanılan valfler, işlevsel amaçlarına göre yön, basınç veya debi kontrolü gibi çeşitli düzenleme yöntemleri ve bunların karmaşıklık düzeylerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Valfler, işlevlerine göre yön kontrol valfleri, basınç kontrol valfleri, debi kontrol valfleri, oransal valfler ve servo valfler gibi çeşitli türlere ayrılmakta olup, bu sayede sistemin güvenli, kararlı ve hassas çalışması sağlanmaktadır (Merritt, 1967). Basınç kontrol valfleri, sistemin önceden belirlenmiş bir basınç seviyesinde çalışmasını temin ederek, aşırı basınç durumlarında devreyi koruma işlevini üstlenmektedir. Çek valfler, yalnızca tek yönde akışa izin veren özel yön denetim valfleri olup, ters yöndeki akışı engelleyerek geri beslemeden kaynaklanabilecek olumsuzlukların önüne geçmektedir. Debi kontrol valfleri, sistemdeki akışkanın debisini düzenleyerek, genellikle silindir veya motorların maksimum hızını sınırlamakta; böylece hareketin zamanlaması ve hız kontrolü sağlanmaktadır. Yön kontrol valfleri ise hidrolik sistemlerin temel bileşenlerinden biri olup, akışkanın bir veya birden fazla kaynaktan farklı yönlere iletilmesini mümkün kılmaktadır. Bu valfler, genellikle silindirik bir yapı içerisinde hareket eden ve mekanik ya da elektriksel olarak kumanda edilen makaralı bir düzenekten oluşmaktadır. Makaranın konumu, akışkanın geçişine izin vererek ya da geçişi sınırlandırarak yön kontrolünü gerçekleştirmektedir. Ayrıca, bu valfler oransal kontrol yapıları sayesinde kuvvet, hız ve strok konumuna bağlı olarak aktüatörlerde sürekli ayarlanabilir ve hızlı tepki verebilen bir kontrol imkânı sunmaktadır (Jelali and Kroll, 2003).

### 2.3.3 Hidrolik akümülatörler

Hidrolik sistemlerdeki hidrolik akümülatör cihazları basınç altında hidrolik sıvıyı depolamaya yarayan bir hidrolik devre elemanıdır. Uygulama yapılacak olan platforma göre

farklı türleri bulunmaktadır. Yedek hidrolik güç kaynağı olarak da kullanılan hidrolik akümülatörler, farklı sınıflandırma kriterlerine sahip olsalar da en yaygın biçimde membranlı, balonlu ve pistonlu tür akümülatörler olarak gruplandırılmaktadır. Bu akümülatörler, enerji depolama, şok emilimi ve sızıntı telafisi sağlayarak bir sistem içindeki hidrolik sıvının yönetilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Her akümülatör tipinin kendine özgü özellikleri ve farklı sektörlerde uygulamaları bulunmaktadır (Schmitz, Duensing, Haas, and Matthiesen, 2021). Akümülatör tiplerine ait görünüm Şekil 2.11’de verilmiştir.



**Şekil 2.11:** Membran akümülatör, balon akümülatör ve pistonlu akümülatör yapıları  
(hidroliksilindir.org, 2024)

Membran akümülatör yapısında hidrolik sıvıyı ve gaz yükünü ayırmak için esnek bir membran kullanılmaktadır. Mobil hidrolik sistemler ve otomotiv süspansiyon sistemleri gibi yüksek basınçta küçük hacimlerde akışkanın gerekli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Membranın esnekliği hızlı tepki ve yüksek enerji depolama kapasitesi sağlar, bu da onları dinamik ve yüksek hızlı işlemler için ideal hale getirmektedir (Schmitz et al., 2021).

Balon akümülatörler, hidrolik sıvıyı gaz yükünden ayıran esnek bir mesaneden oluşmaktadır. Balon tasarımı daha yüksek bir gaz ön şarj basıncına izin verir, bu da onları yüksek basınçta büyük hacimlerde sıvı gerektiren uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Ernst and Ivantysynova, 2016). Pistonlu akümülatörlerde ise gaz ve sıvı, silindir içinde serbestçe hareket eden piston ile ayrılmaktadır. Pistonlu akümülatör, sıcaklık dalgalanmaları durumunda hacim değişimlerini dengelemek, olası sızıntı kayıplarını karşılamak veya salınımları sönmölemek amacıyla sıkıştırma hidrolik sistemlerde kullanılmaktadır (Hawe Hydraulik, 2025).

### 2.3.4 Hidrolik silindirler

Hidrolik silindir yapıları küçük hidrolik güç alanları ile başlayarak yüksek güç gerektiren uygulama alanlarında, savunma sanayinden uzay sanayisine, uçak simülâtör sistemleri vb. birçok alanda kullanım için tercih edilen sistemlerdir. Temel hali ile bir silindir yapısında boru (kovan), piston, mil (piston kolu), kapak, boğaz, sızdırmazlık elemanları ve bağlantı elemanlarından meydana gelmektedir (Zhang, 2018). Şekil 2.12’de temel hali ile bir silindir yapısı aktarılmıştır.

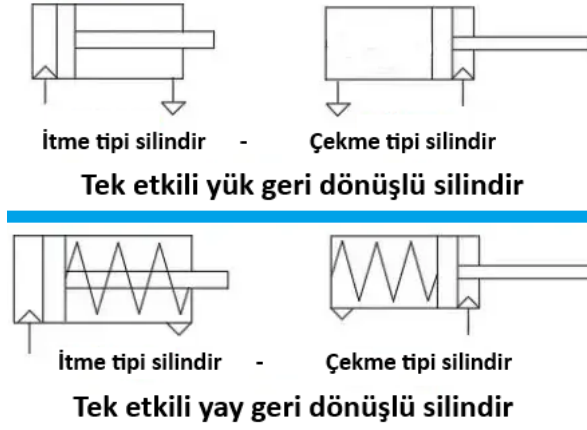


Şekil 2.12: Temel hidrolik silindir yapısı (makineegitimi.com, 2025)

Hidrolik silindirler geniş bir biçimde ve tasarım parametreleri dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Etki yapılarına göre tek etkili ve çift etkili olarak ayrılırlar. Şekil 2.13’de verilen tek etkili silindir yapısında hidrolik akışkan pistonu tek yönde etki etmektedir ve pistonun ileriye doğru hareket etmesi için ihtiyaç duyulan kuvvet hidrolik sıvı basıncı tarafından sağlanmaktadır. Pistonun tam tersi yönde hareketi için gerekli olan kuvvet ise genellikle yay mekanizması veya dışarıdan uygulanan ağırlık ile mümkün hale gelmektedir. Şekil 2.14’de bu silindir yapısının hidrolik şema çizimlerinde kullanılan sembolü aktarılmıştır.

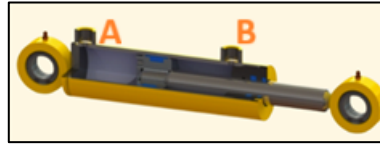


Şekil 2.13: Tek etkili hidrolik silindir yapısı (powermotiontech, 2012)



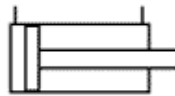
Şekil 2.14: Tek etkili hidrolik silindir sembolleri (The Instrument Guru, 2025)

Bir diğer hidrolik silindir tipi olan çift etkili silindir tipi ise tek etkili silindir yapısından farklı olarak pistonun hem ileri yönde hareket etmesi hem de geri yönde hareket etmesi için gerekli olan kuvvet her iki yönde de hidrolik akışkan basıncı tarafından sağlanmaktadır. Şekil 2.15’de verilen hidrolik silindir yapısı incelendiğinde silindirin A ucundan B ucuna doğru hidrolik kuvvet uygulandığındaki hareket ile B ucundan A ucuna doğru hidrolik kuvvet uygulandığı zamanki hareket piston yüzey alanlarının farklı olmasından dolayı aynı kuvvet koşulları altında itme ve çekme yönlerinde farklılık göstermektedir.



Şekil 2.15: Çift etkili hidrolik silindir yapısı (Meteka, 2025)

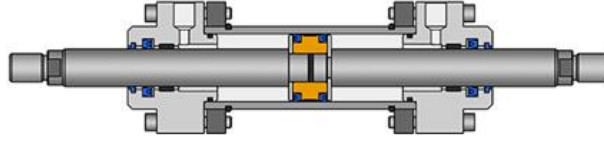
Şekil 2.15’de bulunan çift etkili hidrolik silindir için hidrolik şematik gösterimde kullanılan sembol tipi şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16: Çift etkili hidrolik silindir sembolü (ISO Symbols and Glossary, 2006)

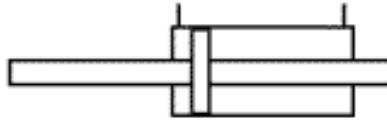
Hidrolik silindir içerisindeki piston alanlarındaki farklılıklardan dolayı tek milli şekilde kullanılan bu silindir yapılarındaki durumun istenmediği uygulamalarda silindir içerisindeki piston yüzey alanlarının eşit olduğu ve hem itme hem de çekme yönlerindeki uygulanan

kuvvet ve hızların eşit olduğu çift milli hidrolik silindir yapıları kullanılmaktadır. Şekil 2.17’de çift milli ve çift etkili hidrolik silindir verilmiştir.



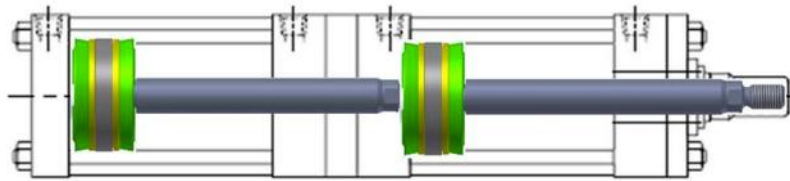
**Şekil 2.17:** Çift etkili ve çift milli hidrolik silindir yapısı (Hydraulic Cylinder Design, 2025)

Şekil 2.18’de ise çift milli ve çift etkili hidrolik silindire ait hidrolik sembol verilmiştir.



**Şekil 2.18:** Çift etkili ve çift milli hidrolik silindir sembolü (ISO Symbols and Glossary,2006)

Hidrolik silindir tipleri etki türlerinin yanı sıra tandem silindir ve teleskopik silindir yapıları olarak da hidrolik uygulama sistemlerinde kullanılmaktadır. Tandem sistemler, daha yüksek güç ve strok elde etmek amacıyla iki veya daha fazla hidrolik silindirin bir araya getirildiği sistemlerdir. Bu tür sistemler, tipik olarak ağır iş makineleri, vinçler ve presler gibi yüksek güç ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Şekil 2.19’da örnek bir tandem silindir yapısı verilmiştir (Comoso, 2024).



**Şekil 2.19:** Hidrolik tandem silindir (Comoso, 2024)

Şekil 2.20’de verilen hidrolik teleskopik silindiler ise kompakt ve çok kademeli uzatma imkânı sunan özel bir hidrolik silindir türüdür. Birden fazla piston ve silindir gövdesinin birbiri içine yerleştirilmesiyle oluşturulan bu yapılar, sınırlı montaj alanına sahip ve yüksek strok gereksinimi olan çeşitli endüstriyel ve mobil uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



**Şekil 2.20:** Hidrolik teleskopik silindir (Lalithydraulics, 2025)

### **2.3.5 Hidrolik borular**

Hidrolik sistemlerde kullanılan borular, sistemin çalışmasında hayati bir rol üstlenmektedir. Bu borular, pompa tarafından üretilen basınçlı akışkanın valf, silindir, motor gibi diğer sistem bileşenlerine güvenli, kontrollü ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Akışkan iletimindeki süreklilik ve sistemin genel performansı, doğrudan boru hatlarının yerleşimi, çapı, uzunluğu ve malzeme özellikleri ile ilişkilidir. Özellikle basınç kayıplarının en aza indirilmesi, titreşimlerin sönümlenmesi ve akışkan kaçaklarının önlenmesi, boru sisteminin doğru tasarımıyla mümkün olabilmektedir. Bu kapsamda yapılan araştırmalarda, hidrolik sistemlerdeki boru konfigürasyonlarının optimizasyonu ile basınç dalgalanmalarının azaltılabileceği ve sistemin dinamik davranışının iyileştirilebileceği ortaya konulmaktadır (Zhang et al., 2022) .

### **2.4 Hidrolik Sistem Kontrolü Alanında Gerçekleştirilen Çalışmalar**

Hidrolik sistemlerin kontrolüne yönelik çalışmalar, özellikle hidrolik servo sistemlerin konum, hız ve basınç gibi parametrelerinin hassas kontrolünü hedeflemektedir. Literatürde bu amaca yönelik olarak çeşitli modelleme teknikleri, kontrolcü yapıları ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar, hem Matlab/Simulink hem de Simscape ortamında gerçekleştirilen sayısal benzetim modelleri aracılığıyla sistem davranışlarını incelemekte; deneysel doğrulama ile desteklenen tasarımlarla gerçek sistem performansları ortaya konmaktadır.

Esatoğlu tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki kademeli, kuvvet geri beslemeli, kanatçık-nozul tip elektrohidrolik servo valf için kayan kipli kontrolcü (Sliding Mode Controller, SMC) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, servo valf sisteminin 7. ve 3. dereceden diferansiyel denklemlerle ifade edilen matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu modeller aracılığıyla, sürgü konumu ile akım girişi arasındaki ilişkileri tanımlayan transfer

fonksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonları kullanılarak hem kayan kipli hem de PID kontrolcü tasarımları yapılmış ve söz konusu kontrolcü yapıların performansları benzetim ortamında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma, servo valflerin gelişmiş kontrol teknikleri ile yüksek doğrulukta kontrol edilebileceğini göstermesi bakımından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır (Esatoglu, 2020). Tadesse ve Jungong tarafından çift etkili ve tek milli hidrolik bir silindirin servo valf ile kontrol edildiği çalışmada ise “Bulanık-PID kontrolcü” yapısı önerilmiştir. Bulanık-PID kontrolcünün hem PID hem de bulanık mantık kontrolcünün avantajlarından yararlanarak sınırlamaların üstesinden geldiği belirtilmiştir. Bulanık kontrolcünün, sistemin çıkış değeri hedef değerden uzak olduğunda sistemleri kontrol etmek için kullanıldığı ve PID kontrolcünün çıkış değeri istenen değere yakın olduğunda uygulandığı aktarılmıştır. Çalışma Matlab/Simulink'te simüle edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Bulanık-PID kontrolör sisteminin hızlı tepki süresi, yerleşme süresi, aşım, yüksek hassasiyetli kontrol, sistemin güvenilirliği ve kararlılığı gibi çalışma etkinliği parametrelerini artırmada iyi olduğu aktarılmıştır (Tadesse and Jungong, 2016). Topçu tarafından yürütülen bir başka çalışmada, çift etkili ve çift milli bir hidrolik silindirin konum kontrolü için P, PD, PID ve bulanık mantık kontrolcüler karşılaştırılmıştır. Deneysel sistem LabVIEW üzerinden kontrol edilmiş, Simscape modeli ile yüksek uyum sağladığı aktarılmıştır (Topçu, 2017). Ling ve arkadaşları tarafından tek milli çift etkili bir hidrolik silindir ve servo valf içeren hidrolik sistem PID kontrolün kullanıldığı bu çalışmada, ilk olarak sistemin modeli 3 bileşenli sinüs dalga formundan 100 saniye süreli uyarıcı işaret ile elde edilmiştir. Verilerin toplanması 50 ms aralıklar ile yapılmıştır. Model olarak ARX [3-3-1] modeli % 95 doğruluk sunduğu için tercih edilmiştir. PID kontrolcü için “ $K_p$ ,” “ $K_i$ ,” “ $K_d$ ” katsayıları Ziegler-Nichols metodu ile gerçek sisteme uygulanmadan önce simüle edilmiştir. Simülasyon çalışması gerçekleştirilen modelde ayrık zamanlı tanımlama yapılan model kullanıldığı aktarılmıştır. Basamak sinyali pozisyon bilgisi olarak uygulanmış ve gerçek veri-model verisi uyumu ile basamak cevap karşılaştırılmıştır (Ling, Rahmat, and Husain, 2012).

Mahdi tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise hidrolik silindir için Matlab/Simulink ortamında hem nümerik model hem de 2.dereceden 0 kutuplu bir transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. PID kontrolör parametrelerinin ayarlanması için Matlab kullanılmıştır (M. S. Mahdi, 2011). Puglis ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tek milli ve çift etkili bir hidrolik silindir ile servo valf içeren sistemin konum kontrolü için PI kontrolcü kullanılmıştır. Sistem tanılması kapsamında elde edilen model 5. dereceden 4 kutuplu

olarak ifade edilmiştir. Farklı kontrolör yapıları simülasyon ortamında değerlendirilmiş; P kontrolcünün kararlı bölge hatasını gideremediği, PD ve PID kontrolcülerin ise gürültüye duyarlı olduğu görülmüştür. Nihai olarak, PI kontrolcünün sistem üzerinde en uygun performans sağladığı aktarılmıştır (Puglisi, Saltaren, Garcia, and Banfield, 2015a). Erol ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada hidrolik sistemin kontrolünde Ziegler-Nichols parametreleri hesaplanarak PID kontrol yöntemi kullanılmıştır (Erol, Altun, and Aktas, 2017).

Kestek tarafından gerçekleştirilen hidrolik bir sistemin kontrolü çalışmasında Matlab ortamında hidrolik sistem modeli için doğrusal olmayan durum uzayı modeli oluşturulmuştur. Kontrolcü tasarımında, valf dinamikleri ihmal edilerek yalnızca valfin statik karakteristiklerinin dikkate alındığı, ayrıca valf sürgüsünün hareketi ile bu harekete karşılık gelen akım arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmıştır. Sistem kontrolü için PID ve I-PID kontrolcü yapıları tasarlanmış ve her iki yapı için de Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması uygulanarak kontrolün kazanç katsayıları belirlenmiştir (Kestek, 2020).

Mahmood ve arkadaşları ise gerçekleştirdikleri çalışmada hidrolik sistemin kontrolünde kullanılan PID kontrolcü katsayılarının optimizasyonu amacıyla Karınca Kolonisi (Ant Colony Optimization – ACO) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada, sistemin transfer fonksiyonu 3. dereceden ve 0 kutuplu bir yapı ile tanımlanmıştır. Optimizasyon süreci sonucunda, PID kontrolcüye ait kontrolcü parametreleri ACO algoritması ile elde edilmiş ve bu parametreler Matlab tabanlı bir simülasyon modeline uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ACO algoritmasının PID kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde etkili bir yöntem olduğu ve bu yaklaşımın gelecekte farklı optimizasyon algoritmalarıyla genişletilebileceği aktarılmıştır (Mahdi, Khalid, and Mahdi, 2019).

Essa ve arkadaşları, çift etkili ve çift milli bir hidrolik silindirin konum kontrolü için kesir dereceli bir kontrolör önermiş ve bu kontrolörün ayarlanmasında Genetik Algoritma (GA) optimizasyon yöntemi kullanmıştır. Donanım tarafında NI PCI-NI 6014 kartı tercih edilmiş; sistemin doğrusal olmayan modeli Simulink ortamında simüle edilmiştir. Ayrıca “kara kutu” modelleme yaklaşımı ile elde edilen 4. dereceden, 1 kutuplu ayırık zamanlı modelin % 91.1 oranında yüksek uyum gösterdiği belirtilmiştir. Performans değerlendirmelerinde Mutlak Hata İntegrali (Integral of Absolute Error – IAE), Karesel Hata İntegrali (Integral of Squared

Error - ISE) ve Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata İntegrali (Integral of Time-weighted Absolute Error - ITAE) indeksleri kullanılmış, kontrol parametreleri ile yerleşme süresi ve aşım değerleri analiz edilmiştir. Simülasyon ve deneysel bulguların gerçekleştirilen çalışmadaki kontrol yapısının konum kontrolünde etkin ve güvenilir bir çözüm sunduğu aktarılmıştır (Essa, Aboelela, and Hassan, 2017).

Salleh ve arkadaşları ise tek milli çift etkili bir hidrolik silindir ve servo valf içeren hidrolik sistem literatür taraması çalışmasında hidrolik silindirin kontrolü için belirli katsayıları içeren matematiksel çözümün veya gri, beyaz, kara kutu modelleme yaklaşımlarından birinin kullanılabileceği belirtilmiştir. Hidrolik silindir sistemlerinin doğrusal olmamaları ve sızıntı, sürtünme, dış bozulma vb. gibi büyük ölçüde model belirsizliklerinden oluştuğu belirtilmiştir. Hidrolik sistemler başlangıç kısmında birçok bilinmez parametre içerdikleri için araştırmacılar tarafından giriş ve çıkış ilişkisine bağlı olan deneysel modelleme yapılarının kullanıldığı aktarılmıştır (Salleh, Rahmat, Othman, and Danapalasingam, 2015). Çakan ve arkadaşları, oransal servo valf sistemine ait parametrelerin benzetim ortamında belirlenmesini amaçlamıştır. Parametre kestirimi için arı algoritması kullanılmış ve sonuçların, üretici firmanın sağladığı katalog verileriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen model, Matlab ortamına aktarılmış ve sistemin dinamik davranışları bu platformda analiz edilmiştir (Cakan, Botsalı, Onen, and Kalyoncu, 2022).

Rahmat ve arkadaşları, hidrolik sistem kontrolünün hem deneysel hem de simülasyon ortamında kontrol edilmesi üzerine yapılan çalışmada sistem tanılama için farklı frekans ve genliklere sahip olan üç farklı kosinus sinyali tek bir sinyal olarak hidrolik sisteme uygulamıştır. Hidrolik silindir tek milli ve çift etkili bir yapıda olup servo valf tarafından kontrol edilmektedir. Matlab da gerçekleştirilen tanılama çalışmasında sistemin modeli ARX olarak 4.dereceden ve 4 kutuplu biçimde ayrık zaman formunda elde edilmiştir. Sistem tanılama için 50 ms aralıklar ile veri toplaması gerçekleştirilmiş ve elde edilen modelin tahmin etme uyumunun % 92 olduğu için kabul edildiği aktarılmıştır (Rahmat et al., 2010).

### 3. HİDROLİK SERVO SİLİNDİR (HSS) İÇİN KONTROLÇÜ TASARIMI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Dalga kanalında yer alan PTWM'nin konum kontrolü için gerçekleştirilen kontrolcü tasarımları sunulmuş ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Tasarlanan kontrolçüler, klasik PI kontrol yapısı ile bulanık mantık tabanlı Takagi-Sugeno (TS) tipi bulanık kontrolör olmak üzere iki temel yapıda gerçekleştirilmiştir. Tezin bundan sonraki kısmında anlam karmaşası oluşmaması için HSS kontrolünde kullanılan PI kontrolör ve TS tipi bulanık kontrolör  $PI^{(Hss)}$  ve  $TS^{(Hss)}$  olarak isimlendirilmiştir.

$PI^{(Hss)}$  ve  $TS^{(Hss)}$  kontrolçülerin her biri için, kontrol parametrelerinin belirlenmesinde farklı optimizasyon algoritmaları kullanılmış ve çıktı performansları Hata Karesinin İntegrali (Integral of Squared Error – ISE), “Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata” (Integral of Time-weighted Absolute Error – ITAE) ve “Karekök Ortalama Kare” (Root Mean Square Error - RMSE) ve ISE gibi performans kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir. Performans değerlendirme kriterleri Denklem 3.1-3.3’de verilmiştir ve burada “e(t)” HSS’nin konum hata sinyalidir. ISE’nin matematiksel olarak hesaplaması kolaydır, kararlı sistemlerde genelde hızlı sonuç verir ancak küçük ama uzun süreli hatalara çok duyarlı değildir. ITAE’de sistem hızlı toparlanmaya zorlanır, sürekli hatalar önlenir ancak hesaplama bakımından biraz karmaşıktır. RMSE ise özellikle deneysel veya sayısal simülasyon sonuçlarında yaygın şekilde kullanılmasına karşın tek başına hata sürekliliği veya zamana bağlı özellikler hakkında bilgi vermemektedir.

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (3.1)$$

$$ITAE = \int_0^T t * |e(t)|dt \quad (3.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (3.3)$$

#### 3.1 $PI^{(HSS)}$ Kontrolcü Yapısı

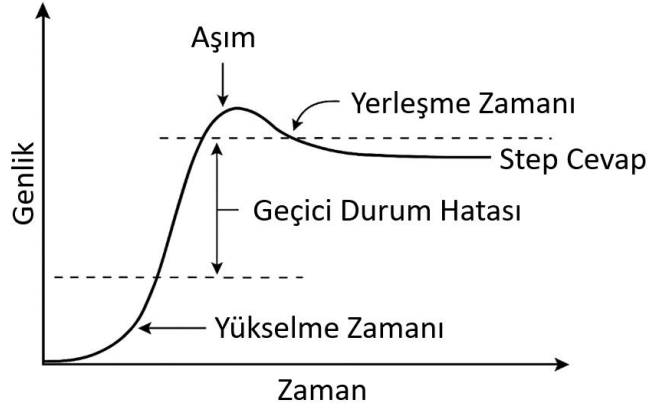
Hidrolik sistemlerde kontrol tasarımı yapılırken, kalıcı durum hatasının ortadan kaldırılması ve sistemin kararlı bir biçimde çalışması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, klasik PID

kontrolcü yerine yalnızca oransal ve integral kazanç bileşenlerine sahip olan PI kontrolcüsü tercih edilmiştir. Çünkü yalnızca oransal kontrolcü, kararlı hâl hatasını sifıra indirmekte yetersiz kalmaktadır ve bu gereksinim ancak integral bileşeniyle giderilebilmektedir (Puglisi, Saltaren, Garcia, and Banfield, 2015b). Ayrıca, klasik PD ve PID kontrolcüler, sistemde kararsızlık sorunlarına yol açabileceğinden dolayı bu tez çalışmasında HSS'nin konum kontrolünde ilk olarak PI yapısı tercih edilerek  $PI^{(HSS)}$  olarak adlandırılmıştır.  $PI^{(HSS)}$  kontrol yapısı Denklem 3.4'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'de verilen  $K_p$  katsayısı oransal kazanç olarak ifade edilmektedir.  $K_p$  hata büyüklüğüne karşı sistemin tepkisini artırmaktadır. Yüksek  $K_p$  değeri, yükselme süresini azaltır ancak sistemde aşım riskini artırabilmektedir.  $K_i$  katsayısı ise integral kazancı olarak ifade edilmektedir.  $K_i$  zamanla biriken hata miktarını gidererek kararlı hâl hatasını ortadan kaldırmaktadır. Ancak yüksek  $K_i$  değeri sistemin kararsızlığa gitmesine neden olabilmektedir.

Öte yandan PI kontrolcü parametreleri doğrudan sistemin dinamik yanıtlarını etkilemektedir. Sistem cevabının istenilen değere ulaşma süresi olarak tanımlanan yükselme süresi, genellikle oransal kazanç  $K_p$  ile ilişkilidir. Yüksek  $K_p$  değeri sistemin daha hızlı cevap vermesini sağlarken, aşım miktarının artmasına neden olabilmektedir. Aşım, sistem cevabının ilk tepkisinde istenen değeri ne kadar aştığını ifade eder ve yüksek  $K_p$  değerlerinde daha belirgin hâle gelmektedir. Sistem cevabının kararlı bir değerde kalıcı hâle gelmesiyle tanımlanan yerleşme süresi, çoğunlukla  $K_i$  kazancının doğru ayarlanmasıyla optimize edilebilmektedir. Şekil 3.1'de genel bir ikinci dereceden sistemin birim basamak girişine verdiği tipik zamana bağlı etki verilmiştir burada sistemin başlangıçta verdiği ilk tepki ile belirlenen yükselme süresi (rise time -  $t_r$ ), çıkışın istenen kararlı değeri aşarak ulaştığı maksimum noktadaki aşım oranı (maximum overshoot -  $M_p$ ), zamanla kararlı hâle ulaşmasını tanımlayan yerleşme süresi (settling time -  $t_s$ ) ve kararlı durumda hedef değerden sapma miktarı olan kararlı hâl hatası (steady-state error -  $e_{ss}$ ) gösterilmiştir. Bu parametreler, PI kontrolcü tasarımında sistem dinamiklerini analiz etmek ve iyileştirmek amacıyla kritik öneme sahiptir.



**Şekil 3.1:** Genel bir ikinci dereceden sistemin birim basamak girişine verdiği tipik zamana bağlı tepki eğrisi

Hidrolik sistemlerde PI kontrolcü parametrelerinin doğru belirlenmesi özellikle önemlidir; çünkü sistemdeki akışkan dinamikleri, valf tepkileri ve dışsal bozulmalar doğrusal olmayan davranışlar sergileyebilir. Dolayısıyla, PI parametrelerinin etkili bir biçimde seçilmesi hem kararlı hem de hassas bir kontrol performansı için kritik rol oynamaktadır.

### 3.2 Bulanık Mantık Kontrolcü Yapısı

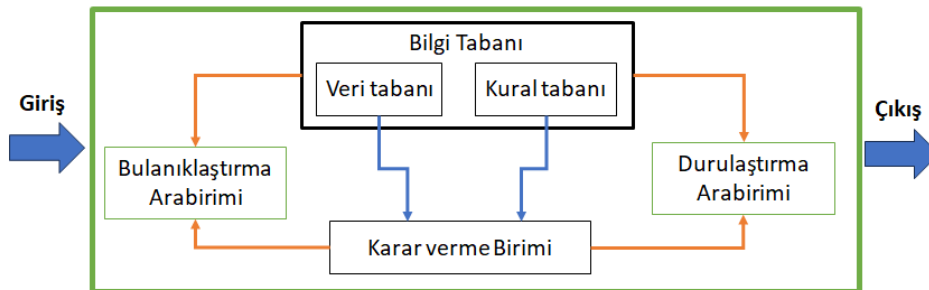
Bulanık mantık kontrolcüler, klasik kontrol yöntemlerinden farklı olarak belirsizlik ve doğrusal olmayanlık içeren sistemlerde daha esnek ve uyarlanabilir bir kontrol yaklaşımı sunan kontrolcü türleridir. Bu kontrolcüler, insan uzmanlığını taklit eden kurallara dayanarak çalışmakta ve sistemin sayısal modeline ihtiyaç duymadan sadece giriş-çıkış ilişkilerine göre karar verebilmektedir. Geleneksel yöntemlerde sabit katsayılar üzerinden sistem davranışı belirlenirken, bulanık kontrolcüler "az", "orta", "yüksek" gibi dilsel değişkenler ve bunlara karşılık gelen üyelik fonksiyonları kullanarak kontrol sinyali üretir. Böylece karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde daha kararlı ve uyumlu bir kontrol performansı sağlanabilmektedir. Özellikle hata ve hata değişimi gibi büyüklükler üzerinden kurulan kural tabanları ile kontrol sinyali üretilerek sistem çıktısı sürekli olarak iyileştirilmektedir. Bu nedenle bulanık mantık kontrolcüler, kontrol uygulamalarında belirsizlikle başa çıkmak ve klasik kontrolcülerin yetersiz kaldığı durumlarda daha etkili çözümler üretmek amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır.

#### 3.2.1 Bulanık mantık sisteminin yapısı ve işleyişi

Bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System, FIS), bulanık mantık temelli karar verme mekanizmasını gerçekleştiren yapıdır ve literatürde kural tabanlı bulanık sistem veya

bulanık uzman sistem olarak da adlandırılmaktadır. Bir bulanık mantık sistemi genel olarak (i) bulanıklaştırma birimi, (ii) bilgi tabanı, (iii) çıkarım mekanizması ve (iv) durulaştırma birim olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bu yapı içerisinde FIS, özellikle bilgi tabanı ve çıkarım mekanizmasını kapsayan çekirdek karar verme sürecini ifade etmektedir. Sistemin temel işlevi, kesin giriş değerlerini üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanıklaştırmak, tanımlı kural tabanını kullanarak çıkarım işlemini gerçekleştirmek ve elde edilen bulanık çıktıyı uygun bir yöntemle kesin değere dönüştürmek ve karar verme sürecini yürütmektir. Bu süreç; bulanık küme teorisi, bulanık EĞER–İSE kuralları ve bulanık akıl yürütme kavramları üzerine inşa edilir. FIS’te “EĞER ... İSE ...” ifadeleri kullanılır ve kurallardaki bağlaçlar genellikle “VE” ya da “VEYA” şeklindedir. Kontrolcü olarak kullanıldığında kesin bir çıktı sağlanması gerektiğinden, durulaştırma (defuzzification) yöntemleriyle bulanık küme, temsil edilebilecek en uygun kesin değere dönüştürülmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde FIS’in tüm yapısı ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Temel bir bulanık çıkarım sistemi Şekil 3.2’de verildiği gibi beş işlevsel bloktan oluşmaktadır. Kural tabanı, bulanık EĞER–İSE kurallarını içermektedir. Veritabanı, bu kurallarda kullanılan üyelik fonksiyonlarını tanımlamakta ve her bir dilsel değer için üyelik derecesini belirlemektedir. Karar birimi, tanımlı kurallar üzerinde çıkarım işlemlerini gerçekleştirmekte ve kuralların etkinlik derecelerini saptamaktadır. Bulanıklaştırma arabirimi, sistemin aldığı kesin girdileri dilsel terimlerle tanımlanan üyelik fonksiyonuna dönüştürmektedir; durulaştırma arabirimi ise çıkarım sonucunda elde edilen bulanık kümeleri gerçek dünyada kullanılabilir tek bir kesin sayısal değere dönüştürmektedir (Sivanandam, Sumathi, and Deepa, 2007).



Şekil 3.2: Bulanık arabirim sistemi (Sivanandam et al., 2007)

Bir bulanık çıkarım sisteminin (FIS) işleyişi, kesin giriş değerlerinin uygun bir bulanıklaştırma yöntemi ile üyelik derecelerine dönüştürülmesiyle başlamaktadır. Bu aşamanın ardından sistemin bilgi tabanı oluşturulmaktadır. Bilgi tabanı, iki temel bileşenden meydana gelmektedir: (i) If-Then yapısındaki kuralları içeren kural tabanı ve (ii) giriş ve çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonlarının türünü, parametrelerini ve tanım aralıklarını içeren veri tabanı. Bu iki yapı birlikte sistemin çıkarım mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. Son aşamada, çıkarım sonucu elde edilen bulanık değerler durulaştırma işlemi aracılığıyla gerçek dünyada anlamlı bir kesin çıkış değerine dönüştürülmektedir. Üyelik derecelerinin birleştirilmesi, bulanık mantıkta “VE” bağlacını temsil eden T-norm operatörü ile gerçekleştirilmektedir. T-norm,  $[0,1]$  aralığındaki üyelik derecelerini yine  $[0,1]$  aralığında tek bir değere dönüştüren bir birleşim operatörüdür. En yaygın kullanılan T-norm türleri minimum ve çarpım operatörleridir. Bu işlem sonucunda her kuralın oluşum kuvveti hesaplanmaktadır. Bu kuvvet doğrultusunda kuralların sonuç kısımları nitelendirilmekte ve nihayetinde nitelendirilmiş tüm sonuçlar bir araya getirilerek kesin bir çıkış değeri üretilmektedir (Sivanandam et al., 2007).

Mamdani yönteminde kural sonuçları bulanık üyelik fonksiyonları ile tanımlanırken, Sugeno yönteminde kural sonuçları sabit değerler veya giriş değişkenlerinin lineer fonksiyonları şeklinde ifade edilmektedir. Bu nedenle Mamdani yapısı ek bir durulaştırma adımı gerektirirken, Sugeno yapısında çıktı ağırlıklı ortalama yöntemiyle doğrudan elde edilmektedir. Ayrıca kural sonuçlarının biçimi, bu sonuçların birleştirilme (agregasyon) süreçleri ve durulaştırma (defuzzification) prosedürleri bakımından anlamlı farklılıklar mevcuttur. Sugeno bulanık sistemlerinde, yaklaşılacak fonksiyonun yerel veya global maksimum ve minimum noktalarının sayısı ve bu noktaların giriş uzayındaki dağılımı, giriş üyelik fonksiyonlarının ve kural sayısının belirlenmesinde doğrudan etkili olmaktadır. Özellikle periyodik veya yüksek frekanslı salınım içeren fonksiyonların doğru biçimde modellenebilmesi için giriş uzayının daha küçük alt bölgelere ayrılması gerekmekte ve bu durum kural sayısının artmasına yol açmaktadır. Üçgensel olmayan giriş üyelik fonksiyonları kullanıldığında TS bulanık sistemleri, Mamdani sistemlerine kıyasla daha az hesaplama adımı, daha düşük bellek gereksinimi ve daha sınırlı donanım kaynağı kullanımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Sugeno kontrolcülerini, kural sonuçlarındaki ayarlanabilir parametre sayısı bakımından fazlasıyla esneklik sağlamaktadır; ancak parametre sayısı, giriş değişkenlerinin sayısına bağlı olarak üssel bir artış göstermektedir. Diğer yandan, TS bulanık kontrolcülerinin özellikle kararlılık analizine ilişkin matematiksel sonuçları, Mamdani bulanık

kontrolcülere göre oldukça sınırlı düzeyde bulunmaktadır. Mamdani yöntemi ise yöntemsel olarak daha kolay yapılandırılabilir. Takagi-Sugeno yapısında tipik bir bulanık sistem kuralı Denklem 3.5'deki gibi tanımlanmaktadır (Sivanandam et al., 2007).

$$EĞER x A ve y B ise z = f(x, y) \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'de verilen "A" ve "B", öncül kısımdaki bulanık kümeleri;  $z = f(x, y)$  ise sonuç kısmındaki kesin fonksiyonu ifade etmektedir.  $f(x, y)$  genellikle giriş değişkenlerinin birinci dereceden polinomu olmakla birlikte, sistemin bulanık bölgede tanımlanan çıktısını uygun şekilde tarif edebilecek herhangi bir fonksiyon olabilmektedir. "f" sabit bir değer olduğunda (örneğin  $f(x, y)=c$ ), model "sıfırinci derece Sugeno" olarak adlandırılmakta ve her kuralın sonucu sabit bir singleton ile tanımlanmaktadır. Bu durumda sıfırinci derece Sugeno modeli, her kural sonucu adım fonksiyonu şeklinde tanımlanan üyelik fonksiyonuna sahip özel bir Tsukamoto modeli ya da kural sonucunun bulanık singleton olduğu bir Mamdani FIS'in özel bir durumu olarak değerlendirilebilmektedir. " $f(x, y)$ " birinci dereceden polinom olduğunda ise (örneğin  $f(x, y)=a x + b y + c$ ), model "birinci derece Sugeno" olarak adlandırılmakta ve her kural sonucunda lineer bir fonksiyon kullanılmaktadır. Sugeno bulanık modelinde, Mamdani modelindeki ilk iki aşama "girdi bulanıklaştırma" ve "t-norm uygulaması" aynı biçimde yürütülmektedir. Kesin girdiler, öncül kısımdaki üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık değerlere dönüştürülmekte, ardından belirlenen t-norm operatörü (çoğunlukla çarpma veya minimum) kullanılarak her bir kuralın etki kuvveti Denklem 3.6'daki gibi tanımlanmaktadır (Sivanandam et al., 2007).

$$w_i = AndMethod(F_1(x), F_2(y)) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da verilen  $F_1$  ve  $F_2$ , sırasıyla girdi 1 ve girdi 2'nin üyelik fonksiyonlarını tanımlamaktadır. Elde edilen her kural çıktısı  $z_i$  (sıfırinci derece için sabit, birinci derece için lineer fonksiyon) ilgili  $w_i$  ile çarpılarak ağırlıklandırılmakta ve nihai çıkış Denklem 3.7'de verilen ağırlıklı ortalama formülüyle belirlenmektedir (Sivanandam et al., 2007).

$$Z_{çıkış} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.7)$$

Öte yandan Takagi ve Sugeno, 1985 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, karmaşık dinamik sistemlerin modellenmesinde etkili olduğu bilinen bulanık mantık yaklaşımının, yapay sinir ağlarının davranışlarını farklı bir matematiksel çerçevede temsil etmek amacıyla kullanılabilceğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, Takagi ve Sugeno tarafından Takagi Sugeno (TS) bulanık model yapısı geliştirilmiş ve bu model sayesinde doğrusal olmayan sistemlerin, birden fazla yerel doğrusal model aracılığıyla başarıyla ifade edilebileceği gösterilmiştir. Böylece bulanık mantık teorisinin, doğrusal olmayan sistemlerin analizi ve modellenmesinde güçlü bir araç sunduğu kanıtlanmıştır (Takagi and Sugeno, 1985).

TS kural yapısının işleyişi, sonlu çıkış fonksiyonlarının çıkış uzayında lineer biçimde hareket edebilmesini mümkün kılmakta ve böylece modelin hem kompakt hem de hesaplama verimliliği yüksek bir temsil sunması sağlanmaktadır. Bu özellik, Sugeno modelinin dinamik ve doğrusal olmayan sistem koşullarında adaptif bir üst kontrolcü olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır (Sivanandam et al., 2007). Bu tez çalışmasında, kontrol yapısının gerçek zamanlı uygulanması ve parametre optimizasyonunun gerçekleştirilmesi hedeflendiğinden, daha düşük hesaplama karmaşıklığı ve analitik olarak ifade edilebilir bir çıkış yapısı sunması nedeniyle TS bulanık çıkarım yöntemi tercih edilmiştir.

### **3.3 Kontrolcü Parametrelerinin Optimizasyonu**

Kontrolcü performansının istenen dinamik ve statik özellikleri sağlaması, uygun parametre değerlerinin seçimine bağlı bulunmaktadır. Bu amaçla, hem  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü kazançları  $K_p$  ve  $K_i$  hem de  $TS^{(HSS)}$  bulanık kontrolcü sonuç fonksiyonları ve ağırlıkları için optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde, tanımlanan amaç fonksiyonu minimize edilmekte ve her adımda aday parametre setlerinin performansları simülasyon ortamında değerlendirilmekte ve karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmada, literatürde yaygın biçimde başarıyla uygulanmış sürü zekâsı ve doğa temelli meta-sezgisel yöntemler tercih edilmiştir. Söz konusu algoritmalar, geniş arama uzaylarında global optimuma yakın çözümler bulabilme yeteneği sayesinde hem  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü kazançlarının hem de  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü kural parametrelerinin eşzamanlı ayarlanmasında yüksek verimlilik elde etmektedir. Bu tez çalışmasında hem  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü kazançlarının hem de  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü kural parametrelerinin optimizasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu, Harris Şahinleri Optimizasyonu ve Cıvık Mantar Algoritması yöntemleri seçilmiştir.

### 3.3.1 Parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization)

1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından tanıtılan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş sürülerinin veya balıkların sosyal davranışlarından esinlenen popülasyon tabanlı bir stokastik optimizasyon tekniğidir. PSO modelinde, "sürü" olarak adlandırılan bir popülasyondaki her "parçacık" (potansiyel bir çözüm), arama uzayında bir konuma ve bir hıza sahiptir. Parçacıkların hareketi, iki temel bilgi kaynağından etkilenir: parçacığın kendi bireysel deneyimi ve sürünün kolektif deneyimi. Her iterasyonda, her parçacık hızını günceller. Hız güncellendikten sonra, parçacık yeni konumuna hareket eder. Bu basit mekanizma, parçacıkların arama uzayında "uçmasını" ve bireysel keşif ile sosyal iş birliği arasında bir denge kurarak optimal çözüme yakınsamasını sağlamaktadır. Bir parçacığın hız ve konum güncelleme denklemleri Denklem 3.8'de verilmiştir (Kennedy and Eberhart, 1995).

$$\begin{aligned}v_i^{k+1} &= \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g^k - x_i^k) \\x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Burada  $x_i^k$ :  $i$ 'nci parçacığın  $k$ . iterasyondaki konumunu,  $v_i^k$ : parçacığın hızını,  $p_i$ : parçacığın şimdiye kadar elde ettiği en iyi konumu (pbest),  $g$ : ise sürüye ait küresel en iyi konumu (gbest) ifade etmektedir.  $\omega$  ataletsel ağırlık katsayısı olup, arama sürecinde keşif ve sömürü davranışları arasındaki dengeyi belirlemektedir.  $c_1$  ve  $c_2$ , sırasıyla bilişsel ve sosyal öğrenme katsayılarını temsil ederken,  $r_1$  ve  $r_2$   $[0,1]$  aralığında düzgün dağılıma sahip rastgele sayılardır. Atalet katsayısının yüksek seçilmesi keşif davranışını, düşük seçilmesi ise sömürü eğilimini artırmaktadır.

### 3.3.2 Harris şahinleri optimizasyonu (harris hawks optimization)

Harris Şahinleri Optimizasyonu (HHO), Harris şahinlerinin işbirlikçi avlanma stratejilerini ve "sürpriz pusu" taktiğini modelleyen bir yöntemdir. HHO, şahinlerin bir avı yakalamak için sergilediği dinamik davranışları taklit eder. Algoritmanın temel yapısı, avın "kaçış enerjisi" ( $E$ ) olarak adlandırılan ve iterasyonlar ilerledikçe azalan bir parametreye dayanır.  $E = 2 \cdot E_0 \cdot (1 - \frac{t}{T})$  formülüne göre bir parametreye dayanır. Eğer  $|E| \geq 1$  ise, algoritma "keşif" fazındadır ve şahinler ya diğer sürü üyelerine göre ya da tamamen rastgele konumlara tüneyerek avı arar. Avın enerjisi azaldığında  $|E| < 1$ , algoritma "sömürü" fazına geçer. Bu fazda, avın kaçma şansı " $r$ " ve enerji seviyesine  $|E|$  bağlı olarak dört farklı pusu stratejisi uygulanır: "yumuşak kuşatma", "sert kuşatma", "aşamalı hızlı dalışlarla yumuşak kuşatma"

ve "aşamalı hızlı dalışlarla sert kuşatma". Özellikle Levy Uçuşu (LF) mekanizmasını içeren dalış stratejileri, algoritmanın yerel optimallerden kaçınma yeteneğini artırır. HHO'nun gücü, bu adaptif faz geçişi ve avın durumuna göre değişen çoklu sömürü mekanizmalarından kaynaklanır (Heidari et al., 2019). HHO algoritmasının temel kontrol parametresi, Denklem 3.9'da tanımlanan enerji katsayısı  $E$ 'dir. Bu katsayı, algoritmanın keşif ile sömürü fazları arasındaki dengeyi belirlemektedir.

