

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİJİTAL ELEKTROHİDROLİK SİSTEMLERİN POPET TİPİ HİDROLİK VALFLERLE
PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME KULLANILARAK DENETLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mustafa Yavuz COŞKUN

KASIM 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DİJİTAL ELEKTROHİDROLİK SİSTEMLERİN POPET TİPİ HİDROLİK VALFLERLE
PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME KULLANILARAK DENETLENMESİ**

Mustafa Yavuz COŞKUN

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 09 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 11 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet İTİK
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bilinçli toplumlar, enerji talebinin artışıyla başa çıkmak için sadece enerji arzını artırmakla yetinmeyen, aynı zamanda enerji verimliliğini artırmayı da amaçlayan bir yaklaşımın gerekliliğini kavramışlardır. Enerji tüketiminde önemli paya sahip olan, özellikle orta ve ağır sanayi ile mobil iş makineleri için vazgeçilmez olan geleneksel elektrohidrolik sistemler (G-EHS) ise enerji verimliliği açısından ciddi iyileştirmelere açıktır. Özellikle, G-EHS’de meydana gelen enerji kayıplarının ~%30’undan sorumlu olan kısma kayıpları bu noktada dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, kısma kayıplarının azaltan ve görece düşük maliyete sahip olan dijital elektrohidrolik sistemler (D-EHS), potansiyel çözüm olarak görülmektedir. Önerilen denetim yöntemlerinin karmaşıklığı ise D-EHS’nin yaygınlaşmasını yavaşlatmaktadır.

Yapılan bu tez kapsamında, D-EHS denetimi için pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir denetim yöntemi önerilmiştir. Böylelikle, denetleyici tasarımında ortaya çıkan karmaşık süreç, yüksek işlem gücü gereksinimi ile takas edilmiştir. İşlem gücüne erişimin her zamankinden daha kolay olduğu günümüzde ise bu takas denetleyici tasarımını kolaylaştırmış ve enerji kayıplarını azaltacak potansiyel bir çözümün yaygınlaşmasının önünü açmıştır.

Akademik kariyerimin başlangıcından itibaren değerli tecrübeleriyle bana yol gösteren ve motivasyonumu kaybetmememi sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Mehmet İTİK’e bu süreç boyunca yardımını esirgemediği için teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin ilerleyişini yakından takip ederek önerileriyle çalışmalarına değer katan Doç. Dr. Nurhan GÜRSEL ÖZMEN’e ve Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS’a, bu süreçte yaşadığım zorluklara benimle göğüs geren ve anlayışını esirgemeyen sevgili eşim Elife COŞKUN’a, çalışmalarım ile ilgili fikir telakkisi için bana zaman ayıran çalışma arkadaşım Dr. Öğr. Üye. Caner SANCAK’a ve hidrolik sistemlerle ilgili deneyimlerinden yararlanmama müsaade eden makina mühendisi Burak SAMUR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, anneme ve babama eğitim hayatım boyunca göstermiş oldukları destekten ötürü teşekkür ederim.

Mustafa Yavuz COŞKUN

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Dijital Elektrohidrolik Sistemlerin Popet Tipi Hidrolik Valflerle Pekiştirmeli Öğrenme Kullanılarak Denetlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mehmet İTİK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/09/2023

Mustafa Yavuz COŞKUN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Dijital Elektrohırolık Sistem.....	7
1.2. Tez İçeriğı	10
1.3. Literatür Özeti.....	11
1.4. Tez Kapsamı	13
1.5. Matematik Modellerinin Elde Edilmesi.....	14
1.5.1. G-EHS'nin Matematik Modeli.....	15
1.5.2. D-EHS'nin Matematik Modelinin Eldesi.....	23
1.6. Kullanılan Yöntemler	27
1.6.1. Pekiştirmeli Öğrenme.....	27
1.6.2. İkili Derin Q-Ağı	29
1.6.3. Derin Deterministik Politika Gradyanı.....	33
1.6.4. PID Denetleyici	35
1.6.5. Parçacık Sürü Optimizasyonu	37
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	39
2.1. G-EHS ve D-EHS Deney Düzeneklerinin Kurulumu.....	39

2.1.1. Dijital Hidrolik Valf Bloğu Tasarımı ve İmalatı	43
2.2. Hidrolik Pistonun Sürtünme Davranışının Belirlenmesi	46
2.3. G-EHS'nin PID Denetleyici ile Konum Denetimi	47
2.4. G-EHS'nin DDPG Denetleyici ile Konum Denetimi	51
2.4.1. Durum Değişkenleri ve Ödül Fonksiyonunun Belirlenmesi	53
2.4.2. YSA Yapılarının ve Hiper Parametrelerin Belirlenmesi	55
2.4.3. DDPG Denetleyici Eğitimi.....	57
2.5. D-EHS'nin DDQN Denetleyici ile Konum Denetimi	59
2.5.1. Tek DDQN Denetleyici ile Konum Denetimi	60
2.5.2. Çoklu DDQN Denetleyici ile Konum Denetimi	65
2.6. Konum Denetimi için DDQN Denetleyicinin Deneysel Eğitimi.....	71
3. BULGULAR	75
3.1. PID Denetleyici ile Konum Takibi	76
3.2. DDPG Denetleyici ile Konum Takibi.....	81
3.3. Tek DDQN Denetleyici ile Konum Takibi.....	86
3.4. Çoklu DDQN Denetleyici ile Konum Takibi	93
3.5. Deneysel Eğitim ile İyileştirilen Çoklu DDQN Denetleyici ile Konum Takibi.....	98
3.5.1. Eğitim Dışı Koşulların Denetim Performansı Üzerine Etkisi	103
4. İRDELEME	113
4.1. G-EHS'nin Konum Denetimi	113
4.1.1. PID Denetleyicinin Değerlendirilmesi	113
4.1.2. DDPG Denetleyicinin Değerlendirilmesi.....	114
4.1.3. PID ve DDPG Denetleyicilerin Kıyaslanması	114
4.2. D-EHS'nin Konum Denetimi	115
4.2.1. Tek DDQN Denetleyicinin Değerlendirilmesi.....	115
4.2.2. Çoklu DDQN Denetleyicinin Değerlendirilmesi	116

4.2.3. Deneysel Eğitim ile İyileştirilen Çoklu DDQN Denetleyicinin Değerlendirilmesi	117
4.2.4. DDQN Tabanlı Denetleyicilerin Kıyaslanması.....	117
4.3. G-EHS ve D-EHS'nin Konum Denetim Performansının Kıyaslanması	118
4.4. Eğitim Dışı Koşulların Deneysel Eğitim ile İyileştirilen Çoklu DDQN Denetleyicinin Takip Performansına Etkisi	121
5. SONUÇLAR.....	124
6. ÖNERİLER	126
7. KAYNAKLAR.....	127
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

DİJİTAL ELEKTROHİDROLİK SİSTEMLERİN POPET TİPİ HİDROLİK VALFLERLE PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME KULLANILARAK DENETLENMESİ

Mustafa Yavuz COŞKUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet İTİK
2023, 132 Sayfa

Bu tez kapsamında, enerji verimliliği ve maliyet açısından geleneksel elektrohidrolik sistemlerin (G-EHS) yerine geçebilecek dijital elektrohidrolik sistemlerin (D-EHS) konum denetimi için bir denetim yöntemi önerilmektedir. Bu sayede, D-EHS'lerin denetiminde sıkça karşılaşılan karmaşık denetleyici tasarım sürecine alternatif bir yaklaşım sunulmaktadır. D-EHS'nin konum denetimi için geniş ve ayrık eylem uzaylarında etkinliği bilinen ikili derin q-ağı (DDQN) pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. DDQN denetleyicinin eğitimi için D-EHS'nin matematik modeli kullanılmıştır. Eğitim için farklı yaklaşımlar denenmiş ve en iyi sonuç, benzetim ortamında eğitilen çoklu DDQN denetleyicinin deney düzenindeki eğitim ile birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca, D-EHS'nin performansı G-EHS ile karşılaştırılmış ve D-EHS'nin G-EHS'ye benzer performans sergilediği benzetim ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Sürekli eylem çıktısı ile denetlenebilen G-EHS için pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetim yöntemi olarak derin deterministik politika gradyanı yöntemi kullanılmıştır. Önerilen DDQN denetleyici ve D-EHS'nin eğitim dışı (farklı konum referansı, valf arızası, besleme basıncı değişimi) durumlardaki davranışları da deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, D-EHS'nin önerilen denetleyici ile kullanılması durumunda G-EHS ile kıyaslanabilir performans sunduğunu göstermiştir. Bununla beraber, eğitim dışı koşullar altında dahi konum denetim performansının korunduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pekiştirmeli öğrenme, Dijital elektrohidrolik sistem, Bağımsız akış denetimi, İkili derin q-ağı, Derin deterministik politika gradyanı

PhD. Thesis

SUMMARY

CONTROL OF DIGITAL ELECTROHYDRAULIC SYSTEMS DRIVEN BY POPPET-TYPE HYDRAULIC VALVES USING REINFORCEMENT LEARNING

Mustafa Yavuz COŞKUN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Mehmet İTİK
2023, 132 Pages

In this thesis, a control method is proposed for the position control of digital electrohydraulic systems (D-EHS) that could replace conventional electrohydraulic systems (C-EHS) in terms of energy efficiency and cost. This offers an alternative approach to the complex controller design process frequently encountered in the control of the D-EHS. The double deep Q-network (DDQN) reinforcement learning approach, known for its effectiveness in controlling large and discrete action spaces, is employed for the position control of the D-EHS. The mathematical model of the D-EHS is obtained and employed for training the DDQN controller. Various training approaches were explored, and the best result was achieved by retraining the multiple DDQN controllers, which had been pretrained in a simulation environment, using an experimental setup. Additionally, the D-EHS's performance is evaluated against the C-EHS, showing comparable results in both simulation and experiments. A deep deterministic policy gradient based controller is employed for the position control of the C-EHS. The behavior of the proposed DDQN controller and the D-EHS under non-training conditions is also examined through experimental studies. The results show that, the D-EHS offers comparable performance to the C-EHS when used with the proposed controller, and the position control performance is maintained even under non-training conditions.

Key Words: Reinforcement learning, Digital electrohydraulic system, Independent metering valve control, Double deep q-network, Deep deterministic policy gradient

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	EHS'nin şematik gösterimi ve temel birimleri (kırmızı çizgi = yüksek basınçlı hat, mavi çizgi = düşük basınçlı hat).....	2
Şekil 2.	Tek sürgülü 4/3 oransal valfin kesit görünümü (URL-1)	3
Şekil 3.	BAY sistemi uygulamasında kullanılan çeşitli tasarımlar: (a) 3/3 valf, (b) 3/3 valf (ters düzen), (c) 3/3 valf ve 2/2 valf birleşimi ve (d) 2/2 valf (Eriksson & Palmberg, 2011).....	4
Şekil 4.	4 adet 2/2 aç-kapa valf ile oluşturulmuş D-EHS	6
Şekil 5.	(a) 4/3 oransal valf ve (b) aç-kapa valflerle oluşturulmuş eşleniği	9
Şekil 6.	Ekskavatörde kullanılan ve aç-kapa valflerden oluşan BAY sistemi (Ketonen & Linjama, 2019).....	10
Şekil 7.	Geleneksel ve dijital EHS yönlendirme birimlerinin yerleşimi.....	15
Şekil 8.	(a) Deneysel ve (b) sayısal çalışmalarda kullanılan G-EHS'nin şematik gösterimi.....	16
Şekil 9.	4/3 doğrusal valfle sürülen asimetrik bir hidrolik pistonu içeren G-EHS'nin gösterimi ve matematik modelinde kullanılan sistem parametreleri	18
Şekil 10.	Valf sürücüsünün transfer fonksiyonunu belirlemek için kullanılan girdi ve çıktı sinyalleri	21
Şekil 11.	Denetim sinyaline göre oransal valfin açıklık alanı değişimi.....	22
Şekil 12.	4 adet aç-kapa valf ve farklı açıklık değerlerine sahip orifislerden oluşan DAKB ve DAKB sembolü.....	24
Şekil 13.	2 adet 4-bit DAKB ve 1 adet 4/3 yönlendirme valfinden oluşan D-BAY ile sürülen D-EHS	24
Şekil 14.	Pekiştirme öğrenme tabanlı denetim yöntemlerinin temel yapısı (Sutton & Barto, 2018)	29
Şekil 15.	DDQN yönteminin işleyişinde kullanılan eğitim ortamı.....	32
Şekil 16.	DDQN algoritması (Mnih vd., 2015b; van Hasselt vd., 2015).....	33
Şekil 17.	DDPG yönteminin işleyişinde kullanılan eğitim ortamı	34
Şekil 18.	DDPG algoritması (Lillicrap vd., 2015)	35
Şekil 19.	PID denetleyicinin şematik gösterimi.....	36
Şekil 20.	PSO algoritmasının uygulama adımları	38
Şekil 21.	G-EHS deney düzeneği ve denetim sisteminin şematik gösterimi	42
Şekil 22.	G-EHS deney düzeneği.....	42
Şekil 23.	D-EHS deney düzeneği ve denetim sisteminin şematik gösterimi	43
Şekil 24.	2 adet 4-bit DAKB içeren dijital hidrolik valf bloğunun şematiği	44
Şekil 25.	Dijital hidrolik valf bloğunun 3 boyutlu modeli ve üretilen valf bloğu	45

Şekil 26.	D-EHS deney düzeneği.....	45
Şekil 27.	Hidrolik silindirin deneysel olarak elde edilen Stribeck sürtünme eğrisi	47
Şekil 28.	Simulink Simscape Fluids modülü ile oluşturulan G-EHS modeli	48
Şekil 29.	PID kazançlarının PSO yöntemiyle belirlenmesi için oluşturulan benzetim ortamı	49
Şekil 30.	Rampa, basamak ve sinüs sinyallerinden oluşan çoklu konum referansı	50
Şekil 31.	PID kazançlarının PSO ile belirlenmesi sırasında maliyet fonksiyonu değerinin değişimi	51
Şekil 32.	DDPG eğitimi için kullanılan benzetim ortamı	52
Şekil 33.	DDPG denetleyici için belirlenen (a) aktör ve (b) kritik YSA'lar.....	57
Şekil 34.	DDPG denetleyici eğitimi için düzenlenen benzetim ortamı	58
Şekil 35.	DDPG denetleyici eğitimi süresince alınan ödülün değişimi	58
Şekil 36.	DAKB A ve B'nin Simulink Simscape Fluids modülü kullanılarak modellenmesi.....	59
Şekil 37.	D-EHS'nin Simulink Simscape Fluids modülü kullanılarak modellenmesi.....	60
Şekil 38.	Tekli DDQN denetleyicide π politika fonksiyonu olarak YSA	63
Şekil 39.	Tek DDQN denetleyici eğitimi için düzenlenen benzetim ortamı	64
Şekil 40.	Tek DDQN denetleyici eğitiminde kullanılan kısaltılmış çoklu konum referans sinyali.....	64
Şekil 41.	Tek DDQN denetleyici eğitimi süresince alınan ödülün değişimi	65
Şekil 42.	Çoklu DDQN denetleyici eğitimi için Matlab Simulink yazılımında oluşturulan benzetim ortamı	66
Şekil 43.	Çoklu DDQN denetleyici eğitimi için düzenlenen benzetim ortamı.....	69
Şekil 44.	Çoklu DDQN denetleyici eğitiminin ilk kısmında alınan ödüllerin değişimi.....	70
Şekil 45.	Çoklu DDQN denetleyici eğitiminin ikinci kısmında alınan ödüllerin değişimi.....	72
Şekil 46.	Deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin eğitim süresince aldığı ödüllerin değişimi	74
Şekil 47.	PID denetleyici ile basamak konum referansı takibi	78
Şekil 48.	PID denetleyici ile rampa konum referansı takibi	79
Şekil 49.	PID denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi	80
Şekil 50.	DDPG denetleyici ile basamak konum referansı takibi.....	83
Şekil 51.	DDPG denetleyici ile rampa konum referansı takibi.....	84

Şekil 52.	DDPG denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi	85
Şekil 53.	D-EHS ve G-EHS deney sistemlerinde sinüs konum referansı takibinde ölçülen basınç değişimleri	87
Şekil 54.	Tek DDQN denetleyici ile basamak konum referansı takibi.....	90
Şekil 55.	Tek DDQN denetleyici ile rampa konum referansı takibi.....	91
Şekil 56.	Tek DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi	92
Şekil 57.	Çoklu DDQN denetleyici ile basamak konum referansı takibi	95
Şekil 58.	Çoklu DDQN denetleyici ile rampa konum referansı takibi	96
Şekil 59.	Çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi	97
Şekil 60.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile basamak konum referansı takibi	100
Şekil 61.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile rampa konum referansı takibi	101
Şekil 62.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi.....	102
Şekil 63.	Farklı aç-kapa popet valflerin arızalanması sonucunda konum takip performansının değişimi	105
Şekil 64.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi.....	107
Şekil 65.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,05 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi.....	108
Şekil 66.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 5.derece polinom kullanılarak oluşturulmuş konum referansı takibi.....	109
Şekil 67.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansının 15 bar besleme basıncı altında takibi.....	111
Şekil 68.	Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansının 25 bar besleme basıncı altında takibi.....	112
Şekil 69.	G-EHS'nin ve D-EHS'nin sinüs konum referansı takip performanslarının karşılaştırılması	120
Şekil 70.	G-EHS'nin ve D-EHS'nin rampa konum referansı takip performanslarının karşılaştırılması	120

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. G-EHS deney düzeneğinin teknik özellikleri	41
Tablo 2. Deneyisel olarak elde edilen sürtünme kuvveti katsayıları	46
Tablo 3. PID denetleyici kazançlarını belirlemek için kullanılan PSO parametreleri	50
Tablo 4. PSO ile belirlenen PID kazanç değerleri	51
Tablo 5. Ödül fonksiyonunda kullanılan katsayılar	54
Tablo 6. DDPG eğitimi için kullanılan hiper parametreler.....	56
Tablo 7. Tekli DDQN denetleyicinin ödül fonksiyonu katsayıları.....	62
Tablo 8. Tek DDQN denetleyici eğitimi için kullanılan hiper parametreler	62
Tablo 9. Çoklu DDQN denetleyicinin ödül fonksiyonu katsayıları.....	68
Tablo 10. Çoklu DDQN denetleyici eğitiminde kullanılan hiper parametreler.....	69
Tablo 11. Arızasız DAKB A ve DAKB B ile gerçekleştirilen konum takibinde aç-kapa popet valflerin açık durumda bulundukları zaman adımı sayısı	104
Tablo 12. PID denetleyici ile çoklu konum referansının deneyisel takip performansı.....	113
Tablo 13. DDPG denetleyici ile çoklu konum referansının deneyisel takip performansı.....	114
Tablo 14. PID ve DDPG denetleyicilerinin konum takip performansının karşılaştırılması.....	115
Tablo 15. Tek DDQN denetleyici ile çoklu konum referansının deneyisel takip performansı.....	115
Tablo 16. Çoklu DDQN denetleyici ile çoklu konum referansının deneyisel takip performansı.....	116
Tablo 17. Deneyisel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin çoklu konum referansı deneyisel takip performansı.....	117
Tablo 18. DDQN tabanlı denetleyicilerin konum takip performanslarının karşılaştırılması.....	118
Tablo 19. DDPG ve deneyisel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicilerinin konum takip performansının karşılaştırılması	119
Tablo 20. Deneyisel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin eğitim dışı koşullardaki takip performansı	121

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

γ	: İndirim katsayısı
θ	: YSA katsayıları
$\mu(s;\theta^\mu)$	: Aktör
π	: Pekiştirmeli öğrenme politikası
τ	: Öğrenme katsayısı
ϵ	: Politika dışı eylem seçim olasılığı
Δ_x	: Oransal valf sürgüsünün örtme miktarı
$\hat{Q}$	: Hedef kritik
Q^*	: İdeal eylem fonksiyonu
$\theta^{Q'}$	: Hedef kritik YSA katsayıları
$\theta^{\mu'}$	: Hedef aktör YSA katsayıları
θ^-	: Hedef YSA katsayıları
θ^Q	: Kritik YSA katsayıları
θ^μ	: Aktör YSA katsayıları
$\hat{\mu}$	: Hedef aktör
π^*	: İdeal pekiştirmeli öğrenme politikası
Δp	: Basınç farkı
a	: Pekiştirmeli öğrenme eylemi
A_A	: A odacığı tarafında basınca maruz kalan etkin alan
A_B	: B odacığı tarafında basınca maruz kalan etkin alan
A_v	: Oransal valf akışkan geçiş alanı
BAY	: Bağımsız akış yönlendirme
$\mathbf{c}$	: DAKB durum matrisi
C	: YSA katsayılarını güncelleme sıklığı
c_1	: PSO yerel ivme katsayısı
c_2	: PSO küresel ivme katsayısı
c_d	: Oransal valf tahliye katsayısı
D	: PSO çözüm uzayı boyutu
DAKB	: Dijital akış kontrol birimi
D-BAY	: Dijital bağımsız akış yönlendirme
D-EHS	: Dijital elektrohidrolik sistem

DQN	: Derin q-ağı
e	: Konum takip hatası
$\dot{e}$	: Konum takip hatasının türevi
E	: Hidrolik akışkanın sıkıştırılabilirlik katsayısı
EHS	: Elektrohidrolik sistem
F_C	: Coulomb kuvveti
F_d	: Piston üzerine etkiyen kuvvet
F_{fm}	: Frenleme kuvveti
$F_s(\dot{x}_p)$	: Sürtünme kuvveti
f_v	: Viskoz sürtünme katsayısı
G_{best}	: PSO parçacıkları arasındaki en iyi konum
G-EHS	: Geleneksel elektrohidrolik sistem
IAE	: Mutlak hatanın toplamı
K_d	: Türev kazanç
K_i	: İntegral Kazanç
K_p	: Oransal kazanç
$k_{v,A}$	: DAKB A akış katsayısı
$k_{v,B}$	: DAKB B akış katsayısı
$L_i(\theta_i)$	: Kayıp fonksiyonu
m	: Hidrolik pistonun kütlesi
P	: PSO parçacığı konumu
P_A	: A odacığının basıncı
P_B	: B odacığının basıncı
P_{best}	: PSO parçacığının bulunduğu en iyi konum
PID	: Oransal-İntegral-Türev denetleyici
P_s	: Besleme basıncı
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
P_T	: Tank basıncı
$Q(s, a; \theta^Q)$	: Kritik
Q_A	: A odacığındaki hidrolik akışkan debisi
Q_B	: B odacığındaki hidrolik akışkan debisi
$Q_{N,A}$	: DAKB A akış katsayısı vektörü
$Q_{N,B}$	: DAKB B akış katsayısı vektörü

r	: Pekiştirmeli öğrenme ödülü
$r_{1,2}$	: PSO rastgele değişken değerleri
ReLU	: Doğrultulmuş doğrusal birim
RMS	: Karekök ortalama
S	: Pekiştirmeli öğrenme durumu
$sg(x_s)$	: Debi yönünü belirleyen parçalı fonksiyon
Tb	: Tam bağlı
TD3	: İkiz-gecikmeli derin deterministik politika gradyanı
u	: Oransal valf denetim sinyali
V	: PSO parçacığı hızı
V_{0A}	: A odacığının başlangıç hacmi
V_{0B}	: B odacığının başlangıç hacmi
w	: PSO atalet katsayısı
x	: Hidrolik pistonun konumu
$\dot{x}_p$	: Hidrolik pistonun hızı
$\ddot{x}_p$	: Hidrolik pistonun ivmesi
x_s	: Oransal valf sürgü konumu
YSA	: Yapay sinir ağı

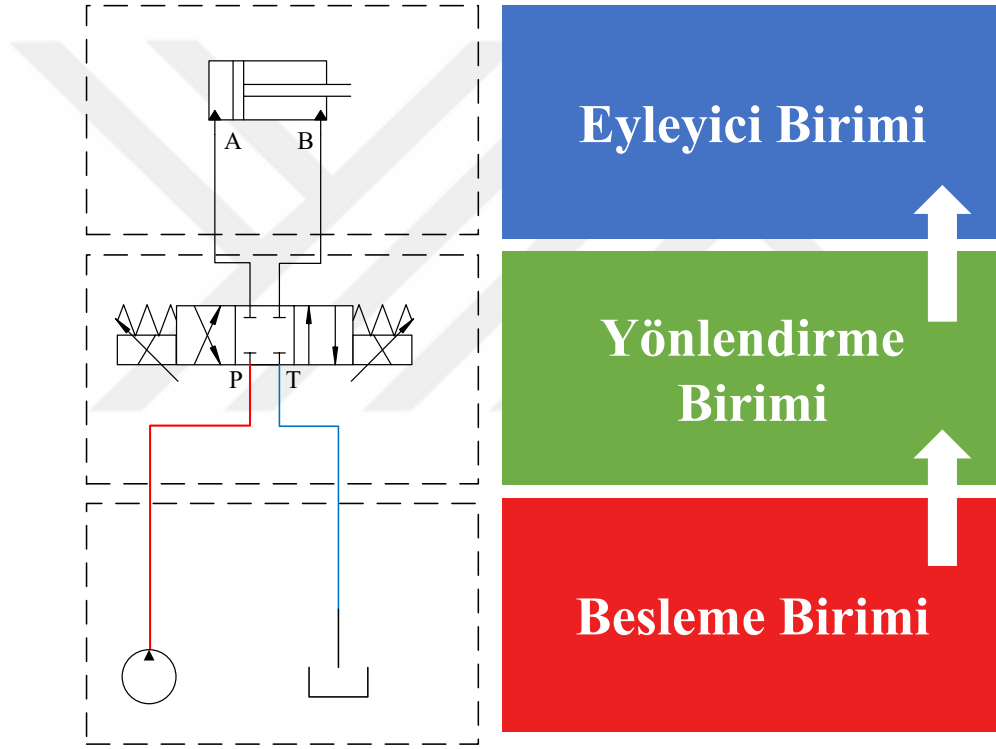
1. GİRİŞ

Elektrohidrolik sistemler (EHS'ler) yüksek güce ihtiyaç duyan endüstriyel tesislerin ayrılmaz bir parçasıdır (Ding vd, 2019). Bununla beraber bu sistemler kazıcılar (*İng.* Excavator) (Janosevic vd, 2012; Vázquez vd, 2014), tarım aletleri (Borghini vd, 2014; Činkelj vd, 2010) ve robotik kollar (Bayrak vd, 2018; Boaventura vd, 2015) gibi uygulamalarda da etkin olarak kullanılmaktadır. EHS'lerin bu denli yaygın kullanımının başlıca sebepleri yüksek güç çıkışı üretebilme yeteneği, sağlam yapısı ve yüksek güç/ağırlık oranıdır (Jelali & Kroll, 2004; Mattila vd, 2017). EHS'lerin yaygın kullanımına ve sunduğu avantajlara rağmen denetlenebilirliklerini zorlaştıran parametrik belirsizlikler üzerinde durulması gereken önemli bir konu olarak araştırmacıların karşına çıkmaktadır (Guo vd, 2017; Yao vd, 2014). Bu belirsizliklerin başlıca kaynakları olarak besleme basıncındaki dalgalanma, hidrolik denetim valflerindeki belirsizlikler ve hidrolik sıvının sıkıştırılabilirlik değerinin (*İng.* Bulk modulus) sabit olmaması gibi durumlar gösterilebilir. Ayrıca, EHS'lerin doğrusal olmayan dinamikler (*İng.* Nonlinear dynamics) (Merrett, 1967; Yao vd, 2000) barındırması da göz ardı edilmemesi gereken bir diğer durumdur. Belirtilen bütün hususlar bir araya geldiğinde EHS'lerin hassas konum ve kuvvet denetiminin gerçekleştirilmesi zorlu bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır (Fallahi vd., 2018; Onat vd., 2017).