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{k}{\text{MaxIt}}\right), \quad E_0 \in (-1,1) \quad (3.9)$$

Burada  $k$  mevcut iterasyon indeksini, MaxIt sayısı maksimum iterasyon sayısını,  $E_0$  ise  $(-1,1)$  aralığında düzgün dağılıma sahip rastgele başlangıç enerji katsayısını temsil etmektedir. Keşif fazında, şahinlerin arama uzayındaki konum güncellemesi Denklem 3.10'da verilen ifade ile gerçekleştirilmektedir:

$$x_i^{k+1} = x_{\text{rand}}^k - r | x_{\text{rand}}^k - 2rx_i^k | \quad (3.10)$$

Burada  $x_{\text{rand}}^k$ , mevcut iterasyonda rastgele seçilen bir şahin konumunu,  $r \in (0,1)$  ise rastgele üretilen bir katsayıyı ifade etmektedir. Algoritmanın sömürü fazında, avın kuşatılması süreci modellenmekte olup, yumuşak kuşatma ve sert kuşatma olmak üzere iki temel strateji uygulanmaktadır. Bu stratejiler sırasıyla Denklem 3.11 ve Denklem 3.12'de verilmiştir.

$$x_i^{k+1} = \Delta x^k - E | \Delta x^k |, \Delta x^k = x_{\text{rabbit}}^k - x_i^k \quad (3.11)$$

$$x_i^{k+1} = x_{\text{rabbit}}^k - E | \Delta x^k | \quad (3.12)$$

Burada  $x_{\text{rabbit}}^k$ , mevcut iterasyondaki en iyi çözümü (avın konumu) temsil etmektedir. HHO algoritmasının dikkat çeken güçlü yönlerinden biri, yerel minimumlardan kaçınmayı sağlayan Levy uçuşuna dayalı kaçış mekanizmasıdır. Bu mekanizma Denklem 3.13'de verilmiştir:

$$x_i^{k+1} = x_{\text{rabbit}}^k - E | \Delta x^k | + S \cdot \text{Levy}(d) \quad (3.13)$$

Burada  $S$  ölçekleme faktörünü,  $Levy(d)$  ise  $d$  boyutlu Levy uçuşunu ifade etmektedir. Bu terim, algoritmanın arama kabiliyetini artırarak erken yakınsama problemini önlemekte ve küresel optimuma ulaşma olasılığını yükseltmektedir.

### 3.3.3 Cıvık mantar algoritması (slime mould algorithm)

Physarum polycephalum adlı cıvık mantar türünün besin kaynaklarını bulmak ve bunlar arasında verimli yollar oluşturmak için kullandığı salınım davranışını ve pozitif-negatif geri bildirim mekanizmalarını taklit eder. SMA'da, cıvık mantarın konumu, besin kokusuna dayalı olarak güncellenir. Algoritma, en iyi besin rastgele keşif arasında belirlenen bir olasılığa göre geçiş yapar. SMA, adaptif ağırlıklandırma ve benzersiz salınım mekanizmaları sayesinde keşif ve sömürü arasında etkili bir denge kurmaktadır. Algoritmada kullanılan ağırlık katsayısı, Denklem 3.14'de verildiği şekilde tanımlanmaktadır (S. Li, Chen, Wang, Heidari, and Mirjalili, 2020):

$$W_i = \begin{cases} 1 + \log \left( \frac{f_{\text{best}} - f_i}{f_{\text{best}} - f_{\text{worst}} + \epsilon} \right), & \text{eğer } f_i \text{ iyi ise} \\ 1 - \log \left( \frac{f_{\text{best}} - f_i}{f_{\text{best}} - f_{\text{worst}} + \epsilon} \right), & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.14)$$

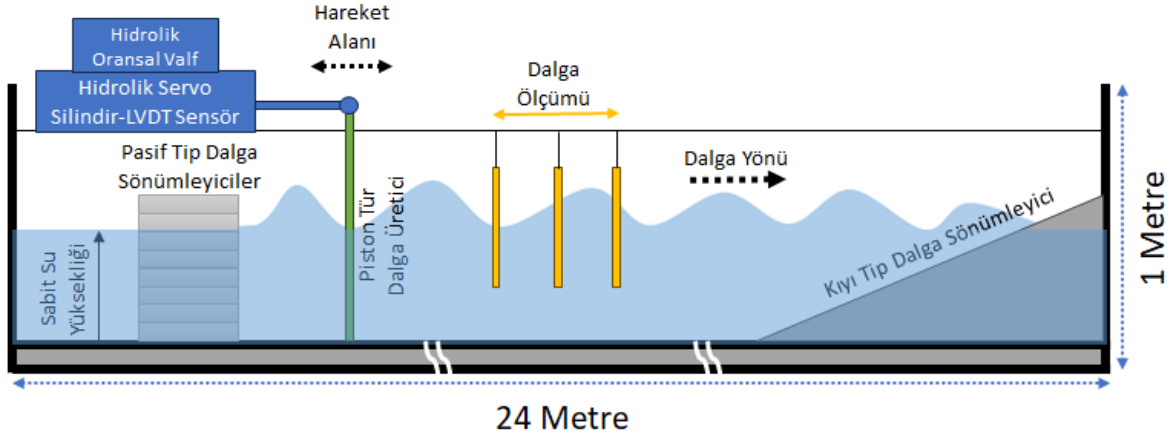
Burada  $f_i$ ,  $i$ 'inci bireyin uygunluk değerini,  $f_{\text{best}}$  ve  $f_{\text{worst}}$  sırasıyla mevcut iterasyondaki en iyi ve en kötü uygunluk değerlerini,  $\epsilon$  ise sıfıra bölme problemini önlemek amacıyla kullanılan küçük bir pozitif sabiti ifade etmektedir. Algoritmada konum güncelleme mekanizması ise Denklem 3.15'de tanımlanmıştır:

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} x_{\text{best}}^k + vb \cdot (W_i x_{\text{best}}^k - x_i^k), & r < p(\text{sömürü}) \\ x_{\text{rand}}^k + vb \cdot (W_i x_{\text{rand}}^k - x_i^k), & r \geq p(\text{keşif}) \end{cases} \quad (3.15)$$

$W_i$ : organizmanın besin yoğunluğuna bağlı dinamik ağırlık katsayısını,  $vb$ : salınım genişliğini belirleyen kontrol parametresini,  $p$ : keşif ve sömürü fazları arasındaki geçişi kontrol eden olasılık anahtarını,  $r \sim U(0,1)$ : karar mekanizmasında kullanılan düzgün dağılımlı rastgele sayıyı,  $x_{\text{best}}^k$ : mevcut iterasyondaki en iyi çözümü,  $x_{\text{rand}}^k$ : rastgele seçilen bir bireyin konumunu ifade etmektedir. SMA'nın temel avantajı, dinamik ağırlık adaptasyonu sayesinde arama çeşitliliğini koruyabilmesi ve aynı zamanda hızlı yakınsama özelliği sergilemesidir.

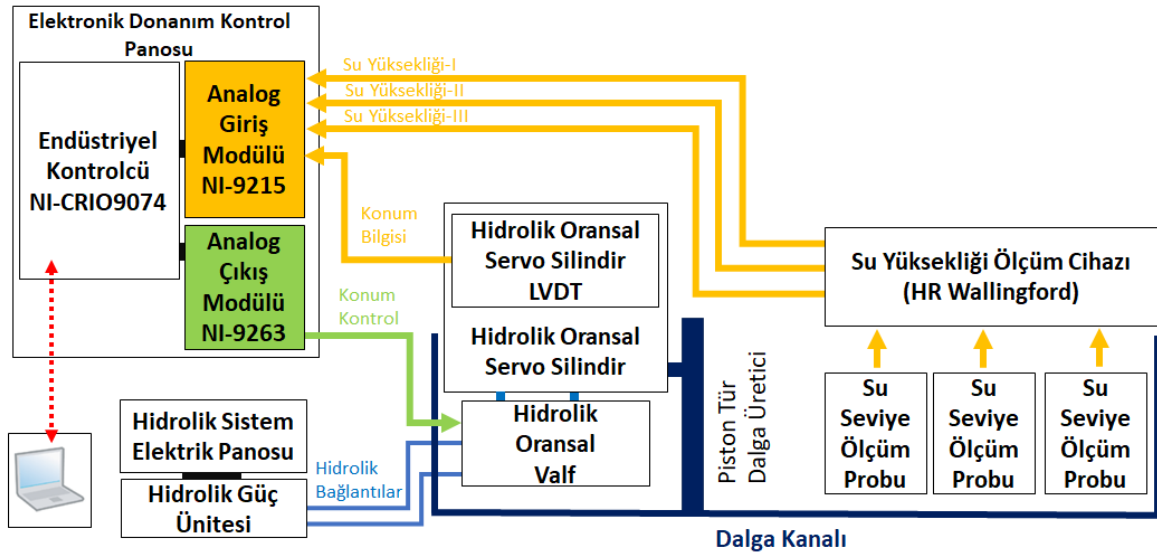
#### 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında deneysel uygulamalar, 24 metre uzunluğa, 1 metre genişliğe ve 1 metre yüksekliğe sahip laboratuvar tipi bir dalga kanalı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dalga üretimi amacıyla kanalın bir ucuna yerleştirilen dalga üretici sistem, başlangıçta flap tipi yapıdan oluşmakta iken, deneysel uygulamalarda karşılaşılan dalga kanalında titreşim oluşması, flap tipi sistem bağlantı noktasındaki paslanmalar gibi kısıtlar nedeniyle piston tipi dalga üretici sistem ile değiştirilmiştir. Bu kapsamda, tez çalışmasının nihai uygulama aşamaları piston tipi dalga üretici sistem ile yürütülmüştür. Dalga kanalına ait genel sistem şeması Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Laboratuvar tip dalga kanalı sistem şeması

Şekil 4.2’de dalga kanalı sisteminin elektronik ve hidrolik bileşen şeması verilmiştir. Burada PTWM’nin hassas konum kontrolü, çift etkili ve çift milli bir hidrolik servo silindir (HSS) aracılığıyla sağlanmıştır. Bu yapı, gerekli kuvvet ve hareketin iletimini sağlayacak şekilde pompa, valf, akümülatör ve filtre gibi tamamlayıcı hidrolik bileşenlerle desteklenmiştir. Tüm hidrolik yapının elektronik kontrolü için National Instruments firmasına ait CRIO-9074 serisi bir programlanabilir otomasyon kontrolörü (Programmable Automation Controller - PAC) ile uyumlu analog giriş/çıkış modülleri kullanılmıştır. Dalga üretim sistemin kontrol algoritmaları, LabVIEW yazılım platformu üzerinde, gerçek zamanlı çalışacak şekilde özgün olarak geliştirilmiştir. Kullanıcı tarafından tanımlanan dalga parametrelerine göre sistemin otomatik biçimde çalışmasını sağlayan bu yazılım altyapısı, sinyal üretimi, konum kontrolü ve veri kaydına ilişkin algoritmaları bütünlük halinde içermektedir.



Şekil 4.2: Laboratuvar tip dalga kanalı sistemi elektronik ve hidrolik bileşen şeması

Dalga kanalı içerisinde üretilen dalgaların bozulmadan ilerleyebilmesi ve geri yansımaların önlenmesi amacıyla, kanalın çıkış kısmına kıyı tipi pasif sönümleyici yapı yerleştirilmiştir; ayrıca dalga üretici sistemin arka tarafına da ikincil bir pasif sönümleme yapısı entegre edilmiştir. Bu düzenleme, dalga formunun sürekliliğini sağlamak ve geri besleme tabanlı kontrol algoritmalarının güvenilirliğini artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Dalga üretiminin doğruluğunu değerlendirmek ve sistemin kapalı çevrim kontrol algoritmasına geri besleme sağlamak amacıyla, kanal içerisine temaslı tip su seviye ölçüm sensörü yerleştirilmiştir. Bu sensörden elde edilen gerçek zamanlı ölçüm verileri hem kontrol algoritmalarında referans ile karşılaştırılarak kullanılmakta hem de bilgisayar ortamına anlık olarak aktarılmakta ve kaydedilmektedir. Böylece, deney sürecinde elde edilen tüm dalga verileri dijital ortamda analiz edilebilir şekilde arşivlenmektedir. Bu bölümde kullanılan tüm donanım ve yazılım bileşenlerinin detayları ile sistem topolojisine ilişkin bilgiler, alt başlıklar halinde sunulacaktır.

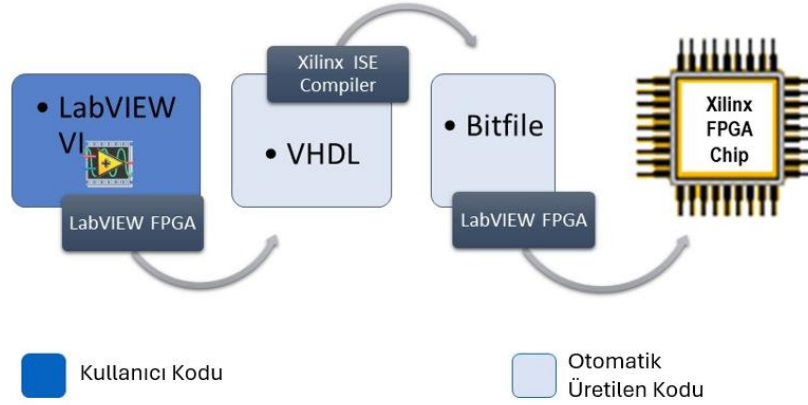
#### 4.1 Dalga Kanalı Kontrol Donanımı ve Alt Donanım Bileşenleri

National Instruments CRIO-9074 (National Instruments, 2025a), dalga üretici sistemin hassas ve gerçek zamanlı kontrolünü sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. FPGA'lar iç yapılarında başlangıçta birbirinden bağımsız durumda bulunan mantık kapıları ile çeşitli donanım kaynaklarını barındıran ve bu kaynakların yazılım tabanlı yapılandırma süreçleri aracılığıyla kullanıcı gereksinimlerine göre yeniden düzenlenmesine olanak sağlayan yarı iletken entegre devrelerdir. En temel özelliği, kullanıcıya donanım seviyesinde işlev

tanımlama ve bu işlevleri ihtiyaçlara göre yeniden yapılandırma imkânı sunmasıdır. Bu sayede FPGA tabanlı sistemler, uygulama sahasında dahi güncellenebilir ve farklı görevler için yeniden kullanılabilir. FPGA’lerde devre davranışı, donanım tanımlama mantığını içeren bir yazılım konfigürasyonu aracılığıyla belirlenmektedir. Bu konfigürasyon dosyası, mantık kapılarının bağlantı yapısını, veri yollarını ve kontrol mantığını tanımlayarak doğrudan donanım üzerine yüklenmektedir. FPGA tabanlı uygulamalarda bir işletim sistemine ihtiyaç duyulmaz; tanımlanan mantık doğrudan donanım seviyesinde çalıştırılır. Bu durum, özellikle zaman kritik ve deterministik uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır (National Instruments Corp., 2025). National Instrument firması tarafından üretilen FPGA barındıran donanımlar LabVIEW yazılımı ile yeniden yapılandırılarak programlanabilmektedir. Bu özellik, donanımın fiziksel olarak değiştirilmesine gerek kalmadan yeni işlevlerin tanımlanmasını mümkün kılmaktadır. FPGA mimarisi, eş zamanlı çalışan bağımsız donanım bloklarının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Mikroişlemcilerde görülen zaman paylaşımı mantığı FPGA’lerde bulunmamaktadır. Böylece birden fazla işlem aynı anda ve birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilebilmektedir. Algoritmaların donanım seviyesinde gerçekleştirilmesi, yazılım tabanlı çözümlere kıyasla daha yüksek yürütme hızları sunmaktadır. FPGA üzerinde tasarlanan mantık yapıları, belirli işlemleri tek bir saat darbesi içinde gerçekleştirebilmektedir. FPGA programlandıktan sonra sabit bir donanım yapısı gibi çalışmaktadır. İşletim sistemi bulunmaması ve doğrudan donanım seviyesinde çalışması nedeniyle yüksek derecede deterministik davranış sergilemektedir. Bu özellik, nanosaniye mertebesinde zaman hassasiyeti gerektiren kontrol uygulamaları için büyük önem taşımaktadır.

LabVIEW FPGA Modülü, LabVIEW yazılımı ortamında geliştirilen grafik tabanlı programların FPGA donanımına aktarılmasını mümkün kılan bir derleme sürecini yürütmektedir. Bu sürecin grafik görünümü Şekil 4.3’de verilmiştir. Kullanıcı tarafından LabVIEW tabanlı oluşturulan grafiksel blok diyagramı (LabVIEW ön panel veya arka panel programı) doğrudan donanıma yüklenmemektedir. Bunun yerine arka planda metin tabanlı bir donanım tanımlama dili olan “Çok Yüksek Hızlı Tümeşik Devre Donanım Tanımlama Dili” (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language – VHDL) koduna LabVIEW tarafından dönüştürülmektedir. Elde edilen VHDL kodu, endüstri standardı FPGA derleme araçları kullanılarak optimize edilmekte ve sentezlenmektedir. Derleme süreci boyunca, dijital mantık yapılarının sadeleştirilmesine ve uygulamanın

donanım üzerinde en uygun biçimde gerçekleştirilmesine yönelik kapsamlı optimizasyonlar gerçekleştirilmektedir. Sentez aşamasının sonunda, LabVIEW yazılımında geliştirilen program FPGA üzerinde gerçek paralel işlem yeteneğine sahip, yüksek derecede optimize edilmiş bir donanım yapısına dönüştürülmektedir. Derleme sürecinin çıktısı olarak, FPGA donanımını yapılandırmak için gerekli programlama bilgilerini içeren bir bit akışı (bitstream) dosyası elde edilmektedir (Pradhan, 2019).



**Şekil 4.3:** FPGA kod dönüşümü ve programlama

Uygulama çalıştırıldığında, bu bit akışı FPGA hedef donanımına yüklenerek kapı dizisi mantığı yeniden yapılandırılmaktadır. Bit akışı isteğe bağlı olarak kalıcı bellek üzerine kaydedilebilmekte ve güç verildiğinde FPGA donanımı tarafından otomatik olarak yüklenebilmektedir. FPGA üzerinde herhangi bir işletim sistemi bulunmamakla birlikte, donanımın çalışması ana bilgisayar veya gerçek zamanlı bir kontrolcü üzerinden geliştirilen bir üst seviye uygulama aracılığıyla izlenmekte ve kontrol edilmektedir. LabVIEW yazılımı FPGA derleme sürecinde grafiksel kodun VHDL'ye dönüştürülmesi sırasında devre tasarımına zamanlama kısıtları uygulanmakta ve varsayılan olarak FPGA saat frekansı 40 MHz olarak yapılandırılmaktadır. Ardından VHDL kodu optimize edilerek gereksiz mantık elemanları azaltılmakta ve kapı dizisi konfigürasyonu sentezlenmektedir. Son aşamada elde edilen bit akışı FPGA donanımına yüklenerek tasarımın fiziksel karşılığı oluşturulmaktadır. (Pradhan, 2019).

Tez çalışması kapsamında kullanılan NI CRIO-9074 içerisinde bulunan mikrodenetleyici yani Real Time (RT) Target yapısı, FPGA yapısına göre sınırlı işlem gücü, sıralı görev yürütme yapısı ve zamanlama belirsizlikleri nedeniyle özellikle paralel döngü işletilmesi noktasında yetersiz kalmıştır. Bu noktada dalga üretimi için Şekil 4.4'de verilen NI CRIO-

9074 donanımında bulunan FPGA yapısı kullanılmıştır. NI CRIO-9074, içerisinde Xilinx Spartan-3 2M FPGA yongasını barındırmakta olup, sistemin zamanla değişen hidrolik dinamiklerine uyum sağlayabilecek şekilde yapılandırılabilir kontrol algoritmalarının deterministik ve senkron biçimde uygulanmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 4.4: CRIO-9074 donanımı

FPGA, özellikle milisaniye mertebesinde örnekleme gerektiren hassas konum kontrolü uygulamalarında, işlemci yükünden bağımsız olarak yüksek frekansta işlem gerçekleştirme kapasitesi ile öne çıkmaktadır. FPGA yapısının kullanımı ile LVDT konum sensöründen alınan sinyaller ve analog kontrol çıkışları, gecikmesiz, veri kayıpsız ve sürekli akış halinde işlenebilmiştir. Donanım yapısı en fazla 8 adede kadar C Serisi modül (örneğin analog giriş, analog çıkış, dijital I/O) desteklemekte olup, bu modüler yapı sistemin genişletilebilirliğini ve uygulamaya özel olarak uyarlanabilirliğini sağlamaktadır. Bu çalışmada, sinyal toplama ve kontrol sinyali üretimi için NI 9215 (analog giriş) (National Instruments, 2025b) ve NI 9263 (analog çıkış) (National Instruments, 2025c) modülleri kullanılmıştır. CRIO-9074 donanımı ile kullanıcı bilgisayarı arasındaki iletişim, yüksek hızlı ve güvenilir veri alışverişi sağlamak amacıyla Ethernet tabanlı TCP/IP protokolü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu yapı hem gerçek zamanlı veri izleme hem de sistem parametrelerinin kullanıcı arayüzü üzerinden dinamik olarak değiştirilmesini mümkün kılmıştır.

#### 4.1.1 Analog giriş ve analog çıkış modülleri

Sistemin hem veri toplama hem de kontrol sinyali üretme süreçlerinde, CRIO-9074 donanımı üzerine entegre edilen analog giriş ve çıkış modülleri etkin olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda, dalga kanalında gerçekleştirilen deneyler sırasında hem dalga yüksekliği ölçümlerinin alınması hem de oransal yön kontrol valfinin (Proportional Directional Valve – PDV) doğru biçimde sürülmesi için gerekli olan analog sinyallerin işlenmesi amacıyla NI 9215 (analog giriş modülü) ve NI 9263 (analog çıkış modülü) dalga kanalında kullanılmıştır. Dalga ölçüm probundan alınan ölçümler 0-10 V gerilim aralığında ve LVDT tipi HSS konum sensöründen elde edilen veriler ise 4–20 mA akım sinyali biçiminde üretilmektedir. Akım

sinyali 1/2W bir direnç aracılığı ile modül girişinde gerilim sinyaline dönüştürülmüştür. Bu sinyaller, NI 9215 modülü aracılığıyla ölçülünerek FPGA yapısına aktarılmıştır. Diğer yandan, kontrolcü tarafından hesaplanan çıkış gerilimi  $-10\text{ V}$  ile  $+10\text{ V}$  aralığında PDV'ye doğrudan uygulanmak üzere FPGA yapısı tarafından NI 9263 analog çıkış modülü üzerinden iletilmiştir. Böylece, HSS'nin yönü ve hızı hassas biçimde kontrol edilebilmiştir. CRIO-9074 ve analog giriş-çıkış modüllerinin fiziksel konumlarını gösteren görsel Şekil 4.5'de verilmiştir. Bu yapı sayesinde veri toplama ve kontrol birimleri arasındaki bağlantılar açıkça izlenebilmektedir.



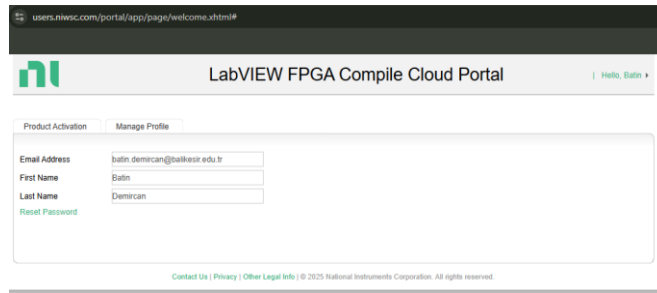
Şekil 4.5: CRIO-9074 ve modül kullanımı

NI 9215 modülü, 16-bit çözünürlüğe sahip dört kanallı bir analog giriş modülüdür ve her kanal için  $\pm 10\text{ V}$  giriş aralığını desteklemektedir. Örnekleme hızı toplamda  $100\text{ kS/s}$  (her bir modül başına) olup, yüksek hızlı ve senkron veri toplama uygulamaları için uygundur. Modül, diferansiyel sinyal ölçümüne olanak tanıdığı için, dış parazitlere karşı yüksek direnç gösterir ve özellikle düşük seviyeli analog sensör verilerinin güvenli biçimde toplanmasında önemli bir avantaj sunmaktadır. NI 9263 ise dört kanallı bir analog çıkış modülüdür ve her kanal için  $-10\text{ V}$  ile  $+10\text{ V}$  aralığında çıkış sinyali üretebilmektedir. Modül, 16-bit çözünürlük sunmakta ve maksimum çıkış hızı kanal başına  $100\text{ kS/s}$ 'ye kadar ulaşabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde, PDV gibi hassas sürücü bileşenlerine kontrol sinyali gönderilmesinde yüksek doğrulukla çalışabilmektedir. NI 9263 modülü, FPGA ile doğrudan senkronize çalıştırılarak, çıkış sinyallerinin gecikmesiz ve kararlı biçimde uygulanmasını sağlamaktadır.

## 4.2 FPGA Programlama

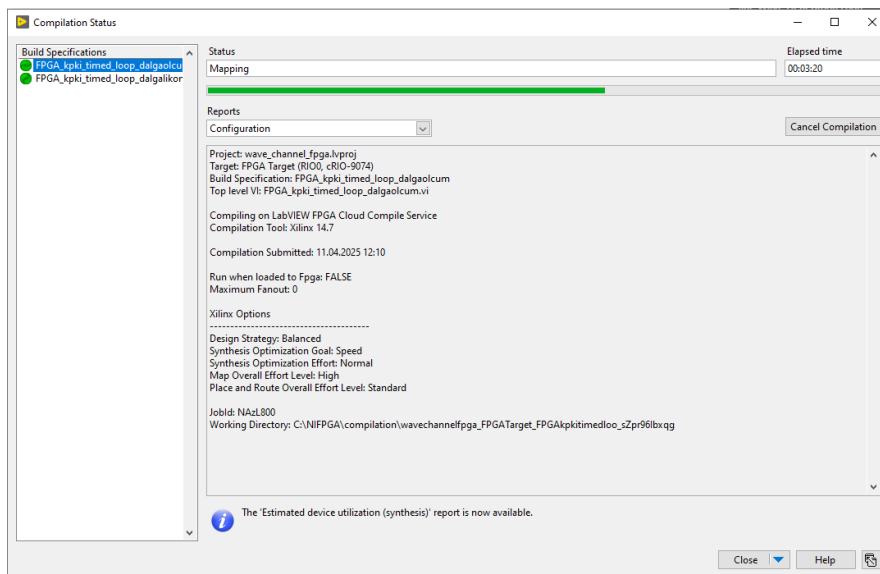
LabVIEW, FPGA projelerinde derleyici kullanımında yerel bilgisayar ile bulut tabanlı derleyiciler kullanılabilir. Bulut tabanlı derleyici kullanımı, geleneksel yerel derleme süreçlerine kıyasla derleme süresini azaltarak sistem geliştirme döngüsünü hızlandırmakta ve özellikle zaman kritik uygulamalarda verimliliği artırmaktadır. Bulut altyapısı, yüksek

işlem gücü ve paralel işlem yetenekleri sayesinde yerel donanımın sınırlamalarını aşmakta; bu da daha büyük ve karmaşık FPGA projelerinin sorunsuz biçimde derlenmesine olanak tanımaktadır. Tez kapsamında geliştirilen FPGA projesi için zaman anlamında bilgisayar ortamında gerçekleştirilen bir yazılım derleme süresi yaklaşık olarak 25 dakika üzerinde sürerken bulut tabanlı yapıya geçildiğinde yalnızca 10 dakika gibi bir sürede tamamlanmıştır. Şekil 4.6’de LabVIEW Bulut portalına erişim için kullanılan ekran görüntüsü verilmiştir.



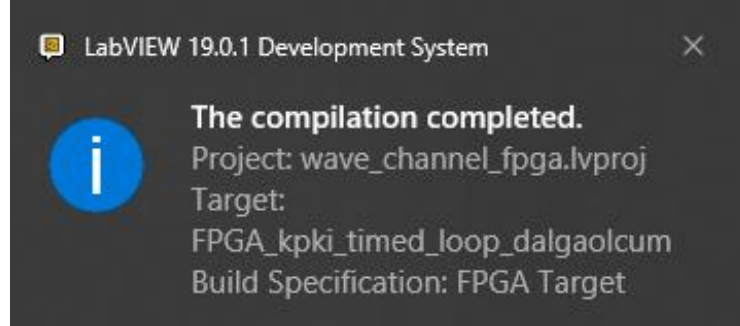
**Şekil 4.6:** FPGA tabanlı proje yapısı

Bilgisayar ortamında hazırlanan kodun FPGA yapısına aktarılması için bilgisayar ortamındaki derlemede tek bir program dosyasına izin verilmektedir. Ancak bulut ortamında gerçekleştirilen derleme işlemlerinde çoklu şekilde farklı FPGA programların paralel olarak derlenmesine olanak tanınmaktadır. Şekil 4.7’de aynı anda derleme gerçekleştirilen LabVIEW yazılım ekranları verilmiştir.



**Şekil 4.7:** FPGA dosya derleme aşaması-I

Bilgisayar ortamında hazırlanan kodun bulut platformunda derlenmesi sonrasında derlenen dosyaya ait bilgisayar ortamında üretilen bilgilendirme ekranı görüntüsü Şekil 4.8’de verilmiştir.



**Şekil 4.8:** FPGA dosya derleme aşaması-II

FPGA yapısında kullanılan “İlk Giren İlk Çıkar” (First in First Out – FIFO) aracılığı ile verilerin yazılması ve okunması birbirinden bağımsız hızlarda gerçekleştirilmiştir. FIFO dolu olduğunda yeni veri kabul edilmez ve veride taşma meydana gelir, FIFO boş olduğunda ise veri okunamaz ve alt akış sistemleri beklemeye alınır. LabVIEW FPGA tabanlı olarak FIFO yapıları, belirli bir veri tipi ve veri derinliği tanımlanarak oluşturulmuştur. Veri üretildiği anda FIFO'ya yazılır, ve ihtiyaç duyulduğunda FIFO'dan okunur. Ayrıca FIFO kullanımı, FPGA'dan RT Target veya ana bilgisayara (Host PC) veri aktarımı için de ideal bir yöntemdir.

Zamanlama ve verilerin sıralarının bozulmadan karşılıklı olarak aktarılması için RT Target ve FPGA bileşenleri arasındaki veri aktarımı, “doğrudan bellek erişimi (Direct Memory Access – DMA)” kullanılarak “ilk giren, ilk çıkar” (First In, First Out -FIFO) yapısı ve “okuma/yazma” (Read/Write) blokları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Burada her iki döngü arasında veri alışverişi için kullanılan FIFO yapılandırmasına ait temel veriler Tablo 4.1’de verilmiştir. İlk kullanılan FIFO FPGA’deki paralel yapılar arasında veri transferi için kullanılmıştır. “FIFO read” ve “FIFO write” komutlarından FPGA programında yararlanılmıştır.

**Tablo 4.1:** FPGA Yapısında Kullanılan FIFO Özellikleri

<b>ÖZELLİK</b>	<b>DEĞER</b>	<b>AÇIKLAMA</b>
<b>Ad</b>	WaveFIFO	İsimlendirme
<b>Tür</b>	Target- Scoped	Sadece FPGA içinde kullanılmıştır.
<b>Requested Number of Elements</b>	1023	Çoklu örnek depolamak için kullanılmıştır.
<b>Implementation</b>	Block Memory	Zaman açısından en verimli yöntem, FPGA kaynaklarını korumak için kullanıldı.
<b>Actual Number of Elements</b>	1029	Derleyici tarafından ayarlanan parameter.
<b>Control Logic</b>	Target Optimal	Derleyicinin uygun yapıyı seçmesine olanak vermektedir.

FPGA program yapısı döngüler arası veri transferinde kullanılan ilk FIFO için yapılandırma ayarları Tablo 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** FPGA Yapısında Kullanılan FIFO1 Yapılandırma Ayarları

<b>PARAMETRE</b>	<b>DEĞER</b>
Name	WaveFIFO
Type	Target-Scoped
Implementation	Look-Up Table
Data Type	FXP (Fixed-Point)
Encoding	Unsigned
Word length	12 bits
Integer word length	5 bits
Arbitration for Read	Arbitrate if Multiple Requestors Only
Arbitration for Write	Arbitrate if Multiple Requestors Only

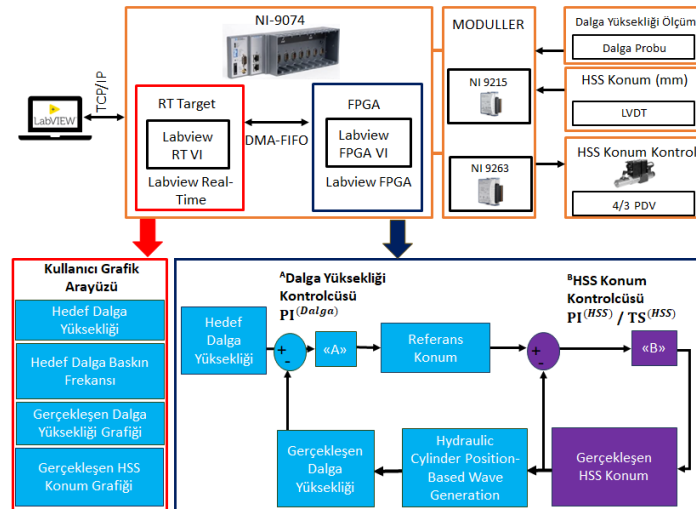
FPGA içerisinde kapalı çevrim dalga kontrolü yapısından verilerin yine CRIO-9074’de bulunan mikrodenetleyici tarafına aktarılmasında ikinci FIFO yapılandırması kullanılmıştır. Kullanılan bu yapılandırma “FIFO2” olarak adlandırılmış ve Tablo 4.3’de verilmiştir.

**Tablo 4.3: FPGA FIFO2 Yapılandırma Ayarları**

PARAMETRE	DEĞER
İsim	WaveData_PC
Tür	Target to Host - DMA
İstenen Eleman Sayısı	100000
Veri Tipi	FXP
İşaret	Unsigned
Kelime Uzunluğu	12 bit
Tamsayı Kelime Uzunluğu	5 bit
Delta	0.0078125

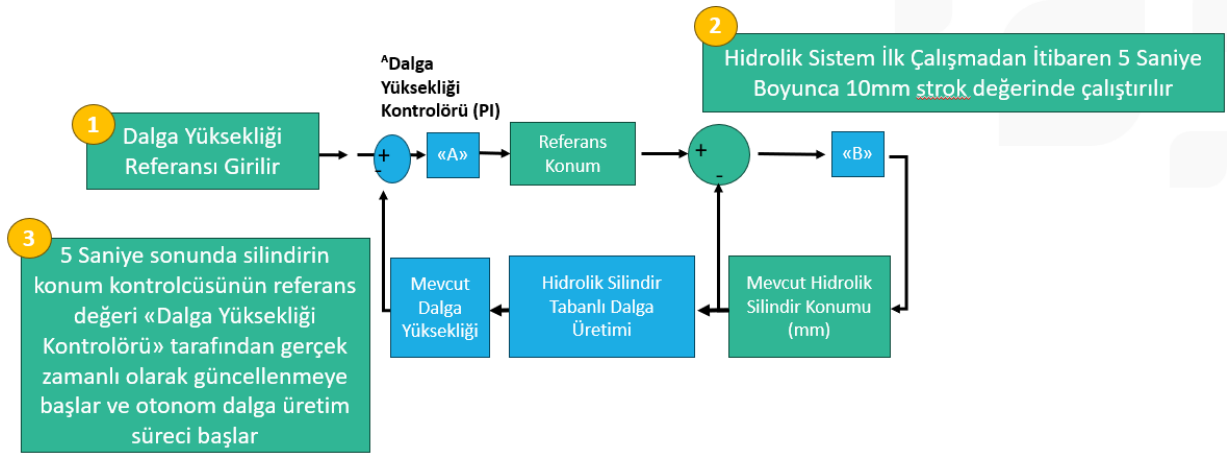
### 4.3 Dalga Kanalında Düzenli ve Düzensiz Dalga Üretim Yapısı

Dalga kanalı sisteminde, hidrolik aktüatör dinamikleri ile dalga yüksekliği dinamikleri farklı zaman ölçeklerine sahip olduğundan, kontrol yapısı iki katmanlı bir mimari olarak tasarlanmıştır. İç katman, HSS hızlı ve hassas konum kontrolünü sağlarken; dış katman, ölçülen dalga yüksekliğine bağlı olarak referans konum bilgisini güncelleyen daha yavaş bir denetim döngüsü olarak yapılandırılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan kontrol yapısının genel şeması Şekil 4.9’da sunulmuştur. Bilgisayar ile CRIO 9074 arasındaki haberleşme yapısında IP tabanlı olarak TCP/IP yapısı ile hedef dalga frekansı ve hedef dalga yüksekliği parametrelerin CRIO 9074 donanımına gönderilmesi ve aynı donanım üzerinden üretilen HSS konum kontrol verileri ile dalga yüksekliği ölçüm verilerinin görselleştirilmesi ve kayıt edilmesi işlemleri için kullanılmıştır. HSS’nin kontrol edilmesi kısmında ise CRIO 9074 ile bilgisayar sistemi arasında herhangi bir bağlantı bulunmamaktadır. Kontrol doğrudan CRIO 9074 içerisindeki FPGA kısmında gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 4.9: Dalga kanalı otonom düzenli dalga üretimi kontrolör yapısı**

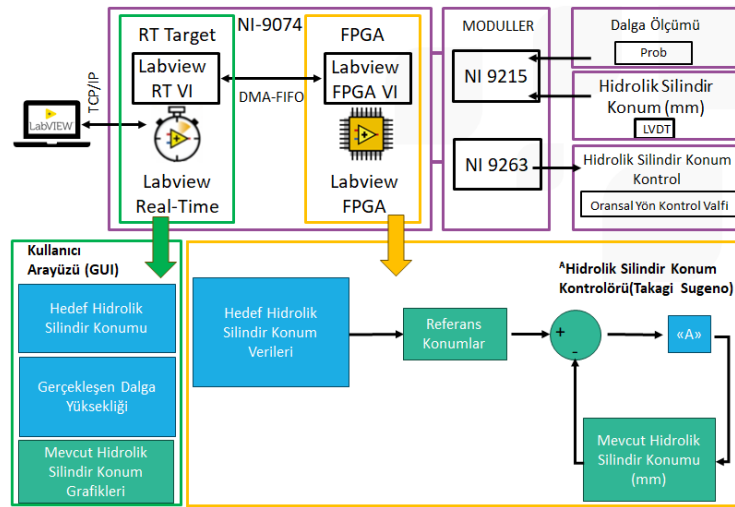
Otonom ve düzenli dalga üretimi için kullanılan kontrol yapısında Şekil 4.10’da verilen yapı incelendiğinde ilk olarak kullanıcıdan üretilmesi istenen dalga yüksekliği ve frekans parametreleri alınmaktadır. HSS’ye uygulanan kontrol sinyali frekansı ile üretilen dalgaların baskın frekansı aynı olduğu için frekans parametresi tarafında herhangi bir kontrol gerekmemektedir. Sonrasında ise otonom dalga üretiminden hemen önce HSS’nin konum kontrolcüsünün “konum” referansı 5 saniye olarak 10 mm verilmiştir. Devam eden aşamada ise bu süre sonunda aynı “konum” kontrolcüsünün referansı artık bir üst kontrolör olan “Dalga Yüksekliği Kontrolörü” tarafından güncellenmeye başlamaktadır. Burada kullanılan Dalga Yüksekliği Kontrolöründe PI kontrolcü bulunmaktadır ve kavram karmaşası olmaması açısından bu kontrolcü  $PI^{(Dalga)}$  olarak tanımlanmıştır. Dolayısı ile otonom dalga üretimi için aktif olarak çalışan bir sistem üretilen dalga yüksekliğini ölçümleyerek  $PI^{(Dalga)}$  üst seviye kontrolcüsü HSS’nin konum kontrolcüsünün referansını güncellemektedir. Hemen sonrasında ise HSS’nin konum kontrolcüsü bu referans kontrolcüden gelen değere göre HSS’nin konum kontrolünü gerçekleştirerek otonom şekilde düzenli dalga üretimini sağlamaktadır.



**Şekil 4.10:** Dalga kanalı otonom düzenli dalga üretimi kontrolör yapısı

Düzensiz dalga üretimi bölümünde ise düzensiz formda dalga üretiminde JONSWAP spektrumundan türetilen çok bileşenli rastgele dalga sinyalinin, hidrolik sistemin frekans bağımlı aktarım karakteristiği dikkate alınarak HSS’nin konum referansına dönüştürülmesi gerekmektedir. Düzensiz dalga üretiminde kullanılan kontrol yapısı Şekil 4.11’de verilmiştir. Düzenli dalga üretiminden farklı olarak bu çalışma yapısında çift katmanlı bir kontrol yapısı bulunmamaktadır yalnızca kullanıcıdan alınan HSS konum verilerine bağlı olarak HSS’nin konum kontrolü gerçekleştirilmektedir. Ve bu durumun sonucunda oluşun

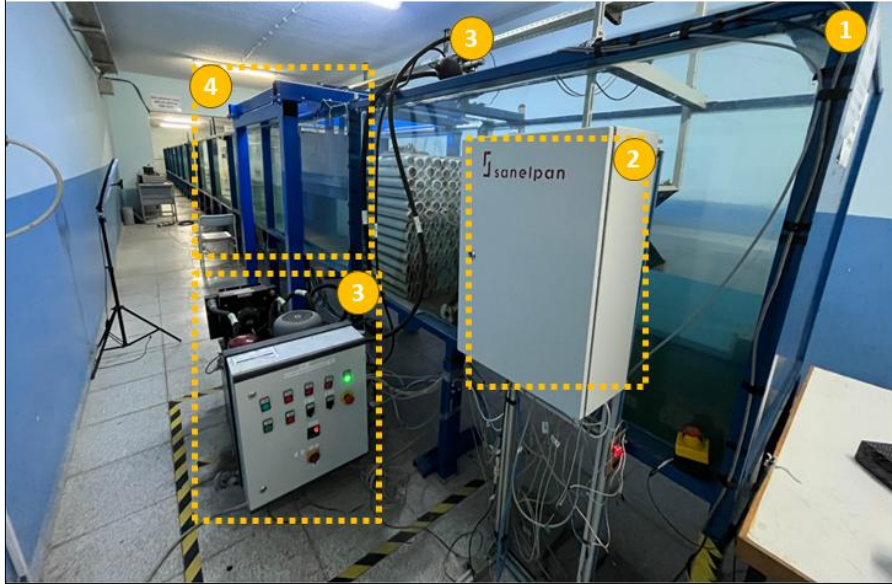
su dalgaları doğrudan kullanıcı bilgisayarında grafiksel olarak görüntülenerek kayıt altına alınabilmektedir.



Şekil 4.11: Dalga kanalı düzensiz dalga üretimi kontrolör yapısı

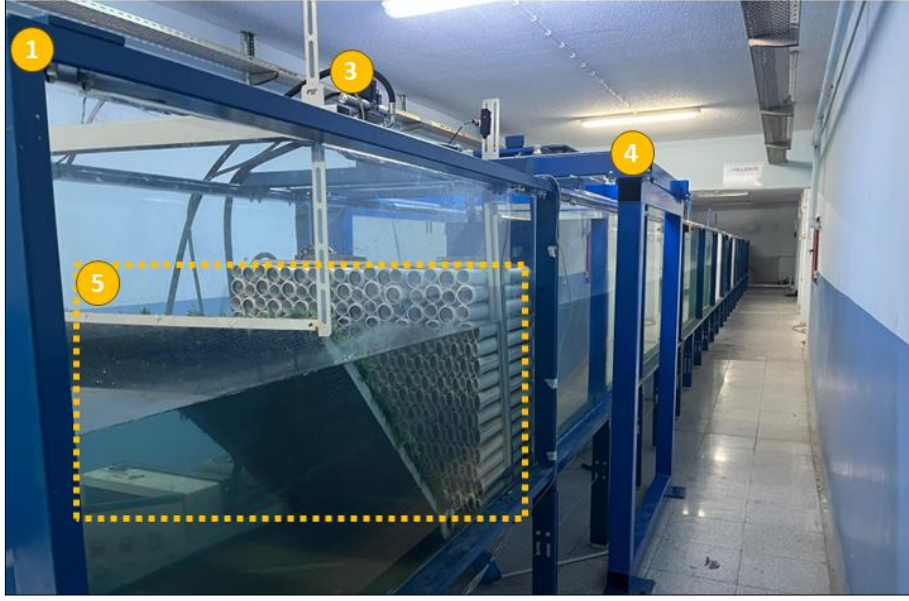
#### 4.4 Dalga Kanalı Yapısı

Laboratuvar tipi dalga kanalı, 24 metre uzunluğa, 1 metre genişliğe ve 1 metre yüksekliğe sahip olup, tek doğrultulu dalga üretim deneylerinin gerçekleştirilmesine olanak tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Kanalın iç yüzeyleri su geçirmez kaplama ile izole edilmiş ve dalga üretiminin sağlıklı bir biçimde iletilmesi amacıyla taban ve yan duvarlar rijit yapıda inşa edilmiştir. Dalga kanalının bir ucu, dalga üretici sistemin yerleştirilmesi için mekanik ve hidrolik sistemlerle uyumlu özel bir montaj platformu ile donatılmıştır. Kanalın diğer ucu ise geri yansımaları minimuma indirmek ve düzenli dalga yayılımını sağlamak amacıyla kıyı tipi pasif sönümleyici yapı ile sonlandırılmıştır. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de dalga kanalına ait görseller verilmiştir.



**Şekil 4.12:** Laboratuvar tip dalga kanalı-I

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de gösterilen yapı, laboratuvar tipi dalga kanalının temel fiziksel bileşenlerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Dalga kanalının ana taşıyıcı iskeleti (1) numara ile ifade edilmekte olup, tüm sistemin mekanik stabilitesini ve yapısal bütünlüğünü sağlamaktadır. (2) numara, kanalın kontrol altyapısını oluşturan elektronik pano sistemini göstermekte olup, bu pano üzerinden dalga üretimi, veri toplama ve sistem izleme işlemleri gerçekleştirilmekte, aynı zamanda gerçek zamanlı kontrol algoritmaları bu merkez üzerinden yürütülmektedir. (3) numara, hidrolik sistemin tüm temel bileşenlerinin yer aldığı ve hidrolik enerji aktarımının sağlandığı hidrolik güç ünitesi panosunu temsil etmektedir. Dalga üretiminin gerçekleştirildiği yapı (4) numara ile gösterilmiş olup, sistemin aktif hareket üreten mekanizması olarak işlev görmektedir. Son olarak, (5) numara ile işaretlenen bölgede, dalga üretici mekanizmanın arka kısmında yer alan pasif sönümleyici yapı bulunmaktadır. Bu pasif sönümleyici yapının temel amacı, PTWM’nin ileri-geri hareketi sırasında oluşabilecek geri yansıyan dalgaların sistem içerisine yayılmasını engellemektir. Bu tür yansıyan dalgalar, kanal içerisinde istenmeyen girişim desenleri oluşturarak hem dalga formunun bozulmasına hem de kontrol algoritmalarının hata üretmesine neden olabilmektedir. Pasif sönümleyici yapı, bu etkileri azaltarak hem dalga üretiminin sürekliliğini hem de üretilen dalga formunun saflığını korumakta; dolayısıyla sistemin deneysel doğruluğunu ve kararlılığını artırmaktadır. Ayrıca bu yapı, hidrolik sistemin dinamik davranışına müdahale etmeden arka bölgedeki dalga enerjisinin kontrollü bir şekilde sönümlenmesini sağlamaktadır.



**Şekil 4.13:** Laboratuvar tip dalga kanalı-II

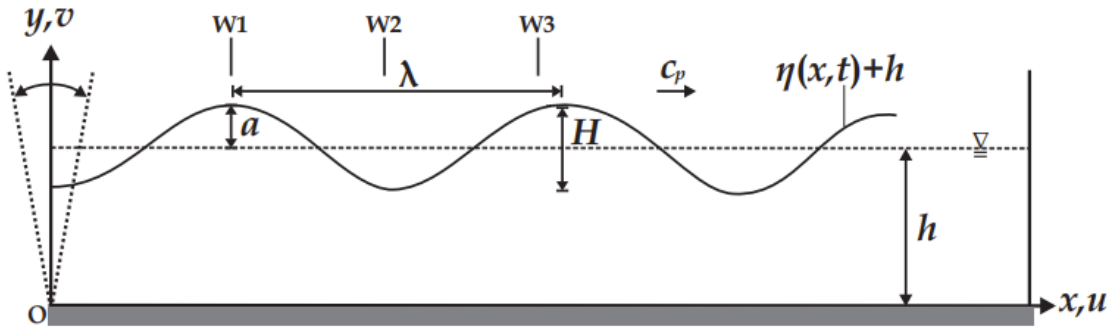
#### 4.4.1 Flap tür dalga üreticili sistem

Tez çalışmasının başlangıç aşamasında, dalga üretimi için flap türü bir dalga üretici sistem kullanılmıştır (Demircan, Bıçakçı, and Akyüz, 2025). Bu sistem, kanal tabanına sabitlenmiş bir eksen etrafında dönen bir flap yapısı aracılığıyla dalga oluşturmakta ve literatürde yaygın biçimde uygulanan kontrollü laboratuvar deneyleri için uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Ancak gerçekleştirilen ilk deneysel uygulamalar sırasında flap tür dalga üretici sistemin ani strok değişimlerindeki rijit yapısı nedeniyle hem su dalga yapısını bozduğu hem de dalga kanalı tabanına titreşim yükü oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca flap yapısının menteşeli kısmının sürekli su içinde bulunuyor olmasının da yorulma çatlaklarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.14’de flap tür dalga üretici yapısı verilmiştir.



**Şekil 4.14:** Flap tür dalga üretici yapısı

Temel bir flap türü dalga üreticili sistemin prensip şeması Şekil 4.16'da sunulmuştur. Bu sistemde dalga üretici, flap tipi bir paletten oluşmakta olup, bu palet dalga kanalının tabanına menteşeli olarak sabitlenmiştir. Dalga üretici,  $x = 0$  konumunda konumlandırılmıştır ve açısal salınım yaparak su kütlelerine enerji aktarımı sağlamaktadır. Dalga, flap paletin zamana bağlı olarak dönmesiyle oluşturulmakta ve  $x$  eksenini boyunca, yani flap düzlemine dik yönde yayılmaktadır. Dalga yayılımı sırasında oluşan yüzey seviyesi değişimi,  $\eta(x, t)$  ile ifade edilmekte olup hem zaman hem de konumsal olarak değişmektedir. Sistemdeki sabit su derinliği  $h$ , dalga yüksekliği  $H$  ve dalga genliği  $a$  olarak tanımlanmaktadır; dalga boyu ise  $\lambda$  ile gösterilmektedir. Oluşan dalganın yayılım hızı, faz hızı  $c_p$  ile ifade edilirken, su partiküllerinin yatay ve düşey hız bileşenleri sırasıyla  $u$  ve  $v$  olarak modellenmektedir. Dalga yüzeyindeki değişimlerin ölçülmesi için tank boyunca belirli mesafelere yerleştirilen sensör noktaları  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  şeklinde konumlandırılmıştır. Bu yapı, özellikle sayısal modelleme ve deneysel doğrulama süreçlerinde, dalga üretimi ile yayılımı arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için ideal bir sistem sunmaktadır (Prayogo and Wiryanto, 2013).

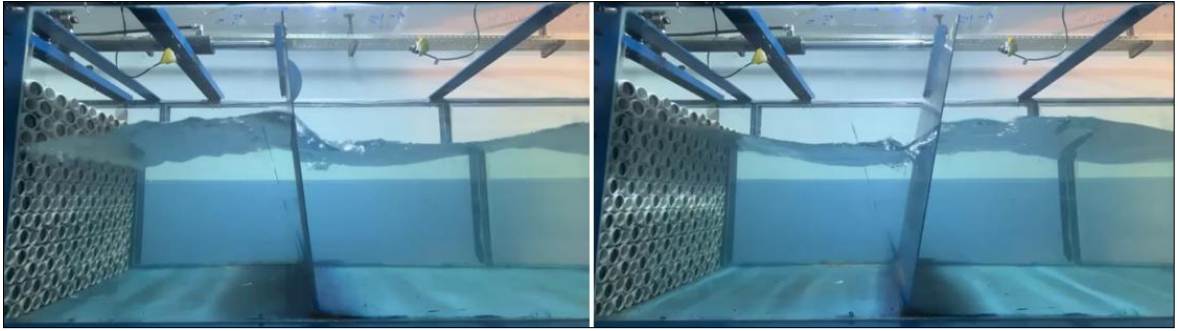


**Şekil 4.15:** Flap tür dalga üreticisi ile dalga üretimi şematik yapısı (Prayogo and Wiryanto, 2013)

Özellikle bu sistemin çalışması esnasında flap mekanizmasının oluşturduğu periyodik titreşimler, dalga kanalının gövdesine sürekli olarak mekanik etki uygulamakta ve yapısal rezonans kaynaklı sorunlara neden olmaktadır. Uzun süreli çalışmalarda, kanalın cam bölümleri ile gövde arasında sızdırmazlık sağlayan silikon bağlantılarda gevşemeler meydana gelmiş ve su sızıntısı problemleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, flap sisteminin sınırlı hareket alanı ve moment tabanlı çalışması nedeniyle yüksek genlikli ve düşük frekanslı düzenli dalgaların hassas biçimde üretilmesinde mekanik zorlanmalar yaşanmıştır. Sistem, zamanla sıkışma, sürtünme ve mekanik arızalara açık hale gelmiştir. Bu teknik ve yapısal nedenlerden ötürü, sistemin sürekliliğini ve deneysel güvenilirliğini sağlamak amacıyla flap

tür dalga üretici sistem devre dışı bırakılarak, yerine PTWM sistem entegre edilmiştir. Piston tipi sistemin seçilmesinde flap türe göre daha düşük stroklarda daha yüksek dalga yüksekliği üretimi, doğrusal hareket kabiliyeti ve kanal duvarlarına minimum mekanik titreşim aktarımı gibi faktörler etkili olmuştur. Böylelikle kanal yapısında gözlenen sızıntı problemleri ve yapısal titreşimler ortadan kaldırılmış, daha kararlı bir deneysel ortam gerçekleştirilmiştir.

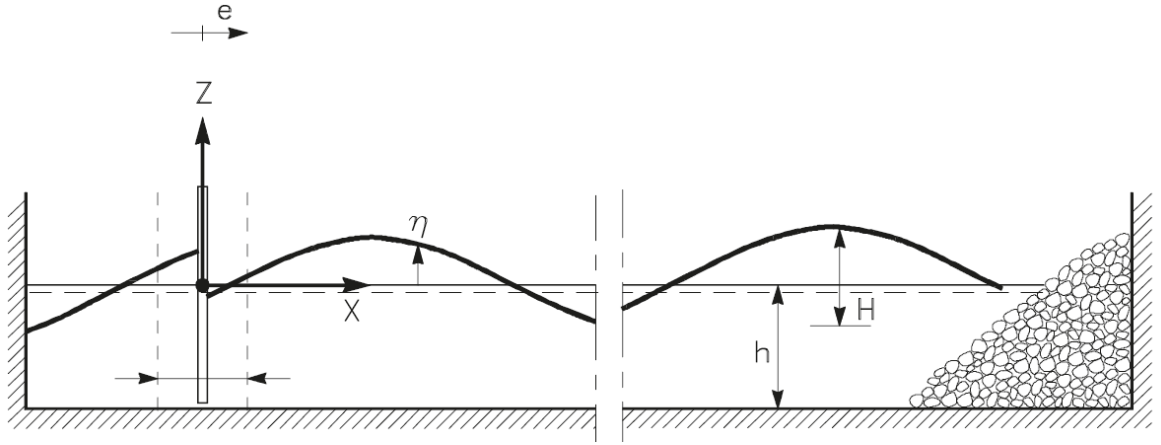
Şekil 4.15'de dalga kanalında bulunan flap tür dalga üreticili sistem ile dalga üretiminin gerçekleştirilmesine ait görsel verilmiştir. Bu sistemde, flap'ın dinlenme konumu olarak belirlenen dik pozisyon dalga kanalı zemini ile 90°'lik açıdan hareketle çalışmaktadır. Dalga üretimi sırasında, flap yapısına bağlanan HSS 0 ile 700 mm strok aralığında ileri ve geri yönlü hareket etmektedir. Bu hareketin su kütlesi üzerinde oluşturduğu momentle birlikte, kanal içinde istenilen dalga formları oluşturulmaktadır. Sistemin bu yapısı, özellikle derin su koşullarına uygun yüksek frekanslı dalgaların üretilmesi açısından kullanılabilirlik sağlamaktadır.



Şekil 4.16: Flap tür dalga üreticili sistemde dalga üretimi

#### 4.4.2 Piston tür dalga üreticili sistem

Dalga kanalında nihai biçimde dalga üretim yapısı olarak PTWM kullanılmıştır. Bu sistemlerde, dalga üretimi suyun tamamını yatay doğrultuda iten bir piston panelinin, zamana bağlı olarak ileri-geri hareket ettirilmesi ile sağlanmaktadır. PTWM yapısında dalgaların laboratuvar ortamında nasıl üretildiğini anlamak da oldukça kritiktir. Bu bağlamda, PTWM'ye ait temel şema Şekil 4.20'de verilmiştir (Lykke, 2010).

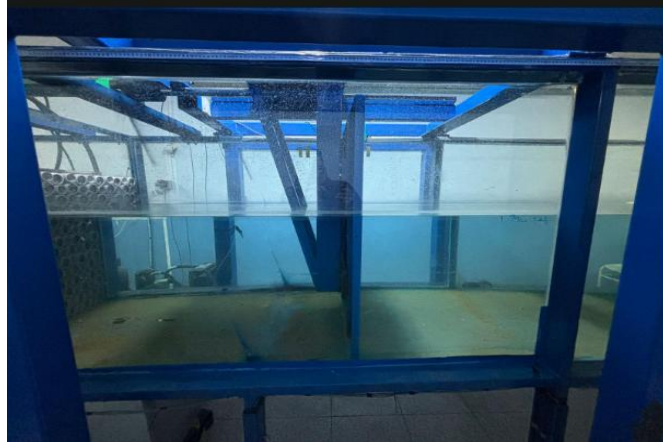


**Şekil 4.17:** PTWM ile dalga üretimi şematik yapı (Lykke, 2010)

PTWM'nin hareketi,  $e(z, t)$  ile gösterilmektedir ve bu ifade dalga paletinin hem zamana hem de derinliğe bağlı yer değiştirmesini tanımlar. Dalga yüzey profili ise  $\eta(x, t)$  ile ifade edilmekte olup, zaman ve yatay konuma göre değişen yüzey dalga yüksekliğini gösterir. Dalga yüksekliği, kanalın ilerleyen bölümlerinde sabit bir formda ilerlediği varsayımı altında  $H$  ile tanımlanır. Kanal tabanından serbest yüzeye kadar olan mesafe sabit su derinliği  $h$  olarak gösterilmiştir. Dalga üreticinin salınımı, literatürde yaygın olarak kullanılan bir harmonik fonksiyonla ifade edilmektedir, bu harmonik fonksiyon Denklem 4.1'de verilmiştir (Lykke, 2010):

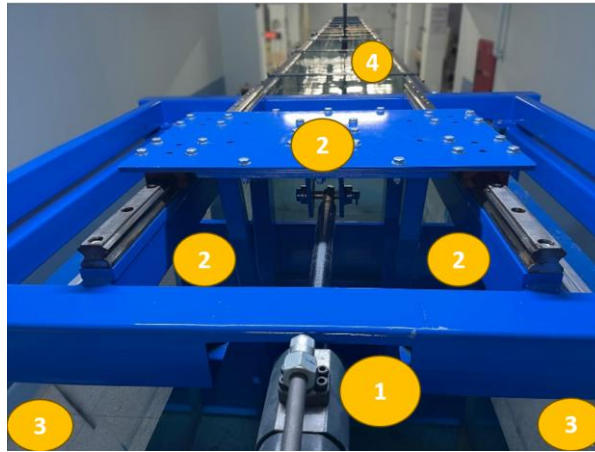
$$e(z, t) = \frac{S(z)}{2} \cdot \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de verilen  $S(z)$ , dalga paletinin strokunu (hareket genliği) ve  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  ise açısal frekans ve " $T$ " ise dalga periyodudur. Dalga kanalında kullanılan PTWM, dalga kanalı içerisine herhangi bir fiziksel yük ve titreşim oluşturmaması için kanal dışına kurulan taşıyıcı iskelet yapısı üzerinden doğrusal kızak sistemi ile tek eksenle hareket ettirilmiştir. Şekil 4.17'de tez çalışmasında kullanılan PTWM verilmiştir.



**Şekil 4.18:** PTWM yapısı-I

Şekil 4.18’de PTWM’nin üstten görünümü sunulmuştur. Görselde, (1) numara ile gösterilen bileşen HSS’yi, (2) numara PTWM’yi, (3) numara kanalın duvarını ve (4) numara ise su yüzeyini temsil etmektedir.



**Şekil 4.19:** PTWM yapısı-II

Şekil 4.19’de ise dalga kanalında yer alan PTWM’nin farklı zaman anlarındaki ileri (sol) ve geri (sağ) yöndeki hareketine bağlı olarak oluşturulan dalga formları görsel olarak sunulmuştur. Görseldeki sol panelde, piston plakasının suya doğru ileri yönde hareket etmesiyle birlikte suyun itilerek yükseldiği ve pozitif bir dalga formunun oluşturulduğu gözlemlenmektedir. Sağ panelde ise pistonun geri yönde hareket etmesiyle birlikte oluşan negatif basınç etkisiyle dalga çukurunun oluştuğu ve su kütesinin geri çekildiği görülmektedir. Bu deneysel görüntüler, piston hareketinin su yüzeyinde oluşturduğu dalga etkisinin doğrudan gözlemlenmesine olanak tanımakta; aynı zamanda sistemin dinamik cevabının değerlendirilmesi açısından önemli bir görsel veri sunmaktadır. Dalga üretiminin

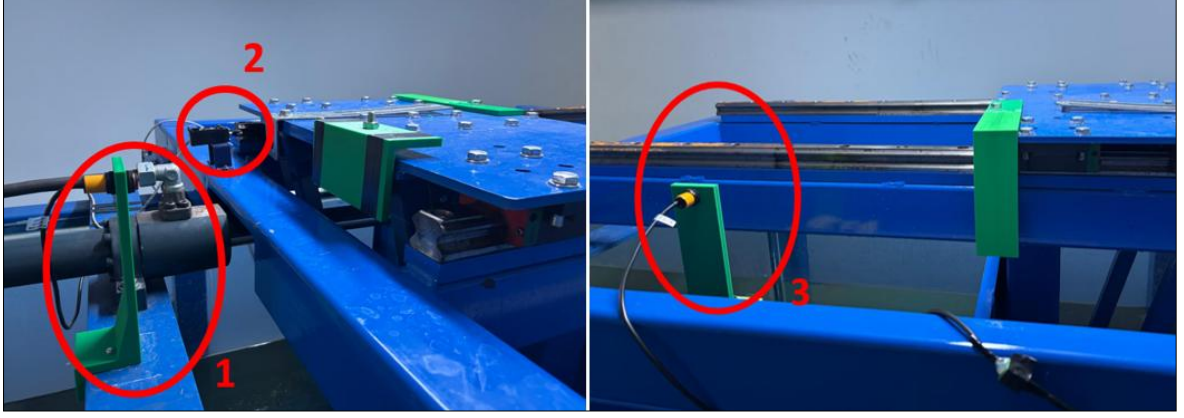
bu şekilde iki yönlü olarak gerçekleştirilmesi, düzenli dalga formasyonunun hassas şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır.



**Şekil 4.20:** Dalga kanalında PTWM ile dalga üretimi

Tez çalışması kapsamında kullanılan PTWM, fiziksel olarak HSS'nin üretim sınırları doğrultusunda 0–700 mm strok aralığında hareket edebilecek kapasiteye sahiptir. Ancak deneysel çalışmalar sırasında sistemin mekanik aksamını korumak ve olası aşırı hareket durumlarını önlemek amacıyla, dalga üreticinin çalışma aralığı yazılımsal ve donanımsal olarak sınırlandırılmıştır. Bu kapsamda, HSS'nin dinlenme pozisyonu 500 mm olarak belirlenmiş ve sistemin maksimum strok genliği  $\pm 150$  mm ile sınırlandırılmıştır. Böylece kullanıcı, dalga üretici sistemin hareketini 350 mm ile 650 mm konumları arasında gerçekleştirebilmektedir. Belirlenen bu limit değerlerinin fiziksel olarak algılanabilmesi amacıyla, ileri ve geri yön uç noktalarına kızılötesi çalışma prensibine dayanan sınır sensörleri yerleştirilmiş ve bu sensörlerin montajı için özel tasarlanmış bağlantı parçaları 3B yazıcı teknolojisi ile üretilmiştir. Bu sensörler sayesinde, dalga üreticinin izin verilen hareket aralığı dışına çıkması durumunda sistemin anlık olarak durdurulması sağlanmaktadır. Sisteme ek bir güvenlik katmanı olarak, Delta 28SV2 serisi bir PLC yapısı kullanılmış ve sınır sensörlerinden alınan bilgiler, sistemin genel kontrol yapısından bağımsız olarak acil durdurma kontakları üzerinden işlenmiştir. Bu yapı sayesinde, olası kontrol yazılımı hatalarında dahi sistemin güvenli bir şekilde durdurulması garanti altına alınmıştır. Bu fiziksel ve yazılımsal güvenlik önlemleri, PTWM sistemin deneysel testler sırasında güvenilir şekilde çalışmasını sağlamıştır. Limitleme sistemine ait fiziksel yapı Şekil 4.21'de sunulmuş durumdadır. Burada (1) numaralı kısımda PTWM'nin negatif maksimum aşım noktası için temassız tip sensör, (2) numaralı kısımda aynı işlev için temaslı tip sensör ve (3)

numaralı kısımda dalga üreticinin pozitif maksimum aşım noktası için temassız tip sensör kullanılmıştır.



Şekil 4.21: PTWM fiziksel limitleme yapısı

#### 4.4.3 Kıyı tip dalga sönümleyici yapısı

Şekil 4.22’de, laboratuvar tipi dalga kanalının son bölümünde yer alan kıyı tipi sönümleyici yapının yandan görünüşü verilmiştir. Bu yapı, kanal içerisinde oluşturulan dalga enerjisinin yansıma oluşturmadan sönümlenmesini sağlamak üzere tasarlanmış ve fiziksel olarak kanal tabanına yerleştirilmiştir.



Şekil 4.22: Kıyı tip dalga sönümleyici yapısı

Sönümleyici yapı, yaklaşık olarak 2750 mm uzunluğa ve 800 mm yüksekliğe sahiptir. Dalga geliş yönüne bakan yüzey, 16° eğime sahiptir ve bu eğimli yüzey farklı boyutlarda poröz taş dolgu malzeme kullanılarak oluşturulmuştur. Söz konusu sönümleyici yapı, gelen dalgaların enerjisini yüzeye çarptığında kırarak, malzeme içindeki boşluklarda viskoz ve türbülans

etkisiyle yayılmasını ve sönümlenmesini sağlamaktadır. Bu sönümleyici yapıda eğimin düşük tutulması ile hem enerjinin daha geniş bir yüzeye yayılması sağlanmış hem de dalga kırılması kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece hem düzenli hem de düzensiz dalgaların fiziksel sönümlenmesi başarıyla sağlanmış, kanal içerisinde yansımatsız bir test ortamı oluşturulmuştur. Bu yapılandırma, özellikle PTWM ile oluşturulan dalgaların performans analizinde ve dalga yayılım davranışının deneysel olarak değerlendirilmesinde güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

#### 4.5 Dalga Ölçüm Sistemi

Dalga kanalında dalga ölçüm sistemi olarak HR Wallingford marka su seviye ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazı aynı anda bağımsız olarak 8 farklı kanaldan ölçüm alınmasını sağlamaktadır. Ayrıca sensörlerden alınan veriler için ölçüm cihazı +10/-10V gerilim aralığında çıkış vermektedir. Şekil 4.23’de dalga ölçümü için kullanılan sistemin prensip şeması verilmiştir.



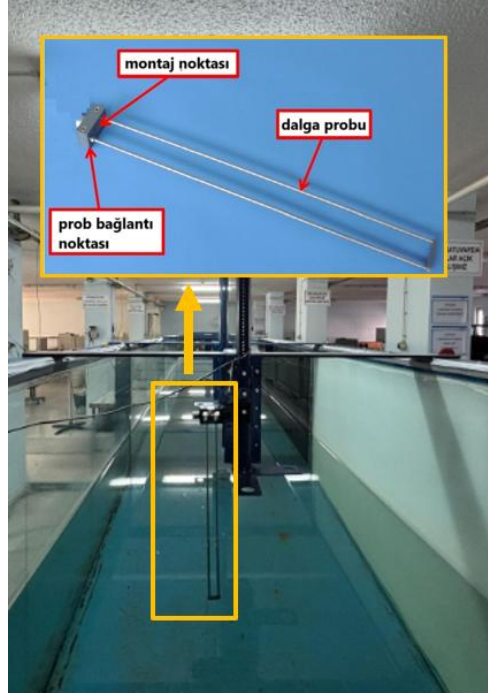
Şekil 4.23: Dalga kanalı su seviye ölçüm şeması

Şekil 4.24’de ise dalga ölçümünde kullanılan ana elektronik dönüştürücü modülleri verilmiştir. Bu ölçüm modülleri üzerinde değişken aralıklarda ölçüm alınabilmesi için ayar yapıları bulunmaktadır.



Şekil 4.24: Wallingford su seviye ölçüm sistemi

Ölçüm yapısının son kısmında ise prob sensörler bulunmaktadır. Prob sensörlerin örnekleme hızı 10kHz seçilmiştir. Prob sensörleri ölçüm alınacak olan seviyeye göre değişken aralıklarda üretilmektedir. Tez kapsamında kullanılan prob sensörler 55 cm uzunluğunda olup Şekil 4.25’de ölçüm probu görüntüsü ve dalga kanalındaki kullanım yapısı verilmiştir.



**Şekil 4.25:** Dalga kanalında bulunan ölçüm probu

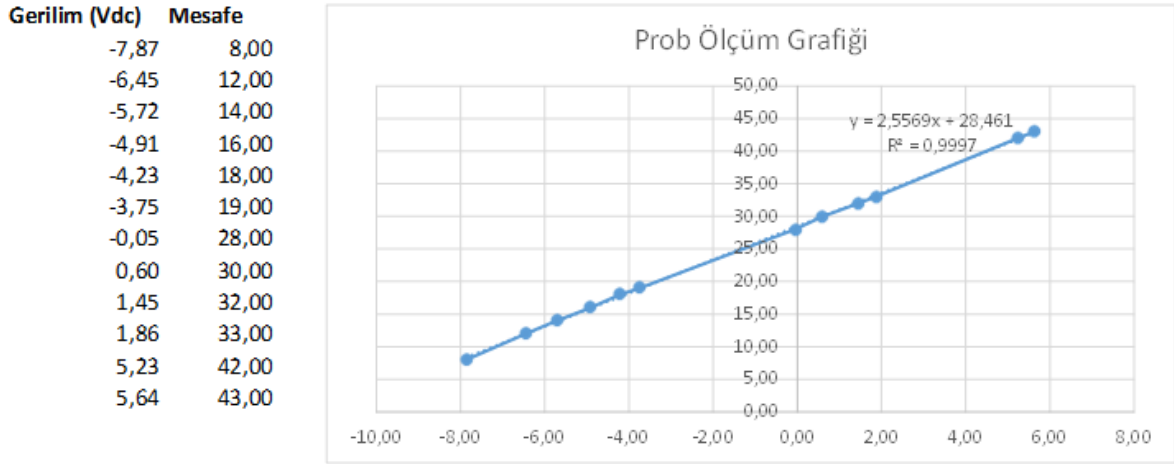
Prob sensörün dalga üreticiye olan mesafesinin doğru bir şekilde ayarlanması için kanal uzunluğu boyunca dalga kanalı üzerine fiziksel ölçüm cetvelleri eklenmiştir. Prob sensörler ile ölçülen su yüksekliğinin doğrulanması ve dalga yapısının analizi için dalga kanalına Şekil 4.26’da görüldüğü şekilde su seviyesi ölçüm cetveli eklenmiştir.



**Şekil 4.26:** Dalga ölçümü için fiziksel doğrulama yapısı

Problardan ölçülen gerilim sinyalinin mesafe bilgisine dönüştürülmesi için Denklem 4.2’de verilen eşitlik kullanılmıştır. Şekil 4.27’de sensör kalibrasyonu için alınan ölçümler ve mesafe dönüşüm formülü yer almaktadır.

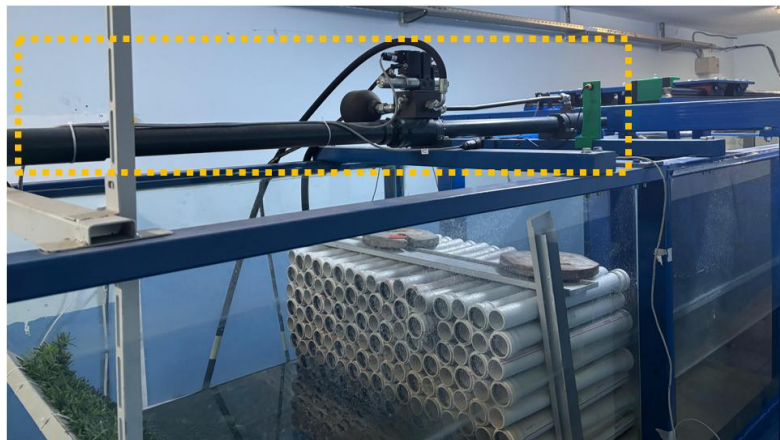
$$Su\ yükseklği\ (hs) = (2.5569 * Ölcülen\ gerilim\ (Vs)) + 28.461) \quad (4.2)$$



Şekil 4.27: Prob kalibrasyon ölçümleri

#### 4.6 Dalga Kanalı Hidrolik Sistem Yapısı

PTWM’nin konum kontrolü için kullanılan çift etkili ve çift milli yapıdaki HSS Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28: Çift etkili ve çift milli HSS

PTWM'nin konum kontrolünün gerçekleştirilmesi ve buna bağılı olarak dalga üretiminin sağlanabilmesi amacıyla, hidrolik sistem akışkanını depolayan ve hidrolik hatlar boyunca hidrolik sıvının basınçlandırılmasını temin eden hidrolik güç ünitesinin yapısı Şekil 4.29'da sunulmuştur.



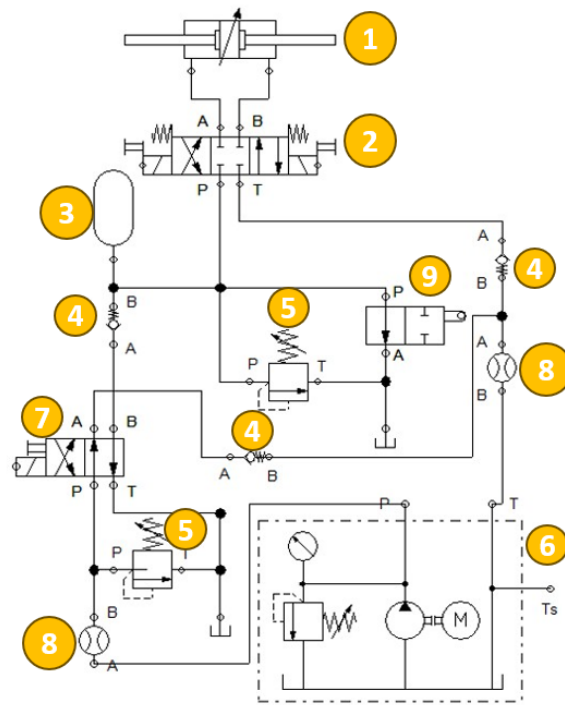
**Şekil 4.29:** Hidrolik güç ünitesi

PTWM'nin çalışmasını sağlayan hidrolik altyapıyı tüm bileşenleriyle gösteren hidrolik şema Şekil 4.30'da verilmiştir. Verilen şekilde (1) numara ile gösterilen çift etkili HSS, ileri ve geri yönde doğrusal hareket üretme kapasitesine sahiptir. Bu çift yönlü hareket, (2) numaralı konumda yer alan yay merkezlemeli ve kapalı merkez yapısına sahip 4/3 yön kontrol valfi aracılığıyla kontrol edilmektedir. Valfin nötr konumunda tüm portların kapalı olması, sistemdeki akışı durdurarak HSS'nin mevcut konumunun güvenli bir şekilde korunmasına imkân tanımaktadır. Hidrolik sistem devresinde, ani debi dalgalanmalarını dengelemek ve geçici yüksek akış taleplerini karşılamak amacıyla (3) numaralı noktada gaz basınçlı bir akümülatör entegre edilmiştir. Bu akümülatörün yalnızca gerektiğinde sisteme dâhil edilmesini sağlamak ve ters akışları engellemek üzere, (4) numaralı konumlarda tek yönlü çalışan çek valfler kullanılmıştır. Bu yapı, sistemin hidrolik stabilitesini artırmakta ve kontrol performansına olumlu katkı sağlamaktadır.

Olası aşırı basınç durumlarına karşı sistemi korumak amacıyla, (5) numaralı konumlarda basınç tahliye valfleri yerleştirilmiştir. Bu valfler, sistem basıncının önceden belirlenmiş güvenli sınırların üzerine çıkması durumunda fazla hidrolik akışkanı yağ tankına yönlendirerek hem bireysel bileşenlerin hem de tüm sistemin güvenliğini sağlamaktadır. Hidrolik sistemin enerji gereksinimi, (6) numaralı konumda yer alan hidrolik güç ünitesi tarafından karşılanmaktadır. Bu ünite, bir elektrik motoru, sabit deplasmanlı hidrolik pompa,

yağ rezervuarı, basınç göstergesi ve "Ts" sembolü ile gösterilen yağ sıcaklık sensörü olmak üzere bir dizi temel alt bileşenden oluşmaktadır.

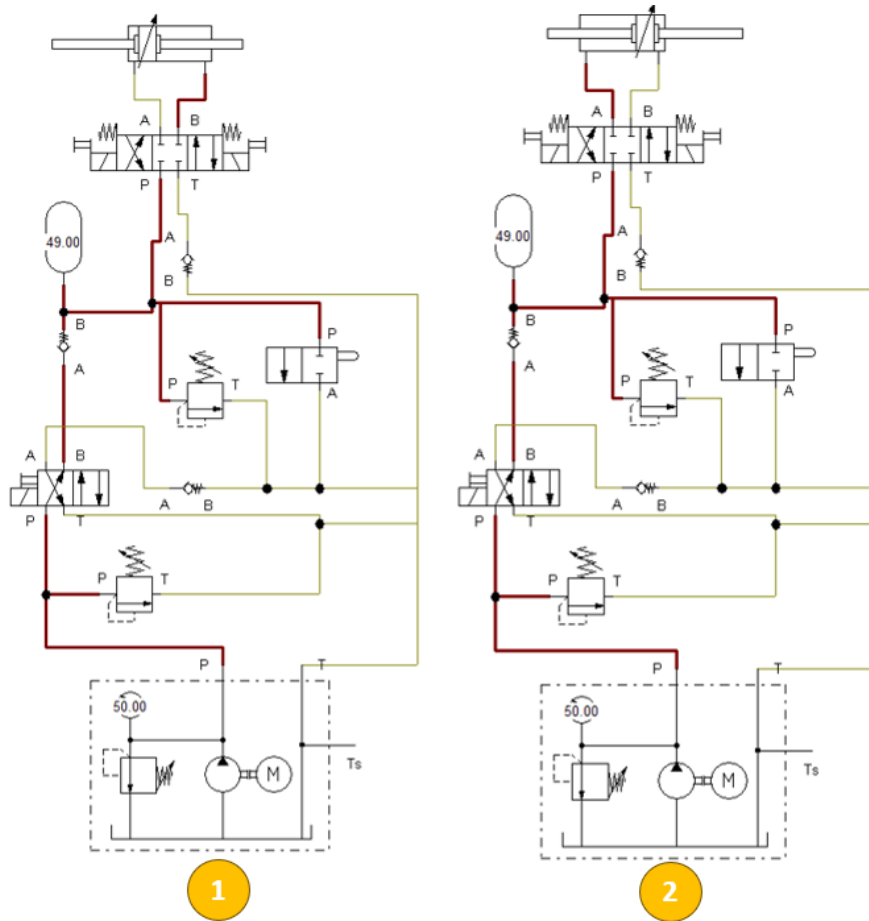
Hidrolik sistemin kontrol edilebilirliğini artırmak ve güvenli işletimi desteklemek amacıyla, (7) numaralı konumda bulunan 4/3 yön kontrol valfi, akümülatörün sistem dışına alınmasını sağlayan bir izolasyon mekanizması olarak işlev görmektedir. Bu sayede akümülatör yalnızca ihtiyaç duyulduğunda devreye alınmakta, sistemin diğer zamanlarda daha stabil çalışması mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, (8) numaralı konumda yerleştirilen debimetreler, sistemde dolaşan hidrolik sıvının anlık debisini ve kullanım miktarını izlemekte, böylece gerçek zamanlı performans takibi yapılmasına olanak tanımaktadır. Son olarak, (9) numara ile gösterilen solenoid kontrollü yön kontrol valfi, elektriksel sinyallerle tetiklenerek hidrolik akış yollarını uzaktan ve otomatik olarak değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu valf, akümülatör gibi devre elemanlarının sisteme gerektiğinde seçici ve güvenli biçimde entegre edilmesini mümkün kılmakta, böylece sistemin otomasyon düzeyini artırmaktadır.



**Şekil 4.30:** Hidrolik sistem şeması

Şekil 4.31’de, PTWM’nin hidrolik kontrolüne ilişkin devre yapısı iki farklı çalışma durumu için detaylı olarak sunulmuştur. Burada (1) numaralı diyagram, HSS’nin ileri yönde hareket

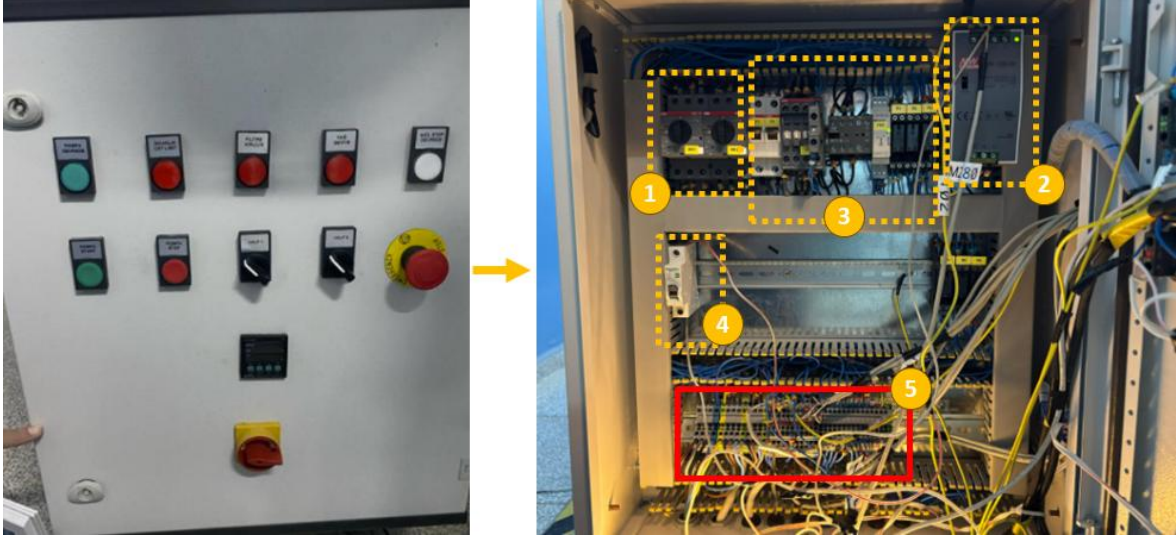
ettiği durumu; (2) numaralı diyagram ise HSS'nin geri yönde çalıştığı durumu temsil etmektedir. Çift etkili hidrolik HSS'nin, sistemin doğrusal mekanik hareketini üretmekte olup, bu hareket yay merkezlemeli kapalı merkez yapıdaki 4/3 yön kontrol valfi ile yönlendirilmektedir. Valfin yönü değiştirildiğinde, HSS'nin A ve B portlarına bağlı basınçlı akışkan hattı değiştirilerek ileri veya geri yönde hareket sağlanmaktadır. Şekil 4.31'de (1) numaralı diyagramda, valf konumu itibarıyla basınç hattından gelen akışkan A portuna yönlendirilmekte, böylece piston sağa doğru (ileri yön) hareket ettirilmektedir. Aynı anda B portundan çıkan akışkan, dönüş hattı üzerinden tanka yönlendirilmektedir. (2) numaralı diyagramda ise valf ters konumda çalışmakta; bu kez B portuna yönlendirilen basınçlı akışkan, pistonun sola doğru (geri yön) hareketini sağlamaktadır. Bu durumda A portundan çıkan sıvı, yine düşük basınçlı dönüş hattı üzerinden tanka boşaltılmaktadır.



**Şekil 4.31:** HSS'nin ileri yön ve geri yön çalışma yapısı

Hidrolik sistemin elektrik enerjisinin sağlanması ve kontrolünün gerçekleştirilmesi için kullanılan hidrolik sistemin elektrik panosu Şekil 4.32'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Burada (1) numaralı alanda motor koruma şalterleri, (2) numaralı alanda sistemin 24Vdc geriliminin

sağlanması için güç kaynağı, (3) numaralı alanda kontaktör ve röleler, (4) numaralı alanda koruma sigortası ve son olarak (5) numaralı alanda ise iç ve dış elektrik bağlantıları için kullanılan elektrik klemensleri yer almaktadır.



Şekil 4.32: Hidrolik sistem elektronik panosu

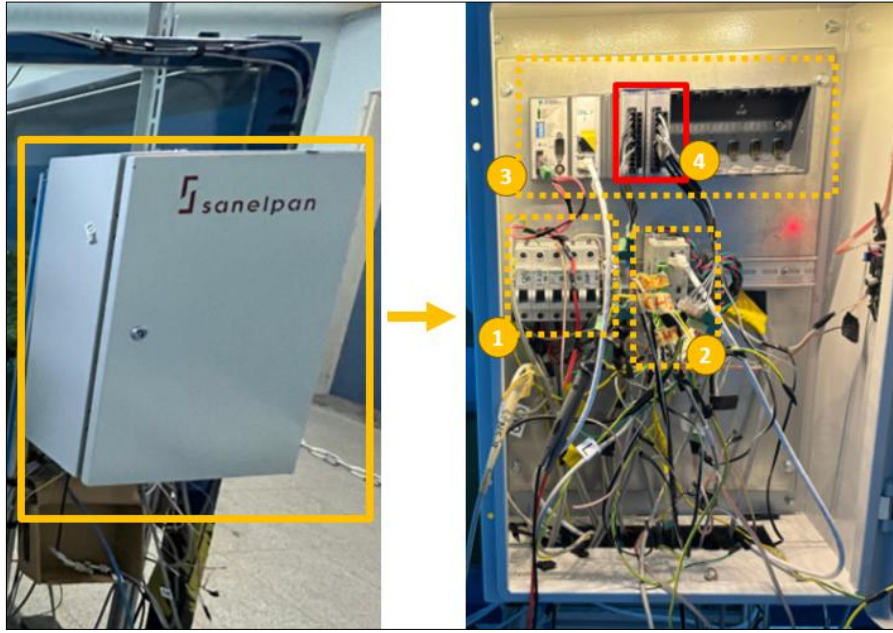
Hidrolik sistemin uzaktan kontrolü için kullanılan kablolu yapıya sahip bir uzak komuta panosu Şekil 4.33’de verilmiştir. Bu pano üzerinde hidrolik iki adet valfin kontrolü, hidrolik pompanın çalıştırılması ve hidrolik pompanın durdurulması işlemleri yapılabilmektedir. Ek olarak kullanıcının doğrudan bilgilendirilebilmesi için bu birim üzerine sinyal lambaları eklenmiştir.



Şekil 4.33: Hidrolik sistem uzak kontrol elektronik panosu

#### 4.7 Dalga Kanalı Elektronik Donanım Panosu

Dalga kanalında kullanılan PTWM'nin, kullanıcı tarafından tanımlanan parametreler aracılığıyla otonom şekilde kontrol edilebilmesi amacıyla sisteme ikinci bir elektrik kontrol panosu entegre edilmiştir. Şekil 4.34'de verilen bu pano hem sistemin genel kontrol işlevlerini hem de güvenli çalışma koşullarını sağlamak üzere yapılandırılmıştır.



Şekil 4.34: Hidrolik sistem uzak kontrol elektronik panosu

Şekil 4.34'deki (1) numaralı alanda doğru akım (DC) besleme hatlarını koruma amacıyla kullanılan DC gerilim sigortaları yer almaktadır. Ana kontrol sistemi olarak (3) numaralı alanda yer alan National Instruments CompactRIO 9074 donanımı hem gerçek zamanlı işlemci hem de FPGA tabanlı paralel işlem altyapısıyla sistemin iki katmanlı kontrol mimarisini gerçekleştirmektedir. Giriş-çıkış işlemleri için (4) numaralı alanda yer alan NI 9215 (analog giriş) ve NI 9263 (analog çıkış) modülleri yer almaktadır. Bu modüller aracılığıyla dalga yüksekliği sensörleri ve LVDT (Linear Variable Differential Transformer) tipi konum sensörlerinden alınan veriler FPGA yapısına aktarılmakta, kontrol sinyalleri ise oransal valf birimine iletilmektedir.

Pano içerisinde yer alan (2) numaralı alanda ise yalnızca sistem güvenliğine hizmet eden Delta 28SV2 serisi bir programlanabilir lojik kontrolör (PLC) bulunmaktadır. PLC yapısı, ana kontrol sisteminden bağımsız çalışacak şekilde tasarlanmış ve sadece fiziksel konum limitleme işlevi için devreye alınmıştır. Bu şekilde, PWTM hem yazılımsal hem donanımsal

düzeyde güvenli bir sınırlandırma ile kontrol edilmektedir. Ayrıca, pano içerisinde yer alan CRIO-9074 donanımının kontrolü, LabVIEW tabanlı olarak geliştirilen özgün kontrol programı aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde, bilgisayar ile CRIO-9074 arasında TCP/IP protokolü üzerinden haberleşme sağlanmakta olup, bu yapı yüksek hızlı veri aktarımı, güvenilir iletişim ve kullanıcı arayüzü üzerinden parametre yönetimi gibi işlevlerin senkronize şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır.