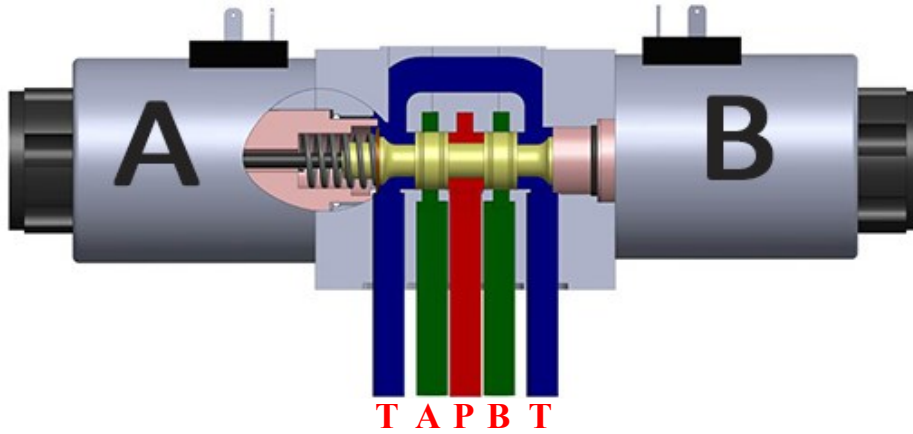
Belirtilen unsurlara ek olarak, bağımlı akış yönlendirme yapısı EHS'lerin potansiyelinin tam anlamıyla ortaya çıkmasını engelleyen diğer bir durumdur. Bu yapının işlevini anlamak açısından EHS'nin çalışma prensibini kısaca irdelemek yerinde olacaktır, daha detaylı anlatım tezin ilerleyen kısımlarında verilecektir. EHS'ler besleme, yönlendirme ve eyleyici olmak üzere üç birimden oluşmaktadır (Şekil 1). Hidrolik akışkan, seçilen bir pompa yardımıyla besleme biriminde basınçlandırılır. Bu birim aynı zamanda sistemden geri dönen hidrolik akışkanı da depolayarak (hidrolik tank), pompaya beslenmesini sağlar. Basınçlandırılan akışkan, yönlendirme biriminde yer alan hidrolik valf aracılığıyla eyleyici birimini oluşturan hidrolik eyleyiciye (piston/motor) ulaşır. Hidrolik valf üzerinden geçen akışkanın debisi bir denetim sinyali aracılığıyla denetlenir.

Şekil 1'de yönlendirme biriminde akışkan debisinin denetimi için 4/3 oransal hidrolik valf kullanılmıştır. Kullanılan oransal valfte tek sürgülü bir akış yönlendirme sistemi bulunmaktadır (Şekil 2). Bu tür akış yönlendirme yapılarında, hidrolik eyleyicinin (piston, motor) giriş ve çıkışındaki akış denetimi fiziksel kısıtlama nedeniyle birbirine

bağımlı olarak yapılabilmektedir. Giriş ve çıkışın mekanik olarak birbirine bağlı olması 4/3 oransal valf ile giriş veya çıkıştan birinin denetlenebileceğini göstermektedir. Bunun sonucunda EHS çıktılarının (konum, hız ve kuvvet) hassas denetimi zorlaşmakta ve %30'a varan kısma kayıpları sebebiyle EHS'nin enerji verimliliği düşmektedir (Abuowda vd, 2020; Ding vd, 2018). Valf kaynaklı kayıpları gidermek için yapılan çalışmaların odağında hidrolik eyleyiciye giren ve çıkan akışkanın birbirinden bağımsız olarak denetlenmesi bulunmaktadır (Dell'Amico vd, 2013; Huova vd, 2013; Ketonen & Linjama, 2019; Linjama vd, 2003b).



Şekil 1. EHS'nin şematik gösterimi ve temel birimleri (kırmızı çizgi = yüksek basınçlı hat, mavi çizgi = düşük basınçlı hat)

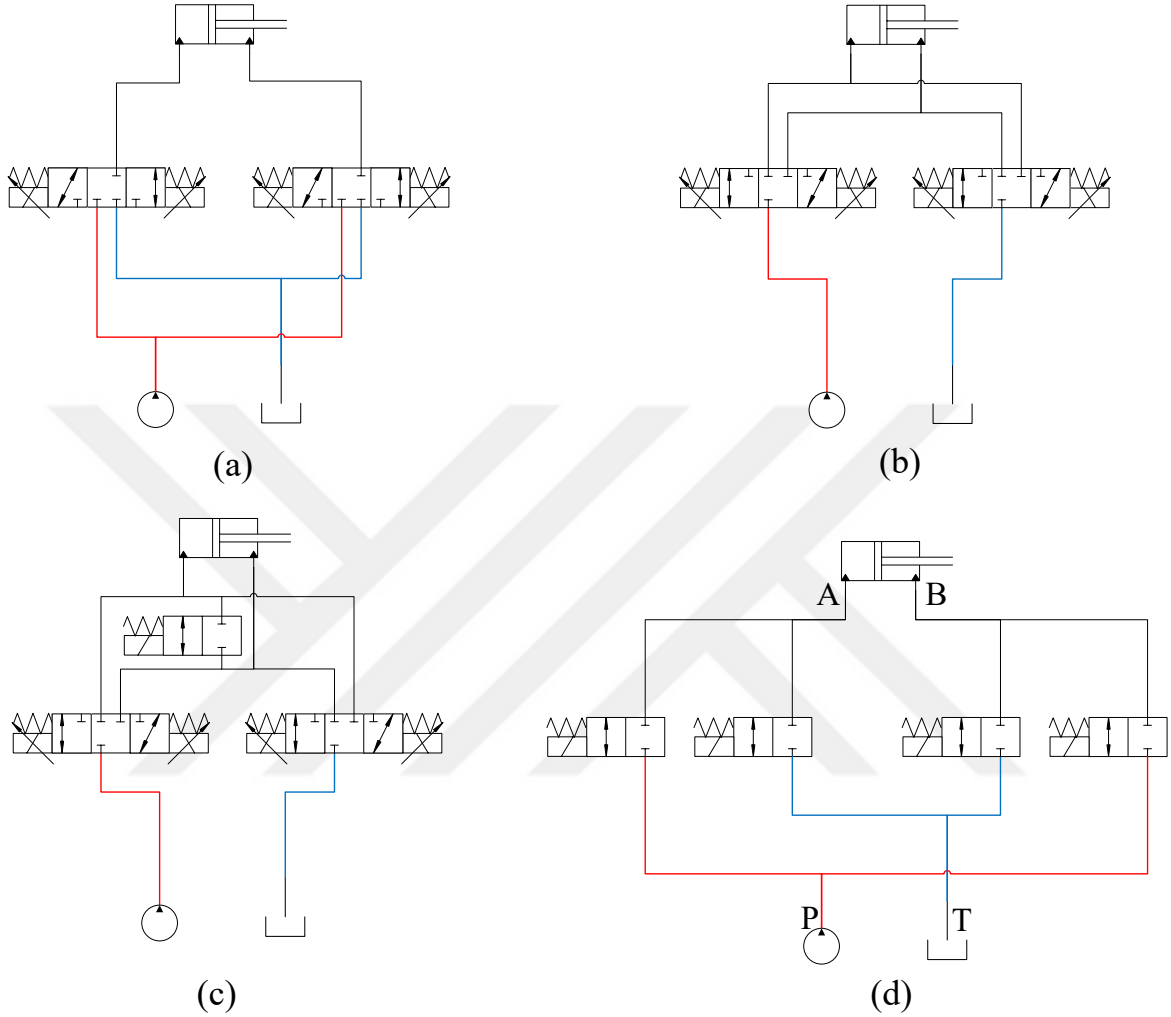


Şekil 2. Tek sürgülü 4/3 oransal valfin kesit görünümü (URL-1)

Önerilen bu yaklaşım literatürde bağımsız akış yönlendirme (*İng.* Independent metering, BAY) olarak isimlendirilmektedir. BAY yaklaşımında hidrolik eyleyicinin giriş ve çıkış hattındaki basınç değerleri bağımsız olarak denetlenerek enerji sarfiyatı azaltılabilir ve yüksek basınç değerlerine çıkmadan istenilen mekanik güç elde edilebilir (Ding vd., 2016). BAY sisteminin kullanıldığı çeşitli EHS şematikleri Şekil 3'te verilmiştir.

Abuowda vd. (2020) tarafından yapılan literatür taraması çalışmasında, BAY yaklaşımının EHS'lere sağladığı avantajlar ve sebep olduğu dezavantajlar ayrıntılı bir biçimde irdelenmiştir. Sıralanan avantajlar arasında, sistemde bulunan hidrolik eyleyicinin giriş ve çıkışının bağımsız denetlenmesiyle EHS'nin daha esnek bir çalışma yapısına müsaade etmesi sayılabilir. Bununla beraber, donanımda herhangi bir değişiklik yapmadan yazılım tabanlı geliştirmelerle EHS'nin farklı uygulamalara özelleştirilebilmesi diğer bir avantajdır. Sistem, esnek çalışma yeteneği sayesinde bu özelleştirmelerin yapılmasına imkân tanımaktadır. Hem kullanılan donanımla hem de yazılım tabanlı geliştirme seçenekleriyle EHS'nin enerji verimliliğinin arttırılabilmesi diğer bir göze çarpan etmendir. BAY sisteminde oransal ve servo gibi karmaşık yapıları valfler yerine oldukça basit yapıları olan aç-kapa (*İng.* On-off) valfler kullanılabilir. Aç-kapa valflerle oluşturulan bu sistem ise dijital BAY (D-BAY) olarak isimlendirilmektedir. Sistem maliyeti açısından değerlendirildiğinde ise D-BAY ile oluşturulan EHS maliyetinin oransal ya da servo valf kullananlardan daha düşük olması mümkündür. Ek olarak, sistem konfigürasyonundaki esneklik işlevselliğin donanımdan yazılıma aktarılması ve gelişmiş denetim yöntemlerinin uygulanabilmesi gibi avantajlar da beraberinde getirmektedir. Bu avantajlarla beraber D-

BAY sistemi EHS kullanımı gerektiren uygulamalar için dikkat çekici bir alternatif olmaktadır.

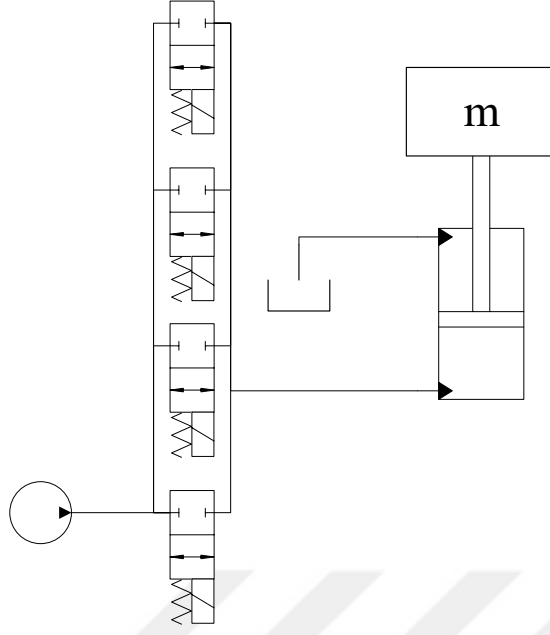


Şekil 3. BAY sistemi uygulamasında kullanılan çeşitli tasarımlar: (a) 3/3 valf, (b) 3/3 valf (ters düzen), (c) 3/3 valf ve 2/2 valf birleşimi ve (d) 2/2 valf (Eriksson & Palmberg, 2011)

Ancak, BAY yaklaşımının dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle, aç-kapa gibi basit valflerin kullanılmadığı durumlarda bileşen maliyetlerinde artış gözlenmektedir. Ayrıca, bu yaklaşımda EHS'nin denetlenebilmesi için karmaşık denetleyicilerin kullanılması gerekmektedir. Maliyeti düşürerek, aç-kapa valflerle, D-BAY uygulaması yapılmak istendiğinde ise basınç dalgalanmaları ve ani hız değişimleri denetim performansı üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır. Meydana gelen basınç dalgalanmalarını gidermek için sisteme ilave edilmesi gereken hidrolik ekipmanlar ise

sistemin genel maliyetini arttırabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, D-BAY yaklaşımı birçok avantaj sunarken, ele alınması gereken bir dizi sorunu da beraberinde getirmektedir.

Görece yüksek maliyetli olan servo ve oransal valflerle kurulan BAY sisteminin örnekleri Şekil 3.a, b ve c’de verilmiştir. Bu noktada basit mekanik yapısı ile bilinen ve düşük maliyetiyle diğerlerinden ayrılan aç-kapa valfleri değerlendirmek yerinde bir karar olacaktır (Şekil 3.d). Linjama vd. (2003a) yaptıkları çalışmada 2/2 aç-kapa valfleri kullanarak üzerine sabit yük uygulanan asimetric bir hidrolik pistonun konum denetimini gerçekleştirmişlerdir. Burada valf denetimi için aç/kapa (*Ing.* On/off, bang-bang) denetleyici kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar denetim performansı açısından ümit vaat edici olmasına karşın göz ardı edilemeyen dezavantajlar ortaya çıkmıştır: Valf ömrünün beklenenden önce tükenmesi, hidrolik basıncın ani değişim göstermesi ve buna bağlı olarak kavitasyon oluşumu. Aynı çalışmada hidrolik hat üzerine birden fazla sayıda aç-kapa valf yerleştirilerek ortaya çıkan sorunların bir kısmının etkin biçimde çözüldüğü ifade edilmiştir. Bunun için ise birbirine paralel olarak bağlı 4 adet aç-kapa valf kullanılmıştır (Şekil 4). Yapılan iyileştirme sonunda ortaya çıkan EHS ise dijital elektrohidrolik sistem (D-EHS) olarak isimlendirilmiştir. Bir EHS’nin D-EHS olarak isimlendirilebilmesi için taşınması gereken özellikler de aynı çalışmada belirtilmiştir (Linjama vd., 2003). Öncelikle, yönlendirme birimindeki tüm valflerin aç-kapa yapısında olması gerekmektedir. Buna ek olarak, aç-kapa valflerle oluşturulan sistemin performansı, servo veya oransal valf barındıran, diğer sistemlerle karşılaştırılabilir düzeyde olmalıdır. Denetleyici açısından değerlendirildiğinde ise sisteme dair temel bilgilerin kullanılarak hidrolik eyleyicinin denetiminin gerçekleştirebilmesi gerekmektedir. Son olarak, D-EHS’nin barındırdığı çok sayıda valf etkin bir biçimde kullanabilmeli ve buna bağlı olarak valf arızası durumunda sistem işler halde kalabilmelidir.



Şekil 4. 4 adet 2/2 aç-kapa valf ile oluşturulmuş D-EHS

BAY sisteminde servo ve oransal valfler yerine aç-kapa valflerin kullanılması yeni avantajları da yanında getirmektedir (Ding vd., 2018; Linjama vd., 2003a). Hidrolik akışkanın geçeceği açıklığın ara değerlere ayarlama gereksiniminin olmaması kullanılan valflerin maliyetinin düşük olmasını sağlamaktadır. Valf açıklığının kesin olarak bilinmesi EHS'nin hassas olarak denetlenebilmesi için oldukça önemlidir. Geri beslemeli (*İng.* Feedback) yapısı nedeniyle yüksek maliyetli olan servo valflerde açıklık değeri tam olarak ayarlanabilmektedir. Açık çevrim (*İng.* Open-loop) çalıştığı için görece daha düşük maliyetli olan oransal valflerde ise histerezis (*İng.* Hysteresis) nedeniyle valf açıklığı üreticinin belirtmiş olduğu hata payı çerçevesinde belirlenebilmektedir. Servo ve oransal valflerden oldukça düşük maliyetli olan aç-kapa valflerin kullanıldığı sistemlerde açıklık ara değerlere ayarlanamamakta fakat miktarı tam olarak bilinmektedir (Şekil 4). Aç-kapa valflerin yapı olarak hidrolik sıvı içerisindeki kirleticilere daha dayanıklı olması da diğer bir önemli avantajdır. EHS'lerin denetimine etki eden diğer bir olumsuz unsur da hidrolik akışkan debisinin hassas biçimde ayarlanmasına engel olan sızıntıdır. Popet tipi gibi uygun aç-kapa valf seçimi ile sızıntı kaynaklı olumsuzluklardan kurtulmak mümkündür. Son olarak, denetim performansının istenen düzeyde olması için hidrolik akışkanın geçeceği açıklık miktarının hızlı bir şekilde değiştirilebilmesi gerekmektedir. Ancak, uygun maliyetli aç-kapa valflerin tepki süresi yüksek olduğu için açıklığın istenen hızda ayarlanabilmesi mümkün değildir. Aç-kapa valflerin farklı biçimlerde bir arada

kullanılması ise düşük tepki süresinden doğan bu olumsuzluğu ortadan kaldırmaktadır. Böylece, D-EHS'ler servo veya oransal valf kullanan EHS'lerle kıyaslanabilecek düzeyde performans sunabilmektedir.

1.1. Dijital Elektrohidrolik Sistem

Literatürde aç-kapa valflerinin pompa ve akümülatör gibi diğer hidrolik elemanların çıkışlarını düzenlemek için kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Breidi vd., 2016; Ding vd., 2018; H. Wang vd., 2022; Zhang vd., 2020). Kullanılan aç-kapa valfler ve denetim yapısı sebebiyle bu sistemler de D-EHS olarak isimlendirilmektedir. Bu tez kapsamında ise D-EHS terimi sadece yönlendirme biriminde aç-kapa türünde hidrolik valfler barındıran sistemleri tanımlamak için kullanılmıştır.

Dünyanın artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için enerji elde etme yöntemlerimizi her geçen gün geliştirmekteyiz. Fosil yakıtlarla başlayan serüvenimiz nükleer enerji santrallerinde atomları parçalayarak enerji ürettiğimiz noktaya kadar geldi ve ilerlemeye devam etmekte. Geldiğimiz noktada enerji ihtiyacımızı karşılamak için rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını da etkin olarak kullanmaktayız. Bununla beraber, çok daha büyük miktarlarda enerji sağlayabilecek Wendelstein 7-X gibi füzyon reaktörleriyle de enerji üretimi konusunda ümit vaat eden çalışmalar yapılmaktadır (Klinger vd., 2019). Bütün bu gelişmelere rağmen enerji maliyeti ve/veya bizlerin enerjiye duyduğu ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, sınırlı arza sahip olan enerjinin etkin bir biçimde kullanılması bilinçli her topluluğun öncelikli seçimidir. Endüstriyel kuruluşlar açısından değerlendirildiğinde ise bunun karşılığı enerji verimliliği arttırılmış işlem döngüleridir. Enerji verimliliği arttırılmış yapılara örnek olarak D-EHS'ler gösterilebilir. Bu önemli özelliğinden dolayı D-EHS'ler bağımlı akışkan yapısı kullanan geleneksel EHS'lere (G-EHS) uygun bir alternatif olarak gösterilmektedir.

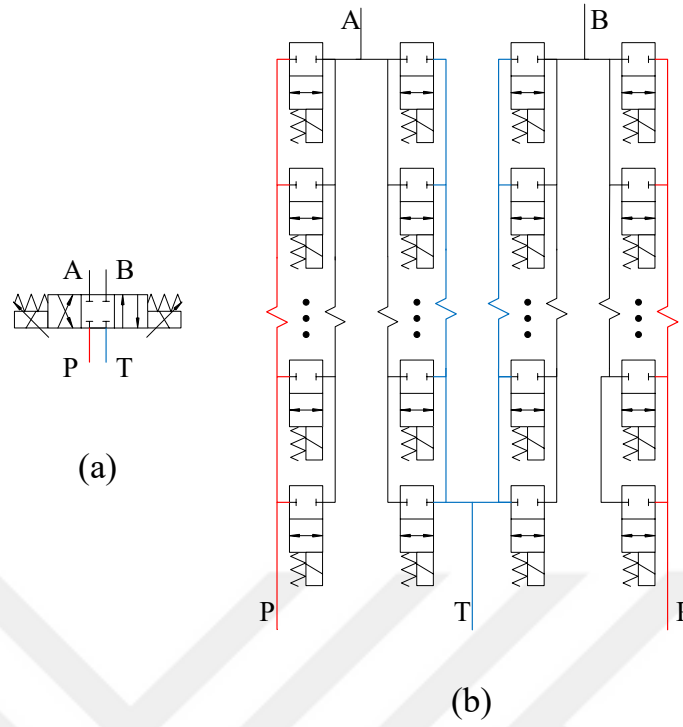
G-EHS ile D-EHS arasındaki temel fark yönlendirme biriminde kullanılan valf sistemidir. Bu nedenle hali hazırda yaygın kullanıma sahip olan geleneksel sistemlerin dijitalle dönüştürülmesi kabul edilebilir yapısal değişikliklerle gerçekleştirilebilmektedir. Örnek olarak

Şekil 1'de verilen G-EHS ele alınabilir. Bu sistemin yönlendirme biriminde bir adet 4/3 oransal valf yer almaktadır ve dijital sistem dönüşümü için oransal valfin aç-kapa valflerle değiştirilmesi yeterli olmaktadır. Bunun için Şekil 5b'de yer alan aç-kapa valflerle

oluşturulmuş oransal valf eşleniği kullanılabilir. Aç-kapa valflerle oluşturulmuş sistem incelendiğinde PA, AT, PB ve BT hidrolik hatlarındaki açıklıkların birbirinden bağımsız olarak denetlenebildiği görülmektedir.