## 5. PİSTON TÜR DALGA ÜRETİCİLİ HİDROLİK SİSTEM MODELİ

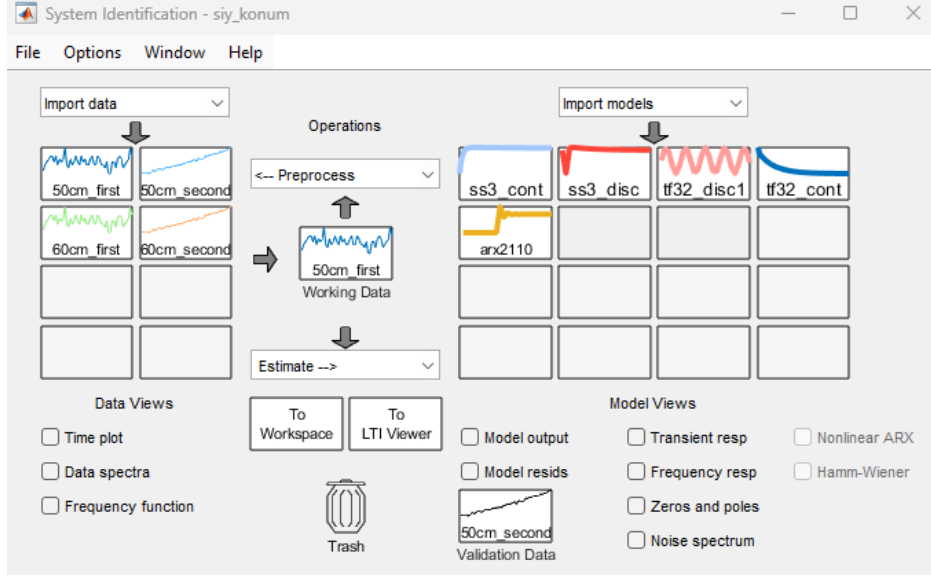
PTWM'nin hassas kontrolü için sistemin kara kutu modeli oluşturulmuş ve bu model kontrol tasarımı süreçlerinde kullanılmıştır. Hidrolik sistemin dinamikleri doğrusal olmayan yapıya sahip olduğundan, hidrolik sistemin modellenmesinde transfer fonksiyonu, durum uzayı ve dışsal girişli otoregresif model yapıları kullanılmıştır. Hidrolik sistemlerin kara kutu modellerinin oluşturulmasında kullanılan model yapıları birçok farklı çalışmada kullanılmış ve literatürde kabul görmüş modelleme yapılarına benzerdir (İstif, 2003; Rahmat et al, 2010).

### 5.1 Kara Kutu Modelleme Yaklaşımı

Kara kutu modelleme yaklaşımı, yalnızca girdi-çıkıktı verilerine dayanarak farklı çalışma koşulları altında sistem davranışını öngörebilecek matematiksel modellerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Kizir, Yaren, and Kelekçi, 2021). Temel fiziksel süreçlere ilişkin ayrıntılı bilgi gerektirmeksizin karmaşık sistem dinamiklerini temsil edebilme yetenekleri sayesinde hidrolik sistemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır.

Hidrolik sistemin modellenmesi için LabVIEW yazılım ortamında geliştirilen kontrol yazılımı, bir milisaniyelik bir döngü hızıyla çalışmıştır. HSS, 0–700 mm arasında hareket edebilmekle birlikte, dalga kanalındaki piston tipi dalga yapıcı yapı nedeniyle çalışma aralığı 300–700 mm olarak belirlenmiştir. HSS'nin dinlenme konumu 500 mm olarak tanımlanmış ve sistem tanımlama süreci için başlangıç konumu 250 mm olarak ayarlanmıştır. Temel olarak hidrolik PDV'ye açık çevrim uygulanan gerilim sinyali ile bu gerilim sinyaline karşılık oluşan HSS'nin konum bilgisi ölçülüp, veri kaydı yapılmıştır.

Hidrolik sisteme uygulanan gerilim sinyaline karşılık elde edilen konum sinyalleri “.lvm” dosyası formatında LabVIEW yazılımının desteklediği biçimde CRIO-9074 bellek yapısına gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Hidrolik sistemin tanımlanmasında giriş-çıkış ilişkisi için kayıt altına alınan sinyaller için MATLAB yazılımında bulunan Sistem Tanımlama Araç Kutusu (System Identification Toolbox - SIT) modülü kullanılmıştır. MATLAB/SIT modülünde giriş sinyali olarak PDV'ye uygulanan gerilim sinyali, çıkış sinyali olarak ise hidrolik sistemden elde edilen konum sinyalleri tanımlanmıştır. Şekil 5.1'de MATLAB/SIT modülünde dalga kanalında bulunan HSS yapısı için toplanan veriler doğrultusunda oluşturulan çeşitli modelleme yaklaşımlarının, deneysel konum verisi ile olan uyumlarını gösteren grafiksel karşılaştırma verilmiştir. Modelleme sürecinde hem sürekli zamanlı hem de ayırık zamanlı yapıların yer aldığı beş farklı model yapısı değerlendirilmiştir.



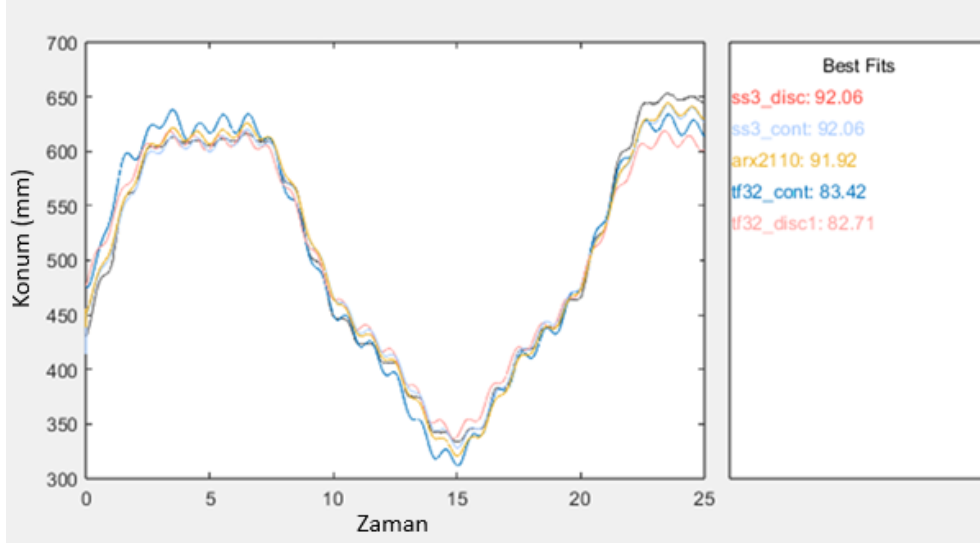
**Şekil 5.1:** MATLAB yazılımı SIT modülü

Şekil 5.1’ de verilen MATLAB/SIT modülünde, “ss3\_disc” modeli 3. dereceden ayrık zamanlı durum-uzay yapısını temsil ederken, “ss3\_cont” ise aynı dereceden sürekli zamanlı durum-uzay modelidir. Her iki yapı da % 92.06 oranında yüksek uyum göstermiştir. Bu durum, sistemin dinamiklerinin üçüncü dereceden bir durum-uzay modeli ile oldukça başarılı şekilde temsil edilebildiğini ortaya koymaktadır.

Alternatif olarak kullanılan “ARX2110” modeli, 2 giriş gecikmesi, 1 çıkış gecikmesi ve 10 adet regresyon parametresi içeren klasik bir Otoregresif Dışsal Girdili Model (ARX – Autoregressive with Exogenous Input) olup, % 91.92 oranında bir başarı sağlamıştır. Bu sonuç, ARX modelinin de sistemin doğrusal davranışlarını temsil etmede yeterli düzeyde performans gösterdiğini göstermektedir. Öte yandan, “tf32\_cont” ve “tf32\_disc1” modelleri sırasıyla sürekli ve ayrık zamanlı 3. dereceden 2 kutuplu transfer fonksiyonlarıdır. Bu iki yapı, sırasıyla % 83.42 ve % 82.71 oranında başarı göstermiştir. Transfer fonksiyonu tabanlı modellerin, durum-uzay ya da ARX yapılarına kıyasla daha düşük başarı oranı sunduğu gözlemlenmiş ve bu da sistemin çoklu giriş-çoklu çıkışlı ve daha karmaşık dinamik içeriğe sahip olduğunu teyit etmektedir.

Sonuç olarak, ss3\_disc ve ss3\_cont isimli durum-uzay tabanlı modellerinin hem sürekli hem de ayrık zaman uzayında sistem dinamiklerini yüksek doğrulukla temsil ettiği görülmektedir. Bu bulgu, sistemin kontrol stratejileri geliştirilirken durum uzayı temelli modellerin tercih edilmesinin daha uygun olacağını ortaya koymaktadır. Ayrıca,

sistemin hem ayrık hem de sürekli modelleme yapılarında benzer başarı oranları göstermesi, sistem dinamiklerinin zamansal ayrıklıktan bağımsız olarak kararlı bir yapıya sahip olduğunu desteklemektedir.



**Şekil 5.2:** Farklı sistem tanımlama modellerinin zaman-konum tepkileriyle deneysel veriye uyumlarının karşılaştırılması

### 5.1.1 Transfer fonksiyonu modeli

Kara kutu modelleme kapsamında kullanılan en yaygın yöntemlerden biri transfer fonksiyonu modelidir. Bu model, valfe uygulanan gerilim  $u(t)$  ile HSS'nin pozisyonu  $y(t)$  arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Transfer fonksiyonu, zamanla değişen bir fiziksel sistemin giriş-çıkış ilişkisini sürekli zaman (s) veya ayrık zaman (z) alanında tanımlar. Denklem 5.1'de transfer fonksiyonu için sürekli zaman tanımlama yapısı verilmiştir.

$$G(s) = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_n}{s^m + a_1s^{m-1} + \dots + a_m} \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'de verilen transfer fonksiyonu ifadesinde,  $G(s)$  sistemin transfer fonksiyonunu temsil etmektedir. Pay ve payda polinomlarının katsayıları sırasıyla  $b_i$  ve  $a_i$  sembolleriyle gösterilmektedir. Burada  $n$ , sistemin sıfır sayısını yani sıfır derecesini ifade ederken,  $m$  ise kutupların sayısını yani sistemin kutup derecesini ifade etmektedir. Genel olarak transfer fonksiyonları  $m \geq n$  koşulunu sağlayacak şekilde tanımlanmaktadır. Bu yapı, fiziksel sistemin giriş-çıkış ilişkisini tanımlamada temel bir matematiksel çerçeve sunar ve sistem dinamiklerinin analizinde kritik rol oynamaktadır. Transfer fonksiyonundaki katsayılar,

sistemin dinamik tepkisinin şekillenmesini sağlamaktadır. Payda katsayıları olarak " $a_0, a_1, a_2$ " sistemin kutup konumlarını belirlemektedir. Bunlar sistemin zaman sabitleri, kararlılık durumu ve tepki süresi gibi özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Pay katsayıları " $b_0, b_1, b_2$ " ise sistemin sıfır konumlarını belirler ve bu sıfırlar da sistemin geçici rejim davranışı, özellikle yükselme zamanı ve aşım üzerinde etkili olmaktadır. Hidrolik sistemin kara kutu modellemesi sonucunda elde edilen 3. dereceden 2 sıfırlı sürekli zaman transfer fonksiyonu Denklem 5.2'de verilmiştir.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{51.66s^2 + 135s + 484.2}{s^3 + 0.4779s^2 + 11.22s + 2.809 \times 10^{-9}} \quad (5.2)$$

3. dereceden payda polinomu, sistemin üç adet enerji depolayıcı eleman (örneğin kütle, yay, hidrolik hacim) içerdiğini ve üçüncü mertebeden bir dinamik yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, sistemin geçmiş giriş bilgilerini de dikkate alan bir bellekli yapı sergilediğini ve daha yavaş dinamik özellikler gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Modelin başarı oranı, tahmin edilen veriye uyum açısından %78,06 olarak elde edilmiştir. Bu değer, modelin eldeki deneysel verilere belirli bir doğrulukla karşılık verdiğini, ancak ayrık zaman modellerine göre daha düşük bir başarı sağladığını göstermektedir. Uyum yüzdesi dışında, oluşturulan model tahmini için Ortalama Kare Hata (Mean Square Error - MSE) değeri ise 450.2 olarak hesaplanmıştır. Ayrık zaman (z) söz konusu olduğunda ise transfer fonksiyonu, zamanla değişen bir fiziksel sistemin giriş-çıkış ilişkisini ayrık zaman (z) alanında tanımlamaktadır. Denklem 5.3'de transfer fonksiyonu için ayrık zaman tanımlama yapısı verilmiştir.

$$G(z) = \frac{b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_mz^{-m}} \quad (5.3)$$

Hidrolik sistemin kara kutu modellemesi sonucunda elde edilen 3.dereceden 2 sıfırlı ayrık zamanlı transfer fonksiyonu Denklem 5.4'de verilmiştir.

$$G(z) = \frac{6.617z^{-1} - 6.57z^{-2}}{1 - 1.752z^{-1} + 1.752z^{-2} - z^{-3}} \quad (5.4)$$

Denklem 5.4’de verilen modelin doğruluk seviyesi yaklaşık % 82.11 olarak elde edilmiş olup, bu değer modele karşılık gelen zaman alanı verileriyle yapılan eşleşmede elde edilen başarı oranını göstermektedir. Ayrıca, tahmin hatasına ilişkin önemli ölçüt olan MSE değeri 299.3 olarak hesaplanmıştır.

### 5.1.2 Dışsal girişli otoregresif modeli

Dışsal Girişli Otoregresif (AutoRegressive with eXogenous input - ARX) modeli, doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerin dinamik davranışlarını modellemek amacıyla kullanılan parametrik bir sistem tanımlama yöntemidir. Bu yaklaşımda sistemin çıkışı, geçmiş çıkış değerleri (otoregresif terimler) ve geçmiş giriş değerlerinin (dışsal giriş) doğrusal bir kombinasyonu şeklinde ifade edilir. ARX modelinin temel yapısı Denklem 5.5’de verilmiştir.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + e(t) \quad (5.5)$$

Denklem 5.5’de  $A(z)$  ve  $B(z)$ , sırasıyla çıkış ve girişe ait fark denklemi katsayılarını temsil eden polinomlardır.  $y(t)$  sistem çıkışını,  $u(t)$  sistem girişini,  $nk$  giriş gecikmesini ve  $e(t)$  ise modelleme sırasında ortaya çıkan beyaz gürültü (hata) terimini temsil etmektedir. Hidrolik sistemin deneysel olarak elde edilen zaman-uzay verilerine dayanarak, ayrık zamanlı bir ARX modeli oluşturulmuştur. Elde edilen model "ARX2110" olarak adlandırılmış ve model parametreleri olan  $na = 2$  (çıkış gecikme derecesi),  $nb = 1$  (girişin polinom derecesi) ve  $nk = 10$  (girişin çıkış üzerindeki etkisinin başladığı gecikme) olarak belirlenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda model yapısı Denklem 5.6’da verildiği gibi elde edilmiştir.

$$A(z) = 1 - 0.5888z^{-1} - 0.4112z^{-2}, B(z) = 0.05993z^{-10} \quad (5.6)$$

Modelin örnekleme zamanı 0.001 saniye olarak belirlenmiştir. Bu yapı, sistemin iki geçmiş çıkış değeri ve 10 örnek gecikmeli tek giriş değeriyle ifade edildiğini göstermektedir. Elde edilen modelin başarı düzeyi oldukça yüksektir. ARX2110 modeli, tahmin verilerine karşılık % 99.91 oranında bir uyum göstermiştir. MSE değeri 0.007536 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, modelin sistemin dinamiklerini yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir. ARX modelinin bu başarısı, düşük parametre sayısı ile karmaşık olmayan ancak oldukça etkili bir yapı ortaya koyduğunu göstermektedir.

### 5.1.3 Durum uzayı modeli

Durum uzayı (state space – SS) modelleme yöntemi, hem sürekli zamanlı hem de ayrık zamanlı sistemler için uygulanabilmekte olup, sistemin geçmiş dinamiklerinin durum değişkenleri aracılığıyla mevcut ve gelecekteki davranışa yansıtılmasını sağlamaktadır. Elde edilen sürekli ve ayrık zamanlı durum uzayı modelleri, bu yaklaşımın hem deneysel verilerle hem de farklı kontrol stratejileriyle uyumlu olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Sürekli zamanlı durumda, sistemin matematiksel yapısı diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Sürekli zamanlı durum uzayı modeli genel olarak Denklem 5.7’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + K \cdot e(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) + D \cdot u(t) + e(t)\end{aligned}\tag{5.7}$$

Burada  $x(t)$  durum değişkenleri vektörünü,  $u(t)$  sistemin girdilerini,  $y(t)$  sistemin çıktısını,  $e(t)$  ise modelleme ve ölçüm hatalarını temsil etmektedir.  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ve  $D$  matrisleri sırasıyla sistemin dinamik, giriş, çıkış ve doğrudan geçiş özelliklerini belirlemektedir.  $K$  matrisi, sistemin tahmin edilen hatalara olan duyarlılığını ifade eder. Bu yapı, sistem dinamiklerinin zamana bağlı olarak sürekli değiştiği durumları modellemek için kullanılır ve çoğunlukla fiziksel sistemler için kontrolcü tasarımında temel alınır. Ayrık zamanlı durumda ise sistemin tanımı fark denklemleriyle gerçekleştirilir ve özellikle sayısal kontrol sistemlerinde veya dijital verilerle çalışılan uygulamalarda tercih edilir. Ayrık zamanlı durum uzayı modeli ise Denklem 5.8’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}x(t + Ts) &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + K \cdot e(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) + D \cdot u(t) + e(t)\end{aligned}\tag{5.8}$$

Burada  $Ts$  örnekleme periyodunu ifade eder. Bu yapıda durum değişkenleri belirli zaman adımlarında güncellenir ve sistemin dinamikleri dijital bir zaman dizisi üzerinden tanımlanır. Bu modelleme yöntemi, özellikle kontrol algoritmalarının mikrokontrolcü, FPGA veya dijital kontrolör gibi donanımlar üzerinde uygulanacağı durumlarda oldukça uygundur. Süreç boyunca kullanılan  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ve  $D$  matrisleri ve hata kovaryansları, sistemin doğrusal ya da doğrusal olmayan yapısının modellemedeki başarısını doğrudan etkilemektedir. Elde edilen 3. dereceden sürekli zamanlı durum uzayı model yapısı Denklem 5.9’da verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0.002513 & 0.04442 & 0.3072 \\ 0.3428 & 111.2 & -3009 \\ -0.3309 & 305.8 & -3701 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.4244 \\ -3849 \\ -4637 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$C = [-6.762 \times 10^4 \quad 4.51 \quad 5.863], \quad D = 0, \quad K = \begin{bmatrix} -0.007481 \\ 0.1415 \\ 21.54 \end{bmatrix}$$

MATLAB/SIT çıktıları incelendiğinde, A matrisi sistemin üç durum değişkeni ( $x_1, x_2, x_3$ ) arasındaki ilişkileri tanımlamakta ve sistemin iç dinamiğini temsil etmektedir. Bu yapı, durumların zaman içerisindeki değişimini ve karşılıklı etkileşimini açıklamaktadır. B matrisi, giriş işaretinin ( $u$ ) sistem durumları üzerindeki etkisini gösterirken; C matrisi, iç durumların ölçülebilir çıkış sinyaline ( $y$ ) nasıl dönüştürüldüğünü açıklar. D matrisinin sıfır olarak tanımlanması ise girişin doğrudan çıkış üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını göstermektedir. K matrisi, modelin gürültüye karşı davranışını ve sistem içi bozucu etkilerin durumlara olan etkisini temsil etmektedir.

Model parametrelerine ait doğruluk oranı oldukça yüksektir ve modelin elde edilen verilere uyumu %99,92 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, elde edilen durum uzayı modelinin gerçek sistemi yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, modelin hata performansını ifade eden MSE değeri 0,006522 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, modelin hem öngörü doğruluğunun hem de parametrik yeterliliğinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, elde edilen ayrık zamanlı üçüncü dereceden durum uzayı modeli Denklem 5.10'da sunulmuştur.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 6.205 \times 10^{-5} & 4.444 \times 10^{-5} \\ 0.0005322 & 0.9279 & -0.7587 \\ -5.557 \times 10^{-5} & 0.07711 & -0.0333 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 9.279 \times 10^{-5} \\ -1.028 \\ -1.3 \end{bmatrix}$$

$$C = [-6.762 \times 10^4 \quad 4.51 \quad 5.863], \quad D = 0, \quad (5.10)$$

$$K = \begin{bmatrix} -6.476 \times 10^{-6} \\ -0.01262 \\ 0.004968 \end{bmatrix}$$

Tahmin edilen durum uzayı modelinde % 99.92 oranında veri uyumu sağlamıştır. Bu yüksek uyum oranı, modelin sistemin gerçek zamanlı dinamik davranışlarını doğru şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, tahmin hatası ölçütlerinden biri olan MSE değeri 0.006522 olarak hesaplanmıştır.

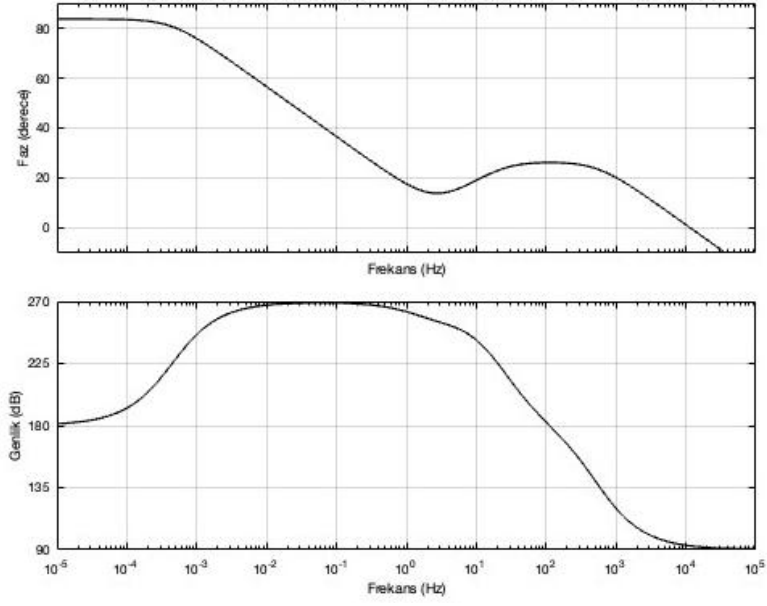
#### 5.1.4 Model seçimi

PTWM'yi doğrudan tahrik eden HSS'nin sistem tanımlama sürecinde elde edilen modeller; yapısal özellikleri, tahmin başarımları ve Bode diyagramları açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, her bir modelin doğruluk seviyesini ortaya koymak amacıyla MSE ve tahmin verisine uyum yüzdesi gibi metrikler temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.1'de sunulan veriler değerlendirildiğinde sürekli ve ayrık zamanlı durum uzayı modelleri, % 99.92'lik uyum oranı ve 0.0065 MSE değerleriyle en yüksek tahmin doğruluğunu sağlamaktadır. Ancak tez kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında sistem modeli açısından sadece en yüksek veriye uyumun yeterli olmadığı belirlenmiştir. Bu noktada HSS'nin sistem modelinin seçiminde HSS tasarım ve üretim parametresi olan çalışma frekansı değeri 1Hz etrafında cevap veren Bode eğrisine sahip olan model ile sistem modeli oluşturulmuştur.

**Tablo 5.1:** Hidrolik sistem modelleri.

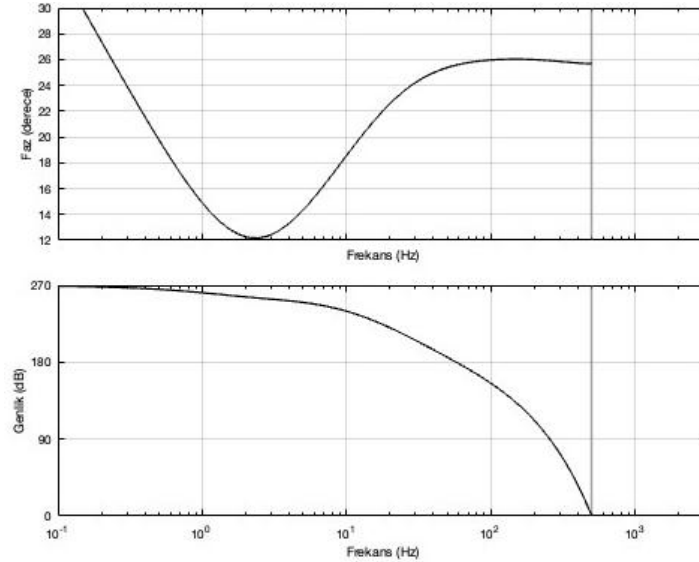
MODEL ADI	MODEL TİPİ	VERİYE	MSE
		UYUM (%)	DEĞERİ
ss3_cont	Sürekli Zaman Durum Uzayı	99.92	0.006522
ss3_disc	Ayrık Zaman Durum Uzayı	99.92	0.006522
arx2110	Ayrık Zaman ARX	99.91	0.007536
tf32_disc	Ayrık Zaman Transfer Fonksiyonu	82.11	299.3
tf32_cont	Sürekli Zaman Transfer Fonksiyonu	78.06	450.2

Tablo 5.1'de verilen ve "ss3\_cont" ile adlandırılan 3.dereceden sürekli zaman durum uzayı modeli için oluşturulan Bode diyagramı Şekil 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.3'de genlik diyagramı düşük frekanslarda yüksek kazanç, artan frekanslarda ise hızlı bir düşüş göstermektedir. Faz diyagramı ise düşük frekanslarda 0'a yakın iken, frekans arttıkça negatif diyagramlara kaymaktadır. Bode diyagramı, HSS'nin geniş bantlı bir frekans cevabına sahip olmadığını ve belirli frekanstan sonra kazancın ciddi ölçüde azaldığı göstermektedir.



**Şekil 5.3:** HSS sürekli zaman 3.dereceden durum uzayı modeli-bode diyagramı

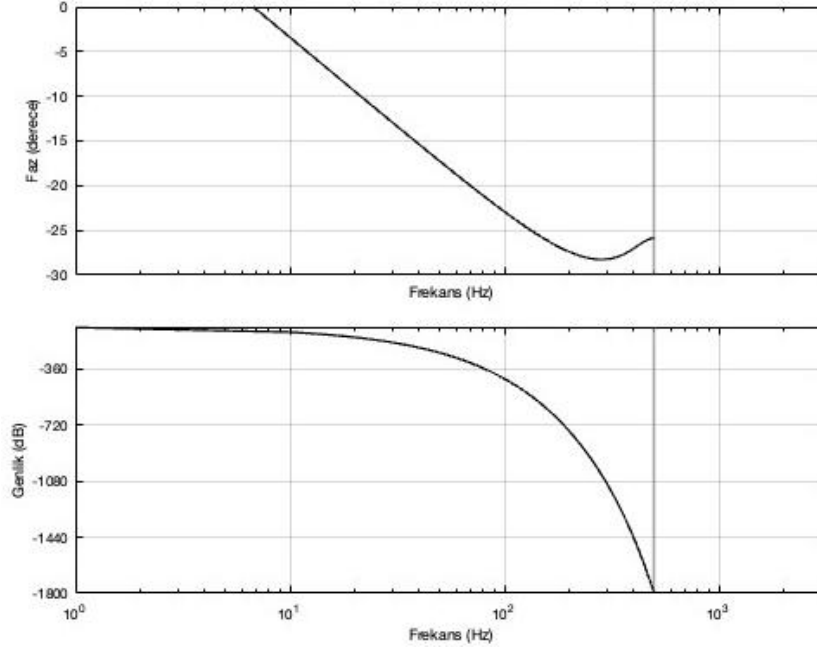
“ss3\_disc” ile adlandırılan 3.dereceden ayrık zamanlı durum uzayı modeli için oluşturulan Bode diyagramı Şekil 5.4’de verilmiştir. Genlik diyagramı düşük frekanslarda yüksek kazançtır ve orta frekanslarda düşüşe geçmektedir. Faz diyagramı ise frekans arttıkça giderek azalan faz açısı sergilemektedir. Bode diyagramı ile ayrık sistemi geçiş bölgesinde kararsızlığa eğilimli olabileceği değerlendirilmiştir.



**Şekil 5.4:** HSS ayrık zaman 3.dereceden durum uzayı modeli-bode diyagramı

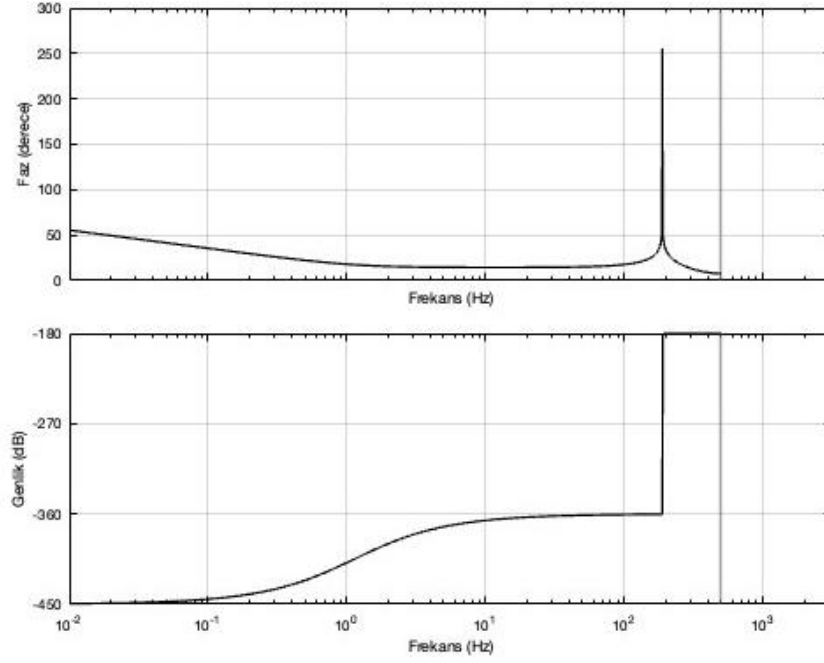
Ayrık zaman ARX modeli için oluşturulan Bode diyagramı ise Şekil 5.5’de verilmiştir. Bode diyagramında bulunan faz diyagramı düşük frekansta 0’da iken frekans arttıkça hızlı bir

şekilde negatif değerlere doğru ilerlemektedir. Genlik diyagramını ise düşük frekanslarda pozitif kazanç ile başlamakta ve orta frekanstan sonra hızla azalarak negatif değerlere düşmektedir.



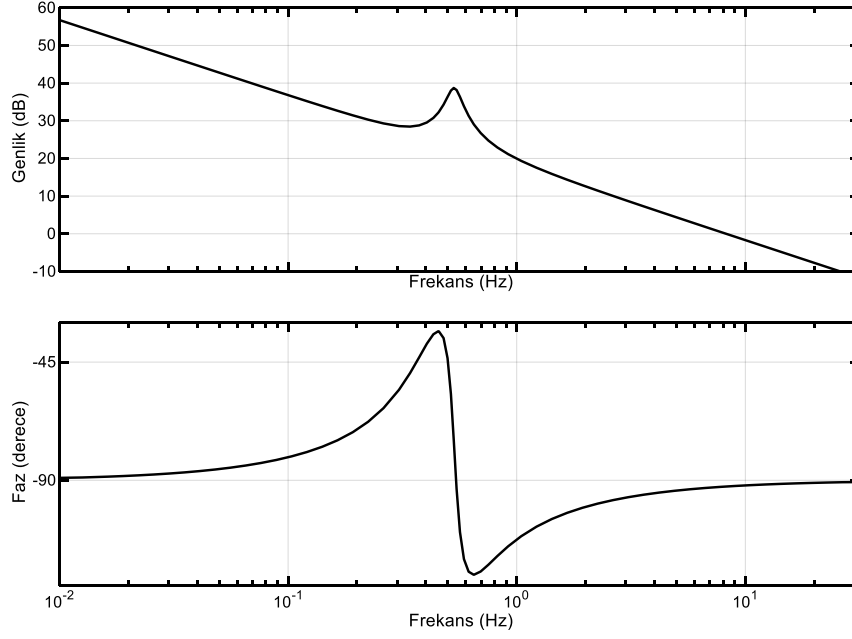
**Şekil 5.5:** HSS ayrık zaman ARX modeli-bode diyagramı

Ayrık zaman ve 3.dereceden transfer fonksiyonu için oluşturulan Bode diyagramı Şekil 5.6'da verilmiştir. Bode diyagramında düşük frekanslarda kazanç düşüktür ancak frekans arttıkça belirgin bir rezonans tepesi oluşmaktadır. Faz diyagramında ise özellikle rezonans noktasında hızlı bir faz kayması söz konusu olmuştur.



**Şekil 5.6:** HSS ayırık zaman 3.dereceden transfer fonksiyonu modeli-bode diyagramı

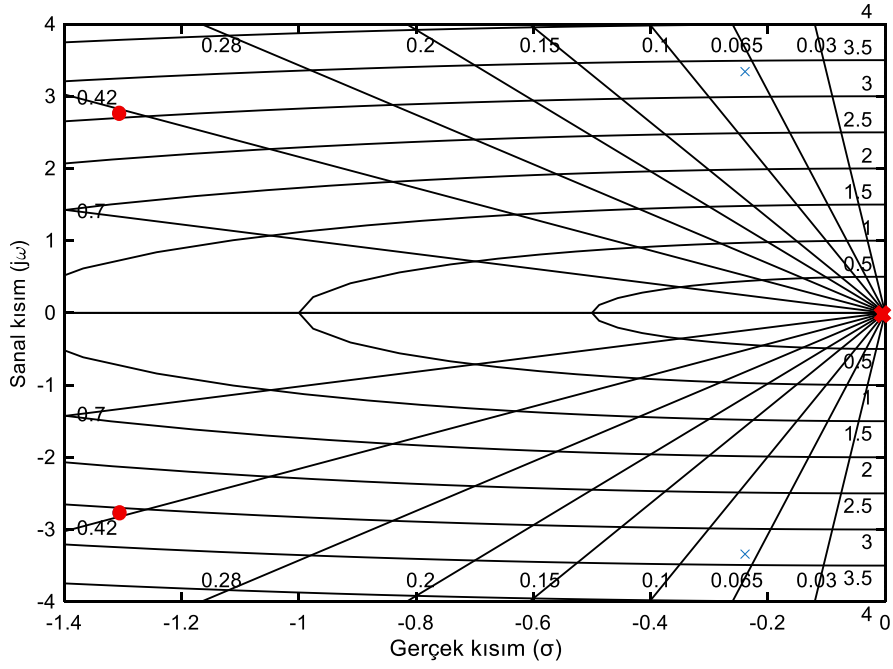
Son olarak sürekli zaman ve 3.dereceden transfer fonksiyonu için oluşturulan Bode diyagramı Şekil 5.7’de verilmiştir. Faz diyagramında düşük frekanslarda faz açısının yaklaşık  $+55^\circ$  civarında başladığı görülmektedir. Bu durum, sistemin düşük frekanslarda faz ilerlemeli bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Genlik diyagramında ise düşük frekanslarda kararlı bir kazanç gözlenirken, belirli bir frekansta rezonans etkisi ile genlik artışı meydana gelmiştir. Bu durum, sistemin rezonans frekansında faz kayması ile birlikte belirgin bir tepki verdiğini göstermektedir.



**Şekil 5.7:** HSS sürekli zaman 3.dereceden transfer fonksiyonu modeli-bode diyagramı

HSS modeli seçimi için oluşturulan beş modelin Bode diyagramları incelendiğinde sürekli zaman 3.dereceden transfer fonksiyonuna ait bode diyagramında gözlenen rezonans frekansı, faz kırılması ve yüksek frekans zayıflatma özellikleri, seçilen sistem modelinin deneysel frekans cevabını temsil etme yeterliliğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Modelin bu karakteristikleri doğru şekilde yakalaması, optimizasyon sürecinde elde edilen kontrolcü parametrelerinin gerçek sistem üzerinde uygulanabilirliğini ve geçerliliğini artırmaktadır.

Bode diyagramına bağlı olarak seçilen 3.dereceden sürekli zaman transfer fonksiyonu modeli için kutuplar ve sıfırlar haritası Şekil 5.8’de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde sistem kutupları sol yarı düzlemde yer almaktadır ve bu durum sistemin kararlılığına işaret etmektedir. Kutupların sanal eksenden uzaklıkları, sistemin sönüm oranı ve geçici rejim davranışı hakkında bilgi sunmaktadır. Sıfırların konumu ise frekans cevabında genlik ve faz özelliklerini etkileyecek kritik faktörlerden biridir.



**Şekil 5.8:** HSS sürekli zaman 3.dereceden transfer fonksiyonu modeli-kutuplar ve sıfırlar haritası

Seçilen sistem modeli için gerçekleştirilen Routh–Hurwitz kararlılık analizi, karakteristik denklemin köklerinin karmaşık düzlemdeki konumunu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu analize ait Routh tablosu Tablo 5.2’de verilmiştir. Routh–Hurwitz yönteminde, özellikle tablonun ilk sütunundaki işaretlerin sistem kararlılığı açısından belirleyici olduğu bilinmektedir. Tablo 5.2 incelendiğinde, ilk sütun elemanlarının pozitif değerler aldığı ve bu sütunda herhangi bir işaret değişimi oluşmadığı görülmektedir. Bu durum, sistemin sağ yarı düzlemde konumlanan kararsız kutuplara sahip olmadığını göstermektedir. Routh tablosunun alt satırında sıfır elemanının ortaya çıkması, karakteristik polinomun imajiner eksen üzerinde kökler içerebileceğine işaret etmektedir. Bu yapı, sistemin asimptotik olarak kararlı olmadığını; ancak marjinal (sınırdan) kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir.

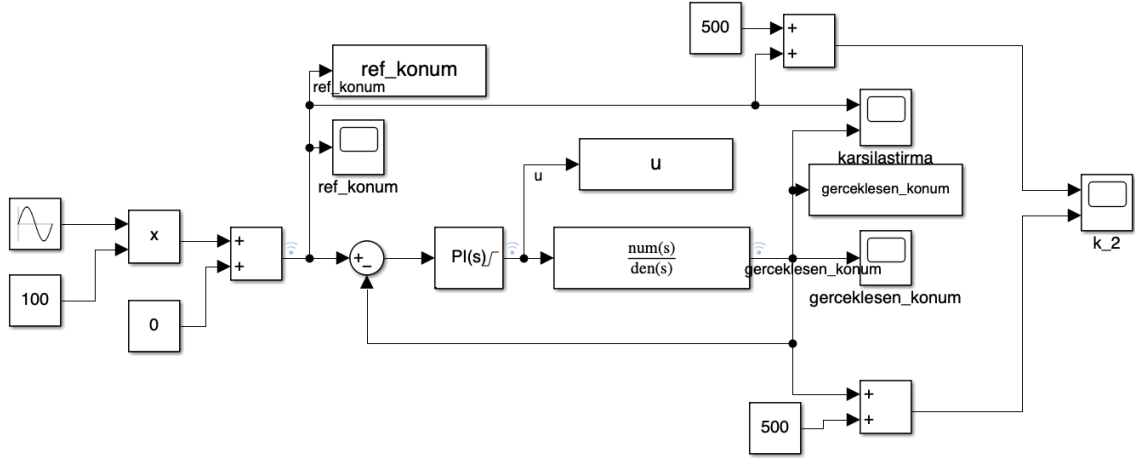
**Tablo 5.2:** Seçilen sistem modeli için Routh–Hurwitz tablosu.

Satır ( $s^n$ )	1.Sütun	2.Sütun
$s^3$	1.0	11.2200
$s^2$	0.4779	0.0
$s^1$	11.2200	0.0
$s^0$	0.0	0.0

Sonuç olarak deneysel frekans cevabını temsil eden Bode diyagramında gözlenen belirgin rezonans tepe noktası faz kırılması ve yüksek frekans zayıflatma davranışı Routh Hurwitz kararlılık tablosunda elde edilen ve sistemin marjinal kararlı bir yapıya sahip olduğunu gösteren ilk sütun işaretleri ile sıfır satırı bulguları ayrıca kutup sıfır haritasında sistem dinamiğini belirleyen baskın kompleks kutuplar ve bunlara eşlik eden ek bir gerçek kutbun varlığı birlikte değerlendirildiğinde sistemin dinamik davranışının ne düşük dereceli basit modellerle ne de gereksiz derecede karmaşık yapılarla yeterli doğrulukta temsil edilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle rezonans davranışını faz gecikmesini ve kararlılık sınırına yakın dinamikleri eş zamanlı olarak doğru biçimde yansıtabilen aynı zamanda kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu açısından uygulanabilir bir yapı sunan üçüncü dereceden sürekli zamanlı transfer fonksiyonu modeli HSS'nin sistem modeli olarak tercih edilmiştir.

## 6. KONTROLÇÜ PERFORMANSLARI

Simulasyon ortamında elde edilen kontrolcü katsayıları daha sonra gerçek zamanlı olarak HSS sistemi üzerinde FPGA tabanlı olarak test edilmiş ve sonuçlar kayıt altına alınarak performans metrikleri doğrultusunda HSS'nin nihai konum kontrolçüsü seçilmiştir.



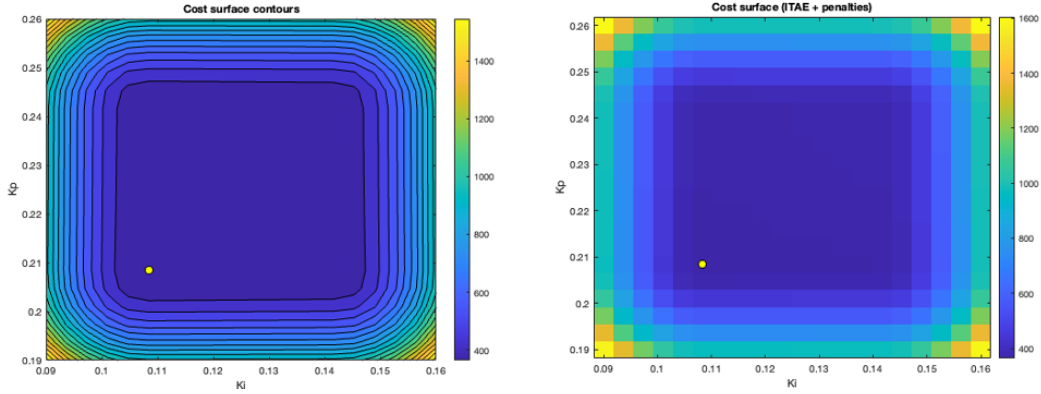
Şekil 6.1: PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcü Matlab/Simulink modeli

PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcü için Matlab/Simulink ortamında oluşturulan model yapısı Şekil 6.1'de verilmiştir. Matlab/Simulink ortamında çalıştırılacak olan modelin başarımlı kriteri için toplam maliyet fonksiyonu belirlenmiştir. Bu fonksiyon, PI<sup>(HSS)</sup> kazanç vektörü  $p = [K_p, K_i]$  için Simulink modelinde yürütülen kapalı çevrim simülasyonlardan elde edilen sinyaller için maliyet fonksiyonu olan "J", zaman-ağırlıklı mutlak hata (ITAE) temelli bir performans ölçütü Denklem 6.1'deki gibi tanımlanmıştır.

$$J = ITAE = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt \quad (6.1)$$

Denklem 6.1'de verilen maliyet fonksiyonu, PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcü parametre uzayının genel davranışını önceden görebilmek ve maliyet fonksiyonunun duyarlılığını inceleyebilmek amacıyla, başlangıç aşamasında ızgara (grid) tabanlı kapsamlı bir arama yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, belirli bir parametre aralığında sistematik olarak tüm olası kombinasyonları deneyerek, kontrolcünün performans eğilimlerini ortaya koymakta ve sonrasında kullanılacak meta-sezgisel algoritmalar için referans aralıklarının belirlenmesini sağlamaktadır.

Bu kapsamda,  $PI^{(HSS)}$  kontrolcünün kazanç parametreleri  $K_p$  değeri 0.19-0.26 ve  $K_i$  değeri ise 0.09-0.16 aralıklarında tanımlanmıştır. Örneğin  $20 \times 20$ 'lik bir grid yapılandırması, toplamda 400 farklı kombinasyonunun değerlendirilmesi anlamına gelmektedir. Her bir nokta için sistem, MATLAB/Simulink ortamında simüle edilerek, ITAE performans kriteri ile hesaplanmıştır.



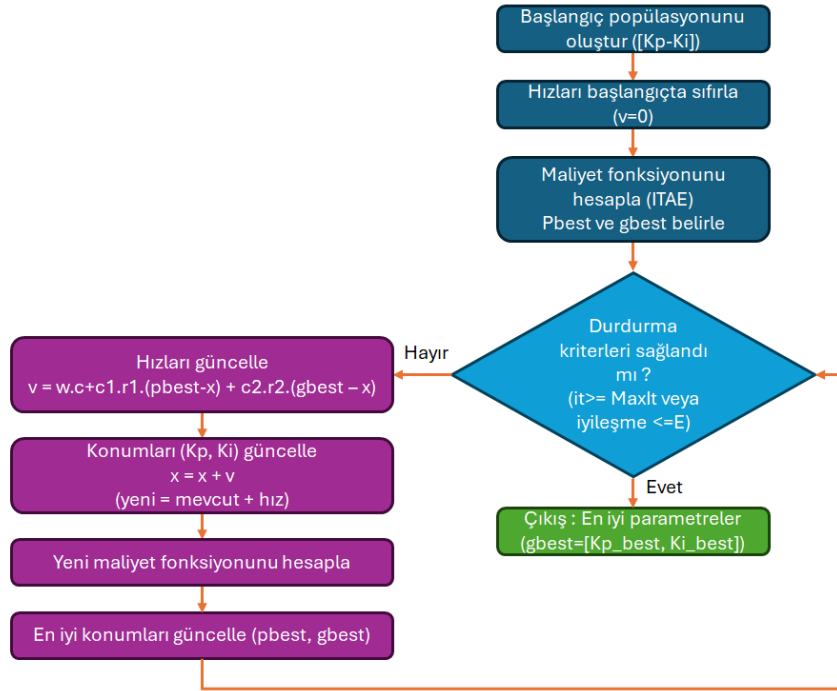
**Şekil 6.2:**  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü grid search algoritması sonuçları

Şekil 6.2’de verilen algoritma sonuç grafiklerinde, maliyet yüzeyi belirgin biçimde düzgün bir yapı sergilemektedir. Sistem dinamiklerinin tanımlanan kazanç aralığında tek modlu bir karaktere sahip olduğu, yani yerel minimumların bulunmadığını gösterilmektedir. Dolayısıyla kontrolcü kazançları değiştikçe sistem tepkisi monoton biçimde kötüleşmekte veya iyileşmektedir. Bu durum optimizasyon algoritmaları açısından iyi koşullandırılmış bir çözüm uzayı anlamına gelmektedir. Verilen şekillerde mavi tonların hâkim olduğu merkez bölge, düşük maliyet fonksiyonu değerlerinin ( $J$ ) elde edildiği optimum performans bölgesini temsil etmektedir. Sarı nokta, grid üzerinde hesaplanan minimum maliyet noktasını göstermekte olup yaklaşık olarak  $K_p \approx 0.21$  ve  $K_i \approx 0.11$  civarında konumlanmıştır. Bu değerler, sistemin hem aşım hem de oturma zamanı açısından dengeli bir performans sunduğu kazanç çifti olarak belirlenmiştir. Burada elde edilen parametreler, sonraki aşamada kullanılan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Harris Şahinleri Optimizasyonu (HHO) ve Slime Kalıbı Algoritması (SMA) gibi meta-sezgisel yöntemlerin başlangıç bölgelerinin tanımlanmasında temel alınmıştır.

## 6.1 PI<sup>(HSS)</sup> Kontrolcü Parametre Optimizasyonu

PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcünün  $K_p$  ve  $K_i$  parametrelerinin optimum değerlerini belirlemek amacıyla üç farklı meta-sezgisel algoritma kullanılmıştır.

PSO, HHO ve SMA algoritmaları, farklı arama mekanizmalarına sahip olmalarına rağmen, ortak bir amaç fonksiyonu olan “J” değerini minimize etmek üzere yapılandırılmıştır. Algoritma seçimi, her bir yöntemin farklı keşif ve sömürü stratejilerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. PSO, grup temelli ve sürekli uzaylarda yüksek yakınsama kararlılığıyla bilinen klasik bir popülasyon algoritmasıdır. Kontrolcü optimizasyonunda genellikle hızlı ve kararlı sonuçlar verdiği için referans bir yöntem olarak seçilmiştir. Şekil 6.3’de PSO algoritmasına ait diyagram yapısı verilmiştir.



Şekil 6.3: PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcü için PSO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı

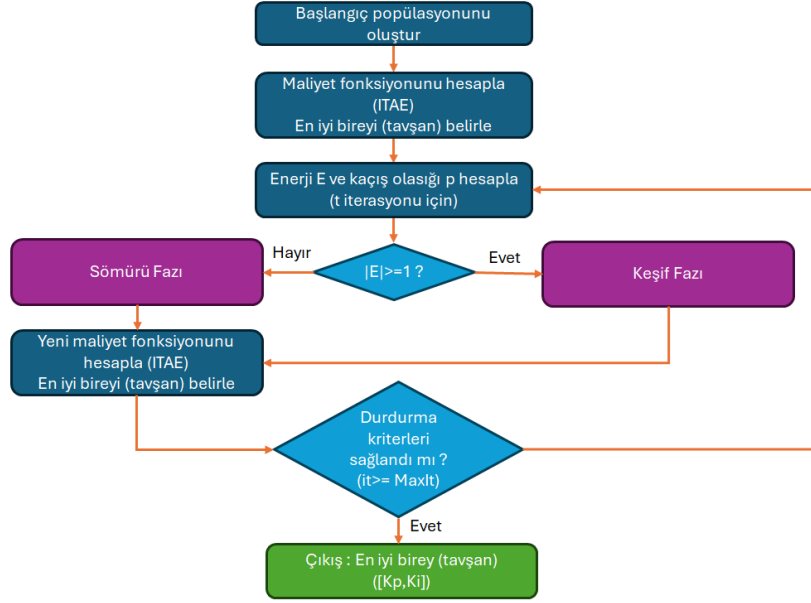
Şekil 6.3’de gösterilen verilen PSO algoritması, optimizasyon sürecine iki parametreden oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlamaktadır. Başlangıçta, popülasyondaki tüm parçacıkların hızları sıfırlanmakta ( $v = 0$ ) ve böylece optimizasyon süreci için başlangıç durumu oluşturulmaktadır. Algoritmanın ana döngüsüne geçmeden önce, her bir parçacık için maliyet hesaplaması yapılmaktadır. Elde edilen ilk maliyet değerlerine göre her parçacığın kendi en iyi konumu (pbest) ve tüm sürünün global en iyi konumu (gbest) belirlenmektedir. Bu ön hazırlık adımlarının ardından algoritma, ana iteratif

sürecine girmektedir. Bu süreç, “Durdurma kriteri sağlandı mı?” kontrolüyle yönlendirilmektedir. Kriter sağlanmadığı sürece (“Hayır” dalı izlenir), algoritma gerekli adımları tekrarlamaktadır.

Hız güncelleme adımında, her parçacığın hızı, atalet ağırlığı ( $w$ ), bireysel öğrenme katsayısı ( $c_1$ ) ve sosyal öğrenme katsayısı ( $c_2$ ) dikkate alınarak standart PSO denklemiyle güncellenmektedir. Konum güncelleme adımında, güncellenen hız değeri, parçacığın mevcut konumuna eklenerek yeni parametreler elde edilmektedir. Böylece, kontrolcü parametreleri her iterasyonda optimize edilmek üzere güncellenmektedir.

Yeni maliyet hesaplama adımında güncellenen konum için yeni bir ITAE maliyeti hesaplanmakta ve bu maliyet değeri, ilgili parçacığın performansını yansıtmaktadır. En iyi değerleri güncelleme adımında ise hesaplanan yeni maliyet değeri, parçacığın kendi en iyi değeri ( $pbest$ ) ve sürünün global en iyi değeri ( $gbest$ ) ile karşılaştırılmakta; eğer daha düşük bir maliyet elde edilmişse, bu değerler güncellenmektedir. Bu işlem adımları, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrarlanmaktadır. Kriter sağlandığında (“Evet” dalı), iterasyon sonlanmakta ve algoritma çıktısı olarak  $PI^{(Hss)}$  kontrolcüye ait en düşük maliyeti sağlayan global en iyi parametre seti elde edilmektedir.

$PI^{(Hss)}$  kontrolcü parametre optimizasyonunda kullanılan ikinci algoritma ise HHO algoritmasıdır. HHO, doğadan esinli bir kuş sürüsü avlanma stratejisini modelleyen ve ani sıçrama mekanizmalarıyla yerel minimumlardan kaçabilen modern bir algoritmadır. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerde küresel arama yeteneği yüksektir. Şekil 6.4’de kullanılan HHO yapısı verilmiştir.



**Şekil 6.4:**  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü için HHO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı

Şekil 6.4’de verilen HHO algoritması, optimizasyon sürecine otuz bireyden (çözüm adayı) oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlamaktadır. Her bir parçacık, kontrolcünün  $K_p$  ve  $K_i$  katsayısını temsil etmektedir. Başlangıç aşamasında, her bireyin maliyeti ( $J$ ) hesaplanmakta ve en düşük maliyet değerine sahip birey, “Tavşan” (o anki en iyi çözüm) olarak belirlenmektedir. Bu adımın ardından algoritma ana iteratif döngüsüne girmekte ve her bir iterasyon ( $t$ ) için “keşif” ile “sömürü” fazları arasındaki dengeyi yöneten Enerji ( $E$ ) ve kaçış olasılığı ( $p$ ) olmak üzere iki temel parametre hesaplanmaktadır.

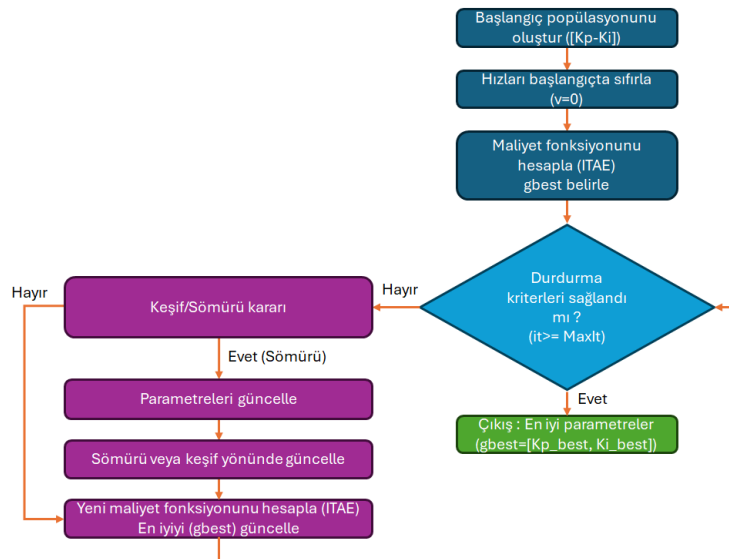
Enerji parametresi, iterasyon sayısına bağlı olarak zamanla azalmaktadır ve algoritmanın keşif fazından sömürü fazına geçişini yönetmektedir. Böylece algoritma, erken iterasyonlarda geniş bir arama alanını keşfederken, ilerleyen iterasyonlarda daha dar bir bölgede hassas iyileştirme yapabilmektedir. Algoritma, enerji parametresinin mutlak değerine göre iki ana fazdan birini uygulamaktadır.  $|E| \geq 1$  olduğu keşif fazında, enerji seviyesi yüksek olduğunda (“Evet (Keşif)” dalı), şahinler rastgele bireyler arası atlama stratejisini kullanarak arama uzayının geniş bir bölümünü araştırmaktadır. Bu faz, küresel optimuma yakınsama olasılığını artırmak amacıyla çeşitliliği korumayı hedeflemektedir.

$|E| < 1$  olan sömürü fazında enerji seviyesi azaldığında (“Hayır (Sömürü)” dalı), algoritma sömürü fazına geçmektedir. Bu fazda şahinler, mevcut Tavşan (en iyi çözüm) konumu etrafında yoğunlaşarak “yumuşak sarma”, “sert sarma”, “yumuşak sarma ve kaçış” ve “hızlı

dalış” olmak üzere dört farklı stratejiden biri aracılığıyla daha hassas bir yerel arama gerçekleştirmektedir.

Her iki fazın sonunda, bireylerin elde ettiği yeni konumlara karşılık gelen  $PI^{(Hss)}$  kontrolcü parametreleri için maliyet fonksiyonu (J) yeniden hesaplanmaktadır. Eğer bu yeni çözüm, mevcut Tavşan’dan daha düşük bir maliyet sağlıyorsa, en iyi birey (best agent) bu yeni çözümle güncellenmektedir. Bu süreç, “Durdurma kriteri sağlandı mı?” kontrolü (örneğin,  $t = 150$  iterasyona ulaşılması) ile yönetilmektedir. Kriter sağlanmadığı sürece (“Hayır – Devam et” dalı), döngü tekrar edilmekte; kriter sağlandığında (“Evet – Bitir” dalı) ise algoritma sonlandırılmaktadır. Sonuç olarak, HHO algoritması,  $PI^{(Hss)}$  kontrolcüye ait optimize edilmiş parametre çiftini, yani en iyi Tavşan’ı üretmektedir.

$PI^{(Hss)}$  kontrolcü parametre optimizasyonunda kullanılan son algoritma ise SMA algoritmasıdır. SMA algoritması, Physarum polycephalum’un besin arama sırasında sergilediği pozitif–negatif geri besleme temelli adaptif damar kalınlığı güncelleme mekanizmasını matematiksel olarak modelleyen popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. SMA’nın küçük boyutlu problemlerde yüksek stabilite sağlaması, bu çalışmadaki iki parametrelili kontrolcü optimizasyonuna uygun hale getirmiştir. Şekil 6.5’de kullanılan SMA yapısı verilmiştir.



Şekil 6.5:  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü için SMA algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı

Şekil 6.5’de verilen SMA optimizasyon süreci, otuz bireyden oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlamaktadır. Her bir birey,  $PI^{(Hss)}$  kontrolcünün  $K_p$  ve  $K_i$  katsayısını temsil etmektedir. İlk aşamada, oluşturulan başlangıç popülasyonu için Başlangıç maliyetlerini hesapla adımı uygulanmakta ve her bir parametre çiftine karşılık gelen maliyet değeri hesaplanmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda en düşük maliyete sahip birey, global en iyi çözüm (gbest) olarak kaydedilmektedir.

Bu adımın ardından algoritma, “Durdurma kriteri sağlandı mı?” kontrolüyle denetlenen ana iteratif döngüye girmektedir. Kriter sağlanmadığı sürece (“Hayır – Devam et” dalı), algoritma keşif ve sömürü fazları arasında seçim yapan Keşif / Sömürü Kararı adımına geçmektedir. Şemada  $SV_{ank}$  olarak gösterilen bu karar noktası, algoritmanın o iterasyonda keşif mi yoksa sömürü mü yapacağını belirleyen olasılıksal bir anahtar mekanizmadır. Sömürü Fazında (“Evet” dalı), algoritma sömürü kararı verdiğinde, Parametreleri güncelle adımı uygulanmaktadır. Bu adım, SMA’nın iç parametrelerinden biri olan  $W$  (ağırlık katsayısı) gibi uyarlamalı değişkenlerin güncellenmesini kapsamaktadır. Ardından bireyin konumu, yani  $PI^{(Hss)}$  kontrolcüsüne ait  $[K_p, K_i]$  parametreleri, Elit çevresi (Sömürü) yönünde Güncelle stratejisine göre yenilenmektedir. Bu strateji, mevcut en iyi çözüm (gbest) etrafında yerel bir arama yapılmasını sağlayarak daha hassas bir optimizasyon gerçekleştirmektedir.

Keşif fazında ise (“Hayır” dalı), algoritma keşif fazına geçtiğinde, bireyin konumu arama uzayının farklı bölgelerini araştırarak şekilde güncellenmektedir. Bu işlem, genellikle popülasyondan rastgele seçilen bir bireyin konumuna göre yönlendirilmekte olup, şemada “Elit çevresi... Güncelle” adımını atlayarak doğrudan bir sonraki aşamaya geçen “Hayır (Keşif – Atla)” oku ile temsil edilmektedir. Her iki fazın sonunda da bireylerin güncellenen konumlarına karşılık gelen  $PI^{(Hss)}$  kontrolcü parametreleri için yeni maliyet değerleri, “Yeni maliyeti hesapla” adımıyla yeniden değerlendirilmektedir. Eğer bu yeni maliyet değeri, mevcut global en iyi çözümden (gbest) daha düşükse, gbest bu yeni çözümlerle güncellenmektedir. Bu süreç, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar döngüsel biçimde devam etmektedir. Kriter sağlandığında (“Evet – Bitir” dalı), döngü sonlandırılmakta ve algoritma çıktı olarak  $PI^{(Hss)}$  kontrolcüsüne ait en iyi parametre setini, yani optimize edilmiş değerlerini döndürmektedir.

Tüm algoritmalar, eşit koşullarda karşılaştırılabilmesi için aynı model yapısı, parametre aralıkları ve simülasyon koşulları altında yürütülmüştür. Simulink ortamındaki her çalışmada 5 saniyelik bir simülasyon süresi uygulanmıştır.  $K_p$  için [0.20 - 0.25] ve  $K_i$  için [0.10 - 0.15] aralıkları belirlenmiştir. Bu aralıklar, önceden gerçekleştirilen grid search analizinde belirlenen optimum bölgeyi kapsayacak şekilde seçilmiş ve tüm algoritmalarda sabit tutulmuştur. Başlangıç popülasyonu, her üç algoritma için de aynı biçimde oluşturulmuştur. Popülasyonun yarısı, grid search ile bulunan en iyi noktanın ( $K_p=0.20842$ ,  $K_i=0.10842$ ) çevresinde  $\pm 0.004$ 'lük aralıkta başlatılmış; diğer yarısı ise tanımlı aralıkta ve rastgele olarak dağıtılmıştır. Hem yakınsama bölgesine yönlendirme hem de parametre uzayında çeşitlilik sağlama amaçlanmıştır. Popülasyon büyüklüğü her algoritma için 30, maksimum yineleme sayısı 150 olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon süreçleri, algoritmaların stokastik yapısından kaynaklanabilecek sapmaları ortadan kaldırmak amacıyla 20 bağımsız koşu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her bir koşuda, algoritmanın ulaştığı en iyi  $K_p$ ,  $K_i$  ve karşılık gelen maliyet değeri “J” kaydedilmiştir. Ardından tüm koşuların ortalamaları alınarak ortalama kazançlar, “best value” olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, tek bir koşunun rastgele doğasından kaynaklanan varyasyonu azaltarak, sistem performansının istatistiksel olarak daha güvenilir bir biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak Simulink ortamında çalıştırılan PSO, HHO ve SMA algoritmaları için elde edilen “best value” ile bulunan  $K_p$  ve  $K_i$  değerleri gerçek zamanlı olarak fiziksel sistem üzerinde denenmiş ve kapalı çevrim sistem tepkileri karşılaştırılmıştır. Tablo 6.1’de PI kontrolcü yapısı için hesaplanan değerler verilmiştir.

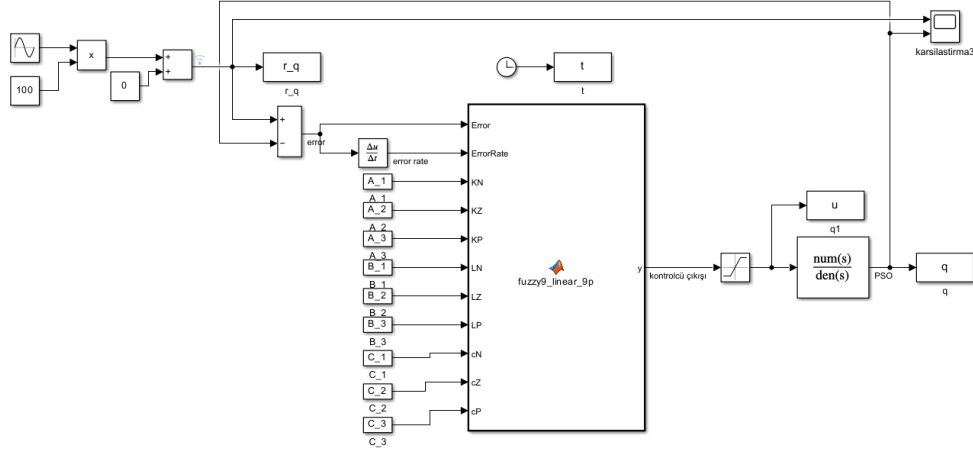
**Tablo 6.1:**  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü için optimizasyon sonucunda bulunan değerler.

KONTROLCÜ	$K_p^{(Hss)}$	$K_i^{(Hss)}$
HHO_PI <sup>(Hss)</sup>	0,20738	0,10747
PSO_PI <sup>(Hss)</sup>	0,2164	0,1145
SMA_PI <sup>(Hss)</sup>	0,2074	0,1075

## 6.2 TS Bulanık Mantık Kontrolcü

Tez kapsamında öncelikle her bir kuralın 3 parametreden (a,b,c) oluştuğu 9 kurallı ve toplam 27 parametrelili bir TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü yapısı geliştirilmiştir ve simülasyon çalışmalarında ilk olarak Şekil 6.6’da verilen TS<sup>(HSS)</sup> yapısı kullanılmıştır.

Ancak bu 27 parametreden oluşan yapı için optimizasyon süreçleri uygulanmaya çalışıldığı zaman tek bir algoritma için 12 saatin üzerinde bir optimizasyon süresi gerekli olmuştur. Bu durum FPGA tabanlı kod yapısına geçildiğinde aynı zamanda karmaşık bir programlama sürecini ayrıca beraberinde getirmektedir. Bu nedenle 27 parametreden oluşan tasarımda parametre uzayını azaltmak amacıyla istatistiksel benzerlik temelli bir sadeleştirme algoritması uygulanmıştır.



Şekil 6.6: TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü Matlab/Simulink modeli

Şekil 6.6’da verilen TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü, HSS konum hatası ( $e$ ) ve HSS konum hata değişim hızı ( $\dot{e}$ ) olmak üzere iki girişe sahiptir. Her iki giriş değişkeni ‘N’ (Negatif), ‘Z’ (Sıfır) ve ‘P’ (Pozitif) olmak üzere üç bölgeye ayrılmış ve toplam 9 adet bulanık kural oluşturulmuştur. Her kuralın lineer sonuç fonksiyonu Denklem 6.2’de verilmiştir.

$$v_{ij} = a_{ij}e + b_{ij}\dot{e} + c_{ij}, \quad i = j = 1,2,3 \quad (6.2)$$

Denklem 6.2’de  $v_{ij}$ , ilgili bulanık kuralın çıkış değerini ifade etmektedir.  $a_{ij}$ , hata için oransal katsayıyı,  $b_{ij}$ , hata değişim hızı için kural bazlı katsayıyı ve  $c_{ij}$  sabit terime karşılık gelen kural bazlı lineer sonuç parametreleridir. Kontrolcü yapısı 27 adet ayarlanabilir parametre içermektedir. TS<sup>(HSS)</sup> Kontrolcü çıkışı, tüm kural sonuçlarının kural ateşleme

derecelerine göre ağırlıklandırılmış ortalaması alınarak elde edilmektedir. Buna göre kontrolcü çıkışı Denklem 6.3’de verilmiştir.

$$v(e, \dot{e}) = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \mu_{ij}(e, \dot{e}) (a_{ij}e + b_{ij}\dot{e} + c_{ij})}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \mu_{ij}(e, \dot{e})}, i, j = 1, 2, 3 \quad (6.3)$$

$\mu_{ij}(e, \dot{e})$ , konum hatası ve hata değişim hızı için tanımlanan  $i$ . ve  $j$ . bulanık kümeler karşılık gelen kural ateşleme derecesini ifade etmektedir. Kural ateşleme derecesi, ilgili giriş üyelik fonksiyonlarının çarpımı yoluyla elde edilmekte olup, bu yapı TS<sup>(HSS)</sup> bulanık kontrolcülerde yaygın olarak kullanılan ağırlıklı ortalama durulaştırma yöntemine karşılık gelmektedir.

Her bir bulanık kural için üç adet lineer sonuç parametresi tanımlanması, FPGA üzerinde 1 ms örnekleme periyodunda gerçek zamanlı uygulamalarda hesaplama yükünü artırmaktadır. Bu nedenle hem donanım kaynaklarının etkin kullanılması hem de optimizasyon sürecinin hızlandırılması amacıyla parametre uzayı sadeleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle PSO algoritması kullanılarak 27 parametrelili tam TS kontrolcü optimize edilmiştir. Ardından, kural sonuç parametreleri arasındaki benzerliği nicel olarak değerlendirmek için Denklem 6.4’de verilen benzerlik metriği tanımlanmıştır.

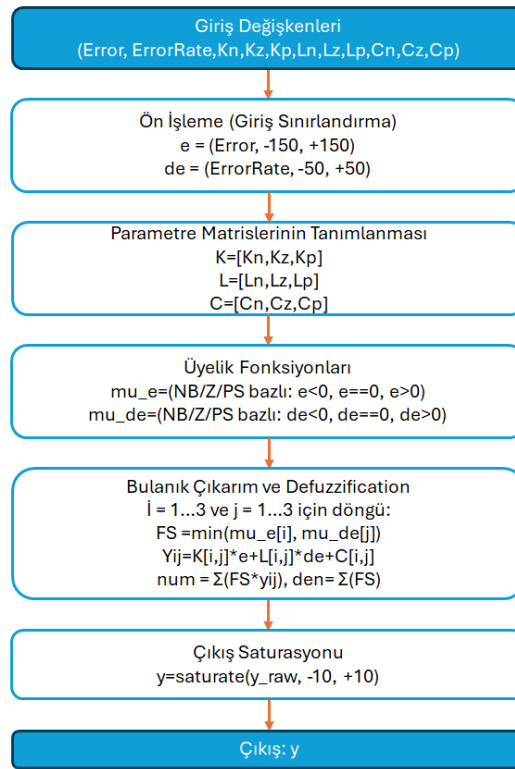
$$S_{pq} = \frac{|a_p - a_q|}{\max(|a_p|, |a_q|)} + \frac{|b_p - b_q|}{\max(|b_p|, |b_q|)} + \frac{|c_p - c_q|}{\max(|c_p|, |c_q|)} \quad (6.4)$$

Bu metrikte  $S_{pq}$ ,  $p$  ve  $q$  numaralı kurallara ait lineer sonuç parametre vektörleri arasındaki görece benzerlik düzeyini ifade etmektedir. Burada  $a_p, b_p, c_p$  ve  $a_q, b_q, c_q$  ilgili kurallara ait lineer sonuç (consequent) katsayılarını temsil etmektedir. Tanımlanan benzerlik metriği, parametreler arasındaki ölçekten bağımsız farkları dikkate alarak, yapısal olarak benzer davranış sergileyen kuralların tespit edilmesine olanak tanımaktadır.  $S_{pq} < 0.05$  koşulunu sağlayan  $p$  ve  $q$  numaralı kurallar benzer kabul edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda, benzer davranış sergileyen dokuz kural, kural sonuç parametrelerinin giriş uzayındaki negatif, sıfır ve pozitif bölgelerde gösterdiği davranışlara göre üç ana kural kümesine ayrılmıştır. Burada “negatif”, “sıfır” ve “pozitif” ifadeleri, giriş değişkenlerinin (konum hatası ve hata değişim hızı) ilgili bulanık bölgelerinde etkin olan ve benzer lineer sonuçlar

üreten kural gruplarını temsil etmektedir. Aynı kural kümesine düşen kurallara ait lineer sonuç parametrelerinin aritmetik ortalaması alınarak, her bir küme için tek bir temsilci parametre seti elde edilmiş ve bu işlem Denklem 6.5'deki gibi tanımlanmıştır.

$$K_i = \frac{1}{n_i} \sum a_{ij}, L_i = \frac{1}{n_i} \sum b_{ij}, C_i = \frac{1}{n_i} \sum c_{ij}, \quad i = j = 1,2,3 \quad (6.5)$$

Burada  $n_i$ ,  $i$ . kümeyle ait kural sayısını ifade etmektedir. Bu yaklaşım sayesinde TS kontrolcü yapısı 27 parametrelili tam modelden 9 parametrelili sadeleştirilmiş bir yapıya dönüştürülmüştür. Kontrolcü performansı, zamana ağırlıklandırılmış mutlak izleme hatasını temel alan Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, parametre sadeleştirme sonrasında kontrolcü performansında belirgin bir düşüş meydana gelmediğini göstermiştir. Bu kapsamda 9 parametrelili olarak geliştirilen TS kontrolcü tasarımı yapısı Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7: TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü tasarım adımları

Şekil 6.7'de verilen TS tasarımında giriş sinyallerinin ön işlenmesi ve sınırlandırılması katmanında HSS'nin konum hatası "e" ve konum hatasının türevi "de" işlenmektedir. Sistemin aşırı sönümlenmesini engellemek ve HSS'nin fiziksel tasarım ve üretim sınırlarının

korunması amacıyla her iki giriş sinyali doyma blokları ile sınırlandırılmıştır. Burada “e” değeri -150mm ile +150mm aralığında ve “de” değeri ise -50mm ile +50mm aralığında sınırlandırılmıştır. Parametre matrislerinin ve kural tabanının oluşturulması katmanında, TS kontrolcünün her bir kuralında yer alan katsayılar, HSS’nin 300–700 mm çalışma aralığı içerisindeki belirli bir alt bölgede, ilgili çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmış dinamik davranışını temsil etmektedir. Bu kapsamda, sistemin doğrusal olmayan yapısı farklı konum bantlarında yerel doğrusal modeller ile ifade edilmekte ve her bir model ilgili kural katsayıları ile tanımlanmaktadır. Bulanıklaştırma ve üyelik derecelerinin belirlenmesi katmanında giriş değişkenleri “Negatif Büyük (NB)”, “Sıfır (Z)” ve “Pozitif Küçük (PS)” olarak tanımlanan dilsel değişkenlere atanmaktadır. Burada giriş sinyalinin anlık değerine göre hangi dilsel kümenin ne derecede aktif olduğunu belirlemektedir. Son olarak algoritmanın çekirdek mekanizması olan çıkarım aşamasında, her bir kural için ateşleme seviyesi girişlerin üyelik derecelerinin minimumu alınarak hesaplanmaktadır ve her bir yerel kuralın çıktısı Denklem 6.6 ile belirlenmiştir.

$$y_{ij} = K_{ij} \cdot e + L_{ij} \cdot \dot{e} + KC_{ij} \quad (6.6)$$

HSS’nin konum kontrolü için PDV’ye uygulanacak çıkış sinyalinin -10V ile +10V aralığında yazılımsal olarak sınırlandırılması yapıldıktan sonra nihai olarak çıkış sinyali elde edilmiştir. Sadeleştirilmiş TS kontrolcü yapısına ait parametreler, meta-sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılarak belirlenmiş ve FPGA üzerinde 1 ms örnekleme periyodunda deterministik olarak çalıştırılabilir bir kontrol yapısı elde edilmiştir.

### 6.2.1 TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü parametre optimizasyonu

Hidrolik sistemin konum kontrol performansını iyileştirmek amacıyla birinci dereceden TS<sup>(HSS)</sup> bulanık mantık kontrolcü tasarlanmış ve optimizasyon algoritmalarıyla en iyilenmiştir. Optimizasyon sürecinde simülasyon süresi 5 saniye olarak belirlenmiş, popülasyon büyüklüğü 30 birey, maksimum iterasyon sayısı ise 150 olarak seçilmiştir. Kontrolcü parametrelerine ait sınırlar ise deneysel analizler sonucunda belirlenen güvenilir çalışma aralıkları doğrultusunda tanımlanmıştır. TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcünün 9 parametresinin kestirilmesi kapsamında tüm optimizasyon süreçlerinde ortak amaç fonksiyonu ITAE performans ölçütü kullanılmıştır.

ITAE yapısında hata büyüklüğü ve hatanın sistemde var olma süresi birlikte cezalandırılarak, sistemin hızlı tepki vermesi ve düşük aşım ile referans sinyalini takip etmesi hedeflenmektedir. Optimizasyon algoritmaları, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan hidrolik sistem modeli üzerinde yürütülmüştür. Denklem 6.7’de  $e(t)$  sistem hatasını, “t” ise simülasyon süresini göstermektedir. ITAE fonksiyonu, hatanın büyüklüğünü ve süresini birlikte cezalandırarak sistemin hızlı tepki vermesini ve hata genliğinin erken azaltılmasını teşvik eder. Böylece elde edilen kontrolcü hem aşım değerini hem de yerleşme süresini minimize etmektedir. TS kontrolcünün KN, KZ, KP, LN, LZ, LP, CN, CZ, CP olmak üzere dokuz parametresi için PI kontrolcü yapısında olduğu gibi PSO, HHO ve SMA algoritmaları parametre optimizasyonu için kullanılmıştır. Tüm algoritmalar, aynı popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve parametre sınır aralıkları ile çalıştırılmıştır. Böylece algoritma performanslarının karşılaştırılması, yalnızca arama stratejilerine dayandırılmış ve deneysel koşullar açısından eşitlik sağlanmıştır.

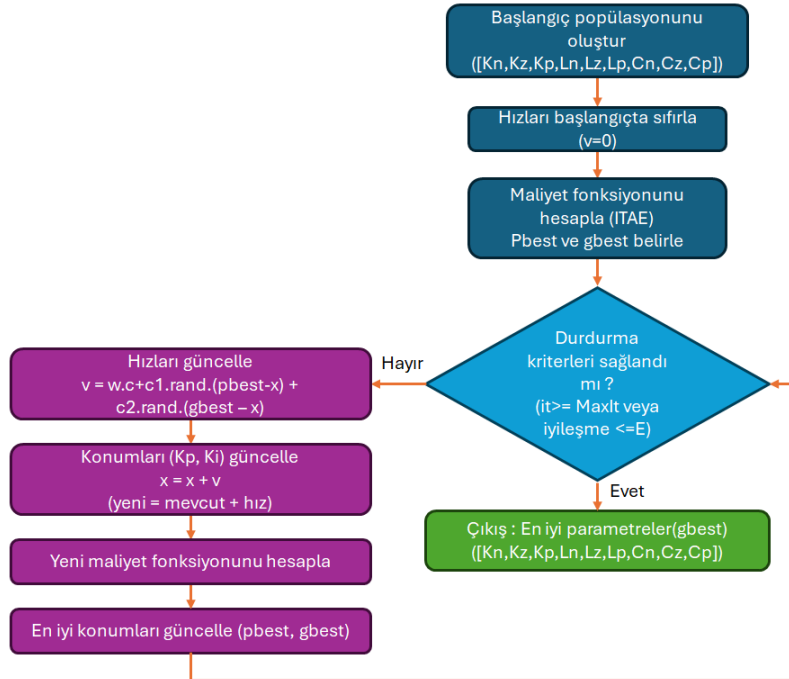
PSO algoritmasında atalet katsayısı  $w=0.7$ , öğrenme katsayıları  $c_1=c_2=1.5$  olarak belirlenmiş ve her iterasyonda  $w$  değeri 0.98 oranında azaltılmıştır. Her üç algoritma da, aynı arama aralıklarında ( $K_i \in [-1,1]$ ,  $L_i \in [-0.01,0.01]$ ,  $C_i \in [-0.5,0.5]$ ) çalıştırılmış ve maksimum 20 iterasyon sonunda en küçük ITAE değeri elde eden çözüm kümesi seçilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları 27 parametrelili tam TS modeline kıyasla yalnızca 9 parametreyle gerçekleştirilen bu sadeleştirilmiş yapının hesaplama yükünü büyük ölçüde azalttığını, buna karşın denetim başarımında belirgin bir kayıp oluşturmadığını göstermiştir. ITAE tabanlı maliyet fonksiyonu hem hızlı tepki hem de düşük hata enerjisi arasında etkili bir denge kurmuştur. Gerçekleştirilen 9 parametrelili tasarım,  $TS^{(HSS)}$  kontrolcünün FPGA üzerinde 1 ms döngü süresiyle deterministik olarak çalıştırılmasını mümkün kılmıştır.

$TS^{(HSS)}$  parametre optimizasyonunda kullanılan ilk algoritma olan PSO yapısı Şekil 6.8’de verilmiştir. Akış şemasına göre optimizasyon süreci,  $N_{Pop} = 30$  adet parçacıktan oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlatılmaktadır. Her bir birey, bulanık kontrolcünün dokuz ayar parametresini ( $x = [K, N_K, Z_K, P_L, N_L, Z_L, P_C, N_C, Z_C, P]$ ) temsil etmektedir. Başlangıçta tüm parçacıkların hızları sıfıra eşitlenmekte ( $v = 0$ ) ve her bir parçacığın (parametre setinin) başlangıç maliyeti, ITAE hesaplanmaktadır. İlk maliyet hesaplamaları ve en iyi değerlerin (pbest, gbest) belirlenmesinin ardından algoritma, “Durdurma kriteri?” kontrolü ile ana iteratif döngüye girmektedir. Durdurma koşulu

sağlanmadığı sürece (örneğin  $it < MaxIt$  olduğunda, “Hayır” dalı izlenir), her bir parçacık için aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulanmaktadır.

Hız güncelleme adımında parçacığın hızı, atalet ağırlığı ( $w$ ), bireysel en iyi konumu ( $pbest$ ) ve sürü genelindeki en iyi konumu ( $gbest$ ) dikkate alınarak güncellenmektedir. Burada  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları sırasıyla bireysel (cognitive) ve sosyal (social) öğrenme katsayılarını ifade etmektedir. Konum Güncelleme adımında her bir parçacığın konumu güncellenmekte ve clip fonksiyonu aracılığıyla önceden tanımlanmış sınırlar içinde kalması sağlanmaktadır. Maliyet Hesaplama adımında güncellenen konumlar için ITAE maliyeti yeniden hesaplanmakta ve her bir parçacığa ait güncel performans değeri belirlenmektedir. En iyi değerleri güncelleme adımında ise yeni maliyet değeri, parçacığın kişisel en iyi değeri ( $pbest_i$ ) ve sürünün global en iyi değeri ( $gbest$ ) ile karşılaştırılmakta; eğer daha düşük bir maliyet elde edilmişse, bu değerler güncellenmektedir.

Bu iteratif süreç, durdurma kriteri ( $it \geq MaxIt$  veya  $iyilesme \leq \epsilon$ ) sağlanıncaya kadar sürmektedir. Kriter sağlandığında (“Evet” dalı), döngü sonlanmakta ve algoritma çıktı olarak  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü için en düşük maliyeti sağlayan global en iyi parametre setini ( $gbest$ ) döndürmektedir.



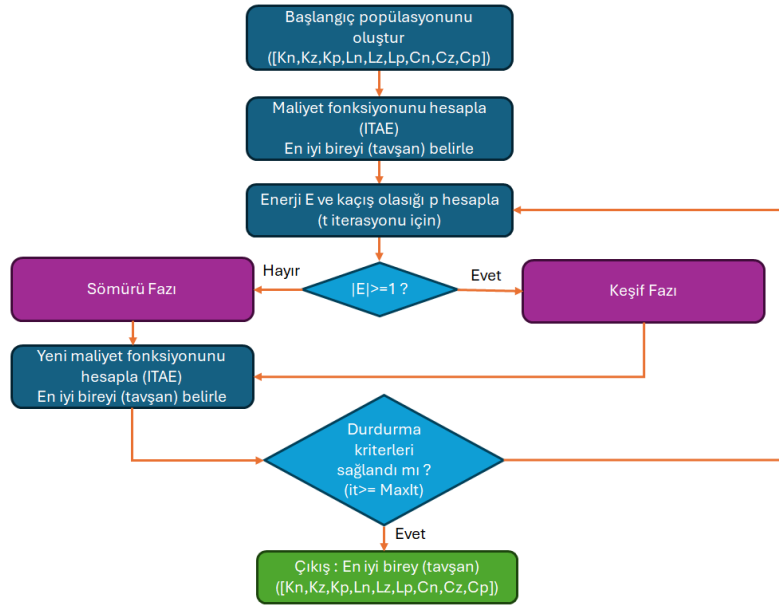
**Şekil 6.8:**  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü için PSO algoritması tabanlı parametre optimizasyonu yapısı

TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü parametre optimizasyonunda kullanılan HHO yapısı Şekil 6.9'da verilmiştir. Algoritma, 30 bireyden (şahin) oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlatılmaktadır. Her bir birey, bulanık kontrolcünün dokuz ayar parametresini ( $x = [K, N_K, Z_K, P_L, N_L, Z_L, P_C, N_C, Z_C, P]$ ) temsil etmektedir. Bu parametreler, önceden tanımlanmış sınırlar dâhilinde rastgele olarak başlatılmakta ve clip fonksiyonu kullanılarak belirtilen sınırlar içerisinde kalmaları sağlanmaktadır.

Başlangıç aşamasında, her bir bireyin (şahinin) maliyeti ITAE kriterine göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, söz konusu parametrelerin üç girişli, dokuz kurallı T-S bulanık kontrolcü modeli üzerinde uygulanmasıyla elde edilen sistem cevabına dayanmaktadır. En düşük ITAE değerine sahip birey “Tavşan” olarak adlandırılmakta ve bu birey mevcut en iyi çözüm ( $x\_best$ ) olarak belirlenmektedir. Bu adımın ardından algoritma, maksimum iterasyon sayısına ( $MaxIt = 150$ ) ulaşıncaya kadar süren ana döngüye girmektedir. Her iterasyonun ( $t$ ) başında, keşif ve sömürü fazları arasındaki geçişi yöneten enerji parametresi ( $E$ ) güncellenmektedir. Daha sonra, enerji parametresinin mutlak değeri kontrol edilerek algoritmanın hangi fazda çalışacağı belirlenmektedir.

$|E| \geq 1$  olduğu keşif fazı kısmında, enerji mutlak değeri 1'e eşit veya 1'den büyük olduğunda algoritma keşif fazına girmektedir. Bu durumda her bir şahin, popülasyondan rastgele seçilen bir bireyi referans olarak konumunu güncellemektedir.  $|E| < 1$  olduğu sömürü kısmında ise Enerji mutlak değeri 1'den küçük olduğunda algoritma sömürü fazına geçmektedir. Şemada gösterildiği üzere bu faz, “Yumuşak Kuşatma” ve “Sert Kuşatma” stratejilerine ayrılmaktadır. Bu aşamaları takiben, “Hızlı Dalış” ile “Kaçış adımı” uygulanarak şahinin konumu son kez güncellenmektedir.

Her iki fazdan sonra elde edilen yeni konum clip fonksiyonu aracılığıyla sınırlandırılmakta ve ilgili bireyin yeni maliyet değeri ITAE ölçütüne göre yeniden hesaplanmaktadır. Eğer yeni maliyet mevcut en iyi çözümden daha düşük ise, Tavşan'ın konumu bu yeni değerle güncellenmektedir. Bu süreç, “Döngü devam etsin mi?” ( $t < MaxIt$ ) koşulu Hayır (Bitti) oluncaya kadar yinelenmektedir. Algoritma tamamlandığında, çıktı olarak Sugeno TS bulanık kontrolcü için en iyi parametre seti ( $x\_best$ ) elde edilmektedir.

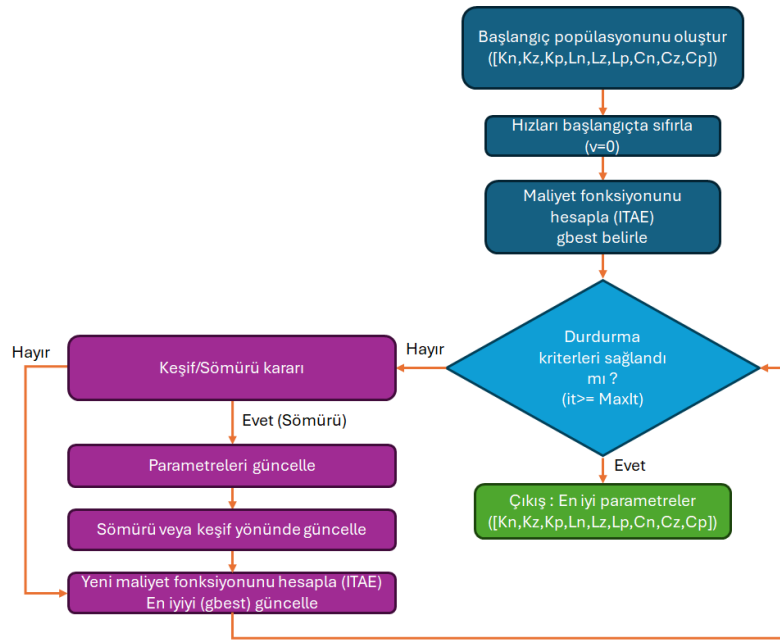


**Şekil 6.9:** TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü için HHO algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı

TS<sup>(HSS)</sup> Kontrolcü için kullanılan ve Şekil 6.10’da verilen SMA algoritması, otuz bireyden (NPop) oluşan bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlatılmaktadır. Her bir birey, bulanık kontrolcünün dokuz ayar parametresini ( $x = [K, N_K, Z_K, P_L, N_L, Z_L, P_C, N_C, Z_C, P]$ ) temsil etmektedir. Bu parametreler, önceden belirlenmiş sınırlar içerisinde (örneğin  $K_i \in [0.15, 0.35]$ ) rastgele olarak başlatılmakta ve clip fonksiyonu aracılığıyla bu sınırlar dâhilinde kalmaları sağlanmaktadır.

Başlangıç aşamasında her bireyin maliyeti, ITAE kriterine göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, bireylere ait parametrelerin üç girişli, dokuz kurallı TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü modelinde kullanılmasıyla elde edilen sistem cevabına dayanmaktadır. Popülasyonun tüm bireylerinin maliyetleri hesaplandıktan sonra, bireyler en iyi çözüm ( $x_{best}$ ) ve en kötü çözüm ( $x_{worst}$ ) olarak sıralanmaktadır. Bu sıralamaya dayanarak, her birey için ağırlık katsayıları belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eden ana döngü başlatılmaktadır. Her iterasyonun (t) başında algoritmanın uyarlamalı parametreleri güncellenmektedir. Daha sonra,  $r \sim U(0,1)$  olacak şekilde  $r < p$  koşulu kontrol edilerek algoritmanın “Sömürü” veya “Keşif” fazlarından hangisinde çalışacağı belirlenmektedir. ( $r < p$ ) durum olan “sömürü fazında” birey,  $x_{best}$  etrafında salınım stratejisini kullanarak konumunu güncellemektedir. ( $r \geq p$ ) durum olan “keşif fazında” birey, rastgele komşuluk stratejisini kullanarak konumunu güncellemektedir. Her iki fazdan hangisi uygulanırsa uygulansın, bireyin elde ettiği yeni konum clip fonksiyonu aracılığıyla sınırlandırılmakta ve

yeni maliyeti (ITAE) yeniden hesaplanmaktadır. Eğer bu yeni maliyet değeri, mevcut en iyi maliyetten daha düşükse,  $x_{best}$  bu yeni değerle güncellenmektedir. Bu işlem, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrarlanmaktadır. Şemada gösterildiği üzere “Hayır” dalı durumunda algoritma “Uyarlamalı Parametrelerin Güncellenmesi” adımına geri dönmektedir. Maksimum iterasyon sayısına (MaxIt = 150) ulaşılması veya yeterli iyileşme sağlanması durumunda (“Evet” dalı), döngü sonlanmakta ve algoritmanın çıkışı olarak TS kontrolcüyeye ait en iyi parametre seti ( $x_{best}$ ) elde edilmektedir.