Hidrolik hatlar üzerindeki paralel bağlı her bir valf seti dijital akış kontrol birimi (DAKB) olarak adlandırılmaktadır. DAKB'nin azami akış katsayısı kendini oluşturan valflerin toplamı kadardır. Ara değerlerdeki akış katsayıları için ise DAKB içerisindeki valflerin durumu (açık – kapalı) değiştirilmektedir. DAKB'deki valf sayısı ve türleri hidrolik eyleyicinin denetimi üzerinde doğrudan etkilidir. Literatürde DAKB içerisindeki valf dizilimi için eş, ikili ve fibonacci olmak üzere üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır (Kalaiarassan & Krishnamurthy, 2019; Linjama vd., 2003b; Ozalp vd., 2021). DAKB içerisindeki valflerin akış katsayısı birbirinin aynısı ise eş dizilim; her bir valfin akış katsayısı bir öncekinin iki katı (1:2:4:8:16) olacak şekilde artıyorsa ikili dizilim; valflerin akış katsayısı fibonacci dizilimiyle uyumlu olarak (1:1:2:3:5) artıyorsa fibonacci dizilimi olarak adlandırılmaktadır. Bir DAKB'nin barındırdığı valf sayısı ise ihtiyaç duyulan denetim sinyalinin sayısına istinaden bit olarak ifade edilir. Örnek olarak, Şekil 5b'de PA hattı üzerinde 4 adet aç kapa valf olduğu durum 4-bit DAKB olarak ifade edilmektedir. Seçilen dizilime göre DAKB farklı sayıda akış katsayısı seçeneği sunabilir. N valf sayısı olmak üzere eş dizilim seçildiği durumda N, ikili dizilim tercih edildiğinde 2^N-1 ve fibonacci dizilimli olması durumunda ise $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$ olmak üzere $\sum_{i=1}^N \{\varphi^i - (-\varphi)^i\} / \sqrt{5}$ adet sıfırdan farklı sayıda akış katsayısı ortaya çıkmaktadır (Linjama vd., 2003a).

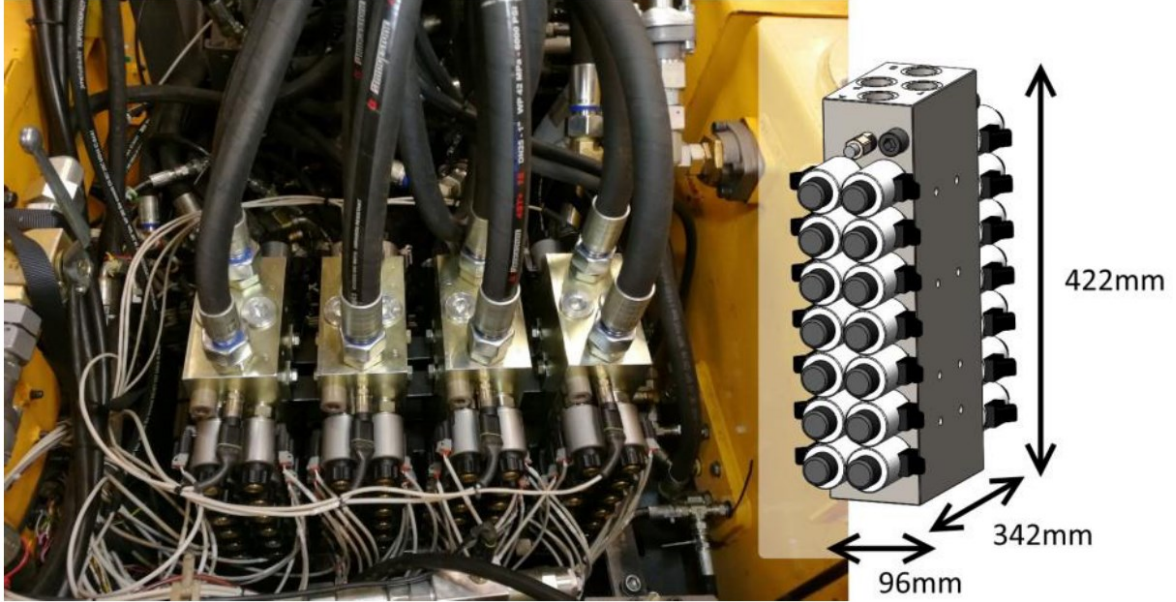
D-EHS'ler, görece karmaşık yapısına ve denetleyici tasarımında karşılaşılan zorluklara rağmen aktif bir araştırma alanını temsil etmektedir. Enerji kayıplarını azaltmaya yardımcı olması ve görece düşük maliyetli ilk yatırım gerektirmesi bu durum için önemli motivasyon kaynaklarıdır. D-EHS'nin gerçek dünya uygulamasına örnek olarak Ketonen ve Linjama'nın (2019) 20 tonluk bir ekskavatör üzerinde gerçekleştirdikleri çalışma gösterilebilir. Bu çalışmada ekskavatörün 4 ünitesinin denetiminden sorumlu her valf Şekil 5b'de verilen valf dizilimini kullanan yapılarla değiştirilmiştir. Ünitenin montajlanmış hali Şekil 6'da verilmiştir. Çalışmanın sonucunda ekskavatörün enerji tüketiminin %36 oranında azaldığı deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir.



Şekil 5. (a) 4/3 oransal valf ve (b) aç-kapa valflerle oluşturulmuş eşleniği

Yüksek güç ihtiyacı nedeniyle EHS'lere ihtiyaç duyan uygulamaların endüstrideki kullanım oranı göz önünde bulundurulduğunda, EHS'lerin enerji tüketimini azaltmak doğrultusunda yapılan her gelişmenin dünya çapındaki enerji tüketimi üzerine iyi yönde etkisi olacağını söylemek mümkündür. Özellikle, enerji tüketiminin %30 oranında azaltılabilmesi ve bunun için basit hidrolik elemanlarının kullanılabilmesi, D-EHS'lerin dikkat çekmesinin ana nedenlerinden biridir. Buna karşın, D-EHS'ler hem EHS'lerin hem de D-BAY sisteminin karmaşıklığını bünyesinde taşımaktadır. İlgili literatürde EHS denetimi ve denetimde yaşanan sorunların giderilmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Bu & Yao, 2000; Kalyoncu & Haydim, 2009; Kim vd., 2012; Sarkar vd., 2013; Shaer vd., 2018; Won vd., 2017). Maalesef, aynı durum D-EHS'ler için geçerli değildir. D-EHS'ler basit hidrolik elemanlardan oluşmasına rağmen karmaşık bir akış yönlendirme sistemine sahiptir. Denetlenmesi gereken çok sayıda valf bulunması ve maliyet odaklı nedenlerle basit aç-kapa valflerin tercih edilmesi denetleyici tasarımı zorlaştırmaktadır. Bu durumda, denetleyicinin hidrolik eyleyicinin çıktısını ayarlayabilecek valf konfigürasyonunu seçerken ani basınç yükselmeleri ve diğer bozucu etkilerle mücadele etmesi kaçınılmazdır. Diğer yandan, D-EHS'ler hali hazırda son kullanıcıya yönelik hidrolik ürünler içermektedir. Yani, bu sistemlerin üretilmesi için yeni bir ürün geliştirme gerekliliği yoktur. Ancak, denetleyici tasarımı için gereken teorik altyapının

henüz yeterince olgunlaşmaması, D-EHS'lerin daha yaygın bir şekilde benimsenmesini engelleyen bir etkidir.



Şekil 6. Ekskavatörde kullanılan ve aç-kapa valflerden oluşan BAY sistemi (Ketonen & Linjama, 2019)

1.2. Tez İçeriği

Yapılan bu tez kapsamında tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen bir D-EHS için makine öğrenmesi tabanlı bir denetim yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği sayısal ve deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Ayrıca, G-EHS için de benzer çalışmalar yürütülmüştür. Böylelikle, D-EHS'nin performansı geleneksel sistemle kıyaslanmıştır. Bu amaçla tezin ilk kısmında, G-EHS ve D-EHS tanıtılmıştır. D-EHS'nin geleneksel sistemden avantajlı olduğu durumlar ve üstesinden gelinmesi gereken etmenler açıklanmıştır. D-EHS'nin denetimine yönelik olarak literatürde yer alan çalışmalar ayrı bir başlık altında verilerek bu tez çalışmasında önerdiğimiz yöntemin gerekliliği ortaya konmuştur. Sonrasında, G-EHS'nin ve D-EHS'nin matematiksel modelinin eldesine yönelik çalışmalara yer verilmiştir. Tez kapsamında kullanılan denetim yöntemlerine ise ilk kısmın sonunda değinilmiştir. İkinci kısım ise tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen G-EHS ve D-EHS üzerine yapılan denetim çalışmalarına ayrılmıştır. Tez kapsamında kullanılan denetleyicilerin tasarımına yönelik detaylar da bu kısımda yer almaktadır. Üçüncü kısımda gerçekleştirilen deneysel ve benzetim çalışmalarının sonuçları

sunulmuştur. Dördüncü kısım elde edilen sonuçların çeşitli kıstaslar kullanılarak değerlendirilmesine ayrılmıştır. Sonuçlar kısmında yapılan çalışmaların geneli göz önünde bulundurularak D-EHS'nin denetlenebilirlik yönünden potansiyeli üzerine değerlendirmelerde bulunulmuştur. D-EHS ve pekiştirmeli öğrenme alanlarıyla ilgili önerilere ise son kısımda değinilmiştir.

1.3. Literatür Özeti

EHS'lerin sağladığı güç avantajı bu sistemleri orta ölçekli ve ağır sanayinin ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir. Günümüzde, bu sistemlerin enerji verimliliği ve maliyet açısından modern gereksinimlere uyarlanması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu noktada, D-EHS'ler ise belirtilen gereksinimleri en iyi şekilde karşılayabildiği için uygun bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. D-EHS görece yeni bir alan olduğu için hidrolik devre tasarımı ve özelleştirilmiş valf imalatı bu alanda aktif olarak ele alınan araştırma konularıdır (Linjama vd., 2015; Ozalp vd., 2021; H. Wang vd., 2022). Bu tez kapsamında ise D-EHS'lerin denetiminde karşılaşılan sorunlar ortaya konulmuş ve alternatif bir denetim yaklaşımı önerilmiştir. Bu nedenle, literatür özeti D-EHS'lerin denetimiyle ilgili olan çalışmalarla sınırlı tutulmuştur.

Linjama vd. (2003) yaptığı çalışmada aç-kapa valflerle oluşturulmuş bir D-EHS'nin etkinliğini göstermiştir. Bu amaçla, asimetrik bir hidrolik pistonun denetimi farklı konfigürasyonlardaki aç-kapa valflerle gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında aç/kapa, darbe genlikli modülasyon (*İng.* Pulse width modulation, PWM) ve darbe kodu modülasyonu (*İng.* Pulse code modulation, PCM) yaklaşımlarının etkinliği incelenmiştir. Aç/kapa yaklaşımının hidrolik piston çıktısını yeterince hassas bir şekilde kontrol etmede sınırlı kaldığı, bu çalışma sonuçlarıyla açıklanmıştır. Ayrıca, PWM yaklaşımının hidrolik akışkan debisini aç/kapa denetleyiciye nazaran daha hassas bir şekilde denetleyebildiği de belirtilmiştir. Birbirinden farklı akış katsayılarına sahip aç-kapa valflerin kullanılmasıyla uygulanan PCM yaklaşımının ise hidrolik piston çıktıları denetleme konusunda diğer yaklaşımlardan daha başarılı olduğu vurgulanmıştır. PCM yaklaşımında basit aç-kapa valflerin kullanılabilmesinin de büyük bir avantaj olduğu belirtilmiştir. İlgili çalışmada, PCM yaklaşımına uygun olarak dizilen aç-kapa valflerin açık veya kapalı durumunun seçimi açık çevrim denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, sistem çıktıları da kullanarak kapalı çevrim bir denetleyici ile ortaya çıkan basınç dalgalanmaları belirli bir

seviyeye kadar giderilmiştir. Valf durumu seçimi için maliyet fonksiyonu kullanılmış ve en iyi valf durumu, valf çözümü uzayı içerisinde deneme yanılma yöntemiyle bulunmuştur (Linjama vd., 2003a). Diğer bir çalışmada Huova vd. (2010) tank hattının basınçlandırıldığı, aç-kapa valflerden oluşan bir hidrolik sistem kullanarak üç odacıklı bir hidrolik silindirin konum denetimini gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, iki odacıklı hidrolik silindirler için geliştirilmiş olan denetim modlarını üç odacıklı bir sistem için uygulanabilir hale getirilmiştir. Uygun valf durumlarının seçimi, enerji verimliliğini göz önünde bulunduran bir maliyet fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Hidrolik pistonun konum denetimi için hız ileri beslemeli (*İng.* Feed-forward) P-tipi bir denetleyici kullanılmıştır. Hidrolik pistonun konumu, hidrolik silindir odacıkları, besleme ve tank basınç değerleri sürekli olarak ölçülmüş ve bu bilgiler kaskad (*İng.* Cascade) denetleyiciye beslenmiştir. D-EHS'nin konum denetimi için yürüttüğü çalışmada Linjama vd. (2016) denetim modu yapısı içermeyen bir yaklaşım önermiştir. Kullanılan basit aç-kapa valflerin yüksek tepki süresine bağlı performans kaybını gidermek için önerdikleri denetim yöntemine Heun yöntemini dahil etmişlerdir. Hidrolik pistonun hız karakteristiğinin ani değişimler içermediği kabulüyle yapılan çalışmada hidrolik silindir odacıklarındaki basınç değerlerinin bir zaman adımı sonrasında alacağı değer Heun yöntemiyle tahmin edilmiştir. Heun yaklaşımında hidrolik pistonun hız değerinin yanı sıra hidrolik silindir üzerinden ölçülen odacık basınç değerleri de kullanılmıştır. Bu yöntem, kaskad denetleyici ile kullanılmıştır. Konum referansını takibi için sırasıyla hız ve kuvvet referansları elde edilmiştir. Uygun valf durumu seçimi için D-EHS'nin bir sonraki adımdaki basınç değerleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmada farklı yük etkilerinin denetim performansı üzerine etkisi de incelenmiş ve önerilen yöntemin bu tür etkilere karşı dayanıklı olduğu gösterilmiştir. Farklı bir yaklaşım olarak, Kalairassan ve Krishnamurthy (2019) gerçekleştirdikleri benzetim tabanlı çalışmada, D-EHS'nin konum denetimi için aç-kapa valflerin debisini göz önünde bulunduran bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, önceki çalışmalarda olduğu gibi, hidrolik piston üzerine etkiyen yük ve konum referansına dayalı olarak denetim modu seçilmekte ve gereken debi miktarı hesaplanarak valflerin durumu değiştirilmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntemin, düşük hız profiline sahip konum referanslarında önceki yöntemlere nazaran başarılı sonuçlar verdiği sayısal çalışmalarla gösterilmiştir. Bununla beraber, valf seçim uzayını daraltarak gereksinim duyulan işlem gücünün azalttığı da ifade edilmiştir. Buna karşın, benzetim çalışması kapsamında aç-kapa

valflerin gecikmesiz çalıştığına dair kabul yapılması yöntemin bu haliyle deneysel çalışmalar için uygun olmadığını göstermektedir.

D-EHS'lerin denetimine yönelik olarak verilen literatür incelendiğinde önerilen yöntemlerin ortak noktaları olarak iki hususun öne çıktığı görülmektedir: Denetlenecek sistem çıktısı dışındaki değişkenlerin ölçülmesine ihtiyaç duyulması ve karmaşık denetleyici yapısı. Bir hidrolik pistonun konum/hız denetimi yapılmak istendiğinde ilgili çıktının ölçülmesi bir gerekliliktir. Fakat, D-EHS ile sürülen bir pistonun denetimi söz konusu olduğunda besleme basıncının ve hidrolik silindir içerisindeki basınçların sürekli olarak ölçülmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum sisteme ek maliyet getirmektedir. Buna ek olarak, D-EHS için karmaşık denetim yapılarına gerek duyulması, ilgili alanda çalışmayı hedefleyen araştırmacılar için bir zorluk teşkil etmektedir (Abuowda vd., 2020; Boström vd. 2007; Linjama vd., 2007; Zhang vd, 2020).

Bu zorluklar ve maliyetler göz önünde bulundurulduğunda, D-EHS'lerin denetimi için tasarım kolaylığı sunan ve maliyet-etkili yöntemlerin araştırılması gerekmektedir. Özellikle, sınırlı sayıda sensörle etkin denetim performansı sunacak ve karmaşık denetleyici tasarımı sürecini ortadan kaldıracak yöntemler üzerine odaklanılmalıdır. Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar bu alanda potansiyel çözümler sunabilecek özelliklere sahiptir. Örneğin, derin öğrenme modelleri, hidrolik sistemlerin karmaşık davranışlarını öğrenmek ve tahmin etmek için kullanılabilir. Bu, gerçek zamanlı denetim için daha hızlı ve doğru tahminler yapılmasına olanak tanırken, ihtiyaç duyulan sensör sayısını azaltabilir.

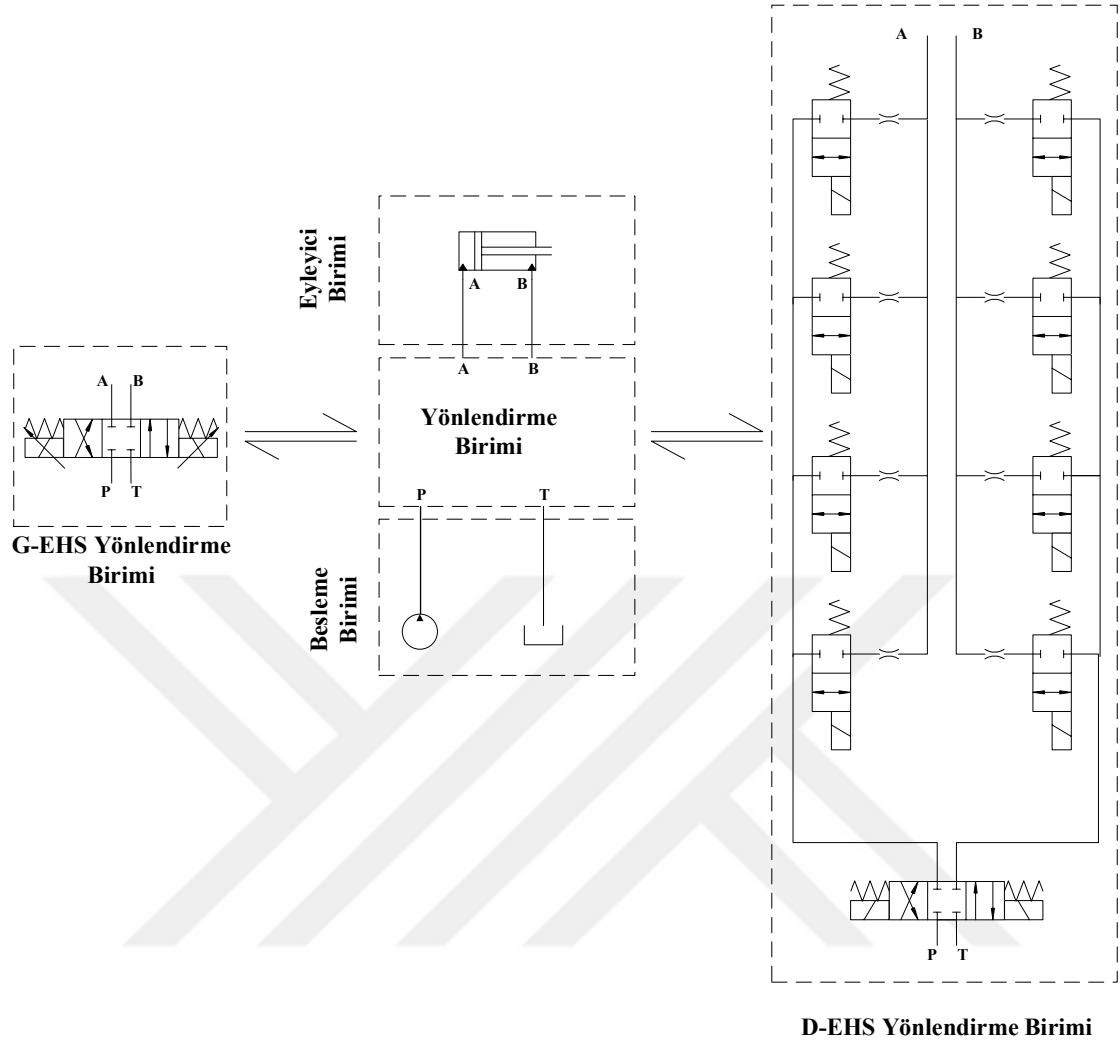
1.4. Tez Kapsamı

Yapılan bu tez kapsamında D-EHS'de yer alan asimetric bir hidrolik pistonun konum denetim çalışması sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan D-EHS'nin D-BAY biriminde 2 adet 4-bit DAKB ve 1 adet 4/3 yönlendirme valfi kullanılmıştır. Her DAKB'de birbiriyle aynı akış katsayısına sahip 4 adet popet tipi aç-kapa valf bulunmaktadır. D-EHS ile gerçekleştirilen çalışmalarda az sayıda valf ile birbirinden farklı çok sayıda akış katsayısı değeri oluşturabilmek için ikili dizilim valf düzeni tercih edilmiştir. Bu amaçla, farklı boyutlara sahip orifisler popet valflerle seri bağlı olarak kullanılmıştır. Aç-kapa valflerle oluşturulan bir hidrolik sistemin dijital olarak adlandırılabilmesi için denetim performansının bağımlı akışkan yapısı kullanan G-

EHS'lerle kıyaslanabilir düzeyde olması gerekmektedir. Bu nedenle, tez kapsamında yönlendirme biriminde 4/3 oransal valf ve eyleyici kısmında asimetrik bir hidrolik piston olan G-EHS ile sayısal ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar daha sonra D-EHS'nin performansı ile karşılaştırılmıştır. D-EHS'nin farklı çalışma koşullarında denetim performansını test etmek amacıyla ek çalışmalar yapılarak tez tamamlanmıştır.

1.5. Matematik Modellerinin Elde Edilmesi

Yapılan bu tez kapsamında geleneksel ve dijital EHS'ler üzerinde benzetim ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. D-EHS için pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir denetleyici olan ikili derin Q-ağı (*İng.* Double deep Q-network, DDQN) yöntemi kullanılmıştır. D-EHS'lerin denetim performansının G-EHS'lerle kıyaslanabilir düzeyde olması beklenmektedir. Bu nedenle, benzer denetim çalışmaları G-EHS için tekrarlanmıştır. G-EHS ve D-EHS arasındaki fark yönlendirme birimlerindeki valf sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Diğer birimler her iki sistemde de aynı olabilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, uygun tasarlanmış tek bir deney düzeneğinin her iki çalışma için de yeterli olabildiği görülmektedir. Şekil 7'de tez kapsamında kullanılan EHS'nin gösterimi verilmiştir. Geleneksel ve dijital sistemler arasındaki geçiş yönlendirme birimlerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Matematik modelleri açısından değerlendirildiğinde G-EHS ve D-EHS arasındaki fark akış denklemlerinde ortaya çıkmaktadır. Bu benzerlikten yararlanılarak öncelikle G-EHS'nin matematik modeli elde edilmiştir. Devamında ise G-EHS modelinin debi denklemleri düzenlenerek D-EHS'nin matematik modeli ortaya konmuştur.