**Şekil 6.10:** TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü için SMA algoritması tabanlı parametre optimizasyon yapısı

TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcü için Simulink ortamında gerçekleştirilen parametre optimizasyon çalışmalarında TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcünün 9 parametresi için elde edilen değerler Tablo 6.2’de verilmiştir.

**Tablo 6.2:** TS<sup>(HSS)</sup> Kontrolcü için optimizasyon sonucunda bulunan değerler.

	K1	K2	K3	L1	L2	L3	C1	C2	C3
<b>HHO</b>	0.27	0.21	0.29	-0.00040	-0.00032	-0.00028	0.055	0.038	0.068
<b>SMA</b>	0.22	0.17	0.24	-0.00030	-0.00027	-0.00022	0.062	0.041	0.072
<b>PSO</b>	0.23	0.18	0.25	-0.00035	-0.00030	-0.00025	0.0607	0.0400	0.0700

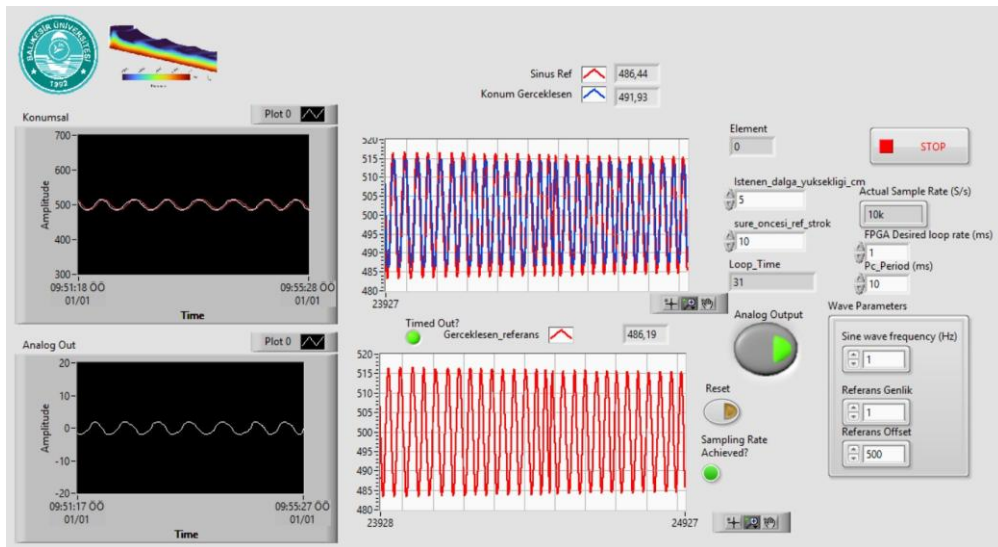
## 7. LABVIEW TABANLI KONTROL VE DENEYSEL SONUÇLAR

LabVIEW yazılımında NI CRIO-9074 donanımı içerisinde bulunan hem RT Target hem de FPGA için program geliştirilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında gerçek zamanlı dalga üretimi için FPGA’da çalışan LabVIEW yazılımı geliştirilmiştir.

### 7.1 FPGA Tabanlı Kontrol

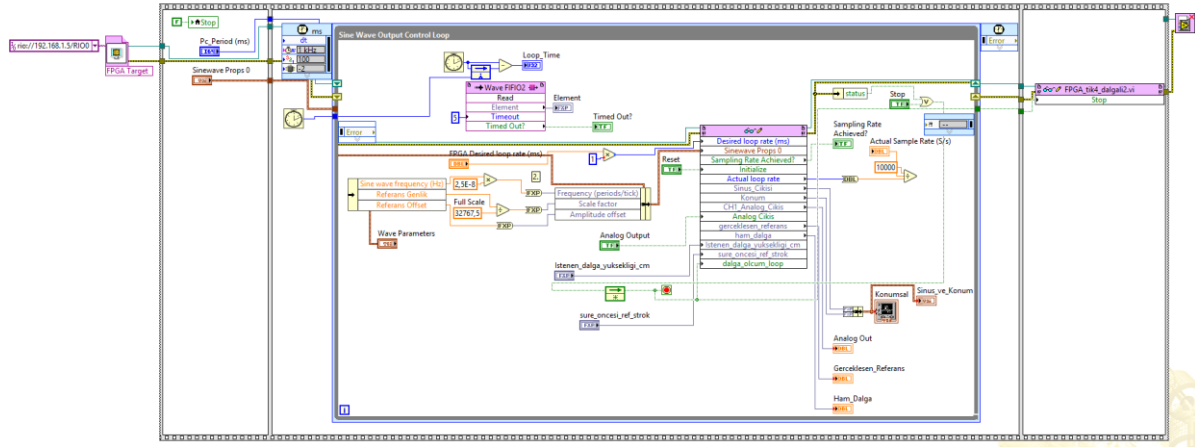
Geliştirilen gerçek zamanlı dalga üretim yazılımında FPGA içinde gerçekleştirilen paralel döngü kullanımları ile 1ms döngü zamanı ile çalışmaktadır. NI CRIO-9074 RT Target yapısında kullanıcıdan alınan ve üretilmesi istenen dalga yüksekliği ve baskın dalga frekansı bilgileri FPGA yapısına aktarılmıştır. Burada istenilen dalganın otonom şekilde üretilmesi için HSS’nin hassas konum kontrolü ve dalga yüksekliği ölçümü paralel çalışan 2 adet döngü ile sağlanmıştır. Bu yaklaşım, sistemin farklı görevlerini optimum şekilde dağıtarak hem zamanlama açısından tutarlı hem de yazılım bakımından modüler bir yapı sunmaktadır. FPGA yapısı gerçek zamanlı olarak otonom dalga üretimini gerçekleştirirken RT Target tarafı sistem izleme, veri kaydı ve kullanıcı etkileşimlerini yönetmektedir.

FPGA-RT Target arasında kullanılan yazılım Şekil 7.1’de ön panel program yapısı olarak verilmiştir. Bu ön panel aracılığıyla, kullanıcı tarafından girilen üretilecek olan dalganın genlik, frekans bilgileri doğrudan FPGA tarafına gönderilmektedir. Öte yandan FPGA yapısı RTTarget ile haberleşerek gerçek zamanlı parametre gösterimlerinin GUI üzerinde görüntülenmesi sağlanmıştır.



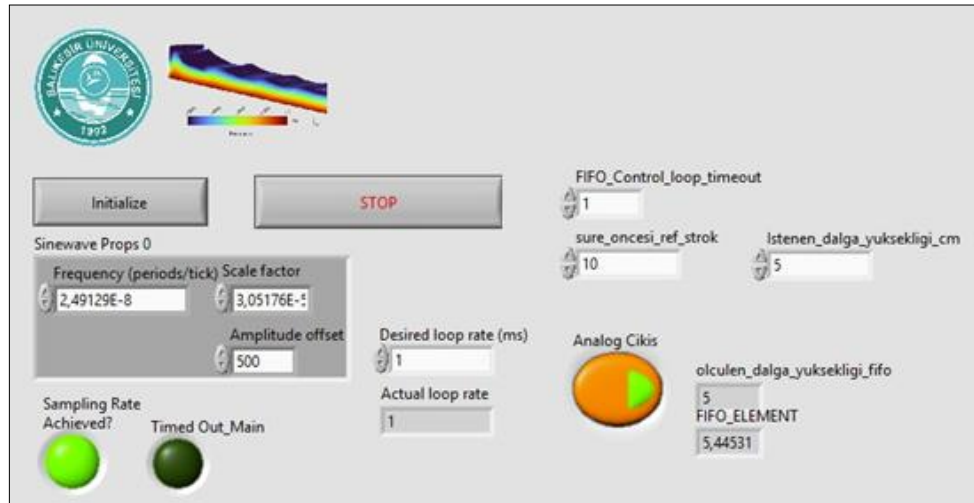
Şekil 7.1: RT Target GUI ön panel

LabVIEW yazılımında ön panel tarafında yer alan ve geliştirilen yazılımın program görüntüsü Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2: RT Target GUI arka panel

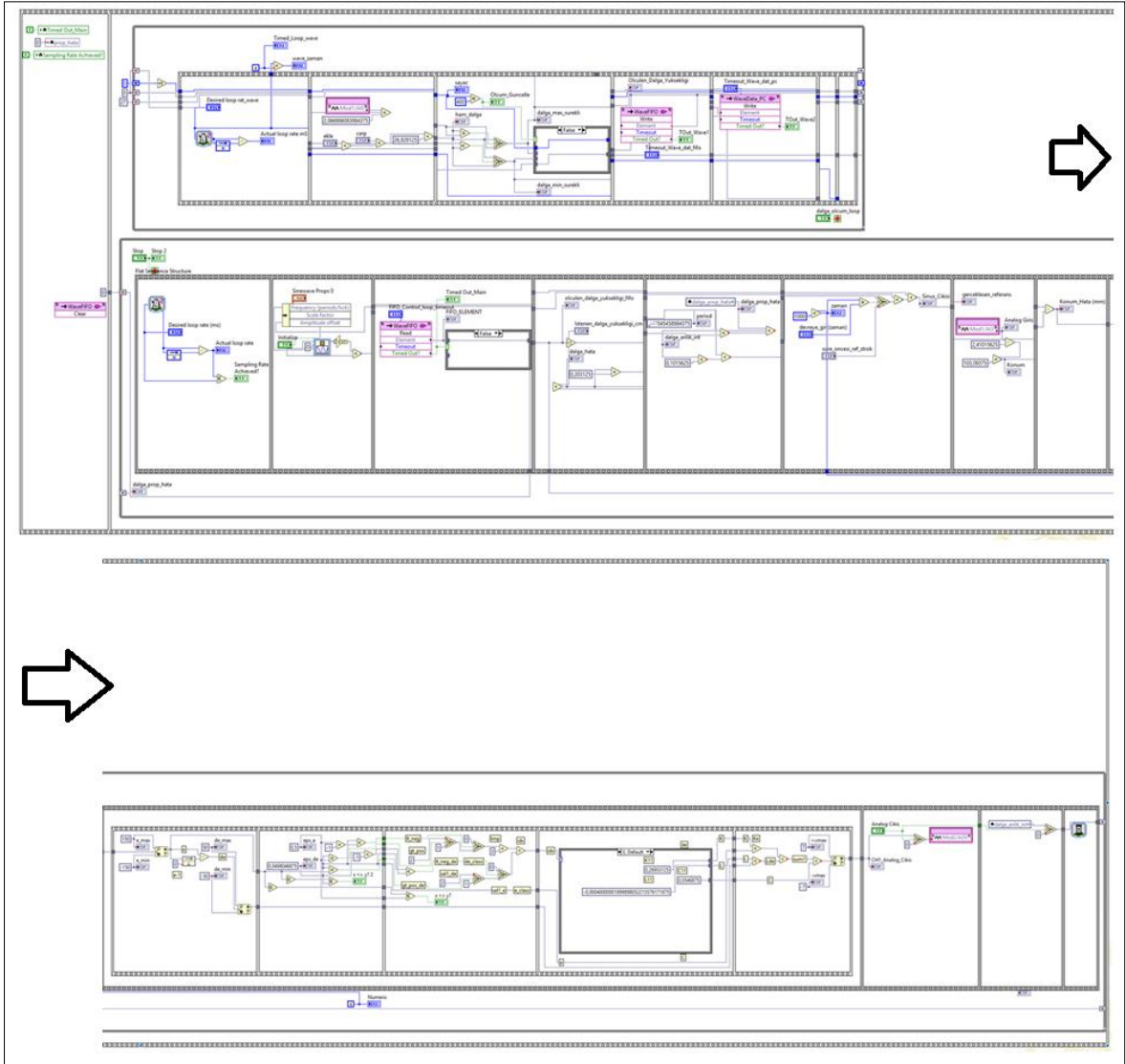
Dalga üretimi noktasında kullanılan FPGA yazılımına ait GUI ise Şekil 7.3’de verilmiştir. Kullanıcı buradan sadece parametrik güncelleme ve görüntüleme gerçekleştirebilmektedir ve herhangi bir grafik çizimi gerçekleştirilmemektedir.



Şekil 7.3: FPGA yazılımı GUI ön panel

FPGA Yazılımına ait ana program yapısı ise Şekil 7.4’de LabVIEW arka panel yazılımı olarak verilmiştir. Burada kullanılan nihai konum kontrolör yapısı olarak TS kontrolcü ve HHO parametreleri ile optimize edilmiş katsayılar kullanılmıştır. Üst kısımda yer alan kısımda dalga yüksekliği gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilerek diziyeye aktarılmakta

sonrasında ise dalga yüksekliğinin minimum ve maksimum noktaları arasındaki fark alınarak nihai dalga yüksekliği verisi elde edilmektedir. Hemen alt kısmında yer alan ikinci yazılım döngüsünde ise ilk döngü ile paralel olarak hem  $PI^{(HSS)}$  kontrolcü hem de  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü HSS'nin konum kontrolünü kullanıcının girdiği dalga üretim parametreleri doğrultusunda sağlamaktadır. Sonrasında ise FIFO kullanımı ile bu veriler RT Target kısmına aktarılmaktadır.

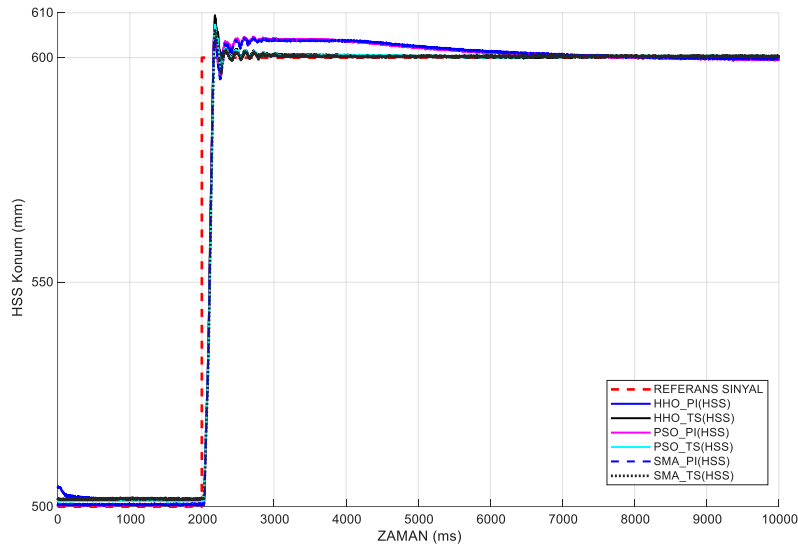


Şekil 7.4: FPGA yazılımı arka panel

## 7.2 HSS Gerçek Zamanlı Konum Kontrolü

$PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü için Simulink ortamında optimizasyon sonucunda elde edilen kontrolcü parametreleri doğrudan gerçek zamanlı olarak HSS üzerine uygulanmıştır. Bu parametreler gerçek zamanlı olarak HSS ile test edilmek üzere test sinyali olarak basamak

ve sinüzoidal sinyaller seçilmiştir. Gerçek sistem üzerinden elde edilen “Basamak Sinyal” Şekil 7.5’de verilmiştir.



Şekil 7.5: HSS gerçek zamanlı basamak sinyal yanıtı

Şekil 7.5’de verilen sinyal yapıları gerçek zamanlı sistem üzerinden kayıt altına alındıktan sonra kontrolcü performansları Tablo 7.5’de karşılaştırılmıştır.

**Tablo 7.1:**  $PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü hidrolik sistem basamak sinyal sonuçları.

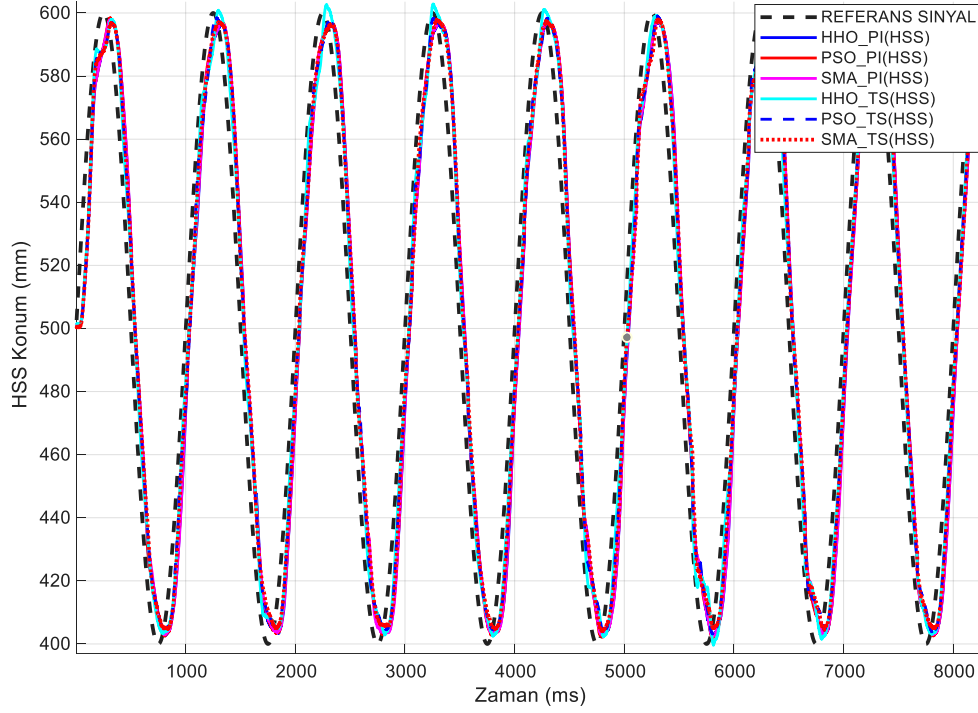
KONTROLCÜ	YERLEŞME ZAMANI (ms)	YÜKSELME ZAMANI (ms)	AŞIM (%)	KARARLI DURUM HATASI (mm)	RMSE (mm)	MAE (mm)	ITAE (mm)
HHO_ $PI^{(HSS)}$	2144.8	2094	0.858	0.345	9.198	2.682	8.03e+07
PSO_ $PI^{(HSS)}$	2145.8	2094.9	1.021	0.345	9.300	2.433	7.74e+07
SMA_ $PI^{(HSS)}$	2146.5	2095.7	0.809	0.345	9.330	2.469	7.97e+07
HHO_ $TS^{(HSS)}$	2146.5	2094.0	1.552	0.143	8.999	1.650	3.80e+07
PSO_ $TS^{(HSS)}$	2152.0	2096.8	1.199	0.175	9.073	1.624	3.96e+07
SMA_ $TS^{(HSS)}$	2150.6	2099.2	0.927	0.436	9.140	1.672	4.00e+07

Tablo 7.1 incelendiğinde,  $PI^{(HSS)}$  tabanlı kontrolcülerde tüm algoritmalar için yerleşme ve yükselme zamanlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, sistemin dinamik cevabının kullanılan optimizasyon algoritmasından büyük ölçüde etkilenmediğini göstermektedir. Bununla birlikte, aşım değerleri SMA- $PI^{(HSS)}$  için en düşük (%0.809) olup, bu algoritmanın  $PI^{(HSS)}$  yapısında daha sönümlü bir cevap elde ettiğini göstermektedir.

TS tipi bulanık kontrolcüye geçildiğinde, özellikle HHO-TS<sup>(HSS)</sup> modelinde aşım oranının %1.552'ye yükselmesi, bulanık sistemin daha agresif bir kontrol davranışı sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte TS<sup>(HSS)</sup> yapısındaki tüm algoritmaların yükselme süreleri PI<sup>(HSS)</sup> yapısına göre hafifçe artmıştır. Öte yandan PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcülerde kararlı durum hatası tüm algoritmalar için 0.345 mm olarak sabit kalmıştır. Buna karşın TS<sup>(HSS)</sup> yapısında hata işareti yön değiştirmekte ve negatif değerlere inmektedir. Özellikle SMA- TS<sup>(HSS)</sup>'da 0.436 mm değeriyle en düşük kararlı durum hatası elde edilmiştir. Bu durum, TS<sup>(HSS)</sup> yapısının durağan hatayı etkin biçimde azaltabildiğini ortaya koymaktadır.

RMSE ve MAE değerleri ise TS<sup>(HSS)</sup> yapısında genellikle PI<sup>(HSS)</sup>'ye göre daha düşük seyretmektedir. Örneğin HHO-TS<sup>(HSS)</sup> için RMSE = 8.999 mm ve MAE = 1.650 mm iken, HHO-PI'de bu değerler sırasıyla 9.198 mm ve 2.682 mm'dir. Bu fark, bulanık yapının geçici rejimdeki hata büyüklüğünü azaltma yeteneğini göstermektedir.

ITAE açısından değerlendirildiğinde, TS tabanlı kontrolcüler PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcülere göre anlamlı bir iyileşme sağlamaktadır. HHO-TS<sup>(HSS)</sup>'da  $3.80 \times 10^7$  olan ITAE değeri, HHO-PI<sup>(HSS)</sup>'nin  $8.03 \times 10^7$  değerine kıyasla yaklaşık %53'lük bir iyileşmeye işaret etmektedir. Benzer biçimde PSO ve SMA algoritmalarında da bu oran %48-60 arasında değişmektedir. Genel olarak, TS<sup>(HSS)</sup> tipi bulanık kontrolcülerin PI<sup>(HSS)</sup> kontrolcülere kıyasla daha düşük RMSE, MAE, ITAE değerleri ve daha küçük kararlı durum hataları ürettiği görülmektedir. Bu durum, bulanık yapının sistem dinamiklerine daha esnek bir uyum sağlayarak performansı artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte HHO algoritması, TS<sup>(HSS)</sup> yapısında ITAE bakımından en iyi sonucu vermiştir. Basamak sinyalin ardından aynı parametreler ile gerçek sistem üzerinde Sinüs sinyal yapısı denenmiştir. 1Hz olarak denenilen kontrol sinyali frekansında HSS strok değeri 200 mm olarak belirlenmiş ve HSS'nin dinlenme pozisyonu 500 mm üzerinden çalıştırma gerçekleştirilmiştir. PI<sup>(HSS)</sup> ve TS<sup>(HSS)</sup> kontrolcülere ait olarak elde edilen ölçüm grafikleri Şekil 8.2'de verilmiştir.



**Şekil 7.6:** HSS sinüzoidal sinyal konum cevabı

Grafikte yer alan veriler ile oluşturulan performans kriterleri Tablo 7.2’de verilmiştir. Sinüzoidal işaretin tüm kontrolcüler için karşılaştırılmasında RMSE, MAE ve ITAE kullanılmıştır.

**Tablo 7.2:**  $PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü hidrolik sistem sinüzoidal sinyal sonuçları.

KONTROLÇÜ	RMSE	MAE	ITAE
HHO_ $PI^{(HSS)}$	20.449	18.511	9.2236e+08
PSO_ $PI^{(HSS)}$	19.579	17.747	8.8493e+08
SMA_ $PI^{(HSS)}$	20.419	18.479	9.2176e+08
HHO_ $TS^{(HSS)}$	16.046	14.666	7.2567e+08
PSO_ $TS^{(HSS)}$	18.059	16.502	8.2098e+08
SMA_ $TS^{(HSS)}$	18.675	17.07	8.5082e+08

Tablo 7.2 incelendiğinde,  $TS^{(HSS)}$  tabanlı kontrolcüler, tüm algoritmalar için  $PI^{(HSS)}$  kontrolcülere kıyasla belirgin biçimde daha düşük RMSE değerleri üretmiştir.  $TS^{(HSS)}$  kontrolcülerin sinüzoidal referans sinyali daha hassas bir şekilde takip ettiğini ve sistemin genel hata enerjisini azalttığı görülmektedir. Özellikle HHO- $TS^{(HSS)}$  yapısı 16.046 mm ile en düşük RMSE değerini elde etmiştir. MAE açısından incelendiğinde ise benzer bir

eğilim gözlenmektedir.  $PI^{(HSS)}$  Tabanlı sistemlerde  $MAE \approx 18$  mm civarında iken,  $TS^{(HSS)}$  kontrolcülerde bu değer 14.6–17.0 mm aralığına düşmüştür.

En düşük MAE değeri yine HHO- $TS^{(HSS)}$  algoritmasında olmuştur. Son olarak ITAE açısından sistemin uzun vadeli izleme performansını değerlendirmede kritik bir ölçüttür.  $PI^{(HSS)}$  Kontrolcülerde ITAE değerleri  $8.8 \times 10^8$ – $9.2 \times 10^8$  aralığındayken,  $TS^{(HSS)}$  yapısında  $7.25 \times 10^8$ – $8.50 \times 10^8$  aralığına düşmüştür. Bu, yaklaşık %15–20 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. En düşük ITAE değeri  $7.256 \times 10^8$  ile HHO– $TS^{(HSS)}$  kontrolcüde elde edilmiştir.  $PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcüler için optimizasyon süreci, PSO, HHO ve SMA olmak üzere farklı algoritmalar altında yürütülmüş ve her iki kontrolcü türü için farklı maliyet fonksiyonu yapılarına dayandırılmıştır.  $PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcüde yalnızca temel ITAE ölçütü ile optimizasyon yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan  $PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcülerin bu tez çalışması için geçerli olan algoritma karşılaştırma yapısı Tablo 7.3’de verilmiştir.

**Tablo 7.3:**  $PI^{(HSS)}$  ve  $TS^{(HSS)}$  kontrolcü karşılaştırması.

ÖZELLİK	$PI^{(HSS)}$ KONTROLCÜ	$TS^{(HSS)}$ KONTROLCÜ
Kazanç tipi	Sabit	Girişe bağlı değişken
Adaptasyon	Yok	Doğal olarak mevcut
Doğrusal olmayan sistemlere uyum	Düşük	Yüksek
Maliyet fonksiyonuna bağımlılık	Yüksek	Düşük
Pürüzsüzlük ve doyunluk cezaları	Gereklidir	Yapısal olarak sağlanır
Optimizasyon süreci	Çoklu yerel minimum, zor yakınsama	Daha düzgün, hızlı yakınsama

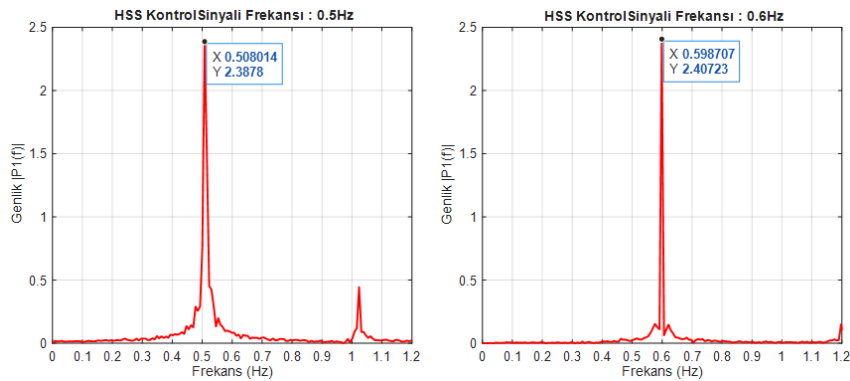
Gerçekleştirilen kontrolcü tasarımı ve kontrolcü parametre optimizasyon çalışması sonuçlarına göre, sinüzoidal referans altında  $TS^{(HSS)}$  tipi bulanık kontrolcülerin klasik  $PI^{(HSS)}$  kontrolcülere kıyasla daha yüksek izleme doğruluğu ve daha düşük hata değerleri sağladığını göstermektedir. Özellikle HHO algoritması,  $TS^{(HSS)}$  modelinin parametre uzayında en etkin optimizasyonu gerçekleştirerek RMSE, MAE ve ITAE değerlerinde anlamlı bir iyileşme sunmuştur. HHO- $TS^{(HSS)}$  yapısının doğrusal olmayan sistemlerde yüksek hassasiyetli takip performansı için en uygun kombinasyon olduğunu elde edilen sonuçlarla belirlenmiştir.

### 7.3 Üretilen Dalga Frekansının Spektral Doğrulanması

HSS'ye farklı frekanslarda uygulanan kontrol sinyallerinin dalga üretim performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla dalga kanalında bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde HSS'ye 0.5Hz, 0.6Hz, 0.7Hz, 0.8Hz, 0.9Hz ve 1.0Hz frekanslarında periyodik referans sinyalleri farklı frekans ve genlik değerlerinde uygulanmış ve her bir durumda dalga probu aracılığıyla kanal içerisindeki gerçek zamanlı dalga yüksekliği verileri kaydedilmiştir. Elde edilen bu ham dalga verileri Matlab ortamına aktarılmış ve her bir frekans için Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) uygulanarak üretilen dalgaların frekans bileşenleri analiz edilmiştir. Ayrık zamanlı bir dalga yüksekliği sinyali  $x(n)$  için FFT matematiksel olarak Denklem 7.1'de tanımlanmıştır.

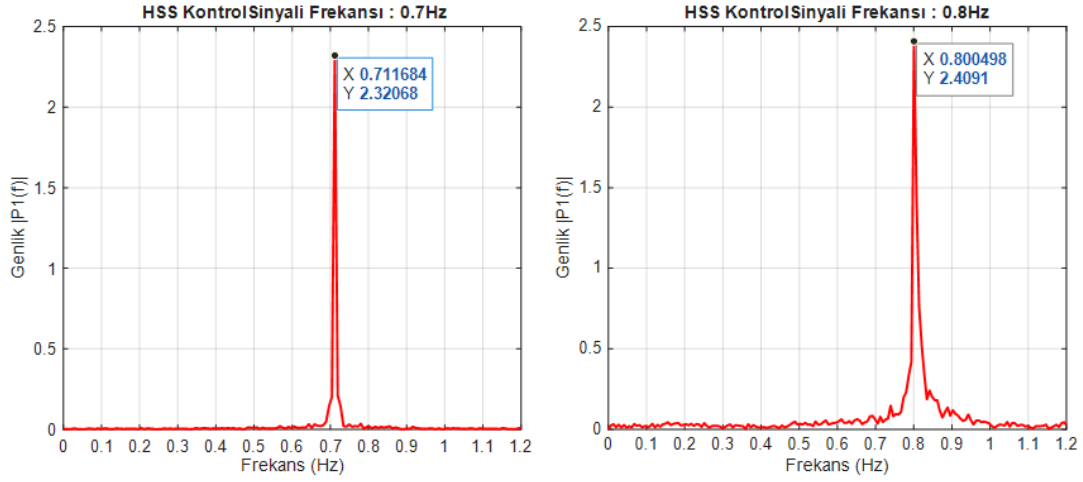
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0,1, \dots, N-1 \quad (7.1)$$

Denklem 7.1'de " $N$ " örnek sayısını, " $n$ " zaman indeksini ve " $k$ " frekans indeksini temsil etmektedir. FFT sonucunda elde edilen genlik spektrumu kullanılarak, dalga sinyalinde en yüksek genliğe sahip frekans bileşeni baskın frekans olarak tanımlanmıştır. Baskın frekans, sistem tarafından üretilen dalganın temel frekansını temsil etmektedir. 0.5Hz – 1.0Hz aralığında 0.1Hz'lik frekans artırımları ve belirli HSS strok değerlerine dalga kayıtları 10ms aralıklar ile kaydedilmiştir. Elde edilen farklı deney kayıtlarına FFT uygulanmış ve Şekil 7.7 ile Şekil 7.10 aralığında FFT sonuçları verilmiştir. Şekil 7.7'de 0.5Hz ve 0.6Hz'lik HSS kontrol sinyali frekansı ile elde edilen su dalgasına uygulanan FFT sonuçları görülmektedir. Burada HSS kontrol sinyali frekansı ile üretilen su dalgasının frekansının örtüştüğü yatay eksende verilen frekans bileşeninde açıkça görülmektedir.



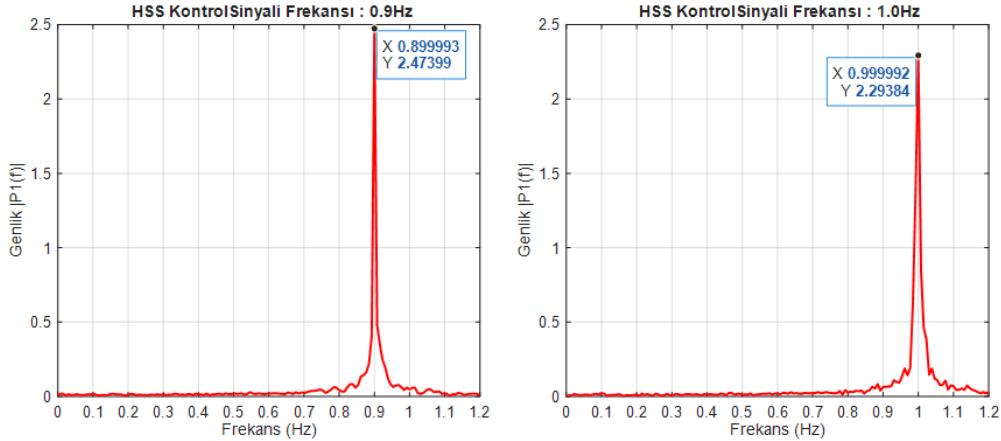
Şekil 7.7: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-I

Şekil 7.8’de ise HSS’ye uygulanan kontrol sinyali frekansı 0.7Hz ile 0.8Hz ile üretilen su dalgasının baskın frekansının örtüştüğü yatay eksende verilen frekans bileşeni ile gösterilmiştir.



Şekil 7.8: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-II

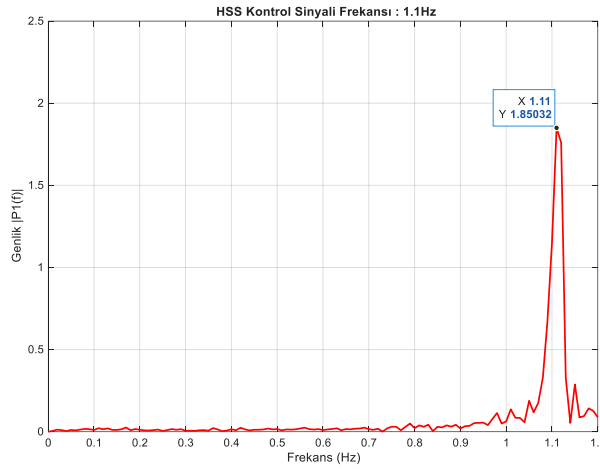
HSS’ye 0.9Hz ile HSS ana tasarım frekansı olan 1.0Hz kontrol sinyali uygulanmış ve üretilen su dalgasının baskın frekansının örtüştüğü yatay eksende verilen frekans bileşeni Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



Şekil 7.9: Dalga Sinyali FFT Uygulaması-III

HSS tasarım frekansı olan 1Hz’in üzerine çıkılarak 1.1Hz frekansında yine dalga kanalında dalga üretimi yapılmış ve üretilen su dalgasının baskın frekansı ile HSS kontrol sinyali frekansının 1.1Hz frekansta dahi örtüştüğü belirlenmiştir. Elde edilen baskın frekans bileşeni Şekil 7.6’de gösterilmiştir. HSS’ye uygulanacak en yüksek frekans güvenlik gerekçesi ile

1.1Hz ile sınırlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda HSS kontrol sinyali frekansı ile üretilen su dalgalarının baskın frekansının aynı olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır.



**Şekil 7.10:** Dalga Sinyali FFT Uygulaması-IV

Sonuç olarak, farklı frekanslarda gerçekleştirilen FFT analizleri, geliştirilen kontrol yapısının kullanıcı tarafından talep edilen dalga frekansını yüksek doğrulukla üretebildiğini ve sistemin frekans takibi açısından güvenilir bir performans sunduğunu deneysel olarak kanıtlamıştır.

#### 7.4 Otonom Dalga Üretiminde Dalga Yüksekliği Kontrolü

Otonom dalga üretimi sürecinde dalga yüksekliğinin kararlı ve düzgün bir şekilde kontrol edilebilmesi, üst seviye dalga kontrolcüsünün performansına doğrudan bağlıdır. Bu amaçla, ikinci seviye  $PI^{(Dalga)}$  kontrolcüsünün oransal ve integral kazançlarının dalga yüksekliği kontrol performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla dalga kanalında farklı frekans ve dalga yüksekliği hedeflerinde birçok deney gerçekleştirilmiştir. PTWM sisteminde üst seviye dalga yüksekliği denetiminde kullanılan  $PI^{(Dalga)}$  kontrolcüsünün katsayıları, Yüzey Düzgünlük İndeksi (Surface Regularity Index -SRI) metriği kullanılarak belirlenmiştir. SRI değeri, otonom dalga üretimi sırasında elde edilen dalga yüksekliği sinyalinin düzenliliğini ve kararlı durum davranışını nicel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmış bir performans ölçütüdür. Genel olarak daha düşük SRI değerleri, dalga yüksekliği sinyalinin daha düzenli, kararlı ve hedeflenen genliğe daha yakın olduğunu göstermektedir. SRI hesaplamaları, sistemin gerçek çalışma koşullarını temsil etmesi amacıyla HSS'nin tasarım kriterinde nominal çalışma frekansı olan 1Hz'de gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında

referans dalga yüksekliği 10 cm olarak belirlenmiş ve her bir  $PI^{(Dalga)}$  katsayı konfigürasyonu için 10 dakikalık uzun süreli otonom dalga üretim deneyleri yapılmıştır. Uzun süreli deneylerin tercih edilmesinin temel nedeni, geçici rejim etkilerinin azaltılması ve SRI değerlerinin ağırlıklı olarak kararlı durum performansını yansıtmasının sağlanmasıdır. Dalga yüksekliği ölçümleri, tek bir dalga probundan elde edilen ölçüm verilerinin kaydedilmesi sonrasında her bir zamana karşılık gelen dalga yüksekliği verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SRI hesaplamalarında yalnızca 10 ms aralıklar ile kaydedilen zaman bilgisi ve dalga yüksekliği verileri kullanılmıştır.

SRI değerinin farklı  $PI^{(Dalga)}$  katsayı kombinasyonlarını ayırt edebilme yeteneğinin ortaya konması için integral kazanç sabit tutulmuş ve yalnızca oransal kazanç sistematik olarak değiştirilmiştir. Başlangıç deneylerinde, yalnızca oransal denetimin kullanıldığı durumda ( $K_i^{(Dalga)} = 0$ ) referans dalga yüksekliğinin izlenemediği ve sistemin kalıcı hata sergilediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle saf oransal denetim yapısı SRI değerlendirmesine dahil edilmemiştir. Ayrıca integral kazancın daha yüksek değerlere çıkarılmasının dalga yüksekliği sinyalinde düşük frekanslı salınımlara yol açtığı ve SRI metriği açısından anlamlı bir iyileşme sağlamadığı belirlenmiştir.  $K_p^{(Dalga)}$  ve  $K_i^{(Dalga)}$  katsayı aralığı çalışmanın amacı için temsil edici ve yeterli kabul edilmiştir. SRI değeri kararlı durum dalga yüksekliği sinyalinin RMS değeri ile mutlak ortalama değeri oranlanarak hesaplanmıştır. SRI'nin matematiksel ifadesi Denklem 7.2'de verilmiştir.

$$SRI = \frac{RMS(h_{ss})}{| \bar{h}_{ss} |} \quad (7.2)$$

Denklem 8.2'de verilen " $h_{ss}$ " kararlı durum bölgesine ait dalga yüksekliği sinyalini, " $RMS(\cdot)$ " dalga yüksekliği sinyalinin etkin (kök ortalama kare) değerini ve " $\bar{h}_{ss}$ " kararlı durum dalga yüksekliği sinyalinin ortalama değerini ifade etmektedir. Bu tanıma göre RMS değeri dalga yüksekliği sinyalindeki genlik dalgalanmalarını temsil ederken, ortalama değer hedeflenen dalga yüksekliği seviyesini göstermektedir. Dolayısıyla, RMS değerinin ortalama değere oranı olan SRI metriği, dalga üretiminin düzenliliğini ve genlik kararlılığını nicel olarak ortaya koymaktadır. En iyi  $K_p^{(Dalga)}$  ve  $K_i^{(Dalga)}$  katsayılarının belirlenmesinde  $SRI < 1.00$  koşulu, düzenli ve kararlı otonom dalga üretimi için hedef kriter olarak belirlenmiştir.

er bir  $PI^{(Dalga)}$  katsayı konfigürasyonu için hesaplanan SRI değerleri Tablo 7.4'de verilmiştir.

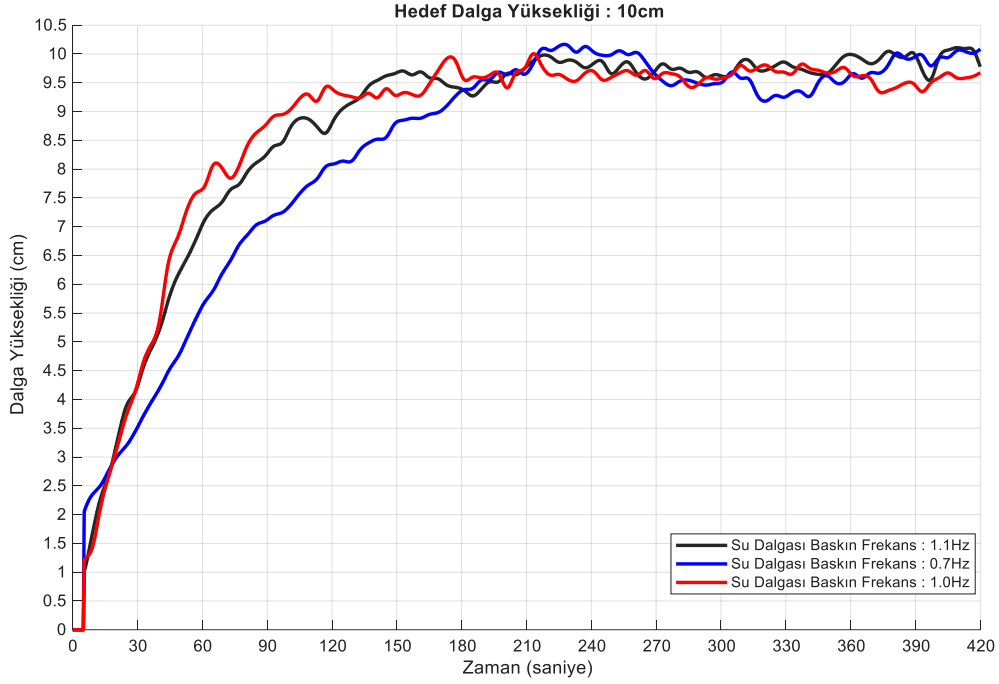
**Tablo 7.4:** Farklı  $PI^{(Dalga)}$  katsayıları için hesaplanan SRI sonuçları

İKİNCİ SEVİYE KONTROLCÜ KAYSAYISI, $K_p^{(Dalga)}$	İKİNCİ SEVİYE KONTROLCÜ KATSAYISI, $K_i^{(Dalga)}$	HEDEF DALGA YÜKSEKLİĞİ (cm)	SRI DEĞERİ
$K_p^{(Dalga)} = 0.1$	$K_i^{(Dalga)} = 0.1$	10	1.019
$K_p^{(Dalga)} = 0.2$	$K_i^{(Dalga)} = 0.1$	10	1.0026
$K_p^{(Dalga)} = 0.3$	$K_i^{(Dalga)} = 0.1$	10	0.9985

Tablo 7.4 incelendiğinde, oransal kazanç arttıkça SRI değerinin azaldığı ve dalga üretim düzenliliğinin iyileştiği açıkça görülmektedir. Yalnızca  $K_p^{(Dalga)} = 0.3$  ve  $K_i^{(Dalga)} = 0.1$  katsayı çifti, SRI <1.00 hedef kriterini sağlayarak düzenli ve kararlı otonom dalga üretimi elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu nedenle söz konusu katsayı çifti, üst seviye  $PI^{(Dalga)}$  kontrolcüsü için en uygun yapı olarak seçilmiş ve çalışmanın devamındaki tüm deneylerde kullanılmıştır.

Şekil 7.11'de 50 cm sabit su derinliğinde otonom olarak üretilen 0.7Hz, 1.0Hz ve 1.1Hz dalga frekanslarına ait zamana bağlı dalga yüksekliği değişimlerini göstermektedir. Tüm deneyler boyunca hedef dalga yüksekliği 10 cm olarak belirlenmiş ve sistemin farklı frekans koşulları altında referans dalga yüksekliğini izleme kabiliyeti karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm frekans koşullarında dalga yüksekliğinin başlangıç anından itibaren zamana bağlı olarak artış gösterdiği, bu artış sürecinde herhangi bir azalma gözlenmediği ve belirli bir geçiş süresinin ardından kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. Özellikle başlangıç evresinde gözlenen geçici rejim davranışının, dalga frekansına bağlı olarak farklı hızlarda gerçekleştiği dikkat çekmektedir. 0.7Hz frekanslı dalga üretimi durumunda, dalga yüksekliğinin hedef değere ulaşma süresinin görece daha uzun olduğu ancak buna karşılık 1.0Hz ve 1.1Hz frekanslarında sistemin daha hızlı bir yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Dalga üretiminde kararlı duruma ulaşıldıktan sonra, üç farklı frekans için elde edilen dalga yüksekliklerinin hedef değer olan 10 cm çevresinde salındığı ve kalıcı hatanın ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Özellikle nominal çalışma frekansı olan 1.0Hz için dalga yüksekliği salınımlarının daha sınırlı olduğu ve daha düzgün bir dalga profili elde edildiği dikkat çekmektedir. Buna karşılık, 1.1Hz frekansında daha belirgin

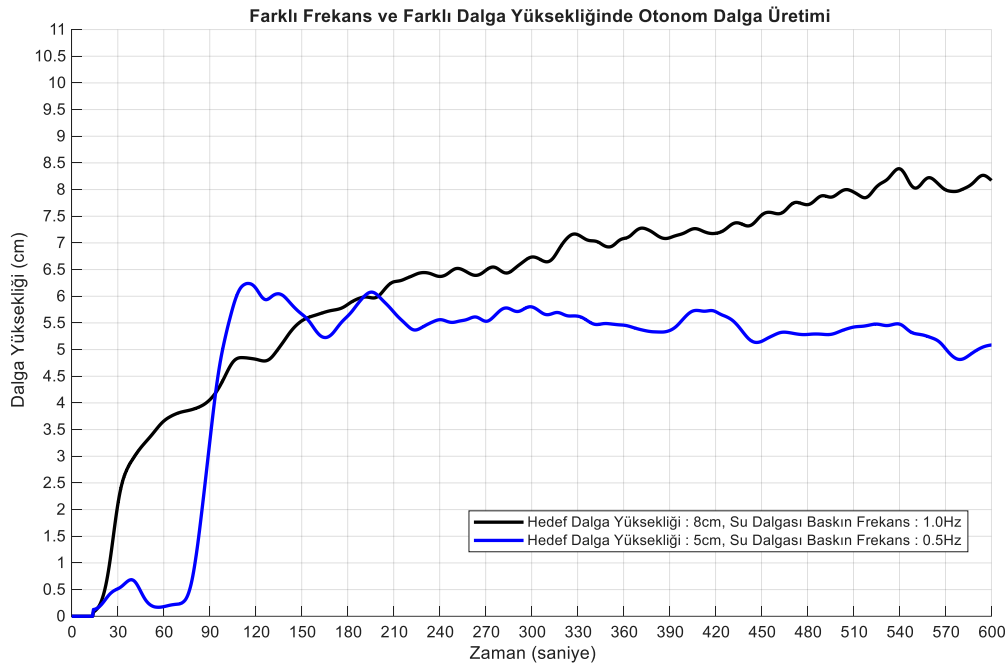
genlik dalgalanmaları gözlenmekte olup, bu durum yüksek frekanslarda artan hidrodinamik etkiler ve sistem ataletinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 7.11: Farklı frekanslarında otonom dalga üretimi dalga yüksekliği değişimleri-I

Şekil 7.12’de ise sabit su derinliği 60cm olarak değiştirilmiş ve otonom dalga üretimi aynı  $K_p^{(Dalga)}$  ve  $K_i^{(Dalga)}$  katsayıları ile gerçekleştirilmiştir. Verilen grafikte farklı hedef dalga yüksekliği ve frekans kombinasyonları altında elde edilen zamana bağlı dalga yüksekliği yanıtlarını göstermektedir. Grafik üzerinde mavi eğri, 8 cm hedef dalga yüksekliği ve 1.0Hz frekans için elde edilen sistem yanıtını; turuncu eğri ise 5 cm hedef dalga yüksekliği ve 0.5Hz frekans koşullarındaki dalga üretim performansını temsil etmektedir. Grafik incelendiğinde, her iki durumda da dalga yüksekliğinin başlangıç anından itibaren artış eğilimi sergilediği ve belirli bir geçiş süresinin ardından kararlı bir rejime ulaştığı görülmektedir. Ancak, hedef dalga yüksekliği ve frekansın birlikte değiştirilmesi nedeniyle, sistemin dinamik yanıt karakteristiklerinin belirgin biçimde farklılaştığı dikkat çekmektedir. Özellikle daha yüksek hedef dalga yüksekliği ve frekansın uygulandığı 8 cm–1.0Hz durumunda, dalga yüksekliğinin referans değere daha hızlı yaklaştığı ve kararlı duruma ulaşıktan sonra daha sınırlı genlik salınımları sergilediği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, 5 cm hedef dalga yüksekliği ve 0.5Hz frekans koşullarında dalga yüksekliği yanıtının daha yavaş bir geçici rejim sergilediği ve kararlı durumda dalga genliğinde daha belirgin dalgalanmaların oluştuğu görülmektedir. Bu durum, düşük frekanslı dalga üretiminde

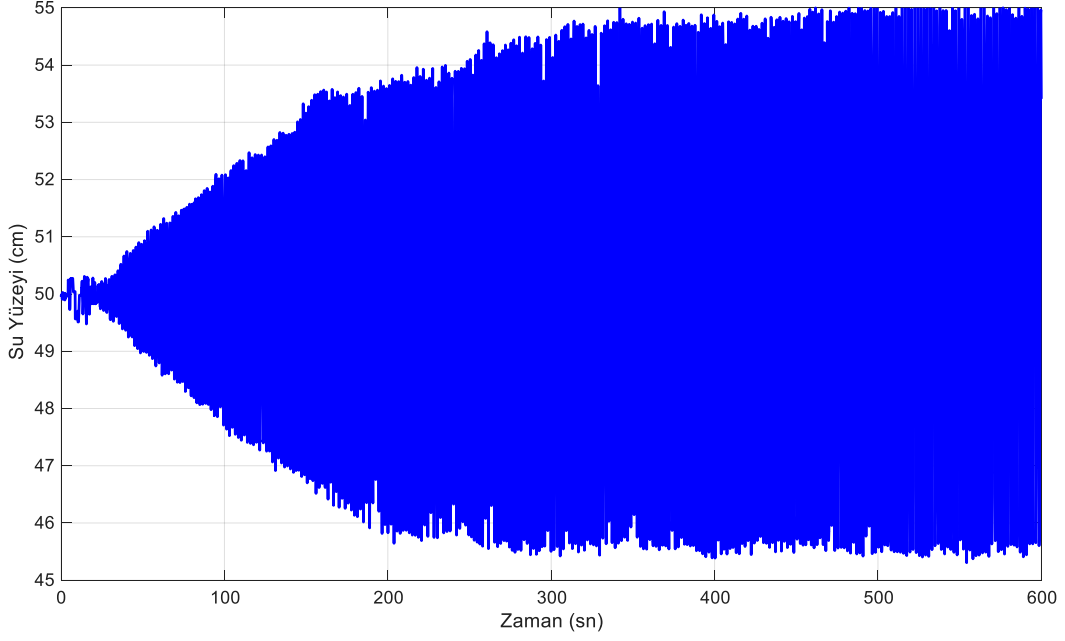
sistemin hidrodinamik gecikmelerinin ve dalga oluşum sürecinin daha baskın hale gelmesiyle ilişkilendirilmektedir.



**Şekil 7.12:** Farklı frekanslarda otonom dalga üretimi dalga yüksekliği değişimleri-II

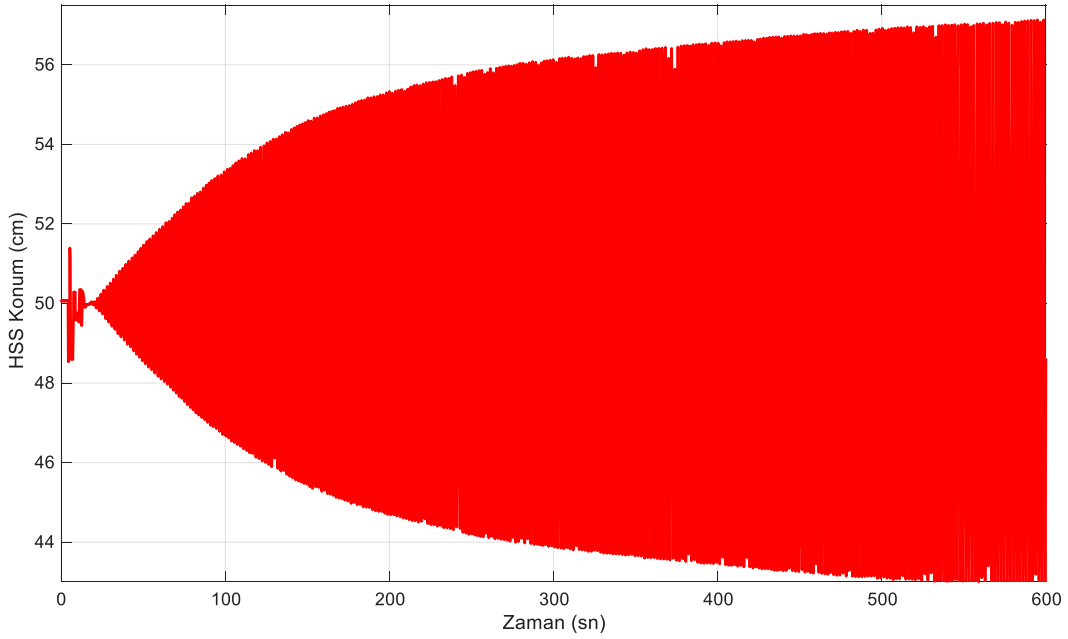
Şekil 7.13 ile Şekil 7.24 aralığında otonom olarak gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. İlk olarak sabit su derinliğinin 50 cm olarak seçildiği ve normal koşullar altında deney gerçekleştirme noktasını ifade eden bu yapıda 10'ar dakikalık kayıtlar farklı frekans değerleri için kayıt altına alınmıştır.

FPGA tabanlı olarak gerçekleştirilen otonom dalga deneylerinde dalga kanalı içerisinde suyun tamamen durgun hale gelmesi için 1'er saat beklenmiştir. Tüm deney kayıtlarında tamamen suyun durağan olduğu durumlarda deneylere başlanmıştır. Şekil 8.9 ile Şekil 8.11 aralığındaki grafikler incelendiğinde üretilen su dalgası frekansı 0.5Hz ve hedef dalga yüksekliği 10cm olarak seçilmiştir. Şekil 8.9'da 50 cm sabit su derinliği için üretilen su dalgalarının formu verilmiştir. Burada hedef dalga frekansı 0.5Hz olduğu için hedef su yüksekliğine üretilen su dalgasının yerleşme süresi 420. saniyeden sonra olduğu belirlenmiştir.



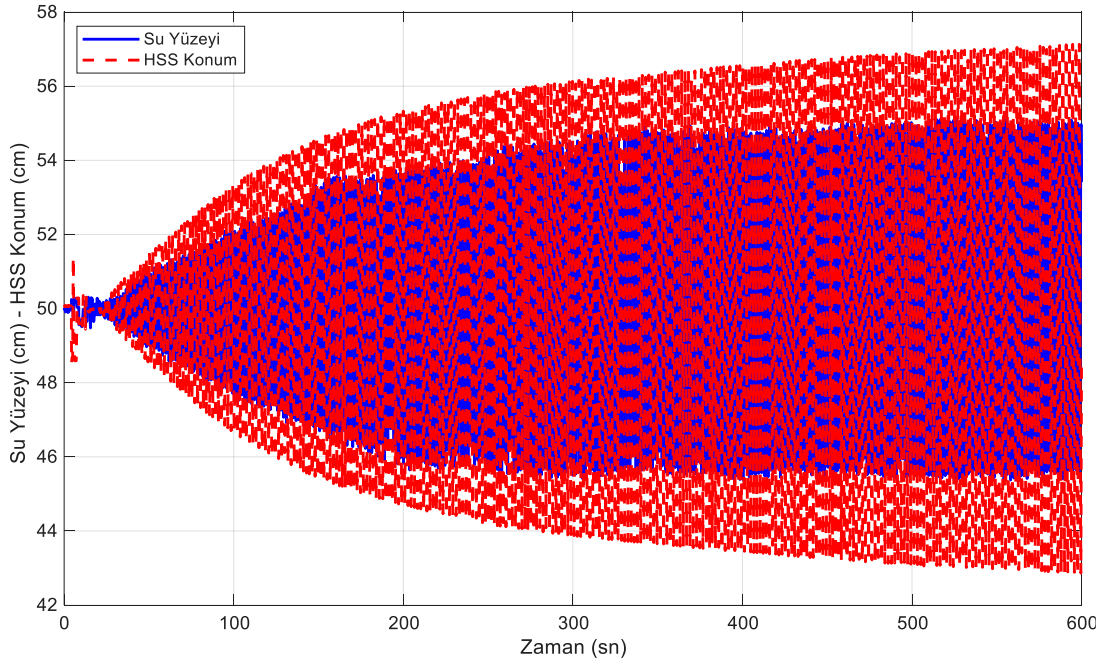
**Şekil 7.13:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-I

Aynı deney için HSS'nin konum grafiği ise Şekil 7.14'da verilmiştir. Otonom dalga üretimi öncesinde belirlenen strok değeri kadar hareket 0-10 saniye aralığında açıkça görülmektedir. HSS'ye başlangıçta bu hareketin uygulanmasının temel amacı, oluşturulan su dalgasının su seviye ölçüm probuna ulaşmasını sağlamak ve bu aşamadan sonra sistemin geri besleme temelli otonom çalışma moduna geçişini gerçekleştirmektir.



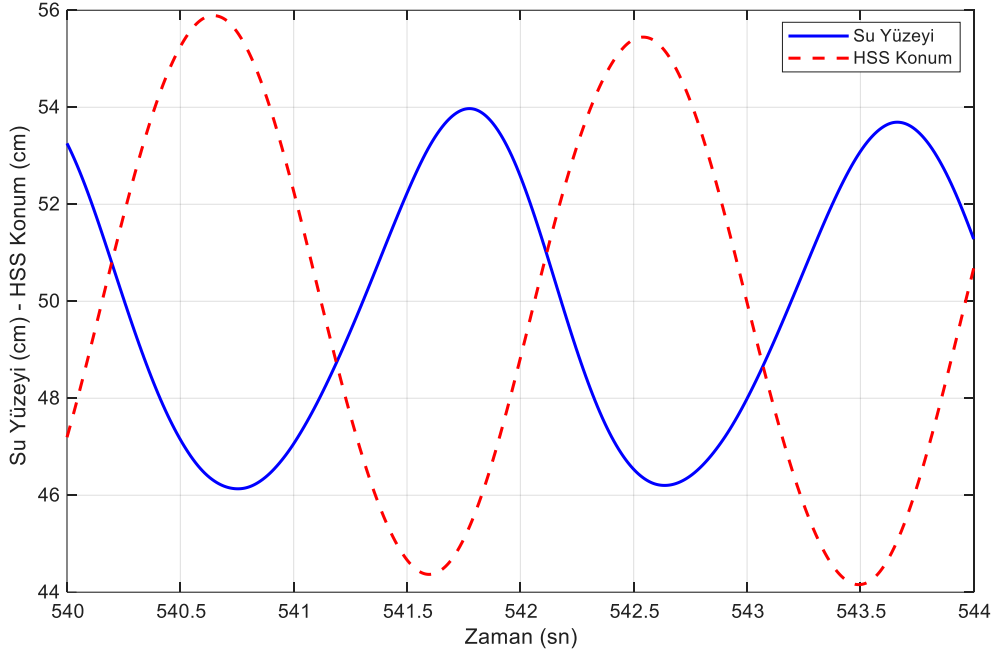
**Şekil 7.14:** Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-I

Şekil 7.15’de HSS konumu ve su yüzeyi değişimine ait iki veri setinin birleştirilmiş hali verilmiştir. Burada HSS konumunda otonom dalga üretimi öncesindeki çalışma ile su dalgalarının kanal sonuna doğru ilerleyip sonrasında otonom dalga üretimi tarafında kontrollü dalga üretimin sağlandığı açıkça görülmektedir.



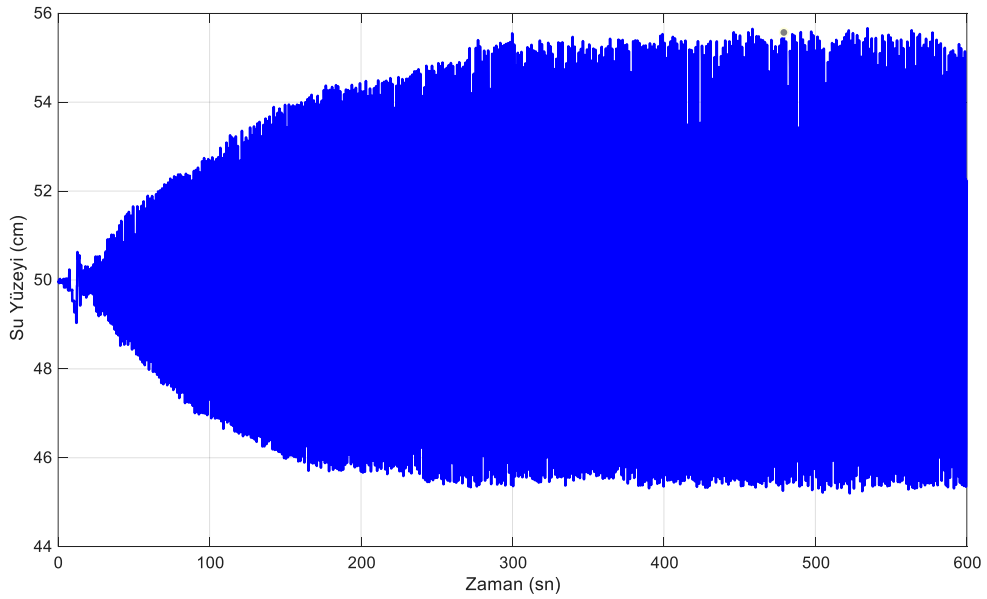
**Şekil 7.15:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-I

Şekil 7.16’da ise otonom dalga üretiminin 540.saniyesinden sonraki yakınlaştırılmış durumdaki HSS konum ve su yüzeyi değişimleri verilmiştir. Tüm yakınlaştırılmış grafiklerde başlangıç zamanı olarak 540.saniye sabit olarak seçilmiş ve dalga üretimi noktasındaki son bir dakikalık kısım suyun doğrusal olmayan etkilerinin en yüksek olduğu durum olarak değerlendirilmiştir. Dolayısı ile gerçekleştirilen ve gerçekleştirilecek olan deneylerde otonom dalga üretimi için su yüzeyi değişiminde deneyin son dakikası kritik öneme sahiptir. Verilen şekilden görüleceği üzere dalga üretimi 9.dakikada dahi kararlı şekilde devam etmektedir.



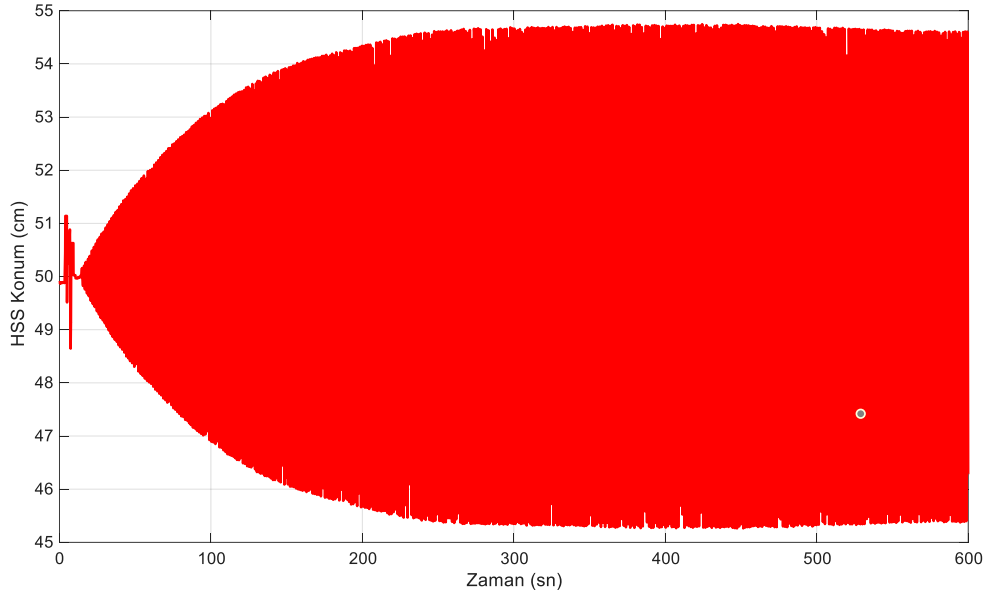
**Şekil 7.16:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-I

Şekil 7.17’de ise üretilecek su dalgasının frekansı 0.7Hz ve dalga yüksekliği ise 10 cm olarak belirlenmiştir. Bu noktada HSS ilk hareketinden itibaren hedeflenen dalga yüksekliğine ulaşma süresi 300. saniyeden sonra olmuştur. Üretilen su dalgalarında frekansın açık etkisi alınan su dalgası ölçümlerinden net bir şekilde görülmektedir. Burada 0.5Hz’lik deneye göre hedef yüksekliğe ulaşma süresi 100 saniye kadar geri gelmiştir.



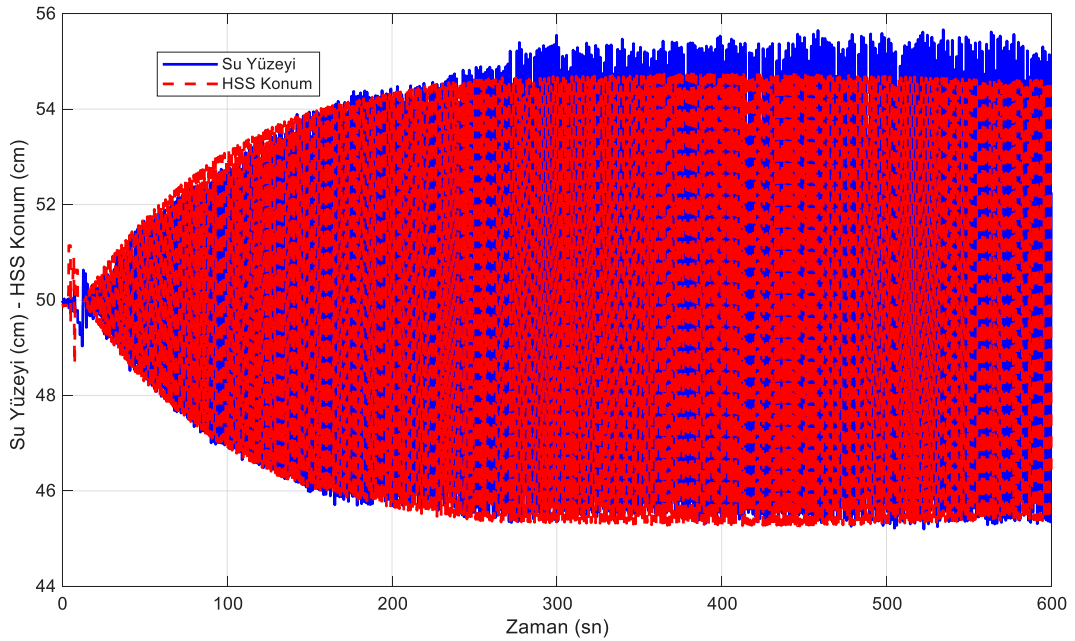
**Şekil 7.17:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-II

Şekil 7.18’de ise 0.7Hz frekansı için HSS’nin konum değişimi verilmiştir. HSS konum kontrolünün 200. ile 300. saniye aralığında düzenli hale geldiği görülmektedir.



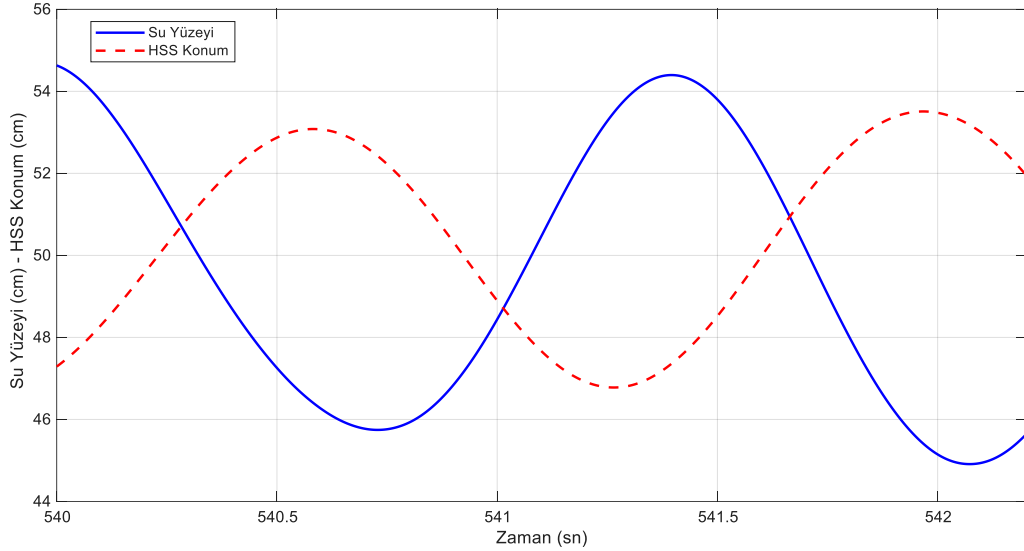
Şekil 7.18: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-II

Şekil 7.19’da 0.7Hz için HSS konumu ve su yüzeyi değişimine ait iki veri setinin birleştirilmiş hali verilmiştir. HSS konumundaki hareketin su dalgası üzerine yansımaları görülmektedir.



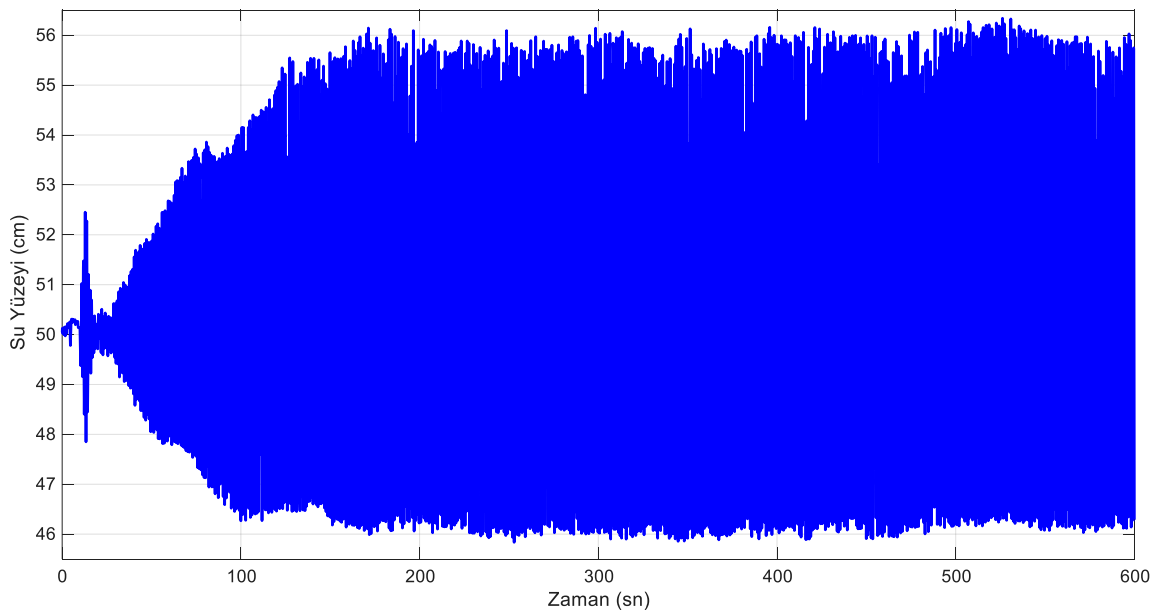
Şekil 7.19: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-II

Şekil 7.20’de 0.7Hz frekanslı dalga üretiminin 540. saniyesinden itibaren grafik başlangıcı yapılmış deneysel ölçüm verileri aktarılmıştır. Burada yine hedef dalga yüksekliği olan 10cm’ e ulaşıldığı açıkça görülmektedir.



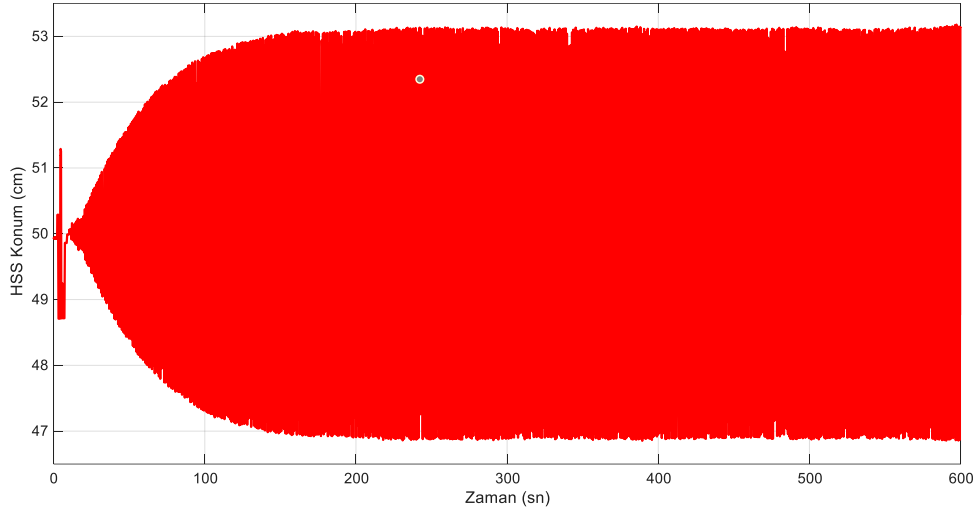
**Şekil 7.20:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-II

HSS tasarım frekansı ile aynı olan otonom dalga üretiminde su dalgası frekansı 1.0Hz ve hedef dalga yüksekliği 10 cm olarak seçilmiştir. HSS’nin konum grafiği Şekil 7.21’de verilmiş ve kararlı bölgenin 200 saniyenin altında olduğu belirlenmiştir.



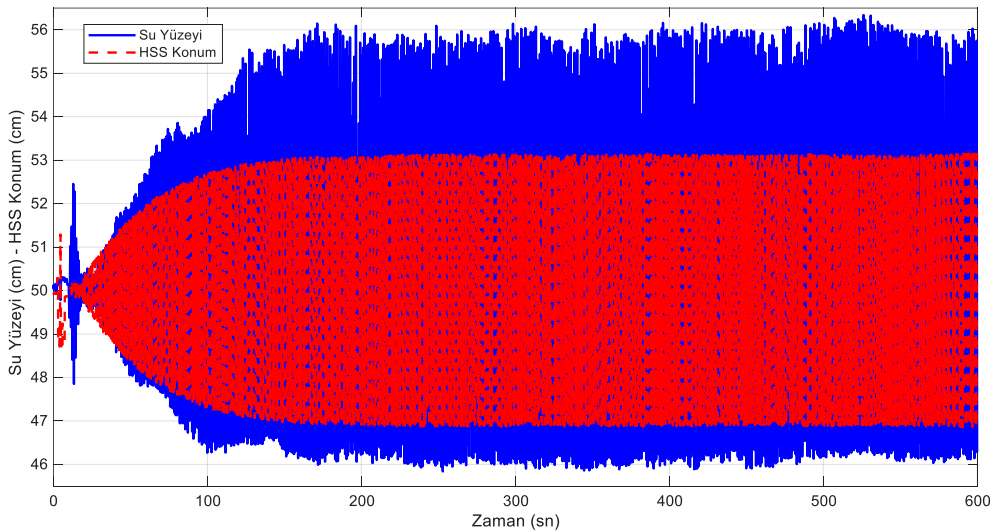
**Şekil 7.21:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-III

1Hz'lik baskın frekansa sahip otonom dalga üretiminde 10cm yüksekliğe sahip dalga üretimi için HSS konum grafiği Şekil 7.22'de verilmiştir. 0.5Hz ve 0.7Hz baskında frekanslarında gerçekleştirildiği deneylerde olduğu gibi su yüzeyi değişiminde çalışma yapısı kararlı durumdadır.



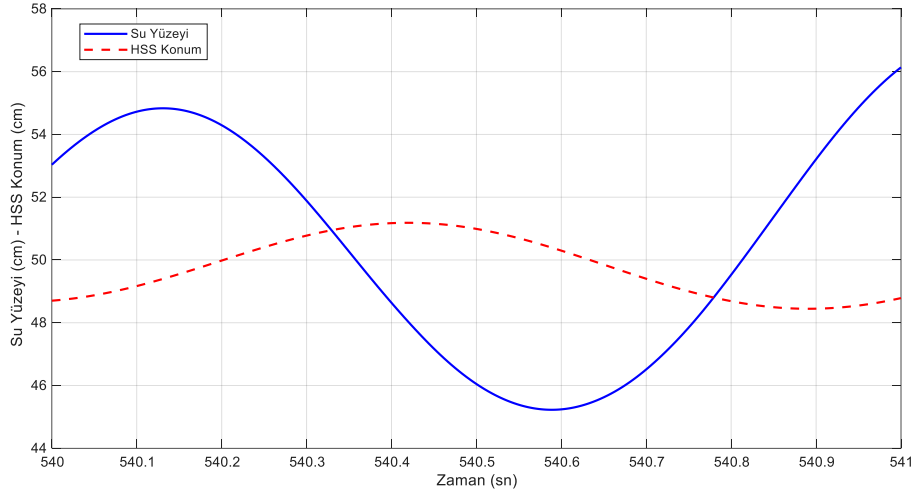
Şekil 7.22: Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-III

Şekil 7.23'de ise hem su yüzeyi değişimi hem de HSS konum grafiğine ait gerçek zamanlı ölçüm verileri birlikte verilmiştir. Tam olarak bu noktada üretilen su dalgasının su yüzeyinde oluşturduğu etkide su yüzeyi dikey ekseninde 1cm kadar yukarıda üretilmiştir ancak burada hedef dalga yüksekliği olan 10cm kararlı bir şekilde üretilmiştir.



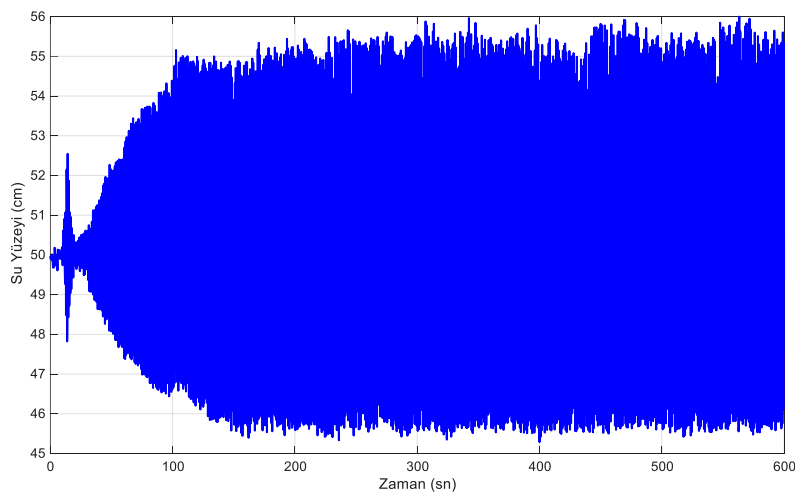
Şekil 7.23: Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-III

Şekil 7.24’de 0.7Hz frekanslı dalga üretiminin 540.saniyesinden itibaren grafik başlangıcı yapılmış deneysel ölçüm verileri aktarılmıştır. Burada 0.5Hz ve 0.7Hz frekanslarında olduğu gibi hedef dalga yüksekliği olan 10cm’e ulaşıldığı belirlenmiştir.



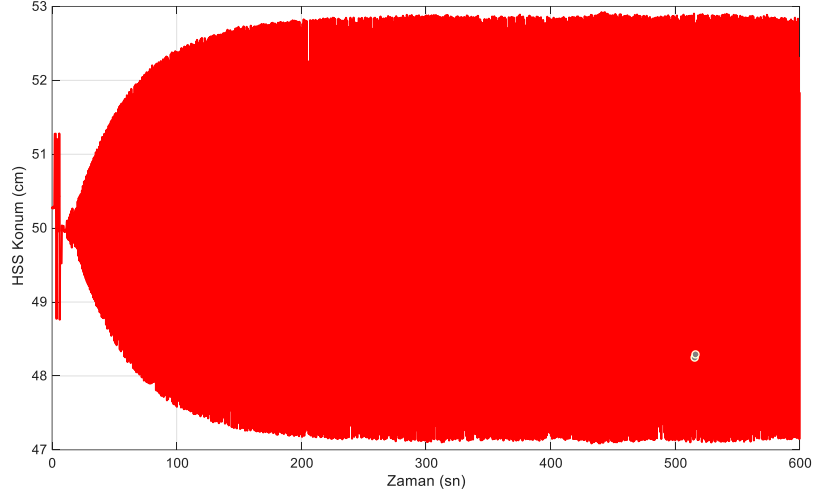
**Şekil 7.24:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-III

Gerçekleştirilen deneylerde en yüksek frekans limiti olarak 1.1Hz seçilmiş ve otonom dalga üretiminde 1.1Hz’lik baskın frekansa sahip su dalgalarının üretimi otonom şekilde sağlanmıştır. Şekil 7.25’de gerçekleştirilen 10 dakikalık deneye ait konum verileri aktarılmıştır. Tıpkı 1.0Hz’lik sinyal yapısında olduğu gibi su yüzeyinin kararlı hale geçmesi 200.saniyenin altında gerçekleşmiştir.



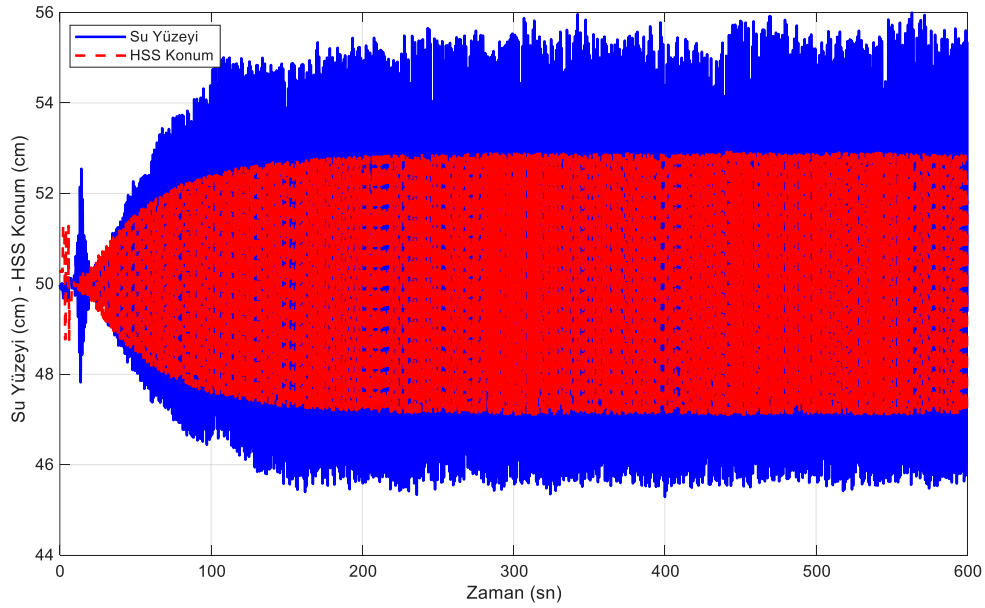
**Şekil 7.25:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-IV

Şekil 7.26’da son olarak seçilen 1.1Hz’lik kontrol sinyali frekansında HSS’nin konum grafiği aktarılmıştır. Burada otonom çalışma öncesindeki başlangıç strok değeri açıkça görülmektedir.



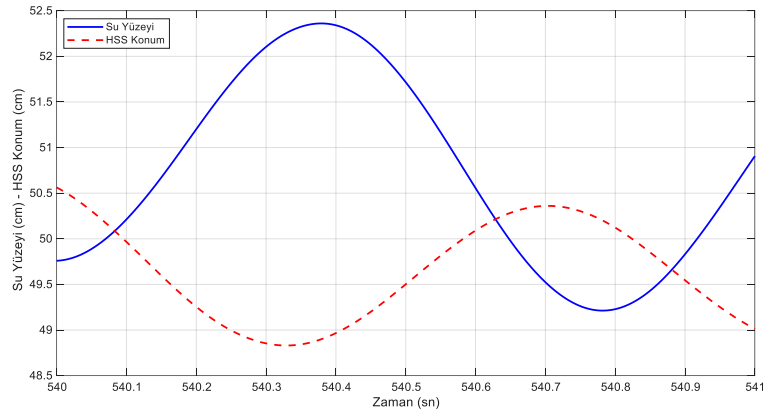
**Şekil 7.26:** Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-IV

1.1Hz frekansa sahip dalga üretiminde HSS ve su yüzeyi değişimine ait gerçek zamanlı ölçüm verileri ise Şekil 7.27’de verilmiştir. Burada tıpkı 1.0Hz’lik dalga üretiminde olduğu gibi üretilen dalganın tepe noktası yaklaşık olarak 1cm yukarıya ötelenmiştir ancak üretilen dalganın yüksekliği 10cm olarak sağlanmıştır.



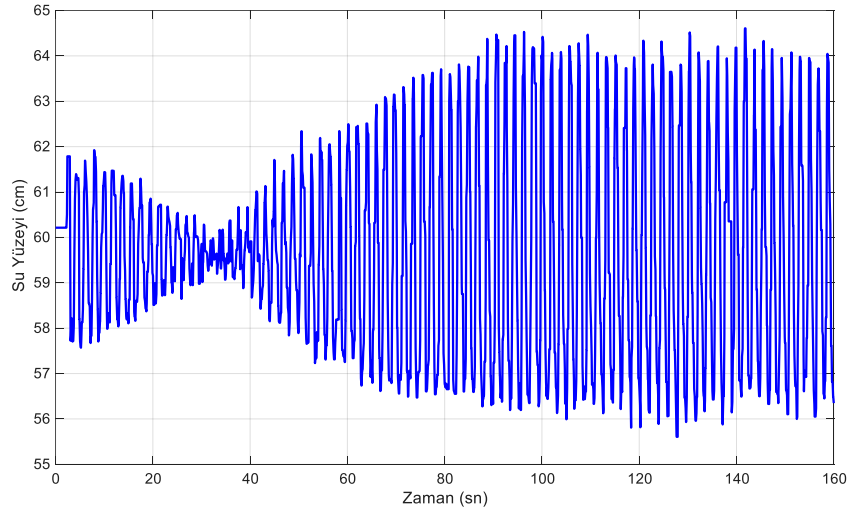
**Şekil 7.27:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-IV

Şekil 7.28’de verilen grafiğin 540.saniyesinden itibaren 1 saniyelik yakınlaştırılmış grafikte ise su yüzeyi değişimi ve HSS konum değişimi detaylı olarak aktarılmıştır.



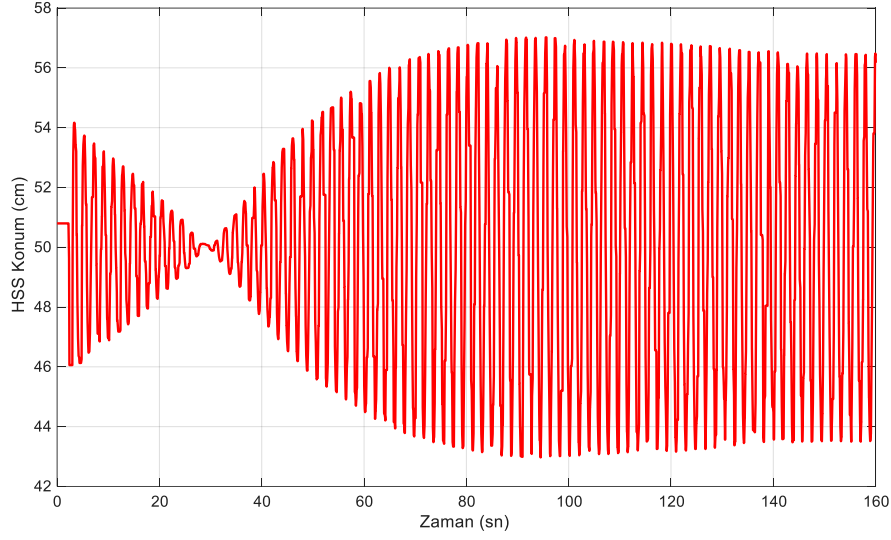
**Şekil 7.28:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-IV

Otonom dalga üretiminde seçilen frekansın üretilen su dalgasının kararlı hale gelmesinde büyük önem arz ettiği ve HSS konumlarının otonom çalıştırmadaki zaman farklılıkları açık şekilde aktarılmış durumdadır. Otonom dalgalar için dalga yüksekliği önemli ve sabit su derinliği önemli bir noktadır. Burada Şekil 7.29’da sabit su derinliği 60cm olarak değiştirilmiş, hedef dalga yüksekliği 8cm olarak belirlenmiştir.



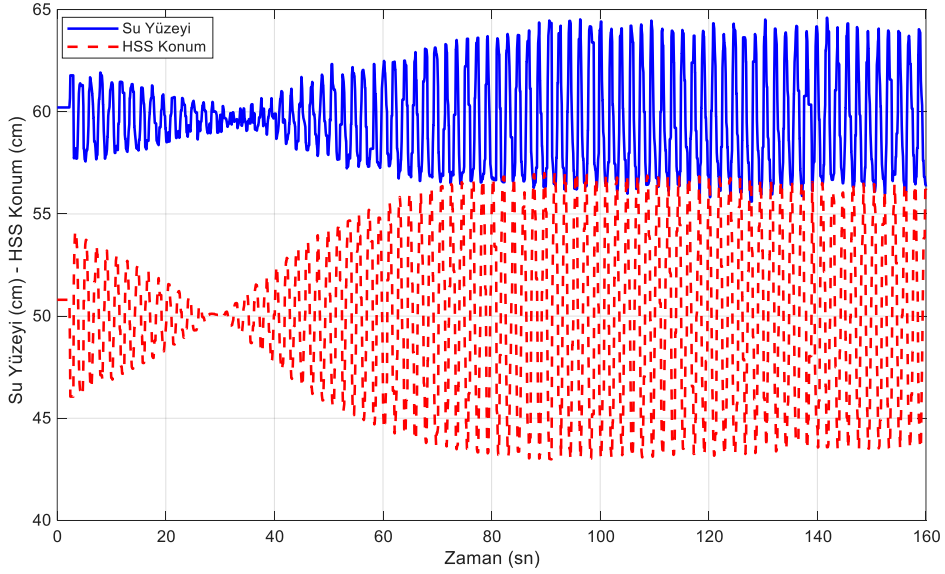
**Şekil 7.29:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-V

Şekil 7.30’da ise 60 cm sabit su derinliği için HSS konum değişimi verilmiştir. Burada 50cm sabit su derinliğinden farklı olarak hareket ettirilen su kütlesi daha fazla olmasına rağmen ilk kararlı HSS konumu 80-100 saniye aralığında olmuştur.