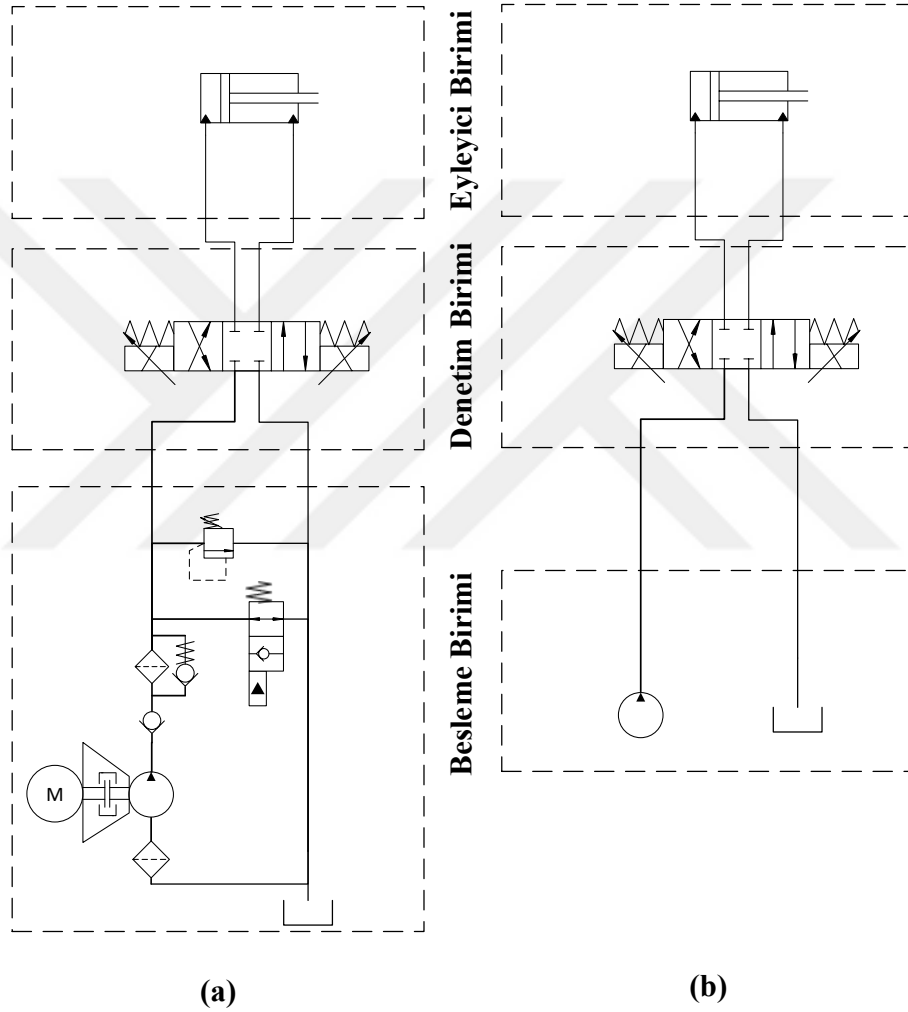


Şekil 7. Geleneksel ve dijital EHS yönlendirme birimlerinin yerleşimi

1.5.1. G-EHS'nin Matematik Modeli

Doktora tezi kapsamında deneysel ve sayısal çalışmalarda kullanılan G-EHS'nin şematik gösterimi Şekil 8'de verilmiştir. G-EHS'nin ana bileşenleri 4/3 oransal valf, asimetrik hidrolik piston ve sabit deplasmanlı pompadır. Deneysel sistemde yer alan basınç emniyet valfi, besleme basıncını ayarlamak ve hidrolik sistemdeki basıncın belirlenen seviyenin üstüne çıkmasını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Hidrolik pistonun hareketi ise oransal valf içerisinde yer alan sürgünün hareketiyle belirlenmektedir. Oransal valfe gelen denetim sinyali sürgünün belli aralık içerisinde hareket etmesini sağlayarak hidrolik akışkanın geçeceği alanın boyutunu değiştirmektedir. Besleme basıncı ve belirtilen alanın boyutuna bağlı olarak hidrolik yol üzerindeki debi miktarı da değişim

göstermektedir (Şekil 2). Valf sürgüsünün asgari ve azami konumlar arasında hareket etmesi sonucunda hidrolik pompadan gelen hat hidrolik silindirin farklı odalarına bağlanmakta ($P \rightarrow A$ veya $P \rightarrow B$), bunun sonucunda da hidrolik piston uzama ya da kısılma yönünde hareket etmektedir. Bu bileşenler dışında deney sisteminde hidrolik akışkan içerisindeki parçaları süzmek için yağ filtresi ve akışkanın hidrolik pompa sonrasında tek yönde akmasını sağlamak için çek valf bulunmaktadır.



Şekil 8. (a) DeneySEL ve (b) sayısal çalışmalarda kullanılan G-EHS'nin şematik gösterimi

EHS'ler üzerinde yapılan denetim çalışmalarında modelleme amaçlı kullanılan sistemin deney sisteminden farklı olduğu görülmektedir. Bunun gerekçesi olarak modelleme işlemindeki karmaşıklığın azaltılması gösterilebilir. Bu doğrultuda yapılan basitleştirme adımlarından birisi besleme biriminin sistem üzerine etkileyen değişkenlerden

etkilenmeyen bir yapıda modellenmesidir. Bu tez kapsamında G-EHS'nin ve D-EHS'nin matematik modellerinin elde edilmesinde de aynı yaklaşım benimsenmiştir. Hidrolik pompanın her daim istenen azami besleme basıncını sağlayabildiği ve besleme basıncında dalgalanma olmadığı veya ihmal edilebilir seviyede olduğu kabul edilmiştir.

Denetimi gerçekleştirilecek olan hidrolik pistonun hareketine etkiyen baskın dinamikler denetim ve eyleyici birimlerindeki bileşenlerle ilgilidir. Bundan dolayı matematik modelinin eldesinde bu birimlerdeki parametreler esas alınmıştır (Şekil 9). G-EHS'nin doğrusal olmayan (*Ing. Nonlinear*) matematik modelinin eldesi için Newton'un ikinci hareket yasasından ve temel akışkan hareketi denklemlerinden faydalanılmıştır. EHS'ler yapıları itibariyle pek çok belirsizlik barındırmaktadır. Bunların matematik modeline yansıtılması modeli karmaşıktırmaktadır. Buna karşın, sistem dinamiklerini kayda değer ölçüde değiştirmemektedir. Bu durumu göz önünde bulundurarak matematik modelinin eldesi için bazı temel kabuller yapılmıştır (Wos & Dindorf, 2015),

- Hidrolik akışkanın sıkıştırılabilirlik katsayısı sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişmemektedir.
- Besleme basıncındaki dalgalanma ihmal edilebilir düzeydedir. Bundan dolayı, besleme basıncı sabit kabul edilmektedir.
- Hidrolik akışkanın sıcaklığı ve viskozitesi değişmemektedir.
- Oransal valf ve hidrolik silindirde herhangi bir hidrolik akışkan sızıntısı yoktur.

Hidrolik piston üzerine etkiyen kuvvetler Newton'un ikinci hareket yasası kullanarak yazıldığında (1) elde edilir.

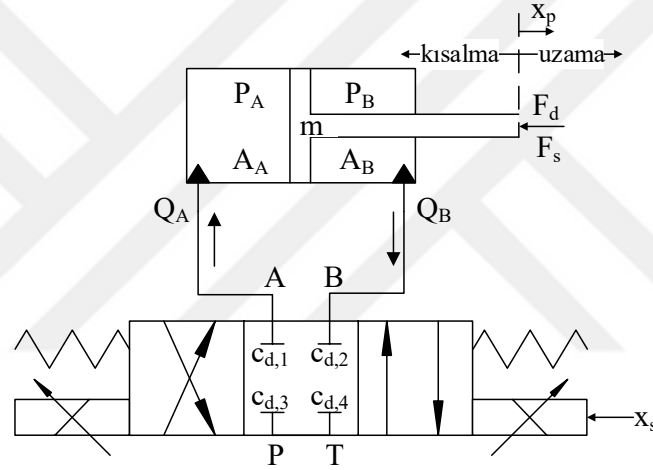
$$m\ddot{x}_p = P_A A_A - P_B A_B + F_d - F_s(\dot{x}_p) \quad (1)$$

Burada, m hidrolik pistonun kütlesi; $\dot{x}_p$ ve $\ddot{x}_p$, sırasıyla, hidrolik pistonun hızı ve ivmesi; alt indis olarak verilen A ve B terimleri hidrolik silindirin ilgili odacıklarını; A_* hidrolik pistonun basınca maruz kalan etkin alanını; P_* hidrolik silindirin ilgili odacığına etkiyen basıncı göstermektedir. F_d ve $F_s(\dot{x}_p)$ ise, sırasıyla, piston üzerine etkiyen kuvveti ve pistonla silindir cidarı arasındaki sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda piston üzerine herhangi bir kuvvet uygulanmamıştır. Sürtünme

kuvveti $F_s(\dot{x}_p)$ ise aşağıdaki bağıntı kullanılarak matematik modeline dahil edilmiştir (Armstrong-Hélouvry & de Wit, 1995).

$$F_s(\dot{x}_p) = \sqrt{2}e(F_{frn} - F_C) \exp\left(-\left(\frac{\dot{x}_p}{\sqrt{2}v_{frn}}\right)^2\right) \frac{\dot{x}_p}{\sqrt{2}v_{frn}} + F_C \tanh\left(\frac{\dot{x}_p}{v_{frn}/10}\right) + f_v \dot{x}_p \quad (2)$$

Bu bağıntıda F_{frn} ve F_C , sırasıyla, frenleme ve Coulomb kuvvetlerini; v_{frn} frenleme kuvvetinden kurtulmak için erişilmesi gereken fren hızını; f_v viskoz sürtünme katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 9. 4/3 doğrusal valfle sürülen asimetrik bir hidrolik pistonu içeren G-EHS'nin gösterimi ve matematik modelinde kullanılan sistem parametreleri

Hidrolik piston üzerine etkiyen basınç dinamikleri ise

$$\frac{V_{0A} + x_p A_A}{E} \dot{P}_A = Q_A(x_s) - A_A \dot{x}_p \quad (3)$$

$$\frac{V_{0B} - x_p A_B}{E} \dot{P}_B = -Q_B(x_s) + A_B \dot{x}_p \quad (4)$$

bağıntılarıyla gösterilmektedir. İlgili bağıntılarda V_{0*} odacıkların başlangıç hacmini; E hidrolik akışkanın sıkıştırılabilirlik katsayısını; Q_* odacıklardaki hidrolik akışkan debisini; x_s oransal valf içerisindeki sürgünün konumunu göstermektedir. Basınç dinamikleri için (3) ve (4) düzenlendiğinde

$$\dot{P}_A = \frac{E}{V_{0A} + x_p A_A} (Q_A(x_s, P_A) - A_A \dot{x}_p) \quad (5)$$

$$\dot{P}_B = \frac{E}{V_{0B} - x_p A_B} (Q_B(x_s, P_B) + A_B \dot{x}_p) \quad (6)$$

bağıntıları elde edilmektedir.

Q_A ve Q_B debileri ilgili odacıklara etkiyen basınca ve oransal valf sürgüsünün konumuna göre değişmektedir. İlgili debilere ait bağıntılar

$$Q_A(x_s, P_A) = c_{d,1} \cdot A_v(x_s) sg(x_s) sign(P_S - P_A) \sqrt{\frac{2|P_S - P_A|}{\rho_{oil}}} - c_{d,2} A_v(x_s) sg(-x_s) sign(P_A - P_T) \sqrt{\frac{2|P_A - P_T|}{\rho_{oil}}} \quad (7)$$

$$Q_B(x_s, P_B) = c_{d,3} \cdot A_v(x_s) sg(-x_s) sign(P_S - P_B) \sqrt{\frac{2|P_S - P_B|}{\rho_{oil}}} - c_{d,4} A_v(x_s) sg(x_s) sign(P_B - P_T) \sqrt{\frac{2|P_B - P_T|}{\rho_{oil}}} \quad (8)$$

olmaktadır. Burada, $c_{d,(1,2,3,4)}$ oransal valfin ilgili çıkışlarındaki tahliye katsayısını (*Ing.* Flow discharge coefficient); P_S ve P_T besleme ve tank basınçlarını; ρ_{oil} hidrolik akışkanın yoğunluğunu göstermektedir. Hidrolik akışkanın geçtiği açıklık alanını ifade eden $A_v(x_s)$ fonksiyonu oransal valfin üreticisi tarafından sağlanan verilerden elde edilmiştir. $sg(x_s)$ ise odacıklardaki debinin yönünü belirleyen parçalı bir fonksiyondur.

$$sg(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

(7) ve (8)'için $P_S > P_A > P_T$, $P_S > P_B > P_T$, $P_T = 0$ ve $c_{d,1} = c_{d,3} = c_{d,3} = c_{d,4} = c_d$ kabulleri yapıldığında ilgili bağıntılar

$$Q_A(x_s, P_A) = c_d \cdot A_v(x_s) \left(sg(x_s) \sqrt{\frac{2(P_S - P_A)}{\rho_{oil}}} - sg(-x_s) \sqrt{\frac{2P_A}{\rho_{oil}}} \right) \quad (10)$$

$$Q_B(x_s, P_B) = c_d \cdot A_v(x_s) \left(sg(-x_s) \sqrt{\frac{2(P_S - P_B)}{\rho_{oil}}} - sg(x_s) \sqrt{\frac{2P_B}{\rho_{oil}}} \right) \quad (11)$$

olarak tekrar düzenlenebilir.

Sürgülü valfler, sürgü ve valf açıklıkları arasındaki ilişki açısından incelendiğinde 3'e ayrılmaktadır: Örtlen (*Ing.* Overlap), örtmeyen (*Ing.* Underlap) ve örtüşen (*Ing.* Zero lapped). Örtüşen sürgülü valflerde sürgü üzerindeki çıkıntılar ile çıkış portlarının açıklığı aynıdır. Sürgü hareketi aynı şekilde açıklık alanı $A_v(x_s)$ 'ye etki etmektedir. Örtmeyen sürgülü valflerde ise sürgü üzerindeki çıkıntılar çıkış portlarından daha küçüktür. Bundan dolayı, valf kapalı konumda olsa dahi her daim akış meydana gelmektedir. Kapalı konumda akış olması istenmediği durumlarda ise üretim kolaylığı nedeniyle örtlen sürgülü valfler kullanılır. Bu tür valflerde, sürgü üzerindeki çıkıntılar çıkış portlarından Δ_x kadar daha geniştir ve sürgü hareketi ile $A_v(x_s)$ arasındaki ilişki ancak parçalı bir fonksiyonla ifade edilebilir. Valf içerisinde akış oluşabilmesi için sürgünün öncelikle Δ_x konumunun ötesine hareket etmesi gerekmektedir. Sürgü hareketinin başlangıcından itibaren Δ_x konumu arasındaki mesafe valfin ölü bölgesi (*Ing.* Dead band) olarak adlandırılmaktadır. Ölü bölgenin denetim üzerine etkisini azaltmak için ölü bölge telafisi (*Ing.* Dead band compensation) yaklaşımı kullanılır. Bu yaklaşımda, sürgü konumu x_s 'e Δ_x kadar ekleme yapılır.

$$x_{s,C} = x_s + \Delta_x \quad (12)$$

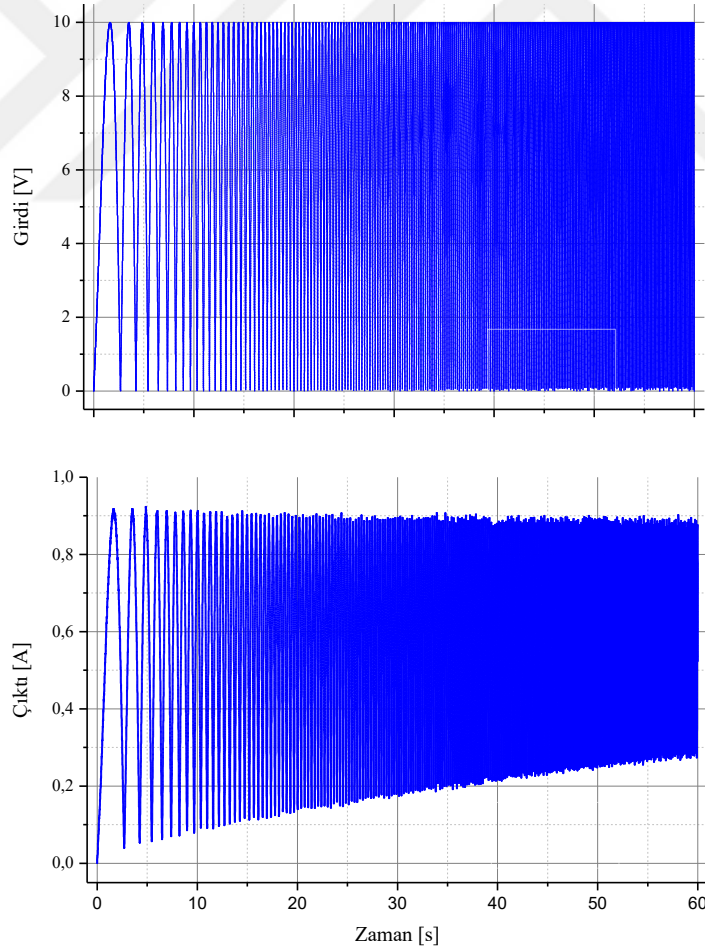
(12)'nin, (10) ve (11)'de kullanılması sonucunda oransal valfin tamamen kapalı olduğu durum dışındaki her sürgü konumunda akış sağlanmış olur.

Oransal valf sürgüsünün konum denetimi için ± 10 V gerilim değerindeki denetim sinyali kullanılmaktadır. Gerilim farkı olarak iletilen denetim sinyali valf sürücüsüne aktarılmaktadır. Valf sürücüsü gerilim farkını $\pm 0,88$ A akım aralığına çevirerek oransal valf üzerindeki bobine aktarmaktadır. Valf sürücünün modelini elde etmek için deneysel bir yaklaşım kullanılmıştır. Bunun için, 10 V genlikli 0,01-4 Hz frekans değerlerine sahip

chirp sinyali valf sürücüsüne uygulanmış ve akım olarak elde edilen sürücü çıkışı kaydedilmiştir (Şekil 10). Elde edilen veriler sistem tanılama için kullanılarak

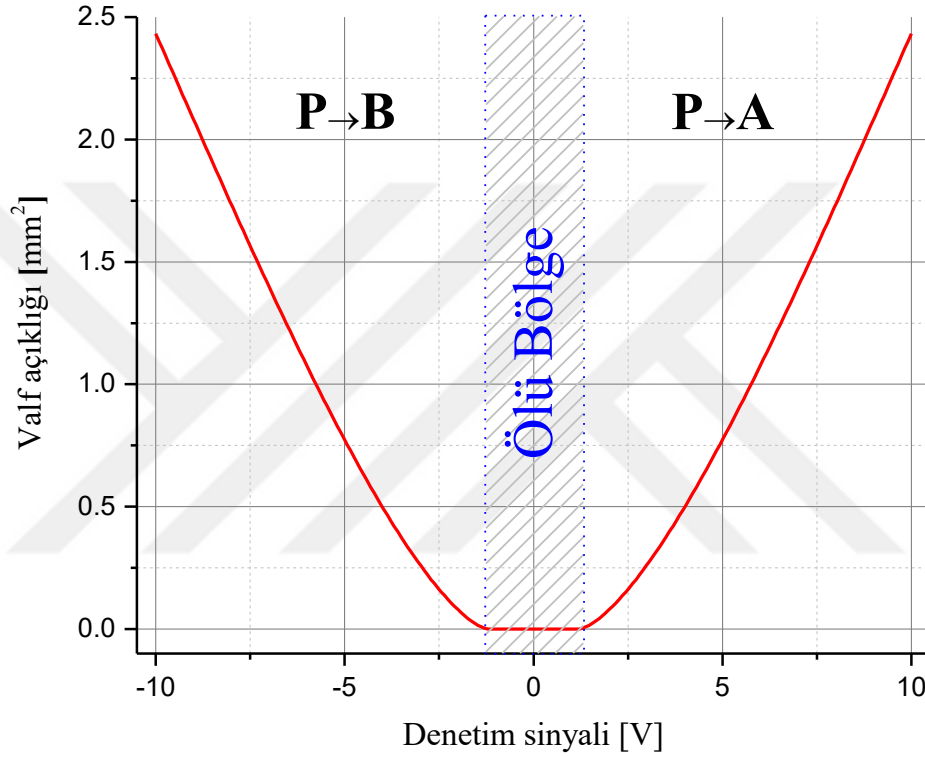
$$v_{\text{sürücü}}(s) = \frac{301,87(s + 11,19)}{(s + 9,206)(s^2 + 82,94s + 3948)} \quad (13)$$

transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Transfer fonksiyonunun çıkışı $\pm 0,88$ A aralığında olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Oransal valf incelendiğinde valf sürgüsünün de ± 1 mm aralığında hareket ettiği tespit edilmiştir. Sürücüden gelen akım değeri yüzdesel olarak oranlanarak sürgü konumuna çevrilmiş ve oransal valfin denetimi gerçekleştirilmiştir. Oransal valfin tepki süresi G-EHS'den çok daha düşük olduğu için valf dinamikleri G-EHS dinamiklerine etki etmemektedir. Bundan dolayı, tez çalışması kapsamında elde edilen sistem modelinde oransal valf modeline yer verilmemiştir.



Şekil 10. Valf sürücüsünün transfer fonksiyonunu belirlemek için kullanılan girdi ve çıktı sinyalleri

Oransal valfin denetimi için nihai olarak akım sinyalleri kullanılmaktadır. Bununla beraber, valf sürücüsü gerilim farkı türünden denetim sinyalini kabul etmektedir. Yapılan çalışmalarda da gerilim farkı türündeki sinyal G-EHS'nin denetim sinyali olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak hidrolik akışkanın geçtiği valf açıklığını veren $A_v(x_s)$ eşitliği valf denetim sinyali u kullanılarak tekrar düzenlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Denetim sinyaline göre oransal valfin açıklık alanı değişimi

G-EHS'nin durum uzay modeli (*İng.* State space model) (1), (5), (6), (10) ve (11) bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= \frac{1}{m} (x_3 A_A - x_4 A_B - F_d - F_s(x_2)) \\
 \dot{x}_3 &= \frac{E}{V_{0A} + x_1 A_A} (Q_A(u, x_3) - A_A x_2) \\
 \dot{x}_4 &= \frac{E}{V_{0B} - x_1 A_B} (Q_B(u, x_4) + A_B x_2)
 \end{aligned} \tag{14}$$

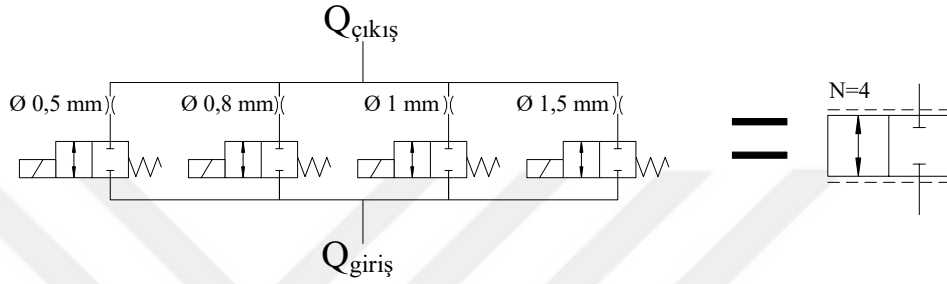
Burada, x_1 piston konumunu (x_p), x_2 piston hızını ($\dot{x}_p$), x_3 A odacığının basıncını (P_A) ve x_4 B odacığının basıncını (P_B) göstermektedir.