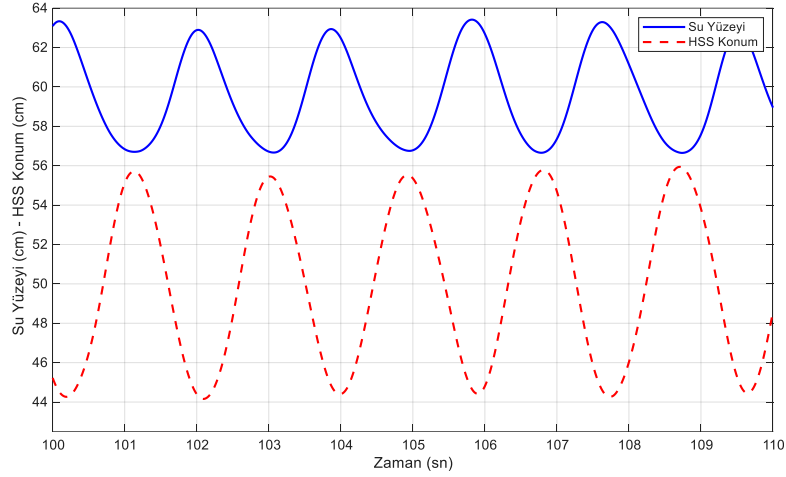
**Şekil 7.30:** Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-V

Şekil 7.31’de ise 60cm sabit su derinliğindeki HSS konum değişimi ve su yüzeyi değişimi detaylı olarak verilmiştir.



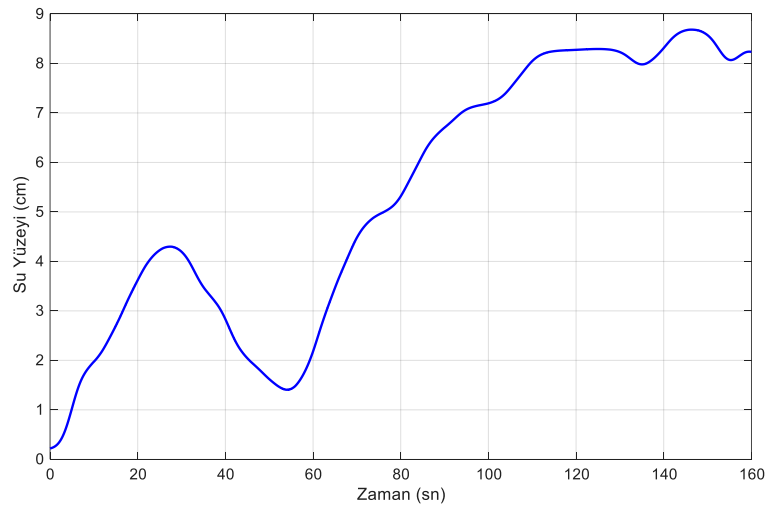
**Şekil 7.31:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-V

Şekil 7.32’de ise 60cm sabit su derinliğinde verilen su yüzeyi ve HSS konum değişimleri için gerçek zamanlı olarak elde edilen 100. ve 110.saniye arasındaki değişimlerin detaylı hali verilmiştir. Bu noktada üretilen su dalgasının oluşturduğu su yüzeyi değişimi etkisinin ve HSS konum değişiminin düzenli formda olması açıkça görülmektedir.



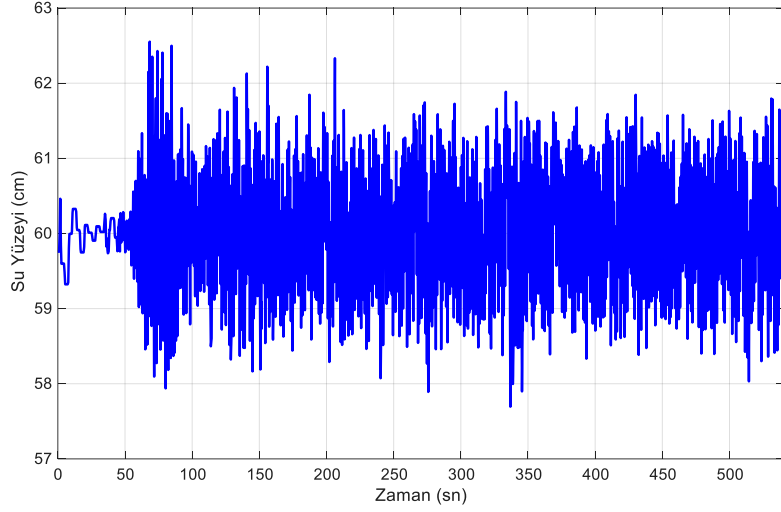
**Şekil 7.32:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi detaylı görünüm-V

Şekil 7.33’de ise yine 60cm sabit su derinliğindeki otonom dalga üretiminde dalga yüksekliği verilerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Burada HSS’nin ilk kararlı bölgesi olan 800-100 saniye aralığındaki değişimin dalga ölçüm probu tarafından düzenli hale geçmesi 110.saniyeden itibaren olmuştur.



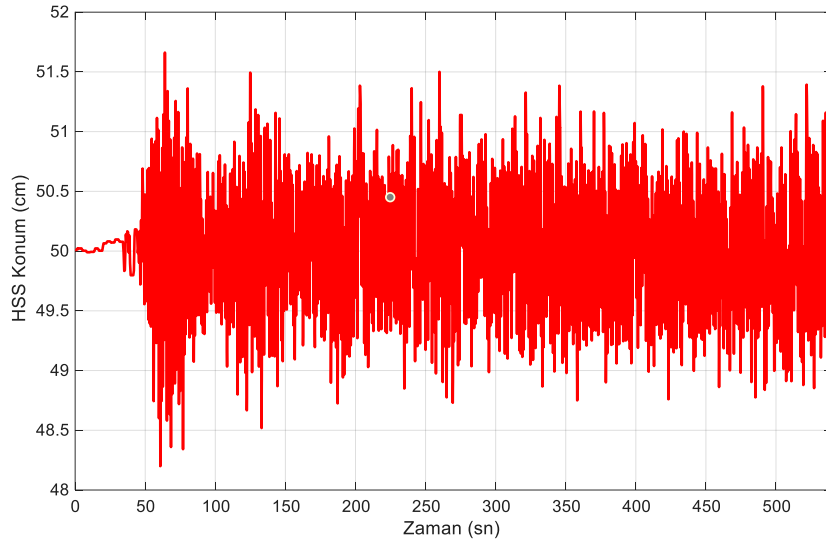
**Şekil 7.33:** Otonom dalga üretimi su yüksekliği değişimi-V

Sabit su derinliği 60cm, hedef dalga yüksekliği 5cm ve baskında su dalgası frekansı 1.0Hz olan deneye ait gerçek zamanlı su yüzeyi değişimi ise Şekil 7.34’de verilmiştir. Burada istenilen dalga yüksekliğinin 8cm’den 5cm düşürülmesi sonucunda su yüzeyi değişimi 50-100 saniye aralıklarında düzenli yapıya geçiş yapmaya başlamıştır.



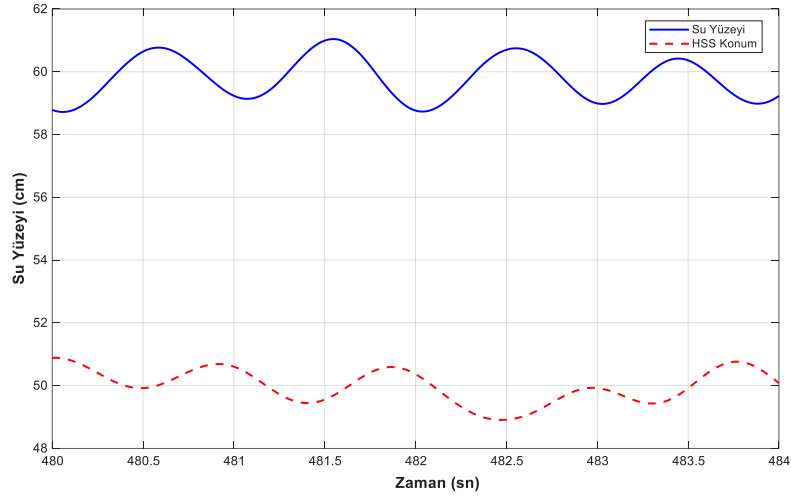
**Şekil 7.34:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi değişimi-VI

Şekil 7.35’de ise aynı deney yapısı için HSS’nin konum grafiği 0 ile 540 saniye aralığında detaylı olarak verilmiştir. Burada HSS konumlarının düzenli yapısı görülmektedir.



**Şekil 7.35:** Otonom dalga üretimi HSS konum değişimi-VI

Şekil 7.36’da 540 saniye boyunca alınan su yüzeyi değişimi ve HSS konum grafik kayıtlarının son 1 dakikalık kısmı verilmiştir. Burada su yüzeyi değişiminin ve HSS konum hareketlerinin düzenli olduğu görülmektedir.



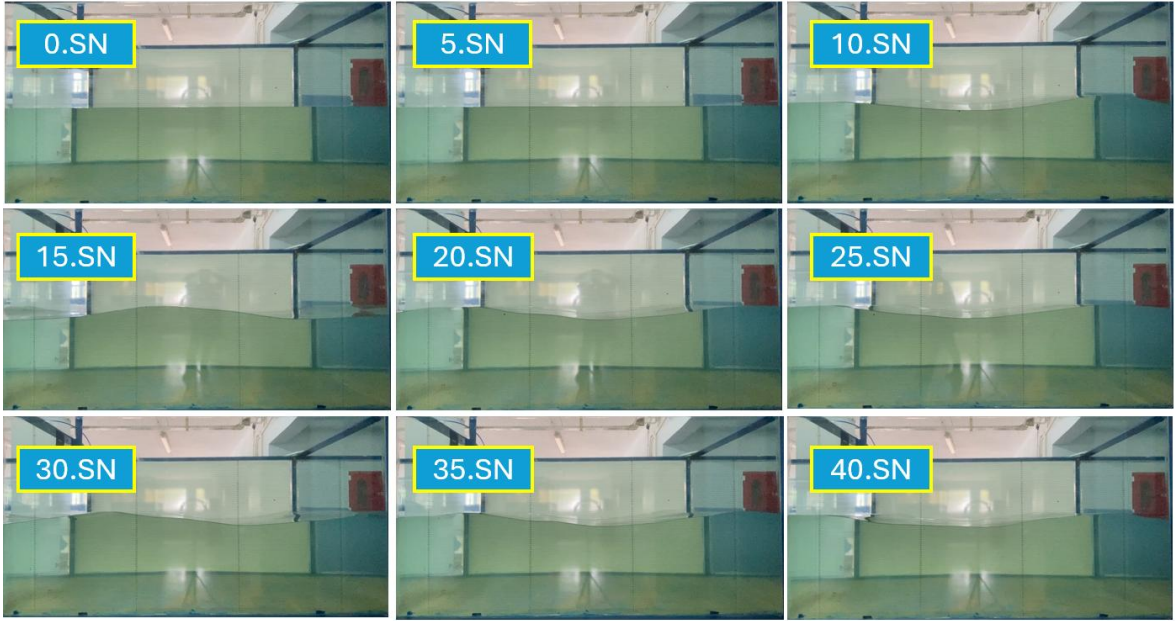
**Şekil 7.36:** Otonom dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-VI

Şekil 7.37'de ise hedef dalga yüksekliği olan 5cm seviyesi için su yüzeyi değişiminde tepe noktasındaki dalga yüksekliği yaklaşık olarak 8cm seviyesine çıkmış sonrasında ise sönümlenerek 5cm bandına oturmuştur.



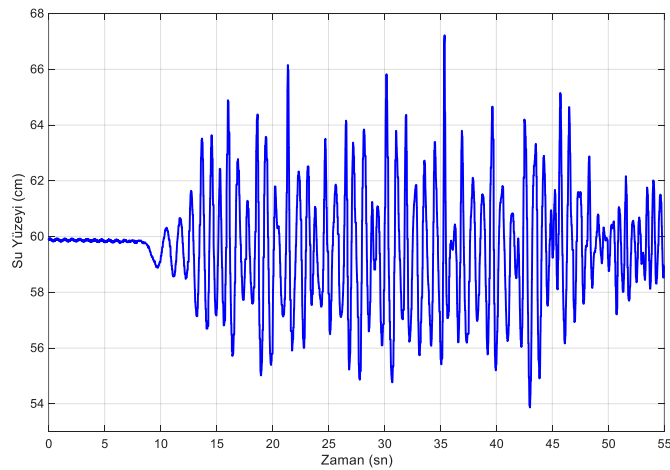
**Şekil 7.37:** Otonom dalga üretimi su yüksekliği değişimi-VII

Sabit su derinliği 50cm su dalgası baskın frekansı 1.0Hz ve dalga yüksekliği 6cm için 40 saniye boyunca görüntülenen su yüzeyi değişiminin dalga kanalı yan yüzeyine göre olan değişimi Şekil 7.38'de verilmiştir.



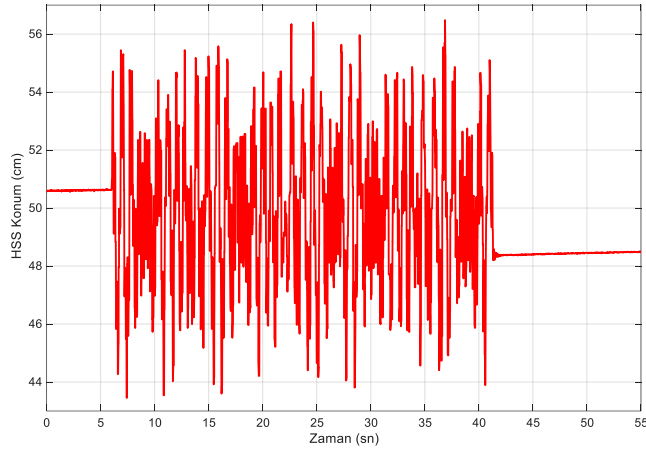
**Şekil 7.38:** Düzenli dalga üretimi dalga kanalı görüntüsü

Tez çalışması kapsamında otonom dalgaların üretiminden sonra düzensiz dalga üretiminde dalga ve kıyı mühendisliği alanında kullanılan bir spektrum olan JONSWAP spektrumu ile kullanıcı tarafından türetilmiş HSS konum verilerinin doğrudan HSS'ye 1ms aralıklar ile uygulanması sağlanmıştır. Bu noktada HSS konum verileri kullanıcı tarafından talep edilen şekilde sadece HSS konum kontrolü için kullanılmıştır. Şekil 7.39'da düzensiz dalga üretiminde 50cm sabit su derinliği için 55saniye içerisinde elde edilen su yüzeyi değişimi verilmiştir.



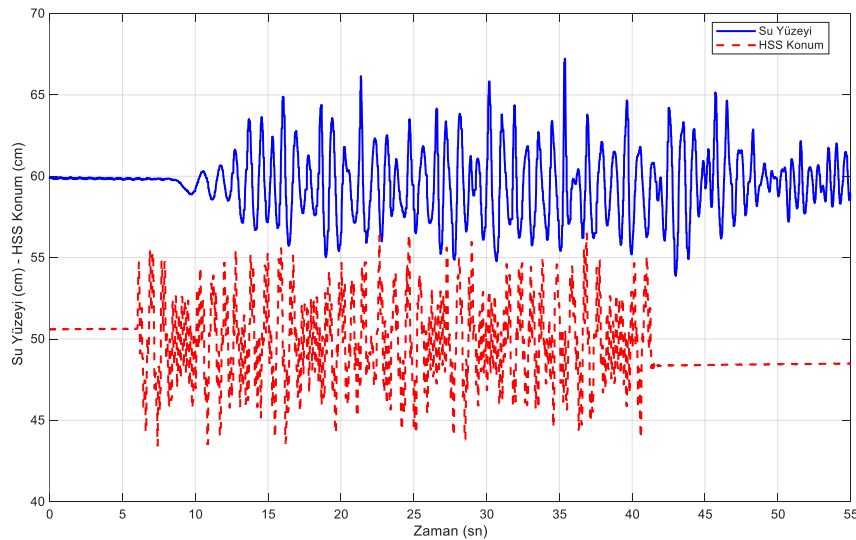
**Şekil 7.39:** Düzensiz dalga üretimi su yüzeyi değişimi-I

Şekil 7.40’da ise kullanıcının talebi doğrultusunda uygulanan HSS konum verilerine ait grafik verilmiştir. Burada kullanıcı istemiş olduğu HSS konum verilerini “.lvm” dosyası formatında sağladıktan sonra 1ms ile yine FPGA tabanlı HSS konum kontrolü mümkün olmuştur.



**Şekil 7.40:** Düzensiz dalga üretimi HSS konum değişimi-I

Düzensiz dalga üretimi noktasında hem su yüzeyi değişimi hem de HSS konum değişimlerini içeren ikili grafik ise Şekil 7.41’de verilmiştir. Dikkat edileceği üzere düzenli dalga üretiminde olduğu gibi HSS ilk harekete başladıktan belirli bir süre sonra su yüzeyi değişimleri dalga oluşturarak ilerlemiş ve HSS’nin konum kontrolünün durdurulmasından sonra ise dalgalar bir süre daha dalga sönmüleyiciye doğru ilerlemiştir.



**Şekil 7.41:** Düzensiz dalga üretimi su yüzeyi ve HSS konum değişimi-I

## 8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, PTWM'ye sahip ve HSS tarafından tahrik edilen bir dalga kanalında istenilen baskın frekans ve dalga yüksekliğinde düzenli dalga üretimi için FPGA tabanlı olarak dalga üretimi ve kontrolü gerçek zamanlı biçimde sağlanmıştır. Geliştirilen sistem, NI CRIO-9074 donanımında bulunan FPGA, RT Target ve bilgisayar yapılarının bütünleşik çalıştığı otonom bir kontrol yapısı uygulanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, HSS' modeli deneysel verilerden kara kutu yaklaşımıyla sürekli zaman ve üçüncü dereceden transfer fonksiyonu modeli ile elde edilmiştir. Bu model üzerinden HSS'nin konum kontrolünü sağlamak amacıyla PI ve TS kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. TS kontrolcü yapısında, konum hatası ve hata değişimi giriş değişkenleri olarak alınmıştır. Her bir kuralın çıkışı  $u_i = a_i e + b_i \dot{e} + c_i$  biçiminde tanımlanmıştır. Bu kapsamda oluşturulan 9 kural (3×3) ve 9 parametrelili Sugeno modeli, sistemin doğrusal olmayan karakteristiklerini yakalamada yüksek doğruluk sağlamıştır.

PI ve TS kontrolcü parametrelerinin optimum belirlenmesi için PSO, HHO ve SMA algoritmaları kullanılmıştır. PI kontrolcü ve TS kontrolcünün parametre optimizasyonunda ITAE tabanlı maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen kontrolör parametrelerinin gerçek zamanlı olarak hidrolik sisteme uygulanması sonucunda, TS kontrolcünün PI kontrolcüye göre daha düşük hata, daha kısa yerleşme süresi ve daha kararlı çıkış verdiği belirlenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen ikinci dalga üretim çalışması ise düzensiz dalgaların üretimi olmuştur. Kullanıcıdan JONSWAP spektrumuna dayalı olarak oluşturulan HSS'ye uygulanması gereken konum-zaman verileri alınmış ve 1ms aralıklar ile bu HSS konum verileri dalga kanalındaki HSS yapısına uygulanmıştır. Zamana bağlı olarak üretilen HSS'nin konumlarının takibi sağlanmış ve düzensiz dalga üretimi elde edilmiştir. Veri toplama sürecinde ise sistemden elde edilen konum ve dalga yüksekliği verileri 10 ms örnekleme periyodu ile kaydedilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması ile FPGA tabanlı gerçek zamanlı denetim, modern optimizasyon algoritmaları ile PI ve TS kontrolcülerin kullanıldığı düzenli dalga üretiminde otonom ve düzensiz dalga üretiminde ise konum-zaman verilerine dayalı olarak kapalı çevrim bir dalga üretim ve veri kayıt altyapısı geliştirilmiştir.

## 9. KAYNAKLAR

- Akder.** (2020). Hidrolik Devrelerde Kullanılan Pompa Tipleri. Retrieved June 14, 2025, from <https://demircelik.com.tr/haber/hidrolik-devrelerde-kullanilan-pompa-tipleri-11296>
- Cakan, A., Botsali, F. M., Onen, U., and Kalyoncu, M.** (2022). Modeling of Electro-Hydraulic Servo System Using The Bees Algorithm. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(10), 1–10. <https://doi.org/10.36306/KONJES.1083352>
- Cao, J., Liu, J., Liu, X., Zeng, C., Hu, H., and Luo, Y.** (2025). A Review of Marine Renewable Energy Utilization Technology and Its Integration with Aquaculture. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 2343, 18(9), 2343. <https://doi.org/10.3390/EN18092343>
- Chen, W., Du, X. Y., Zhang, B. L., Zheng, Z., and Cai, Z.** (2023). Observer-based sliding mode control for offshore structures with nonlinear energy sink mechanisms. *IET Control Theory and Applications*, 17(14), 1955–1966. <https://doi.org/10.1049/CTH2.12518>
- Chen, W., Du, X., Zhang, B. L., Cai, Z., and Zheng, Z.** (2022). Near-Optimal Control for Offshore Structures with Nonlinear Energy Sink Mechanisms. *Journal of Marine Science and Engineering* 2022, Vol. 10, Page 817, 10(6), 817. <https://doi.org/10.3390/JMSE10060817>
- Comoso.** (2024). Tandem Air Cylinders. Retrieved March 29, 2024, from <https://www.comoso.com/brands/parker/actuators-stages-and-cylinders/pneumatic-cylinders/duplex-tandem-air-cylinders>
- De Mello, P. C., Carneiro, M. L., Tannuri, E. A., Kassab, F., Marques, R. P., Adamowski, J. C., and Nishimoto, K.** (2013). A control and automation system for wave basins. *Mechatronics*, 23(1), 94–107. <https://doi.org/10.1016/J.MECHATRONICS.2012.11.004>
- Dean, R. G., and Dalrymple, R. A.** (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*.
- Demircan, B., Bicakci, S., and Akyuz, E.** (2025). Position Control of Hydraulic Servo Cylinder for Wave Channel. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 13(1), 2667–8055. <https://doi.org/10.36306/konjes.1571870>
- Demircan, B., Bıçakçı, S., and Akyüz, E.** (2025). Position Control of Hydraulic Servo Cylinder for Wave Channel. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 13(1), 260–276. <https://doi.org/10.36306/KONJES.1571870>
- Doctors, L. J., Day, A. H., and Clelland, D.** (2008). *Unsteady Effects During Resistance Tests on a Ship Model in a Towing Tank*.
- 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>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Edinburghdesign.** (2024). Piston Coastal Wave Generators. Retrieved June 13, 2025, from <http://www.edesign.co.uk/wp-content/uploads/2013/02/IMG3051.jpg>
- Ernst, M. H., and Ivantysynova, M.** (2016). Micro Surface Shaping for the High-Pressure Operation of Piston Machines With Water as a Working Fluid. *ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC 2015*. <https://doi.org/10.1115/FPMC2015-9534>
- Erol, O., Altun, Y., and Aktas, M.** (2017). (PDF) Designing A PID Controller for Water Hydraulic Servo Motor Systems with Ziegler-Nichols Method. Retrieved September 18, 2024, from Designing A PID Controller for Water Hydraulic Servo Motor Systems with Ziegler-Nichols Method website: [https://www.researchgate.net/publication/321267782\\_Designing\\_A\\_PID\\_Controller\\_for\\_Water\\_Hydraulic\\_Servo\\_Motor\\_Systems\\_with\\_Ziegler-Nichols\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/321267782_Designing_A_PID_Controller_for_Water_Hydraulic_Servo_Motor_Systems_with_Ziegler-Nichols_Method)
- Esatoglu, A.** (2020). İki kademeli elektro hidrolik servo valf için kayan kipli denetçi tasarımı. Retrieved September 18, 2024, from <https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen-tez/c6a2ea89-fee2-47d2-bd5e-0a6a5ad07f69/iki-kademeli-elektro-hidrolik-servo-valf-icin-kayan-kipli-denetci-tasarimi>
- Essa, M. E. S. M., Aboeela, M. A. S., and Hassan, M. A. M.** (2017). Application of Fractional Order Controllers on Experimental and Simulation Model of Hydraulic Servo System. *Fractional Order Control and Synchronization of Chaotic Systems*, 277–324. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50249-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50249-6_10)
- Evers, F. M., and Hager, W. H.** (2015). Impulse Wave Generation: Comparison of Free Granular with Mesh-Packed Slides. *Journal of Marine Science and Engineering 2015, Vol. 3, Pages 100-110*, 3(1), 100–110. <https://doi.org/10.3390/JMSE3010100>
- Ezpeleta, H., Ulazia, A., Aristondo, O., and Ibarra-Berastegi, G.** (2025). Future wave energy evolution in the Bay of Biscay for different converters. *Energy*, 331, 136713. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.136713>
- Goda, Y.** (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. World Scientific.
- Gu, H. B., Causon, D. M., Mingham, C. G., Qian, L., and Chen, H.-B.** (2011). *On the Numerical Simulation of a Piston-type Wavemaker*. OnePetro. Retrieved from <https://dx.doi.org/>
- Guillouzouic, B.** (2014). *Collation of Wave Simulation Methods | Tethys*. Retrieved from <https://tethys.pnnl.gov/publications/d212-collation-wave-simulation-methods>
- Guo, C. ;, Zhong, X. ;, Zhao, D., Guo, C., Zhong, X., and Zhao, D.** (2023). Research on Scale Effect of Resistance Components for Full-Formed Ship Based on Large-Scale Model Towing Test. *Journal of Marine Science and Engineering 2023, Vol. 11, Page 1300*, 11(7), 1300. <https://doi.org/10.3390/JMSE11071300>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gyongy, I., Bruce, T., and Bryden, I.** (2014). Numerical analysis of force-feedback control in a circular tank. *Applied Ocean Research*, 47, 329–343. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2014.07.002>
- 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>
- Han, H., Liu, Y., Ma, L., Liu, Z., and Quan, L.** (2018). Analyze the characteristics of electro-hydraulic servo system's position-pressure master-slave control. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6), 2018. [https://doi.org/10.1177/1687814018782013/ASSET/6105692A-580F-4788-A06B-7182A16AA31D/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177\\_1687814018782013-FIG9.JPG](https://doi.org/10.1177/1687814018782013/ASSET/6105692A-580F-4788-A06B-7182A16AA31D/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1687814018782013-FIG9.JPG)
- Hasselmann, K., Muller, P., Olbers, D. J., and Wegener, A.** (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) Wind Work and Radiative Internal Wave Flux in a Hybrid Slab Model View project Ocean Dynamics book View project*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/256197895>
- Hawe Hydraulik.** (2025). Piston type accumulator type HPS Product documentation. Retrieved August 25, 2025, from [www.hawe.de](http://www.hawe.de)
- Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., and Chen, H.** (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, 97, 849–872. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2019.02.028>
- Hidroliksilindir.org.** (2024). Hidrolik Akümülatör Nedir. Retrieved January 10, 2026, from <https://www.hidroliksilindir.org/hidrolik-akumulator-nedir-detayli-rehber/>
- Hidroman.** (2025). Hidrolik Pompa Nedir. Retrieved May 26, 2024, from <https://www.hidroman.com.tr/icerik/hidrolik-pompa-cesitleri-nelerdir>
- Hudspeth, R. T.** (2006). Waves And Wave Forces On Coastal And Ocean Structures. In *Advanced Series on Ocean Engineering* (Vol. 21).
- Hughes, S. A.** (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World Scientific.
- Hydraulic cylinder design.** (2025). Retrieved March 29, 2024, from <https://www.hydraulic-calculation.com/article.php?ID=12>
- Ingram, D., Wallace, R., Robinson, A., and Bryden, I.** (2014). The design and commissioning of the first, circular, combined current and wave test basin. *OCEANS 2014 - TAIPEI*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964577>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ISO Symbols and Glossary.** (2006). Retrieved March 29, 2024, from <https://www.powermotiontech.com/technologies/other-technologies/article/21884236/chapter-4-iso-symbols-and-glossary-part-3>
- İstif, İ.** (2003). *Oransal Valf Ve Hidrolik Silindirden Oluşan Bir Sistemin Tanılanması Ve Konum Kontrolü* (İstanbul Teknik Üniversitesi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Retrieved from <https://polen.itu.edu.tr/items/b0a2569f-0043-4c8a-877f-e68b8b09d5bc>
- Jang, T. S., and Sung, H. G.** (2021). New nonlinear theory for a piston-type wavemaker: The classical Boussinesq equations. *Applied Mathematical Modelling*, 91, 43–57. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2020.08.077>
- Jelali, M., and Kroll, A.** (2003). *Hydraulic Servo-systems*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0099-7>
- Kennedy, J., and Eberhart, R.** (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Kestek, E.** (2020). Elektro-hidrolik bir sistemin akıllı PID kontrol ile denetimi. Retrieved September 18, 2024, from <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Khait, A., and Shemer, L.** (2019). Nonlinear wave generation by a wavemaker in deep to intermediate water depth. *Ocean Engineering*, 182, 222–234. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.04.065>
- Kim, H. J., Mujeeb-Ahmed, M. P., Cabrera, J. M., and Paik, J. K.** (2022). A new method for predicting site-specific wave-induced hull girder loads acting on ship-shaped offshore installations in benign conditions. *International Journal of Maritime Engineering*, 163(A4), 706. <https://doi.org/10.5750/IJME.V163IA4.14>
- Kizir, S., Yaren, T., and Kelekçi, E.** (2021). *Matlab Simulink Destekli Gerçek Zamanlı Kontrol Teori ve Mühendislik Uygulamaları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık. Retrieved from <https://www.seckin.com.tr/kitap/374731873>
- Lalithydraulics.** (2025). Telescopic Cylinder | Telescopic Cylinder Hydraulic | India. Retrieved March 29, 2024, from <https://lalithydraulics.com/telescopic-cylinder.php>
- Lee, S., and Hong, J. W.** (2020). A Semi-Infinite Numerical Wave Tank Using Discrete Particle Simulations. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020, Vol. 8, Page 159, 8(3), 159. <https://doi.org/10.3390/JMSE8030159>
- Leng, D., Xiao, H., Sun, L., Liu, G., Wang, X., and Sun, L.** (2019). Study on a magnetorheological elastomer-base device for offshore platform vibration control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30(2), 243–255. [https://doi.org/10.1177/1045389X18808398/ASSET/5B1295A0-3845-4882-BD64-87C3C73DBEB1/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177\\_1045389X18808398-FIG14.JPG](https://doi.org/10.1177/1045389X18808398/ASSET/5B1295A0-3845-4882-BD64-87C3C73DBEB1/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1045389X18808398-FIG14.JPG)

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, M., Zhang, H., and Guan, H.** (2011). Study of offshore monopile behaviour due to ocean waves. *Ocean Engineering*, 38(17–18), 1946–1956. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2011.09.022>
- Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., and Mirjalili, S.** (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, 111, 300–323. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2020.03.055>
- Ling, T. G., Rahmat, M. F., and Husain, A. R.** (2012). System identification and control of an Electro-Hydraulic Actuator system. *Proceedings - 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, CSPA 2012*, 85–88. <https://doi.org/10.1109/CSPA.2012.6194696>
- Liu, G. Da, Li, G., and Shen, G.** (2016). Experimental evaluation of the parameter-based closed-loop transfer function identification for electro-hydraulic servo systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(1), 2017. [https://doi.org/10.1177/1687814016684425/ASSET/A02C8397-9A41-4CE7-AEE1-C2A1A1E64340/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177\\_1687814016684425-FIG15.JPG](https://doi.org/10.1177/1687814016684425/ASSET/A02C8397-9A41-4CE7-AEE1-C2A1A1E64340/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1687814016684425-FIG15.JPG)
- Liu, G. J., Farooq, B., Jiao, J. B., Wang, L. H., and Zhang, Y.** (2014). Research on the Effect of Seasonal Environmental Loads on Bohai Bay Offshore Platform. *Advanced Materials Research*, 1006–1007, 18–25. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.1006-1007.18>
- Liu, Y., Zheng, Y., Song, R., Chen, J., and Jin, H.** (2020). Wave generation characteristic analysis of piston and flap type wave maker with rotary-valve-control vibrator. *Journal of Vibration and Control*, 26(15–16), 1297–1308. <https://doi.org/10.1177/1077546319895664>
- Lykke, T.** (2010). *Aalborg Universitet Technical Background Material for the Wave Generation Software AwaSys 5*. Retrieved from [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/45714876/Technical\\_Background\\_Material\\_for\\_the\\_Wave\\_Generation\\_Software\\_AwaSys\\_5.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/45714876/Technical_Background_Material_for_the_Wave_Generation_Software_AwaSys_5.pdf)
- Machado, I. R., Garcia-Rosa, P. B., and Watanabe, E. H.** (2021). Hierarchical control and emulation of a wave energy hyperbaric converter. *IET Renewable Power Generation*, 15(14), 3269–3281. <https://doi.org/10.1049/RPG2.12250>
- Machdraulics.** (2025). The Roles and Characteristics of Hydraulic Fluid | MAC Hydraulics - MAC Hydraulics. Retrieved January 10, 2024, from <https://mac-hyd.com/blog/the-roles-and-characteristics-of-hydraulic-fluid/>
- Madsen, O. S.** (1970a). WAVES GENERATED BY A PISTON-TYPE WAVEMAKER. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(12), 36. <https://doi.org/10.9753/icce.v12.36>
- Madsen, O. S.** (1970b). WAVES GENERATED BY A PISTON-TYPE WAVEMAKER. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(12), 36. <https://doi.org/10.9753/icce.v12.36>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mahdi, M. S.** (2011). Controlling a Nonlinear Servo Hydraulic System Using PID Controller with a Genetic Algorithm Tool. Retrieved September 18, 2024, from Controlling a Nonlinear Servo Hydraulic System Using PID Controller with a Genetic Algorithm Tool website: [https://www.researchgate.net/publication/311536154\\_Controlling\\_a\\_Nonlinear\\_Servo\\_Hydraulic\\_System\\_Using\\_PID\\_Controller\\_with\\_a\\_Genetic\\_Algorithm\\_Tool](https://www.researchgate.net/publication/311536154_Controlling_a_Nonlinear_Servo_Hydraulic_System_Using_PID_Controller_with_a_Genetic_Algorithm_Tool)
- Mahdi, S. M., Khalid, K. S., and Mahdi, S. M.** (2019). PID controller tuning using ant colony method for servo hydraulic system. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(4), 148–152. <https://doi.org/10.26480/JMERD.04.2019.148.152>
- Mahjouri, S., Shabani, R., Rezazadeh, G., and Badiei, P.** (2020). Active Control of A Piston-Type Absorbing Wavemaker with Fully Reflective Structure. *China Ocean Engineering*, 34(5), 730–737. <https://doi.org/10.1007/S13344-020-0066-9/METRICS>
- Makineegitimi.com.** (2025). Hidrolik Silindirin Elemanları - Makine Eğitimi. Retrieved January 10, 2026, from <https://www.makinaegitimi.com/hidrolik-silindirin-elemanlari/>
- Merritt, H.** (1967). Hydraulic Control Systems . Retrieved June 14, 2025, from Hydraulic control systems website: <https://www.scribd.com/document/806462173/Hydraulic-Control-Systems-by-Herbert-e-Merritt>
- Meteka.** (2025). Compact Piston. Retrieved March 29, 2024, from <https://www.meteka.lt/en/hidraulic-cylinders/double-acting/itemlist/category/499-double-acting-a>
- Muthukkumaran, K., and Arun, · K S.** (2015). *Erratum to: Effect of seabed slope on the pile behaviour of a fixed offshore platform under lateral forces. 1*, 223–236. <https://doi.org/10.1007/s40722-015-0015-5>
- National Instruments.** (2025, June 22). cRIO-9074. Retrieved June 22, 2025, from [https://www.ni.com/en-tr/support/model.crio-9074.html?srsltid=AfmBOorc8OQO\\_c0hlaZ1-ZH2GBqOBx238-8YFiYeFAeNiYxSvXt-C1xh](https://www.ni.com/en-tr/support/model.crio-9074.html?srsltid=AfmBOorc8OQO_c0hlaZ1-ZH2GBqOBx238-8YFiYeFAeNiYxSvXt-C1xh)
- National Instruments.** (2025, June 22). NI-9215 . Retrieved June 22, 2025, from [https://www.ni.com/en-tr/shop/model/ni-9215.html?srsltid=AfmBOoqPX\\_pPnrdV-8nbxgRwJN6Lvd-fK-nGu\\_\\_s7tMROMm2d3uOBIIB](https://www.ni.com/en-tr/shop/model/ni-9215.html?srsltid=AfmBOoqPX_pPnrdV-8nbxgRwJN6Lvd-fK-nGu__s7tMROMm2d3uOBIIB)
- National Instruments.** (2025, June 22). NI-9263. Retrieved June 22, 2025, from <https://www.ni.com/en-tr/shop/model/ni-9263.html>
- National Instruments Corp.** (2025). Everything You Need to Know About LabVIEW FPGA - NI. Retrieved January 9, 2026, from <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/18/everything-you-need-to-know-about-labview-fpga.html>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Picasso, B., De Vito, D., Scattolini, R., and Colaneri, P.** (2010). An MPC approach to the design of two-layer hierarchical control systems. *Automatica*, 46(5), 823–831. <https://doi.org/10.1016/J.AUTOMATICA.2010.02.013>
- Powermotiontech.** (2012). Engineering Essentials: Cylinders | Power and Motion. Retrieved March 29, 2024, from <https://www.powermotiontech.com/technologies/cylinders-actuators/article/21882647/engineering-essentials-cylinders>
- Pradhan, N.** (2019). Introduction to LabVIEW FPGA. Retrieved January 9, 2026, from <https://labviewprogram.blogspot.com/2018/07/lesson-1-introduction-to-labview-fpga.html>
- 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)
- Puglisi, L. J., Saltaren, R. J., Garcia, C., and Banfield, I. A.** (2015a). Robustness analysis of a PI controller for a hydraulic actuator. *Control Engineering Practice*, 43, 94–108. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2015.06.010>
- Puglisi, L. J., Saltaren, R. J., Garcia, C., and Banfield, I. A.** (2015b). Robustness analysis of a PI controller for a hydraulic actuator. *Control Engineering Practice*, 43, 94–108. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2015.06.010>
- Rahmat, M. F., Rozali, S. M., Abdul Wahab, N., and Zulfatman.** (2010). Application of draw wire sensor in position tracking of electro hydraulic actuator system. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 3(4), 736–755. <https://doi.org/10.21307/IJSSIS-2017-418>
- Rahmat, M. F., Rozali, S. M., Wahab, N. A., Zulfatman, and Jusoff, K.** (2010). Modeling and Controller Design of an Electro-Hydraulic Actuator System. *American Journal of Applied Sciences*, 7(8), 1100–1108. <https://doi.org/10.3844/AJASSP.2010.1100.1108>
- Rizal, A. M., and Ningsih, N. S.** (2020). Ocean wave energy potential along the west coast of the Sumatra island, Indonesia. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 6(2), 137–154. <https://doi.org/10.1007/S40722-020-00164-W/FIGURES/13>
- Rubio-Clemente, A., Velásquez, L., and Chica, E.** (2022). Design of a water channel to model the wave conditions in the Colombian Pacific Ocean. *REandPQJ*, 20(4), 405–412. <https://doi.org/10.24084/REPQJ20.325>
- Salleh, S., Rahmat, M. F., Othman, S. M., and Danapalasingam, K. A.** (2015). Review on modeling and controller design of hydraulic actuator systems. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 8(1), 338–367. <https://doi.org/10.21307/IJSSIS-2017-762>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schmitz, K., Duensing, Y., Haas, C., and Matthiesen, G.** (2021). International conference Fluid Power 2021: Conference Proceedings. *Univerzitetna Založba Univerze v Mariboru*. <https://doi.org/10.18690/978-961-286-513-9>
- Shivachev, E., Khorasanchi, M., Day, S., and Turan, O.** (2020). Impact of trim on added resistance of KRISO container ship (KCS) in head waves: An experimental and numerical study. *Ocean Engineering*, 211, 107594. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.107594>
- Sivanandam, S. N., Sumathi, S., and Deepa, S. N.** (2007). Introduction to fuzzy logic using MATLAB. In *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-35781-0/COVER>
- Tadesse, A., and Jungong, M.** (2016). Modeling and simulations on a fuzzy- PID position controller of electro hydraulic servo system. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015*, 96–103. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7381922>
- Takagi, T., and Sugeno, M.** (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-15*(1), 116–132. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- The Instrument Guru.** (2025). Single acting cylinder. Retrieved March 29, 2024, from <https://theinstrumentguru.com/single-acting-cylinder/>
- Topçu, E. E.** (2017). PC-based control and simulation of an electro-hydraulic system. *Computer Applications in Engineering Education*, 25(5), 706–718. <https://doi.org/10.1002/CAE.21831>
- Walker, K., Stokes, A., Kiprakis, A., and Giorgio-Serchi, F.** (2020). Investigating PID Control for Station Keeping ROVs. *UKRAS20 Conference: “Robots into the Real World” Proceedings*, 3, 51–53. <https://doi.org/10.31256/KY3XG3B>
- Wang, J. ;, Chen, Z. ;, Zhang, F., Wang, J., Chen, Z., and Zhang, F.** (2021). A Review of the Optimization Design and Control for Ocean Wave Power Generation Systems. *Energies 2022, Vol. 15, Page 102, 15*(1), 102. <https://doi.org/10.3390/EN15010102>
- Wen, C.-Y. H. ; ;, Chen, G.-F., Rogowski, K., Lee, H. H., Wen, C.-Y., and Chen, G.-F.** (2022). Study on an Oscillating Water Column Wave Power Converter Installed in an Offshore Jacket Foundation for Wind-Turbine System Part II: Experimental Test on the Converting Efficiency. *Processes 2022, Vol. 10, Page 418, 10*(2), 418. <https://doi.org/10.3390/PR10020418>
- Windt, C., Davidson, J., Schmitt, P., and Ringwood, J. V.** (2019). On the Assessment of Numerical Wave Makers in CFD Simulations. *Journal of Marine Science and Engineering 2019, Vol. 7, Page 47, 7*(2), 47. <https://doi.org/10.3390/JMSE7020047>

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wu, N. J., Tsay, T. K., and Chen, Y. Y.** (2014). Generation of stable solitary waves by a piston-type wave maker. *Wave Motion*, 51(2), 240–255. <https://doi.org/10.1016/J.WAVEMOTI.2013.07.005>
- Xu, D., Xing, K., Jin, X., Enyan, M., Bing, Z., and Junsen, R.** (2023). *LabVIEW-based servo valve dynamic and static test system You may also like Modular-based test system for proportional valves Nonlinear position control of electro-hydraulic servo system based on lyapunov robust integral backstepping controller.* <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2655/1/012022>
- Younkin, G. W.** (2002). Industrial Servo Control Systems: Fundamentals And Applications, Revised And Expanded. *Industrial Servo Control Systems.* <https://doi.org/10.1201/9780203909454>
- Yuan, Y., and Wang, X.** (2022). Dynamic analysis of shallow embedded jacket offshore structures under wave forces. *SN Applied Sciences*, 4(11), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S42452-022-05207-5/FIGURES/10>
- Zhang, D., Juan, M., Zhang, Z., Gao, P., Jin, J., Wang, J., and Yu, T.** (2022). A dynamic modeling approach for vibration analysis of hydraulic pipeline system with pipe fitting. *Applied Acoustics*, 197, 108952. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2022.108952>
- Zhang, L., Zhao, M., Lu, Z., Yu, X., Duan, F., and Jin, L.** (2020). Effects of wave number and average radius on flow and heat transfer in a curve-wave channel. *International Journal of Energy Research*, 44(12), 9494–9512. <https://doi.org/10.1002/ER.5086>
- Zhang, Q.** (2018). *Basics of hydraulic systems.* Retrieved from <https://www.routledge.com/Basics-of-Hydraulic-Systems-Second-Edition/Zhang/p/book/9781138484665>

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Batın DEMİRCAN

Doğum tarihi ve yeri :

E-posta :

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Üniversite / Bölüm		Yıl
Doktora	Balıkesir Üniversitesi	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2026
Yüksek Lisans	Balıkesir Üniversitesi	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2019
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2015

### Yayın Listesi

- Demircan, B., and Bıçakçı, S.** (2025). Generation of regular waves with FPGA based controller in a wave channel. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 260–276. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.1618673>. [Tezden türetilmiştir]
- Demircan, B., Bıçakçı, S., and Akyüz, E.** (2025). Position control of hydraulic servo cylinder for wave channel. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 13(1), 260–276. <https://doi.org/10.36306/konjes.1571870>. [Tezden türetilmiştir]
- Demircan, B., Yaren, T., Akyüz, E., and Bıçakçı, S.** (2025). Modeling of an electro-hydraulic system for wave generation in a wave channel. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(1), 260–276. <https://doi.org/10.17694/bajece.1622216>. [Tezden türetilmiştir]
- Demircan, B., Bıçakçı, S., and Akyüz, E.** (2024). Modeling and verification of the hydraulic system used in the wave channel system. *4th International Efes Scientific Researches and Innovation Congress*'ta sunulan bildiri. [Tezden türetilmiştir]
- Demircan, B., Bıçakçı, S., and Akyüz, E.** (2024). LabVIEW based hydraulic cylinder position control application for hydraulic system. [5th International Istanbul Current Scientific Research Congress]’ta sunulan bildiri. [Tezden türetilmiştir]
- Demircan, B., Bıçakçı, S., and Akyüz, E.** (2024). Developing an application for real-time measurement and logging of water waves in a wave channel system. *4th International Selcuk Scientific Research Congress*'ta sunulan bildiri. [Tezden türetilmiştir]