1.5.2. D-EHS'nin Matematik Modelinin Eldesi

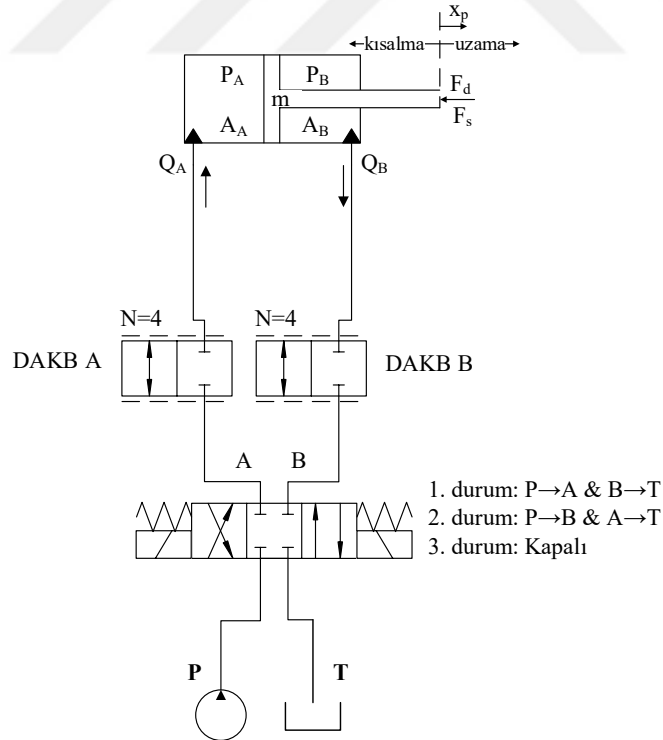
Öncesinde de belirtildiği üzere, tez kapsamında kullanılan G-EHS ve D-EHS deney düzenekleri aynı besleme ve eyleyici birimlerini kullanmaktadır. D-EHS'nin yönlendirme birimi ise G-EHS'nin aksine çok sayıda aç-kapa popet valften oluşmaktadır. Bu nedenle, D-EHS'nin durum uzay modeli temel olarak (14) ile oldukça benzerdir. Değişiklik gösteren kısım ise $Q_A(u, x_3)$ ve $Q_B(u, x_4)$ 'nin elde edilışıdır. Tez kapsamında sayısal ve deneysel çalışmaların yürütüldüğü D-EHS'nin eyleyici birimi 4'er valf içeren 2 adet DAKB'den ve 1 adet 4/3 yönlendirme valfinden oluşmaktadır. Yönlendirme valfi 3 farklı durumda bulunabilmektedir. Bulunduğu duruma göre hidrolik pompadan gelen basınçlı hidrolik akışkanı DAKB A veya DAKB B'ye yönlendirebilmektedir. Bu durumda diğer DAKB ise dönüş hattı olan hidrolik tanka bağlanmaktadır. Böylelikle, hidrolik pistonun uzama ve kısalma yönündeki hareketi mümkün olmaktadır. Üçüncü durum ise bütün hidrolik yolların kapalı olmasıdır. Yönlendirme valfi bu durumdayken DAKB'ler üzerinde herhangi bir akış meydana gelmemektedir. DAKB içerisindeki valfler birbirinin aynısıdır ve her valfin debi değeri farklı açıklıklara sahip orifislerle düzenlenmiştir. Orifislerin açıklığı 10 bar basınç farkı altında ikili valf dizilimini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Orifislerin çap değeri belirlenirken, DAKB'de bulunan 4 adet aç-kapa popet valfinin açılması durumunda ulaşılacak azami debi değerinin kullanılan hidrolik pompanın üretebileceği azami debi değerini aşmaması ve bu değer kullanılarak 4/3 oransal valf ile uyumu gereklilikleri göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda 0,5 mm, 0,8 mm, 1 mm ve 1,5 mm çapında dairesel geçiş alanına sahip orifislerin kullanılmasına karar verilmiştir. Tezin devamında DAKB'nin gösterimi için daha anlaşılabilir bir yapı sunması sebebiyle Şekil 12'de verilen hidrolik devre sembolü kullanılmıştır. DAKB sembolünün sol üstünde yer alan N=4 ifadesi DAKB'nin 4 adet aç-kapa valften oluştuğunu ifade etmektedir. Verilen bilgiler doğrultusunda matematik modeli elde edilecek D-EHS'nin gösterimi ise Şekil 13'te verilmiştir.

D-EHS'de yer alan DAKB'ler bağlı oldukları piston odacığına göre DAKB A ve DAKB B olarak isimlendirilmektedir. Benzer biçimde, ilgili odacıklar doğrultusunda

gerçekleşen akışın debisi ise Q_A ve Q_B olarak nitelendirilmiştir. DAKB A ve DAKB B yapısal olarak birbirinin aynısıdır ve tek DAKB'yi denetlemek için 4-bit denetim sinyaline ihtiyaç duyulmaktadır. İkili valf dizilimine sahip 4 adet aç-kapa valf içeren bir DAKB valflerin açık (1) ya da kapalı (0) olmasına bağlı olarak toplam $2^4 = 16$ durumda bulunabilir. Bu durumlar bir matrisin sütunları olarak yazıldığında 16 sütundan oluşan **c** matrisi elde edilmektedir.



Şekil 12. 4 adet aç-kapa valf ve farklı açıklık değerlerine sahip orifislerden oluşan DAKB ve DAKB sembolü



Şekil 13. 2 adet 4-bit DAKB ve 1 adet 4/3 yönlendirme valfinden oluşan D-BAY ile sürülen D-EHS

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

DAKB'nin akış katsayısı (*Ing.* Flow coefficient) $k_{v,*}$ açık durumda olan valflerin akış katsayısının toplamıdır. Valflerin durumu ise 4-bit denetim sinyali $\mathbf{c}(i_*)$ ile denetlenir ve i değişkeni $\mathbf{c}$ matrisindeki ilgili sütunu ifade etmektedir. DAKB içerisinde yer alan aç-kapa valflerin akış katsayısı $\mathbf{Q}_{N,*}$ vektörüyle gösterilmektedir. Bu terimlere alt indis olarak eklenen $*$ ifadesi ilgili terimlerin ait olduğu DAKB A'yı veya DAKB B'yi belirtmektedir. Verilen bilgiler doğrultusunda DAKB A'nın akış katsayısı

$$k_{v,A}(i_A) = \mathbf{c}(i_A)^T \mathbf{Q}_{N,A} , \quad \mathbf{Q}_{N,A} = \begin{bmatrix} Q_{N,A4} \\ Q_{N,A3} \\ Q_{N,A2} \\ Q_{N,A1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

olmaktadır. DAKB A'da yer alan valflerin akış katsayıları $Q_{N,A(1-4)}$ ile gösterilmiştir. Aynı yaklaşım DAKB B için de geçerlidir. İlgili DAKB'nin akış katsayısı belirlendikten sonra DAKB'nin giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı Δp ile orifis akışı için geliştirilmiş bağıntı kullanılarak debi değeri hesaplanır.

$$Q_*(i_*) = k_{v,*}(i_*)\sqrt{\Delta p} \quad (17)$$

Şekil 13 incelendiğinde basınçlı hidrolik akışkanın DAKB A veya DAKB B hattı üzerinden hidrolik pistona aktarıldığı görülmektedir. $Q_A(i_A)$ ve $Q_B(i_B)$ bağıntıları oluşturulurken basınçlı hidrolik akışkanın iletim hattını belirten $v_{yön}$ teriminin ve (9) bağıntısının kullanılması gerekmektedir. $v_{yön}$ teriminin alacağı değer

$$v_{yön} = \begin{cases} 1, & P \rightarrow A \\ -1, & P \rightarrow B \end{cases} \quad (18)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. P hattının herhangi bir DAKB'ye bağlı olmadığı durumda ise $v_{yön} = 0$ olmaktadır. (9), (16), (17) ve (18) bağıntıları düzenlendiğinde ve $P_S > P_A > P_T$, $P_S > P_B > P_T$, $P_T = 0$ kabulleri yapıldığında $Q_A(i_A)$ ve $Q_B(i_B)$

$$\begin{aligned} Q_A(i_A) &= k_{v,A}(i_A) [sg(v_{yön})\sqrt{P_S - P_A} - sg(-v_{yön})\sqrt{P_A}] \\ Q_B(i_B) &= k_{v,B}(i_B) [sg(-v_{yön})\sqrt{P_S - P_B} - sg(v_{yön})\sqrt{P_B}] \end{aligned} \quad (19)$$

olarak elde edilmektedir. G-EHS'nin matematik modelinde kullanılan (1), (2), (5), (6) ve D-EHS'de yer alan DAKB'lerin debi değerini belirlemek için elde edilen (19) bağıntıları bir arada değerlendirildiğinde D-EHS'nin durum uzay modeli

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m} (x_3 A_A - x_4 A_B - F_d - F_s(x_2)) \\ \dot{x}_3 &= \frac{E}{V_{0A} + x_1 A_A} (Q_A(i_A, x_3) - A_A x_2) \\ \dot{x}_4 &= \frac{E}{V_{0B} - x_1 A_B} (Q_B(i_B, x_4) + A_B x_2) \end{aligned} \quad (20)$$

olarak elde edilmiştir.

(15)'te verilen **c** matrisi tek bir DAKB'nin bulunabileceği 16 farklı durumu göstermektedir. Bu tez kapsamında tasarımı ve imalatı yapılarak kullanılan D-EHS'de ise 2 adet 4-bit DAKB bulunmaktadır. Bununla beraber, süreksiz bir işleyişe sahip 4/3 yönlendirme valfi 3 farklı durumda bulunabilmektedir. Hidrolik akışın meydana gelmediği durumlar elendiğinde ise DAKB'lerin 15 ve 4/3 yönlendirme valfinin 2 farklı durumda bulunabildiği görülmektedir. D-EHS'de yer alan asimetric hidrolik pistonun istenen konum referansını takip edebilmesi için bahsedilen üç yapının da aynı anda çalışması gerekmektedir. Bu durumda ise hidrolik akışın gerçekleştiği $15 \times 15 \times 2 = 450$ farklı durum ortaya çıkmaktadır. Hidrolik pistonun sabit kalması için akışın meydana gelmediği 1 durum daha eklendiğinde valf durumu çözüm uzayında yer alan durumların sayısı 451'e çıkmaktadır. D-EHS'nin etkin bir şekilde denetlenebilmesi için, uygun valf durumlarının sistemin örnekleme zamanından daha kısa bir sürede hesaplanabilmesi gerekmektedir.

1.6. Kullanılan Yöntemler

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında denetim bakış açısından birbirinden oldukça farklı olan fakat temelde akışkan gücünü kullanan iki sistemin denetimi gerçekleştirilmiştir. G-EHS'nin eyleyici biriminde yer alan 4/3 oransal valf açık ve kapalı konumları arasında sonsuz farklı noktada bulunabilmektedir. Bu ise ilgili sistemin sürekli (*İng.* Continuous) denetim çıktılarını destekleyen denetleyicilerle denetlenebileceğini göstermektedir. D-EHS de bulunan aç-kapa popet valfler ise sadece iki durumda bulunabilmektedir: Açık ve kapalı. Benzer olarak, 4/3 yönlendirme valfi de sadece 3 durumda bulunabilmektedir (Şekil 13). Bu nedenle D-EHS süresiz (*İng.* Discrete) bir denetim yöntemine ihtiyaç duymaktadır.

Pekiştirmeli öğrenme yöntemleri arasında, sürekli ve süresiz denetimi destekleyen çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu tezde, sürekli denetim çıktıları üretebilen derin deterministik politika gradyanı (*İng.* Deep deterministic policy gradient, DDPG) ve süresiz denetim sinyalleri sağlayabilen ikili derin Q-ağı (*İng.* Double deep Q-network, DDQN) yaklaşımları kullanılmıştır (Mnih vd., 2015a; van Hasselt vd., 2015). DDQN, görece yüksek boyutlu süresiz çözüm uzaylarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir ve karmaşık sistemlerde uygun denetim çıktılarını belirleyebilme yeteneğine sahiptir. DDPG ise karmaşık dinamiklere sahip doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerle gerçekleştirilen çalışmalarla etkinliği kanıtlanmış bir diğer pekiştirmeli öğrenme yöntemidir. DDQN ve DDPG yöntemlerinin detaylı anlatımı bu kısım içerisinde kendi başlıkları altında verilmiştir. Pekiştirmeli öğrenme yöntemlerine ek olarak G-EHS'nin denetimi için PID denetleyiciden de yararlanılmıştır. PID denetleyicinin parametrelerinin belirlenmesi için parçacık sürüsü optimizasyonu (*İng.* Particle swarm optimization, PSO) yöntemi kullanılmıştır. Benzer biçimde, PID denetleyici ve PSO yöntemi de bu kısım altında açıklanmıştır.

1.6.1. Pekiştirmeli Öğrenme

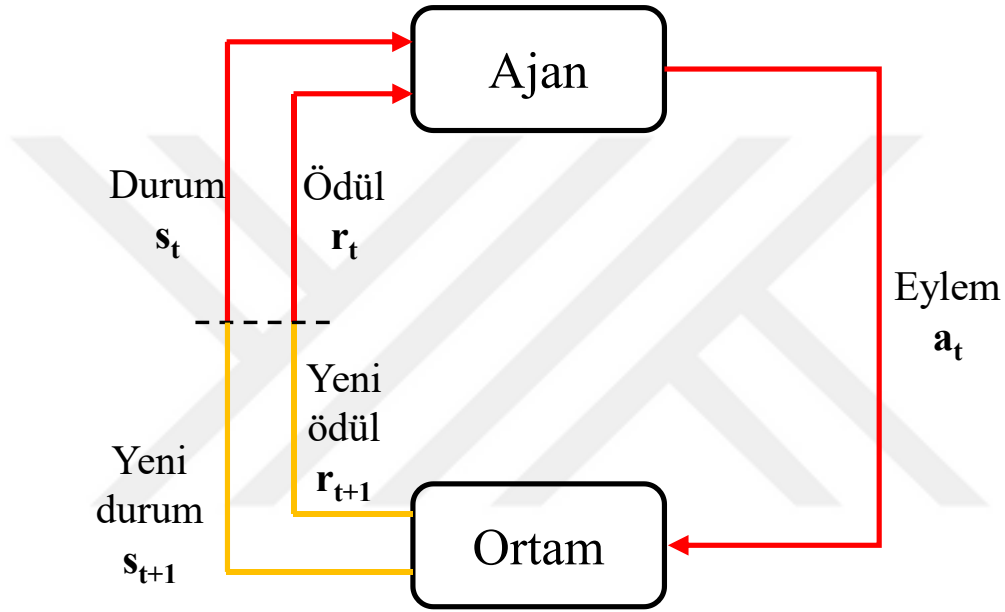
Makine öğrenmesi önceden veya anlık elde edilen verinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen öğrenme işlemine verilen genel bir isimdir. Verilerin hangi süreçte elde edildiği ve algoritmaya hangi biçimde beslendiğine göre 3'e ayrılmaktadır: Gözetimli (*İng.* Supervised), gözetimsiz (*İng.* Unsupervised) ve pekiştirmeli (*İng.* Reinforcement). Yapılan

bu tez kapsamında ise pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. Pekiştirmeli öğrenme uygun çıktıyı belirlemek/üretmek için ödül tabanlı bir değerlendirme kullanmaktadır. Yöntem, belirlenen ödülü uzun vadede azami düzeye ulaştırmayı amaçlar ve bu amaç için bir strateji geliştirilmesini kapsar. Bu nedenden dolayı, denetim çalışmalarında sıklıkla tercih edilen bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır.

Pekiştirmeli öğrenme temel olarak üç bileşenden meydana gelmektedir: Ajan (*Ing.* Agent), Ortam (*Ing.* Environment) ve durum (*Ing.* State) (Armoogum & Li, 2019) (Şekil 14). Sistem denetimi açısından değerlendirildiğinde, ortam denetlenmek istenen sisteme karşılık gelmektedir. Ortamdan elde edilen geri bildirim (durum, s_t) kullanılarak en yüksek ödülü verebilecek bir fonksiyonun geliştirilmesi bu yöntemin öncelikli amacıdır (Sutton & Barto, 2018). Bu fonksiyon pekiştirmeli öğrenme literatüründe politika (*Ing.* Policy, π) olarak isimlendirilmektedir. Seçilen pekiştirmeli öğrenme yöntemine göre politika fonksiyonu deterministik veya stokastik olabilmektedir. Denetim çıktısı üreten yapı ise ajan olarak adlandırılmaktadır. Ortamla etkileşim ajan tarafından üretilen a_t eylem çıktısı ile sağlanmaktadır. Eylem sonucunda ortamdan alınan s_t durum bilgisi ödül fonksiyonu (*Ing.* Reward function) ile değerlendirilerek r_t ödül değeri belirlenmektedir. Politika fonksiyonu π 'nin geliştirilmesi için gerekli olan işlemlerde r_t ödül değeri ve ortamdan alınan s_t durum verisi eş zamanlı kullanılmaktadır.

Literatür incelendiğinde q-ağı, derin Q-ağı (*Ing.* Deep Q-network, DQN), ikili derin Q-ağı, derin deterministik politika gradyanı, ikiz-gecikmeli derin deterministik politika gradyanı (*Ing.* Twin-delayed deep deterministic policy gradient, TD3) ve soft aktör-kritik gibi farklı pekiştirme öğrenme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir (Fujimoto vd., 2018; Haarnoja vd., 2018; Lillicrap vd., 2015; Mnih vd., 2013, 2015a; van Hasselt vd., 2015). Yapılan bu doktora tezinde, uygulama olarak ayrık ve sürekli denetim sinyalleriyle denetlenebilen iki farklı sistem kullanılmıştır. Belirtilen pekiştirmeli öğrenme yaklaşımları içerisinde Q-ağı, DQN ve DDQN ayrık denetim sinyalleriyle çalışabilen yöntemlerdir. Q-ağı yöntemi en uygun eylemi seçmek için tablo tabanlı bir yapı kullanmaktadır. Bu nedenle, durum ve eylem çözüm uzaylarının çok sayıda eleman içerdiği sistemler için uygun bir seçenek olmamaktadır. DQN ve DDQN ise Q-ağı temel alınarak geliştirilmiş yöntemlerdir. DQN ilk olarak 2013 yılında önerilmiş ve yapılan geliştirmelerle 2015 yılında son halini almıştır (Mnih vd., 2013, 2015a). Bu yöntemin etkinliği farklı ödül alma mekanizmalarına ve strateji gereksinimlerine sahip ATARI 2600 oyunları ile sınanmıştır. DQN yöntemi, 49 oyunun 29'unda insan oyuncularından daha yüksek puan değerine

ulaşmıştır. Yöntemin farklı karakteristiklere sahip uygulamalarda elde ettiği başarılı sonuçlar pekiştirmeli öğrenme dünyası için çığır açıcı olmuştur. van Hasselt vd. (2015), Mnih vd. (2015a)'nin önerdiği DQN yönteminin uzun vadede beklenen ödül eşitliğini düzenleyerek DDQN yöntemini önermiştir. Böylelikle, ortaya çıkan yöntem öncülerinden daha kararlı hale gelmiştir. Bu tez kapsamında tasarlanan ve üretilen D-EHS'nin denetimi için de DDQN yöntemi kullanılmıştır. G-EHS denetimi için ise DDQN yönteminin avantajlarını sürekli eylem uzayına aktarabilen DDPG yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 14. Pekiştirme öğrenme tabanlı denetim yöntemlerinin temel yapısı (Sutton & Barto, 2018)

1.6.2. İkili Derin Q-Ağı

DDQN, derin Q-ağı (*İng.* Deep Q-Network, DQN) yöntemi temel alınarak geliştirilmiş politika dışı (*İng.* Off-policy) bir denetim yöntemidir (van Hasselt vd., 2015). Pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin genelinde olduğu gibi, bu yöntemin amacı ideal eylem-değer fonksiyonu (*İng.* Optimal action-value function) $Q^*(s, a; \theta)$ için gerekli olan stratejiyi bulmaktır. Böylelikle, s_t durumu için en uygun a_t eylemi belirlenerek alınacak r_t ödülü asgari düzeyde tutulabilir. Bu durum ise ideal eylem-değer fonksiyonu

$$Q^*(s, a; \theta) = \max_{\pi} E[r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots | s_t = s, a_t = a, \pi] \quad (21)$$

ile mümkün olmaktadır. Burada, γ indirim katsayısı (*İng.* Discount factor) ve θ eylem-değer fonksiyonunun katsayılarıdır. Pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinde anlık elde edilen ödüle ilave olarak gelecekte elde edilmesi mümkün olan ödüller de değerlendirilir. Buradaki amaç, uzun bir süreç için alınabilecek ödülleri azami düzeye çıkartabilecek stratejiyi geliştirmektedir. Bu yaklaşımı uygulayabilmek için $[0, 1]$ aralığında değer alabilen γ indirim katsayısı gelecek zaman adımlarında elde edilmesi beklenen ödüllerin önemini belirlemek için kullanılır. İndirim katsayısının değeri 1'e yaklaştıkça gelecekte alınması muhtemel ödül karar verme mekanizmasında daha yüksek etkiye sahip olmaktadır. DDQN yönteminde ideal eylem-değer fonksiyonunu yakınsamak için doğrusal olmayan fonksiyon yakınsayıcı olarak da adlandırılan yapay sinir ağına (YSA) yer verilmiştir. Doğrusal olmayan fonksiyon yakınsayıcı yapıların eylem-değer fonksiyonu olarak kullanıldığı durumlarda kararsızlık sorunuyla karşılaşmaktadır. DDQN yönteminde bu durumun çözülmesi için tekrarlamalı bellek (*İng.* Replay buffer) ve eylemleri değerlendirecek ikincil bir hedef (*İng.* Target) YSA olmak üzere iki yenilik önerilmiştir (Mnih vd., 2015a). Eylem seçimini gerçekleştiren ana YSA parametrelerinin güncellenmesi için ortamdan s_t durum, a_t eylem ve r_t ödül verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. YSA parametrelerinin ideal eylem-değer fonksiyonu bulmak için iyileştirilmesi işlemi “eğitim” olarak adlandırılmaktadır. Eğitimin sadece ortamdan t anında alınan bilgilerle yürütülmesi YSA'nın zamanla ideal eylem-değer fonksiyonu $Q^*(s, a; \theta)$ 'dan uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Bunun önüne geçmek için, ortamla ilgili bilgiler (s_t , a_t , r_t ve s_{t+1}) tekrarlamalı bellek D 'de depolanır ve YSA'nın eğitimi için bellekteki veriler küçük gruplar (*İng.* Mini batch) halinde rastgele seçilerek kullanılır. DDQN yönteminin temel aldığı DQN yönteminin bilinen sorunlarından birisi eylem seçimini değerlendirirken iyimser değerlendirmelerde bulunarak ideal eylem-değer fonksiyonuna ulaşmayı zorlaştırmasıdır (Y. Wang, vd., 2023). Bunun nedeni ise, eylem seçimi için kullanılan YSA ile eylemi değerlendiren YSA'nın aynı olmasıdır. Bu nedenden dolayı da eylem-değer fonksiyonun eğitiminde dalgalanmalar meydana gelmektedir. İkincil bir yapı olarak hedef YSA'nın ($\hat{Q}(s, a; \theta^-)$) kullanılmasıyla seçilen eylemleri değerlendiren kısım ana YSA'dan ($Q(s, a; \theta)$) ayrılmıştır. Bu yaklaşımda, hedef YSA'nın katsayıları θ^- seçilen aralıklarla (C eğitim adımında bir kez) θ olarak güncellenmektedir. Aralıklı güncelleme sayesinde görece daha sabit bir değerlendirme kriteri kullanılmakta ve kararlı bir eğitim ilerleyişi elde edilmektedir. Son olarak, van Hasselt (2015)'in y_t uzun vadede beklenen ödüle dair yaptığı iyileştirme ile yöntem son haline ulaşmıştır.

$$y_i^{DQN} = r_i + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(s', a'; \theta_i^-) \quad (22)$$

$$y_i^{DDQN} = r_i + \gamma \hat{Q}(s', \arg \max_{a'} Q(s', a'; \theta_i); \theta_i^-) \quad (23)$$

DDQN eğitiminde diğer önemli bir unsur ise ajanın çok sayıda eylemden oluşan çözüm uzayını araştırmasını sağlamaktır. Eğitimin başlangıcında rastgele katsayılarla oluşturulan ana ve hedef YSA'lar belli eylemleri önceliklendirme eğilimine sahiptir. Bu durum, eylem-değer fonksiyonunun yerel asgari noktada kısıtlı kalması olarak da görülebilir. Bunun önüne geçmek için ϵ -greedy yöntemi kullanılır. ϵ , $[0, 1]$ arasında değer alabilen bir değişkendir ve ajanın hangi olasılıkla politika dışı bir eylem seçeceğini belirlemek için kullanılır. ϵ değerinin seçimi ajanın keşif-sömürü (*Ing.* Exploration-exploitation) davranışına direkt etki eder. Geniş çözüm uzayı olan bir ortamda çalışıldığında, ϵ değerinin bütün durumların değerlendirilmesine imkân tanıyacak biçimde belirlenmesi gerekir. İlerleyen eğitim süreciyle beraber ϵ değerinin belirlenen bir asgari düzeye kadar azaltılması sık rastlanan ve başarılı sonuçlar veren bir uygulamadır. Politika dışı seçilen eylemler sayesinde ajan çözüm-uzayındaki değerlerin tamamını kullanmış ve çözüm uzayını keşfetmiş olur. Bu çeşitlilik ise eğitim sürecine olumlu yansır. Ana YSA'nın eğitimi için $L_i(\theta_i)$ kayıp fonksiyonundan (*Ing.* Loss function) elde edilen değer kullanılır. Belirli aralıklarla katsayıları güncellenen hedef YSA da bu noktada değerlendirici olarak denklemde yer almaktadır.

$$L_i(\theta_i) = E_{(s,a,r,s') \cup (D)} \left[\left(y_i^{DDQN} - Q(s, a; \theta_i) \right)^2 \right] \quad (24)$$

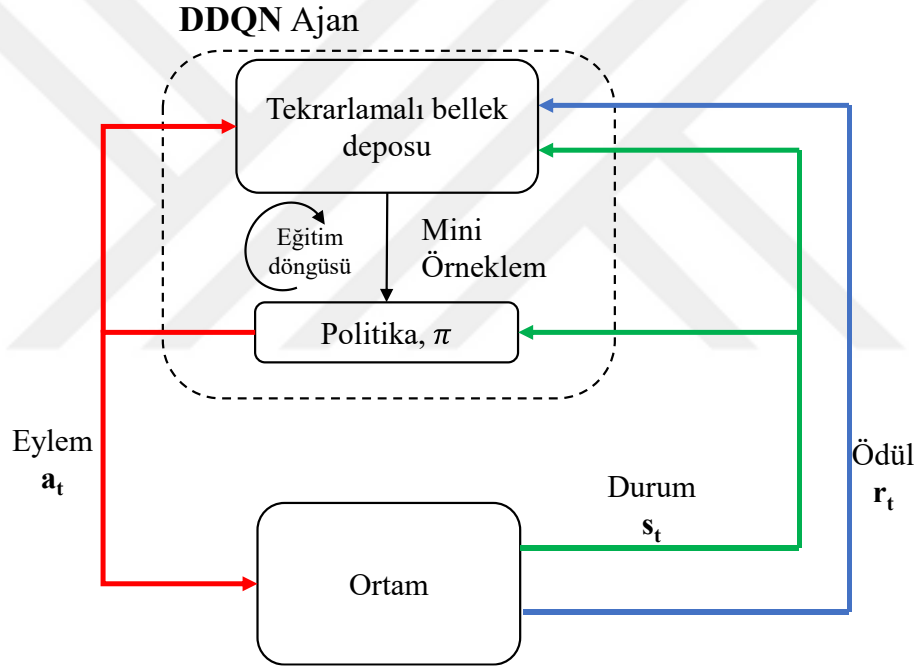
Burada, $*_i$ ifadesi i . iterasyonda yapılan işlemi ve $(s, a, r, s') \cup (D)$ ifadesi ise D tekrarlamalı bellekten alınan verileri ifade etmektedir. Kayıp fonksiyonundan elde edilen değere bağlı olarak ana YSA'nın katsayıları geri yayılım (*Ing.* Backpropagation) algoritması ve azalan eğim (*Ing.* Gradient descent) yaklaşımıyla güncellenir. Hedef YSA'nın katsayılarının tamamını C eğitim adımında bir güncellemek eğitim sürecinin başarımında dalgalanmaya sebep olabilmektedir. Bu durumun $Q(s, a; \theta)$ eylem-değer fonksiyonu üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için hedef YSA'nın katsayıları τ öğrenme oranı katsayısı kullanılarak güncellenir.

$$\theta^- \leftarrow \tau\theta + (1 - \tau)\theta^- \quad (25)$$

Eğitim sürecinin ilerlemesiyle beraber ana YSA ideal eylem-değer fonksiyonuna yakınsar. Bunun sonucunda da eylem seçimi için ideal politika

$$\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_a Q(s, a; \theta) \quad (26)$$

belirlenmiş olur. DDQN yöntemi için benzetimde kullanılan eğitim ortamı Şekil 15'te ve takip edilen adımlar Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 15. DDQN yönteminin işleyişinde kullanılan eğitim ortamı

DDQN Algoritması

Tekrarlamalı bellek D 'yi oluştur

Ana YSA $Q(s, a)$ 'yı rastgele θ ağırlıklarını kullanarak oluştur

Hedef YSA $\hat{Q}(s, a)$ 'yı $\theta^- = \theta$ ağırlıkları ile oluştur

Belirlenen eğitim süreci boyunca tekrarla

Her eğitim bölümü boyunca tekrarla

Durum s_t 'yi belirlenen başlangıç koşulları aralığında rastgele seç

Her eğitim adımı boyunca tekrarla

Eğer tekrarlamalı bellek boyutu belirlenen küçük grup boyutunun altındaysa

Eylem uzayından rastgele a_t eylemini seç ve ortamdaki alınan s_t durum, r_t ödül ve s_{t+1} sonraki durum bilgilerini tekrarlamalı bellek D 'ye kaydet

Eğer sonu

Eylem uzayından ϵ olasılıkla rastgele a_t eylem seç **ya da** $a_t = \operatorname{argmax}_a Q(s_t, a; \theta)$

Ortamdaki elde edilen $\{s_t, a_t, r_t, s_{t+1}\}$ geçiş bilgilerini tekrarlamalı bellek D 'ye kaydet

Tekrarlamalı bellek D 'den belli sayıda rastgele geçiş bilgisini seçerek mini grup oluştur

$$y_i^{DDQN} = \begin{cases} r_j & \text{, Bölüm j+1'de sonlandysa} \\ r_i + \gamma \hat{Q}(s', \operatorname{argmax}_{a'} Q(s', a'; \theta_i^-); \theta_i^-) & \text{, Bölüm devam ediyorsa} \end{cases}$$

Kayıp fonksiyonunu kullanarak θ ağırlıklarını geri yayılım yöntemiyle güncelle

Hedef YSA'nın ağırlıklarını C adımda bir $\theta^- \leftarrow \tau\theta + (1 - \tau)\theta^-$ olarak güncelle

Her sonu

Her sonu

Son

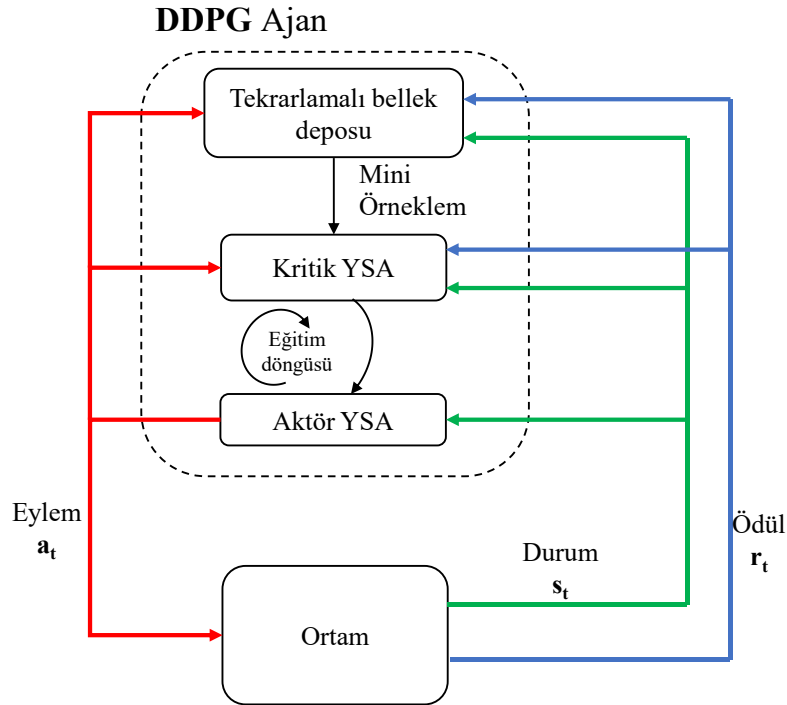
Şekil 16. DDQN algoritması (Mnih vd., 2015b; van Hasselt vd., 2015)

1.6.3. Derin Deterministik Politika Gradyanı

DQN ve DDQN yöntemleri süresiz uzayda başarılı sonuçlara ulaşmıştır. Bu süreçte, pekiştirmeli öğrenme uygulama yöntemlerinin gelişmesine büyük katkı sağlayan hedef YSA yapısı ve geçmiş deneyimlerden öğrenmeyi sağlayan tekrarlamalı bellek alana etkin bir biçimde kazandırılmıştır. Bahse konu yöntemler sadece sınırlı bir eylem uzayı içerisinde tanımlanabilen süresiz denetim çıktılarıyla çalışabilmektedir. Robotik uygulamaların çoğu ve denetim uygulamalarının geneli denetim için sürekli denetim çıktılarına ihtiyaç duymaktadır. Sürekli eylem uzayının belli kısımlara ayrılarak süresiz eylem uzayına uyarlanması ise hesaplama yükü açısından uygun bir çözüm olmamaktadır. Bunun nedeni ise s_t durumunda en uygun a_t eyleminin belirlenmesi için $Q(s, a; \theta)$ eylem-değer fonksiyonunun bütün a eylemleri için hesaplanması gereksinimidir.

Lillicrap vd. (2015) DDQN yönteminin sağladığı avantajları sürekli eylem uzayına taşıyabilmek için Silver vd. (2014)'nin önerdiği deterministik politika gradyanı (*Ing.* Deterministic policy gradient, DPG) yöntemini kullanmıştır. Sonuç olarak ortaya çıkan yöntem DDPG olarak isimlendirilmiştir. DDPG yapısı itibarıyla politika-dışı ve aktör-kritik yapısını kullanan bir yöntemdir. Ortamdan gelen s_t durum bilgisine göre uygun a_t eylem seçimi $\mu(s; \theta^\mu)$ aktör YSA tarafından gerçekleştirilir. Bu yöntemde seçilecek eylem

sürekli bir yapıda ve sonsuz sayıda olduğu için eylem uzayı içindeki eylemler, DDQN yönteminde olduğu gibi, tek tek değerlendirilerek seçim yapılmaz. Bunun yerine aktör YSA eylemi direkt olarak durum verilerini değerlendirerek üretir. Seçilen eylemin değerlendirmesi ise $Q(s, a; \theta^Q)$ kritik YSA tarafından yapılır. YSA'ların eğitim boyunca tutarlı sonuçlar vermesi için DDQN yönteminde olduğu gibi hedef YSA yapıları kullanılır: $\hat{\mu}(s; \theta^{\mu'})$ hedef aktör YSA ve $\hat{Q}(s, a; \theta^{Q'})$ hedef kritik YSA. Hedef YSA'lar belirlenen aralıklarla τ öğrenme oranı katsayısı ile güncellenir. Tekrarlamalı bellek yaklaşımı da DDPG yönteminin önemli elemanlarından birisidir. Aktör YSA'nın seçtiği eylem, buna karşılık gelen durum, elde edilen ödül ve bir sonraki durum bilgileri tekrarlamalı bellekte tecrübe olarak saklanır. Sonrasında, her eğitim adımında tekrarlamalı bellekten rastgele seçilen küçük gruplarla eğitim gerçekleştirilir. Aktör YSA'nın eylem uzayını yeterince keşfedebilmesi için üretilen eylem değeri seçilen bir N gürültü değeriyle toplanır. Eğitimin başlangıcında görece yüksek gürültü değerleri kullanılır ve eğitim ilerledikçe gürültü miktarı belli oranda azaltılır. Yöntemin önerildiği çalışmada gürültü olarak Ornstein-Uhlenbeck (O-U) fonksiyonu kullanılmıştır (Uhlenbeck & Ornstein, 1930). DDPG yönteminin işleyişine ait genel gösterim Şekil 17'de ve takip edilen adımlar Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 17. DDPG yönteminin işleyişinde kullanılan eğitim ortamı

DDPG Algoritması

Tekrarlamalı bellek D 'yi oluştur

$\mu(s; \theta^\mu)$ aktör ve $Q(s, a; \theta^Q)$ kritik YSA'ları rastgele θ^μ ve θ^Q ağırlıklarıyla oluştur.

$\hat{\mu}(s; \theta^{\mu'})$ hedef aktör ve $\hat{Q}(s, a; \theta^{Q'})$ hedef kritik YSA'ları $\theta^{\mu'} = \theta^\mu$ ve $\theta^{Q'} = \theta^Q$ olarak oluştur

Belirlenen eğitim süreci boyunca **tekrarla**

Her eğitim bölümü boyunca **tekrarla**

N gürültü değerini belirle

Durum s_t 'yi belirlenen başlangıç koşulları aralığında rastgele seç

Her eğitim adımı boyunca **tekrarla**

Aktör YSA ile $a_t = \mu(s_t; \theta^\mu) + N_t$ eylemini oluştur

a_t eylemini ortama uygula ve alınan r_t ödülü ile s_{t+1} sonraki durumu gözle

$\{s_t, a_t, r_t, s_{t+1}\}$ tecrübelerini tekrarlamalı bellek D 'ye kaydet

Tekrarlamalı bellek D 'den M adet rastgele tecrübeleri seçerek mini grup oluştur

Uzun vadede beklenen ödülü hesapla, $y_i = r_i + \gamma \hat{Q}(s_{i+1}, \hat{\mu}(s_{i+1}; \theta^{\mu'}); \theta^{Q'})$

Kritik YSA'yı kayıp fonksiyonu $L = \frac{1}{M} \sum_i (y_i - Q(s_i, a_i; \theta^Q))^2$ kullanarak güncelle

Aktör YSA ile oluşturulan aktör politikasını örneklenmiş politika eğitimi (*Ing.* Sampled policy gradient) yöntemiyle güncelle:

$$\nabla_{\theta^\mu} J \approx \frac{1}{N} \sum_i \nabla_a Q(s, a; \theta^Q) \Big|_{s=s_i, a=\mu(s_i)} \nabla_{\theta^\mu} \mu(s; \theta^\mu) \Big|_{s_i}$$

Hedef YSA'ları güncelle:

$$\begin{aligned} \theta^{Q'} &\leftarrow \tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^{Q'} \\ \theta^{\mu'} &\leftarrow \tau \theta^\mu + (1 - \tau) \theta^{\mu'} \end{aligned}$$

Her sonu

Her sonu

Son

Şekil 18. DDPG algoritması (Lillicrap vd., 2015)

1.6.4. PID Denetleyici

Yapılan bu doktora tezi kapsamında G-EHS'nin denetimi için kullanılan yöntemlerden bir diğeri de PID denetleyicidir. PID denetleyici uzun zamandan beri endüstriyel sistemlerde başarı ile uygulanan denetim yöntemlerinden birisidir. Uygulama kolaylığı sunan basit yapısı ve buna karşın etkin denetim performansı sergilemesi yaygın kullanımının altındaki ana nedenlerdir. Çalışmalar kapsamında, PID denetleyiciyle elde edilen denetim performansı diğer yöntemlerin başarımlarının kıyaslanması amacıyla kullanılmıştır.

PID denetleyici yapı olarak 3 kazanç elemanından oluşmaktadır: Oransal (*Ing.* Proportional, K_p), integral (K_i) ve türev (*Ing.* Derivative, K_d). Sistemin denetlenmek

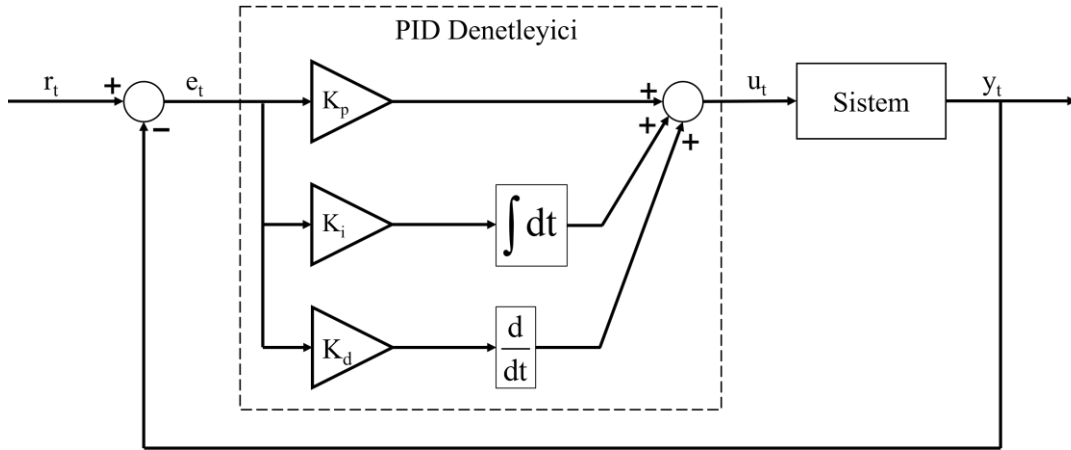
istenen y_t çıktısı ile takip etmesi istenen r_t referans sinyalinin farkı e_t hata olarak belirlenir. PID denetleyicinin işleyişi

- Oransal kazanç: Hatanın kendisi, K_p ile çarpılarak anlık hatayı düzeltmeyi sağlar.
- İntegral kazanç: Hatanın integrali K_i ile çarpılarak önceki zamanlardaki kümülatif hataları düzelten bir denetim sinyali oluşturur.
- Türev kazancı: Hatanın türevi K_d ile çarpılarak gelecekte oluşması muhtemel hataları önlemeye yardımcı olur.

olarak açıklanabilir. Bu üç terimden elde edilen değerler birleştirilerek u_t denetim sinyali elde edilir.

$$u_t = K_p e_t + K_i \int e_t dt + K_d \frac{de_t}{dt} \quad (27)$$

Belirtilen denetleyici kazançları farklı denetim performansı isterlerine ve sistemlerine göre ayarlanabilir. PID denetleyicinin şematik gösterimi Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 19. PID denetleyicinin şematik gösterimi

1.6.5. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Gerçekleştirilen doktora tezi kapsamında, pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin kullanımı için kapsamlı eğitim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, kıyaslama amacıyla PID denetleyici ile yapılan çalışmalara da yer verilmiştir. Adil bir kıyaslama yapılabilmesi için PID denetleyici kazançlarının da titizlikle belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda, parçacık sürü optimizasyonu (*İng.* Particle swarm optimisation, PSO) başarılı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Kennedy & Eberhart, 1995).

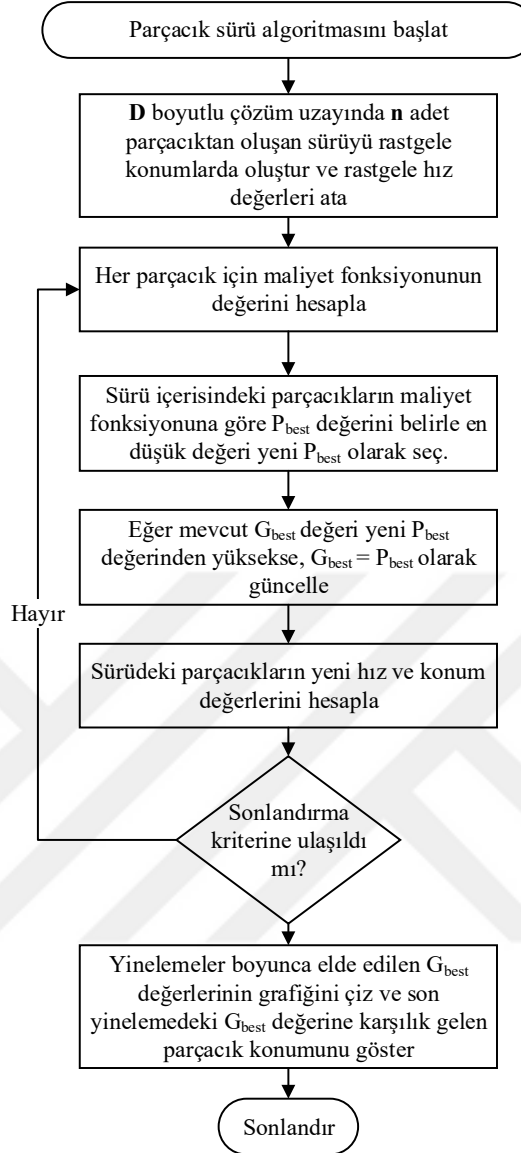
PSO, kuş ve balık sürülerinin besin arayışı sırasındaki sergiledikleri davranışları temel alarak geliştirilmiş bir algoritmadır ve yıllar içerisinde farklı alanlardaki başarılı uygulamaları sayesinde tanınırlık kazanmıştır (Cura, 2012; Mahor, Prasad, & Rangnekar, 2009; Sibalija, 2019). PSO, seçilen maliyet fonksiyonunu asgari düzeye indirmek için yinelemeli (*İng.* Iterative) bir yaklaşım kullanır. Öncelikle, D boyutlu çözüm uzayı içerisine rastgele noktalar yerleştirilir ve bu noktalara rastgele hız vektörleri atanır. Başlangıç şartlarından elde edilen maliyet fonksiyonu değeri kullanılarak sonraki yineleme için kullanılacak hız vektörü oluşturulur. Bu yaklaşımla, sürü içerisindeki parçacıklar potansiyel en iyi noktaya doğru yönelir. Yineleme adımları önceden belirlenen yineleme sayısına veya maliyet fonksiyonu değerine veya maliyet fonksiyonunun yinelemeler arasındaki değişimine bağlı bir sonlandırma durumuna kadar devam eder (Şekil 20).

Tez kapsamında kullanılan PSO algoritması

$$V^{i+1} = wV^i + c_1r_1(P_{best}^i - P^i) + c_2r_2(G_{best}^i - P^i) \quad (28)$$

$$P^{i+1} = P^i + V^{i+1} \quad (29)$$

olarak yazılabilir. Burada, $*^i$ iterasyon sayısını ve w keşif ile sömürü arasındaki dengeyi sağlayan atalet değerini göstermektedir. Parçacıkların konumu ve hızı, sırasıyla, P ve V ile gösterilir. Maliyet fonksiyonuna göre, D boyutlu çözüm uzayı içerisinde, parçacığın bulunduğu en iyi konum P_{best} ile gösterilir. Parçacıklar içerisindeki en iyi konum ise G_{best} ile ifade edilir. c_1 ve c_2 , sırasıyla, yerel ve küresel ivme katsayılarıdır. D boyutlu uzay içerisinde parçacıkların bir sonraki konumunun belirlenmesi için ivme katsayıları oldukça önemlidir. Son olarak r_1 ve r_2 , her yinelemede $[0.1 \ 1]$ aralığında rastgele değer alan değişkenlerdir.



Şekil 20. PSO algoritmasının uygulama adımları

PID denetleyicinin kazançlarını optimize etmek için gerçekleştirilen çalışmada maliyet fonksiyonu olarak mutlak hatanın toplamı (*İng.* Integral absolute error, IAE) tercih edilmiştir.

$$IAE = \int |e_t| dt \quad (30)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen tez kapsamında, 1.6 bölümünde verilen denetim yöntemleri kullanılarak farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar,

- G-EHS ve D-EHS deney düzeneklerinin kurulumu,
 - G-EHS ve D-EHS'nin ortak elemanı olan hidrolik pistonun sürtünme davranışının deneysel olarak belirlenmesi ve Stribeck fonksiyonu olarak ifade edilmesi,
 - PID denetleyici kazançlarının PSO ile optimize edilerek G-EHS'nin konum denetiminin sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi,
 - DDPG denetleyiciye yönelik ön çalışmalarla hiper parametrelerin belirlenmesi ve ödül fonksiyonun şekillendirilmesi,
 - Farklı konum referans sinyalleri için eğitilen DDPG denetleyici ile G-EHS'nin konum denetiminin sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi,
 - DDQN denetleyiciye yönelik ön çalışmalarla hiper parametrelerin belirlenmesi ve ödül fonksiyonunun şekillendirilmesi,
 - Farklı konum referans sinyalleri için eğitilen tek DDQN ve çoklu DDQN denetleyicileri ile D-EHS'nin konum denetiminin sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi,
 - Benzetim ortamında eğitilen DDQN denetleyicinin D-EHS deney sistemi üzerinde gerçekleştirilen eğitimle iyileştirilmesi,
 - Deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile konum denetimi gerçekleştirilen D-EHS'nin değişken besleme basıncı, valf arızası ve farklı konum referanslarına karşı denetim başarımının deneysel olarak incelenmesi,
- olarak sıralanabilir. Çalışmalara ait detaylı anlatım bu kısım altında verilmiştir.

2.1. G-EHS ve D-EHS Deney Düzeneklerinin Kurulumu

Gerçekleştirilen doktora tezi kapsamında denetim yaklaşımı açısından iki farklı hidrolik sistemde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İki sistem birbirinden yönlendirme birimlerinde kullanılan valf yapısıyla ayrılmaktadır. Besleme ve eyleyici birimleri ise birbirinin aynısıdır. Bu nedenle eyleyici birimi değişimli olarak kullanılabilecek tek bir hidrolik sistem tasarımı yapılmıştır (Şekil 7).

Temel deney düzeneği tasarımına G-EHS ile başlanmıştır. G-EHS'nin besleme biriminde elektrik motoru ile tahrik edilen hidrolik dişli pompa kullanılmıştır. Hidrolik sistemin besleme basıncı belirlenen asgari düzeyi geçmemesi için ise basınç emniyet valfi sisteme dahil edilmiştir. Belirlenen sınırlar içerisinde basınçlandırılan hidrolik akışkan yönlendirme birimine iletilmektedir. G-EHS'nin yönlendirme biriminde 4/3 oransal valf bulunmaktadır. Oransal valf içerisindeki sürgünün konumu ± 10 V aralığındaki denetim sinyali ile denetlenmektedir. Sürgünün konumuna göre basınçlandırılmış hidrolik akışkanın debisi ayarlanmaktadır. Debisi düzenlenen hidrolik akışkan oransal valf içerisindeki sürgünün konumuna göre hidrolik pistonun A veya B odacığına aktarılmaktadır. Hidrolik pistonun diğer odacığı ise oransal valf üzerinden tank hattına bağlanmaktadır. Hidrolik pistonun konumunu hassas bir biçimde ölçebilmek için ise lazer mesafe sensörü kullanılmaktadır. Bununla beraber EHS'nin besleme ve hidrolik silindir basınç değerlerini belirleyebilmek için ise 3 adet basınç sensörü de sistemde yer almaktadır (Şekil 21 ve Şekil 22). G-EHS deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar Tablo 1'de verilmiştir.

G-EHS olarak tasarlanan ve imal edilen deney sistemini D-EHS'ye çevirmek için iki değişiklik yapılmıştır:

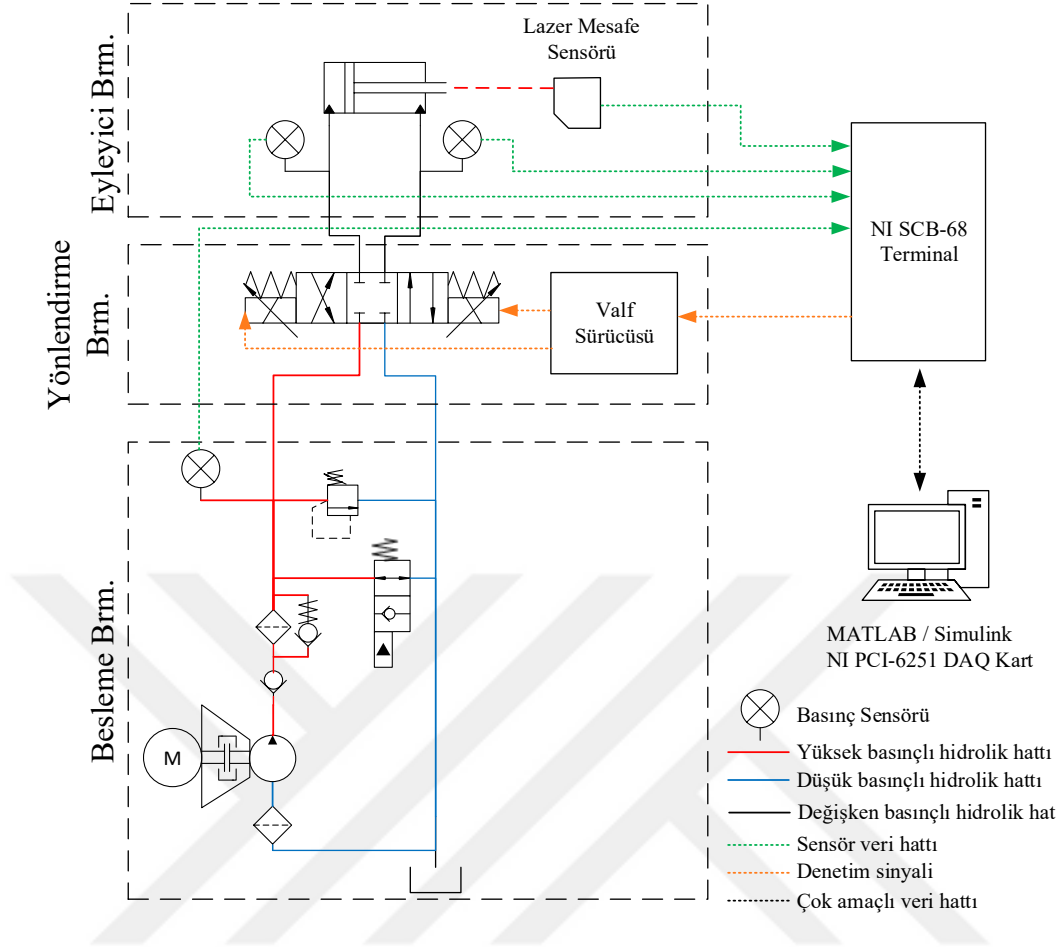
- Oransal valfin ± 10 V aralıkta değer alabilen sürekli denetim sinyali +10 V, 0 V ve -10 V olmak üzere üç değerle sınırlandırılmıştır. Bunun sonucunda, ilgili valf yönlendirme valfi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle, yönlendirme valfi akışkan debisini sadece valf çıkışları arasında yönlendirebilecek ya da çıkışları tamamen kapatabilecektir.
- İçerisinde 2 adet 4-bit ikili dizilim DAKB barındıran bir dijital hidrolik valf bloğu sisteme dahil edilmiştir.

Yapılan değişikliklerle beraber D-EHS'nin yönlendirme biriminde 8 adet aç-kapa popet valf ve 1 adet 4/3 yönlendirme valfi bulunmaktadır.

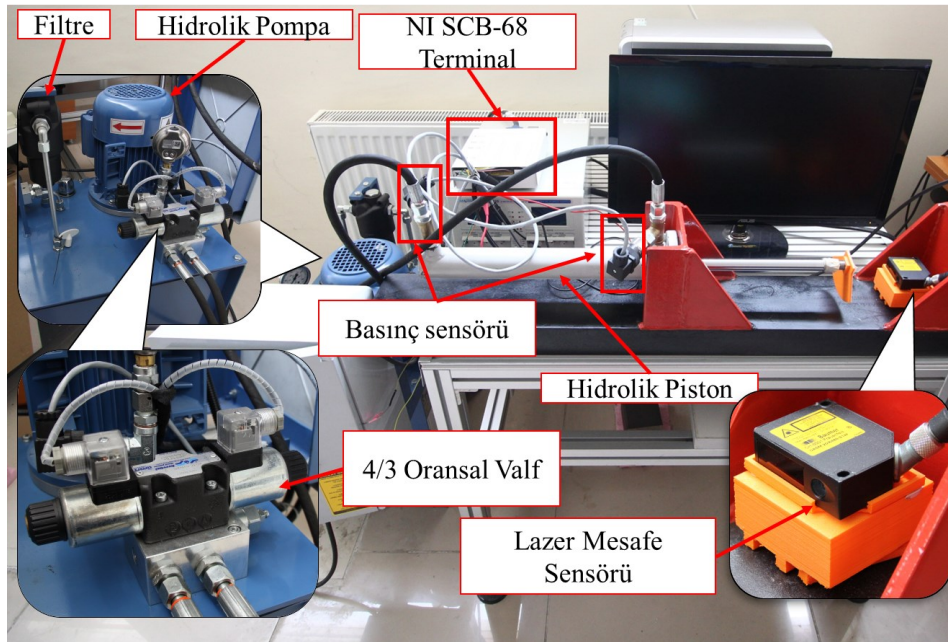
Tablo 1. G-EHS deney düzeneğinin teknik özellikleri

Hidrolik pompa	Boden BHP 2BO-D4 4 cc/rev
Hidrolik pompa motoru	Volt IM B35 1.1 KW 1400 rpm
Hidrolik yağ	Hidrotex DTA 46 Oil
Oransal Valf	Brevini XD3C01N2G
Hidrolik Piston	Ø40/50/20 – 300 mm
Lazer mesafe sensörü	Baumer OADM 20I6460/S14F
Basınç sensörü	Trafag EPI8287
Veri toplama sistemi	NI PCI-6251 DAQ Kart NI SCB-68 Terminal

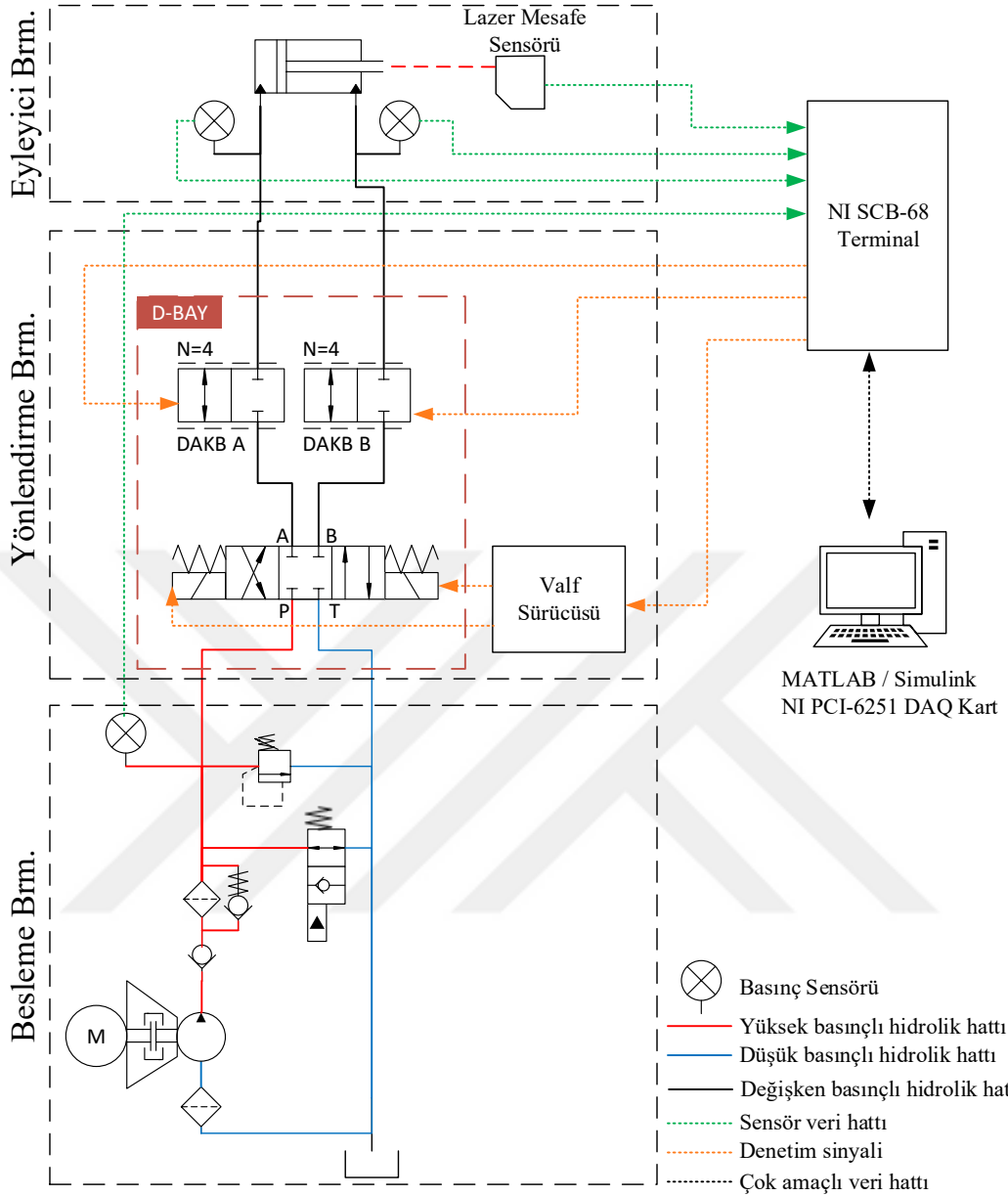
Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda yazılım alt yapısı olarak Mathworks tarafından geliştirilen MATLAB ve Simulink başta olmak üzere MATLAB yazılımının farklı modüllerinden yararlanılmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen denetleyiciler Simulink Desktop Real-Time modülü ile bilgisayar üzerinde gerçek zamanlı olarak 0,01 s örnekleme zamanı (100 Hz) ile çalıştırılmıştır. Yazılım ve deney düzeneği arasındaki veri alışverişini sağlamak amacıyla ise National Instrument'in geliştirmiş olduğu PCI-6251 veri toplama kartı ve SCB-68 terminali kullanılmıştır. 1 μ s azami örnekleme zamanı ve 1,5 μ s oturma süresi ile PCI-6251 veri toplama kartı yapılan çalışmaların gecikmesiz olarak gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Deney düzeneğinden toplanan sensör verileri terminal vasıtasıyla veri toplama kartına aktarılmaktadır. Denetleyici ise toplanan veriyi değerlendirerek uygun denetim sinyalini belirlemektedir. G-EHS'nin denetiminde ± 10 V aralığında değişen analog bir denetim sinyali yeterli olmaktadır. D-EHS için ise 9 adet denetim sinyali ihtiyacı duyulmaktadır. İlgili denetleyiciler tarafından belirlenen denetim sinyali veri toplama kartı ile oluşturulmakta ve terminal yardımıyla deney düzeneğine aktarılmaktadır.



Şekil 21. G-EHS deney düzeneği ve denetim sisteminin şematik gösterimi



Şekil 22. G-EHS deney düzeneği

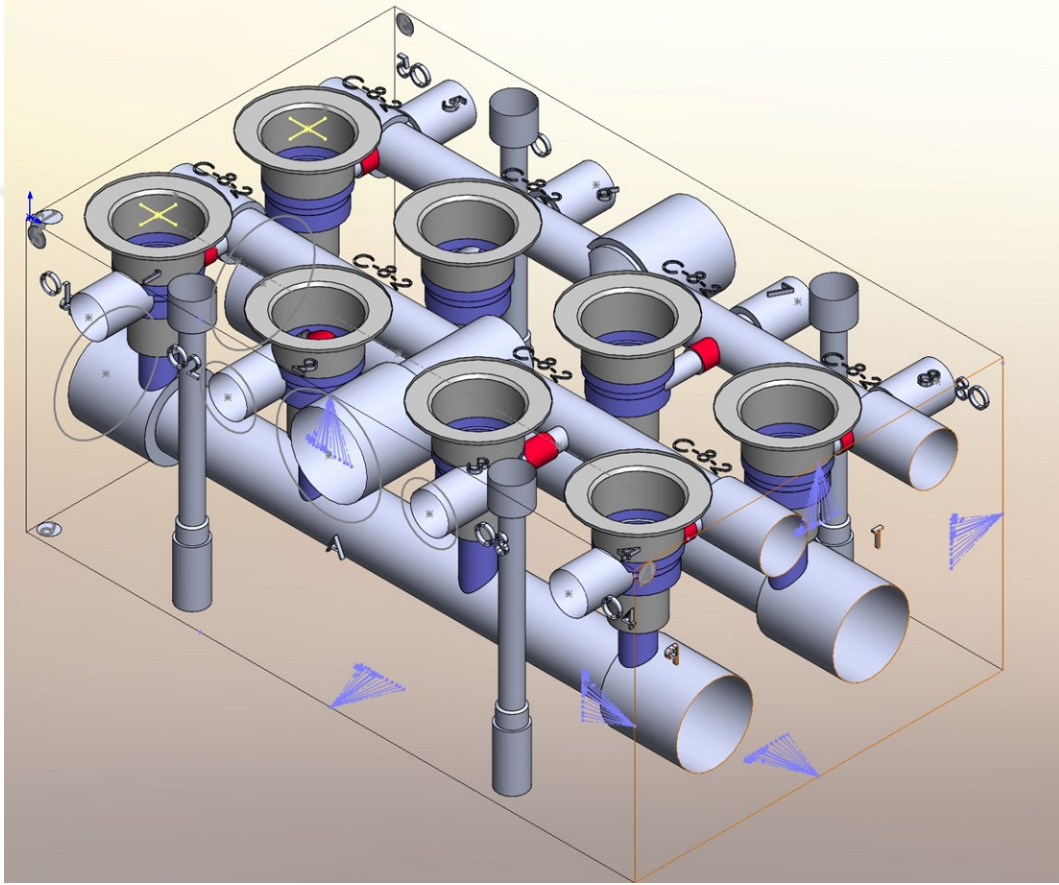


Şekil 23. D-EHS deney düzeneği ve denetim sisteminin şematik gösterimi

2.1.1. Dijital Hidrolik Valf Bloğu Tasarımı ve İmalatı

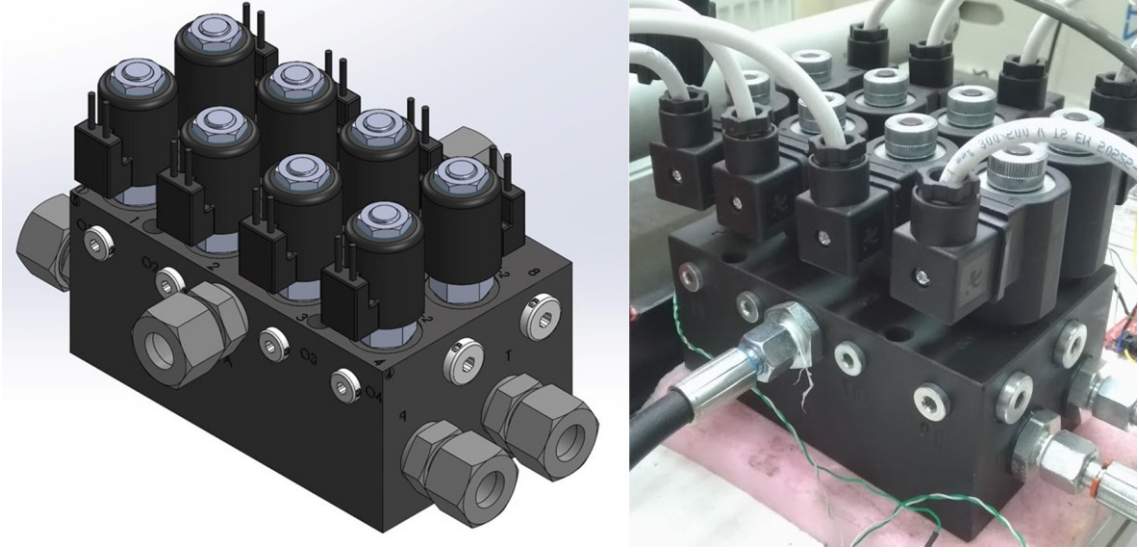
Aç-kapa popet valflerinin yer aldığı dijital hidrolik valf bloğu, hidrolik hat üzerinde dar boğaz oluşturmayacak şekilde tasarlanmıştır. Blok içerisindeki akışkan yollarının çapı, aç-kapa popet valflerin akış katsayısı ve orifislerin çapı belirlenirken bu husus göz önünde bulundurulmuştur. Basınçlandırılmış hidrolik akışkanın farklı odacıklara yönlendirilmesi işlemi 4/3 yönlendirme valfi ile gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, DAKB'lerin bağlı bulundukları odacıklar değişmemektedir. Her bir DAKB 4 adet popet valf ve bunlara seri

bağlı olan orifislerden meydana gelmektedir. Popet valfler ve orifisler valf bloğuna mekanik olarak bağlanmaktadır. Böylelikle, istenildiği takdirde orifisler değiştirilerek eş veya fibonacci diziliimli DAKB'ler elde edilmesi mümkündür. Tasarımı gerçekleştirilen dijital hidrolik valf bloğunun hidrolik akış yollarını gösteren şematığı Şekil 24'te verilmiştir. Şematikte kırmızı ile belirtilen kısımlar aç-kapa popet valflere seri olarak bağlanan orifisleri göstermektedir.



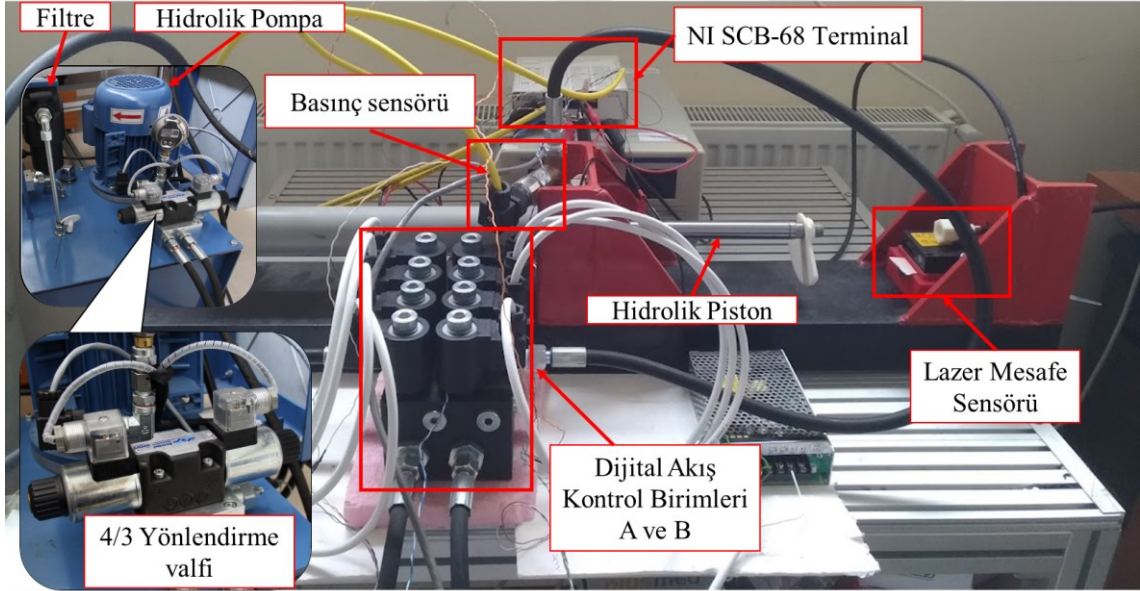
Şekil 24. 2 adet 4-bit DAKB içeren dijital hidrolik valf bloğunun şematığı

Buna ek olarak, dijital hidrolik valf bloğu üzerinde ilave giriş-çıkış noktaları da yer almaktadır. Böylelikle, ilerleyen süreçte benzer blokların birbirine bağlanarak daha hassas debi denetimine imkân veren yapıların oluşturulması mümkün olmaktadır. Dijital hidrolik valf bloğunda Vis Hydraulics markasına ait SVT0.S08 aç-kapa popet valfler kullanılmıştır. Sabit çaplı orifisler ise M6 setskur vidalar işlenerek üretilmiştir. Şekil 24'te verilen hidrolik hat yapısı göz önünde bulundurularak imal edilen dijital hidrolik valf bloğu Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. Dijital hidrolik valf bloğunun 3 boyutlu modeli ve üretilen valf bloğu

Dijital hidrolik valf bloğunun Şekil 23'te belirtildiği gibi G-EHS deney düzeneğine eklenmesiyle D-EHS deney düzeneği kurulumu tamamlanmıştır (Şekil 26).



Şekil 26. D-EHS deney düzeneği

2.2. Hidrolik Pistonun Sürtünme Davranışının Belirlenmesi

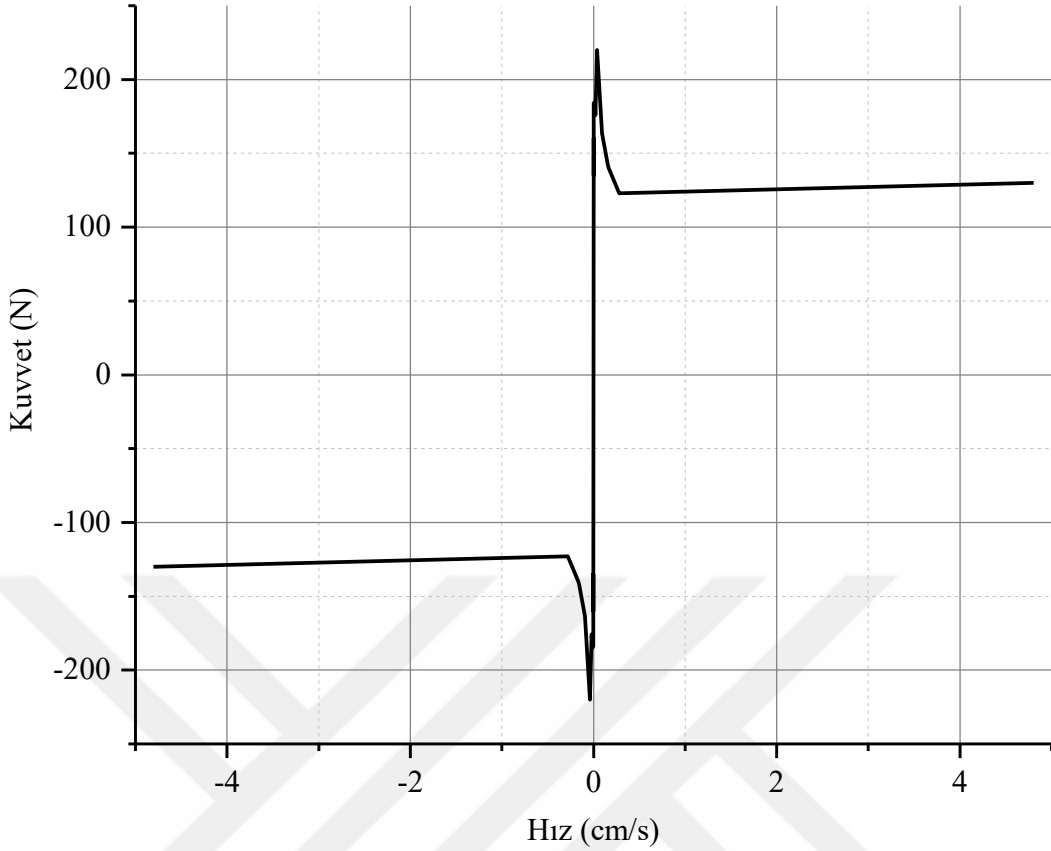
Tez kapsamında kullanılan denetim yöntemlerinin başarımı hidrolik pistonunun konum denetimine bağlı olarak ölçülmektedir. Bu nedenle, hidrolik pistonun hareketine etki eden bileşenleri belirlemek ve matematik modeline dahil etmek denetim başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Doğrusal olmayan yapısıyla sürtünme kuvveti de bu etkilerden birisidir. Hidrolik pistonda sürtünme kuvveti cidarla piston arasında meydana gelmektedir ve hidrolik pistonun hızına bağlı olarak değişim göstermektedir. Meydana gelen sürtünme kuvvetini deneysel olarak belirlemek için hidrolik piston farklı hızlarda uzama yönünde hareket ettirilmiştir. Hidrolik pistonun hızı kararlı hale ulaştığında iki odacık arasındaki basınç farkından ortaya çıkan kuvvet sürtünme kuvvetine eşit olmaktadır.

$$F_s(\dot{x}_P) = P_A A_A - P_B A_B \quad (31)$$

Yapılan çalışmalarda hidrolik pistona etkiyen sürtünme kuvveti 0-4,8 cm/s arasında değişen 10 farklı hız değerinde ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler incelendiğinde, sürtünme kuvvetinin Stribeck eğrisine uyumlu bir biçimde değiştiği görülmüştür. Sürtünme kuvvetinin 4,8 cm/s ve üzerindeki hız değerlerinde doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir ve daha yüksek hızlar için ölçüm yapılmamıştır. Son olarak, hidrolik pistona etkiyen sürtünme kuvvetinin uzama ve kısalma yönünde birbirine eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Elde edilen ölçümler değerlendirilerek hıza bağlı değişen sürtünme kuvvetini ifade eden (2) eşitliğinin katsayıları hesaplanmış ve Tablo 2’de verilmiştir. Sürtünme kuvvetinin hıza bağlı değişimi ise Şekil 27’de verilmiştir.

Tablo 2. Deneysel olarak elde edilen sürtünme kuvveti katsayıları

Frenleme kuvveti, F_{frn}	220 N
Fren hızı, v_{frn}	$3,65 \times 10^{-3}$ m/s
Coulomb kuvveti, F_C	123 N
Viskoz sürtünme katsayısı, f_v	$1,55 \times 10^{-2}$ N/(m/s)

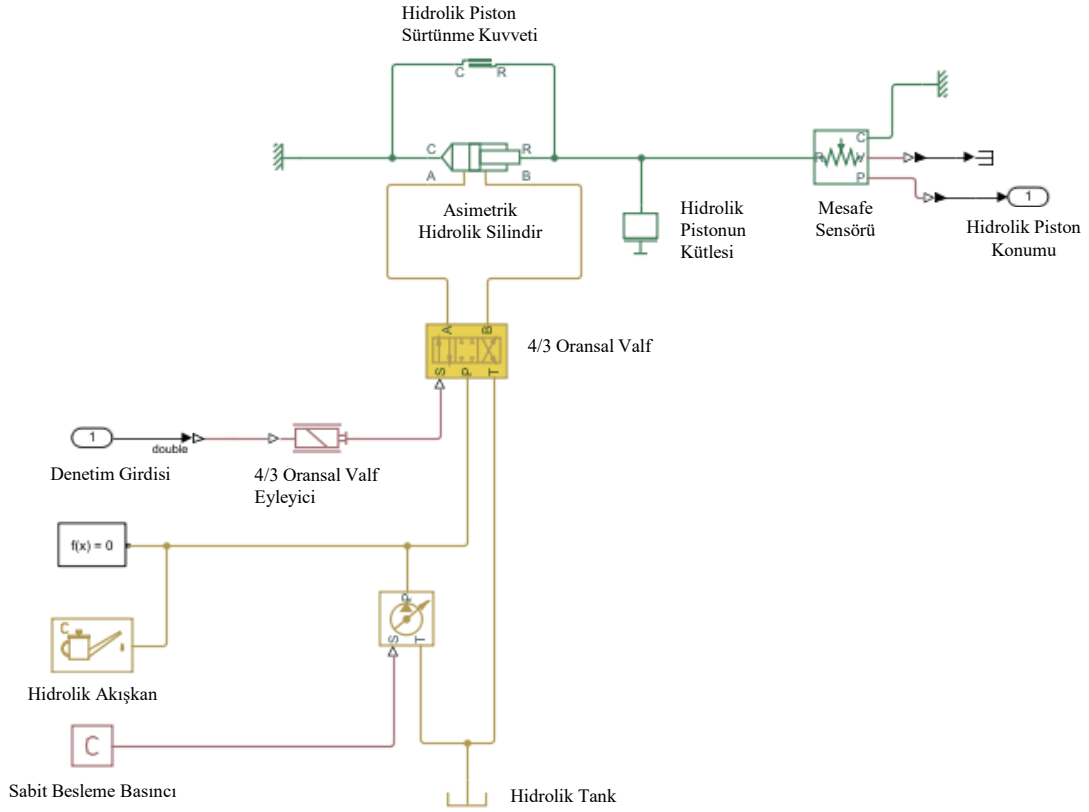


Şekil 27. Hidrolik silindirin deneysel olarak elde edilen Stribeck sürtünme eğrisi

2.3. G-EHS'nin PID Denetleyici ile Konum Denetimi

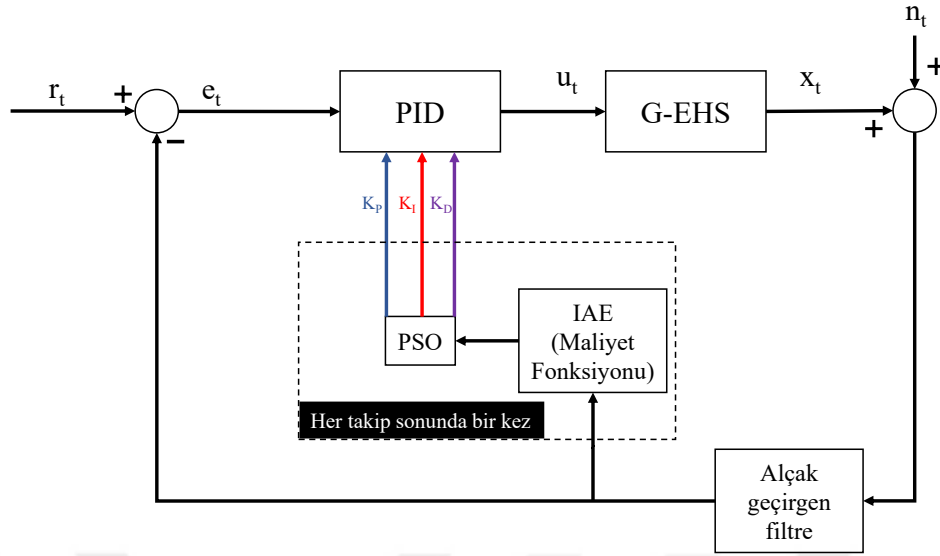
Oransal valf ile sürülen hidrolik pistonun konum denetimi için PID denetim yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, basamak, sinüs ve rampa türü sinyaller içeren çoklu konum referansının izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Farklı özelliklere sahip çoklu konum referansını takip etmek için PID denetleyici kazançları, PSO yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Öncelikle, PSO ile kazançların belirlenebilmesi için MATLAB Simulink yazılımı kullanılarak benzetim ortamı oluşturulmuştur. G-EHS'nin (14)'te verilen matematik modeli benzetim ortamına aktarılırken Simulink'in hidrolik sistemler için özelleşmiş Simscape Fluids modülü kullanılmıştır (Şekil 28). Böylelikle, yazılımın sunduğu işlem kolaylığı ve hızı avantajından azami seviyede yararlanılmıştır. Modülde yer alan hidrolik bileşenler Tablo 1 ve Tablo 2'de yer alan bilgiler kullanılarak düzenlenmiş ve Simulink ortamında birleştirilmiştir.



Şekil 28. Simulink Simscape Fluids modülü ile oluşturulan G-EHS modeli

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda elde edilen denetleyici kazançları nihai olarak deney düzeneğinde uygulanacaktır. Bu nedenle, deney düzeneğinde yer alan etkilerin benzetim ortamında aktarılması önemlidir. Hidrolik pistonun konumunu ölçmek için kullanılan sensör kaynaklı gürültü de bunlardan birisidir. Benzetim ortamında bu etkiyi oluşturabilmek için beyaz gürültü (*Ing.* White noise) kullanılmıştır. Sensör gürültüsünün denetim performansı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için 30 Hz alçak geçirgen filtre kullanılmıştır. Benzetim ortamına dahil edilen PSO, her takip sonunda hesaplanan IAE maliyet fonksiyonuna göre çözüm uzayı içerisinde yeni kazanç değerleri belirlemektedir. Bu süreç belirlenen sonlandırma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. Oluşturulan benzetim ortamı Şekil 29’da verilmiştir.



Şekil 29. PID kazançlarının PSO yöntemiyle belirlenmesi için oluşturulan benzetim ortamı

Çözüm uzayının yeterince araştırılabilmesi ve uygun kazanç değerlerini belirlenebilmesi için PSO parametrelerinin seçimi önemli bir konudur. Uygun parametrelerinin belirlenebilmesi için birçok ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak, w atalet değerinin 0,9 dan küçük seçildiğinde asgari maliyet fonksiyonu değerine ulaşamadığı, büyük seçildiğinde ise yerel asgari değerde kaldığı görülmüştür. Sürü boyutunu belirlemek için de benzer bir yaklaşım tercih edilmiştir. Bu amaçla 4, 8, 16, 32 ve 40 parçacıktan oluşan sürülerle ön çalışmalar yapılmıştır. 8 parçacık içeren sürünün 16, 32 ve 40 parçacık içeren sürülerle aynı sonucu verdiği görülmüştür. Bu nedenle, işlem yükünü azaltmak adına sürü boyutu 8 parçacık olarak seçilmiştir. PSO yönteminde dikkate alınması gereken diğer önemli parametreler ise yerel ve küresel ivme katsayılarıdır. Yapılan çalışmada, literatürde yer alan benzer çalışmaların önerileri göz önünde bulundurularak, katsayılar belirlenmiş ve daha sonra ön çalışmalar yardımıyla hassas ayarlamalar yapılmıştır (Coşkun & İtik, 2023).

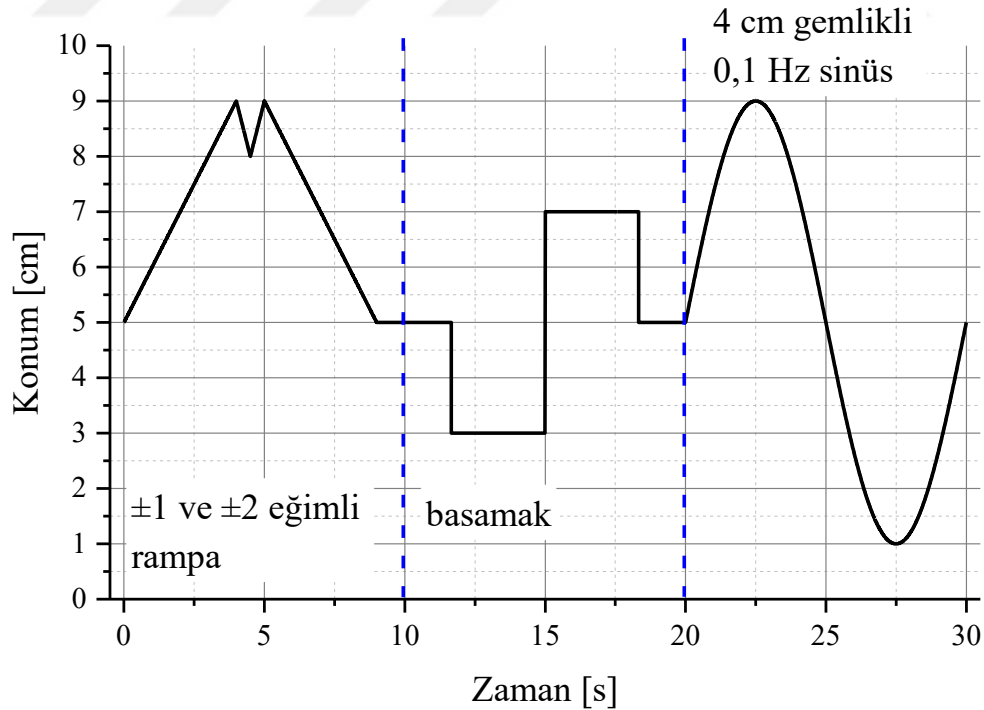
Sonuç olarak, PID denetleyicinin kazançlarını belirlemek için kullanılacak parametreler Tablo 3'te sunulmuştur. Ön çalışmalarda, başlangıç koşullarının optimizasyon performansını etkilediği gözlenmiştir. Bu nedenle, PSO yöntemi çoklu konum referans sinyali için iki kez çalıştırılmıştır ve çalışmanın ilerleyen aşamalarında en iyi sonuçları veren kazanç değerleri kullanılmıştır. Denetim sinyalinin 4/3 oransal valfe uygun olan ± 10

V sınırları içerisinde kalabilmesi için ise çözüm uzayı sınırlandırılmıştır. Bu bağlamda, K_p ve K_I kazançları için $[0 \ 100]$; K_D kazancı için ise $[0 \ 1]$ aralığı belirlenmiştir.

Tablo 3. PID denetleyici kazançlarını belirlemek için kullanılan PSO parametreleri

İterasyon sayısı	200
Sürü boyutu	8
Atalet değeri, w	0,9
Rastgele değişkenler, r_1 ve r_2	0 ... 1
Yerel ivme katsayısı, c_1	0.9
Küresel ivme katsayısı, c_2	1.2

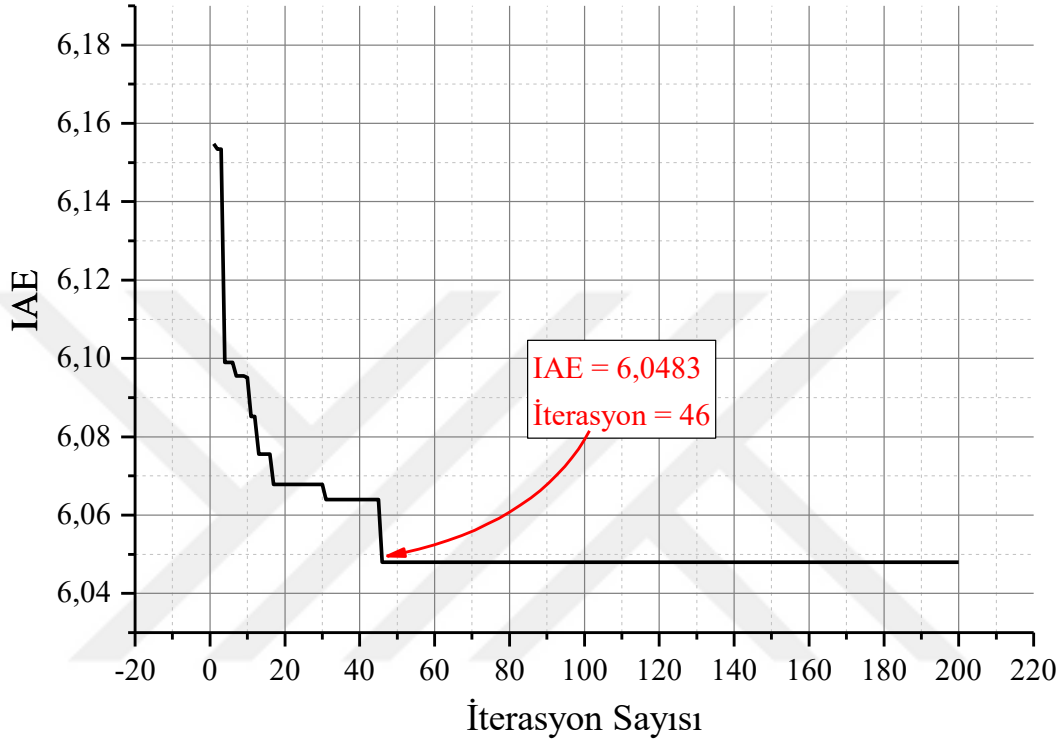
Belirlenen PSO parametreleri ile çözüm uzayı sınırları gözetilerek gerçekleştirilen çalışmada, 4 cm basamak, 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs ve farklı eğim değerleri içeren sinyallerden oluşan çoklu konum referansı için PID kazançları belirlenmiştir (Şekil 30). Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının ilerleyişi Şekil 31’de ve çalışma sonucunda elde edilen PID kazanç değerleri ise Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 30. Rampa, basamak ve sinüs sinyallerinden oluşan çoklu konum referansı

Tablo 4. PSO ile belirlenen PID kazanç değerleri

Konum Referansı	IAE	K_P	K_I	K_D
Çoklu referans	6,0483	13,5455	18,1654	0,4067



Şekil 31. PID kazançlarının PSO ile belirlenmesi sırasında maliyet fonksiyonu değerinin değişimi

2.4. G-EHS'nin DDPG Denetleyici ile Konum Denetimi

G-EHS'nin konum denetimi PID denetleyiciye ek olarak pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir denetleyici olan DDPG ile de gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, DDPG denetleyici içerisinde çoklu konum referansı ile benzetim ortamında eğitilmiştir. Akabinde, eğitimi tamamlanan denetleyicinin denetim performansı deneysel çalışmalarla sınanmıştır. DDPG için etkin bir eğitim ortamı oluşturabilmek adına uygun hiper parametrelerin ve ödül fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, öncelikle MATLAB Simulink yazılımı kullanılarak bir benzetim ortamı oluşturulmuştur (Şekil 32). Bu ortamda üzerinde hiper parametrelerin, YSA yapısının ve ödül fonksiyonunun belirlenmesine yönelik çalışmalar eş zamanlı olarak yürütülmüştür.

2.4.1. Durum Değişkenleri ve Ödül Fonksiyonunun Belirlenmesi

DDPG denetleyicinin etkin çalışabilmesi için denetime etkiyen unsurları gözleyebilmesi gerekmektedir. G-EHS'nin konum denetimi için gerçekleştirilen ön çalışmalarda farklı etmenler s_t durum değişkeni olarak seçilerek DDPG denetleyici eğitimine dahil edilmiştir. Eğitimlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi sonuç veren s_t durum değişkenleri $\dot{x}$ hidrolik piston konumunun türevi, e konum takip hatası, $\dot{e}$ konum takip hatasının türevi ve u denetim sinyali olarak belirlenmiştir.

Eğitim için seçilen ödül fonksiyonunu belirlerken durum değişkenlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Böylelikle, eğitim süresince alınan ödül ile durum arasında bir bağlantı kurulması mümkün olur. Bu durum göz önünde bulundurularak yapılan ön çalışmalarda, ödül fonksiyonu için 4 ceza ve 1 ödül terimi içeren bir yapı belirlenmiştir. Toplanan terimlerin sonucunda ise R nihai ödül fonksiyonu değeri elde edilmektedir. Ön çalışmalar esnasında sadece ceza içeren terimlerle dahi DDPG'nin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Ödül terimi ise DDPG denetleyici eğitimini daha odaklı hale getirebilmek için kullanılmıştır. Ceza terimleri ile kaçınılması gereken durumlar net bir biçimde belli edilirken ödül terimi ile eğitimin yönlendirilmesi gereken doğrultu belirlenmiştir. Sonuç olarak, eklenen ödül terimi ile daha kısa eğitim süresinde benzer denetim performansı elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \min\left(0, -\alpha \frac{d}{dt}|e_t|\right) \\
 P_2 &= -\beta|e_t| \\
 P_3 &= -\omega \left|\frac{d}{dt}u_t\right| \\
 P_4 &= x < 0 \parallel x > 14 \Rightarrow -\lambda \\
 R_1 &= \frac{\mu}{(\max(\rho, |e_t|))^2} \\
 R &= \frac{1}{\varphi}(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + R_1)
 \end{aligned} \tag{32}$$

Ödül fonksiyonu içerisinde yer alan terimlerin amaçları

- P_1 terimi, konum takip hatasındaki artış oranıyla orantılı bir ceza değeri üretmek için kullanılmaktadır. Burada kullanılan $\min$ fonksiyonu, P_1

teriminin azalan takip hatası durumunda herhangi bir ceza üretmemesini sağlamaktadır.

- P_2 terimi, takip hatasıyla orantılı olarak bir ceza değeri üretmektedir. Böylelikle, DDPG denetleyicinin en temel amacı olan takip hatasını asgari düzeyde tutulması yönünde bir etki oluşturulmaktadır.
- P_3 terimi, DDPG denetleyicinin takip hatasını azaltmak için agresif davranışlar sergilemesinin önüne geçmektedir. Böylelikle, denetleyici denetim sinyalinde ani değişimler meydana getirilmeden takip hatasını azaltmaya çalışmaktadır.
- P_4 terimi, direkt olarak sonlandırma kriterine bağlı bir terimdir. Hidrolik piston konumu belli aralıklar dışına çıktığı durumda eğitim bölümü sonlandırılmakta ve ilgili terim ile ceza değeri oluşturulmaktadır. P_4 terimi diğer ceza terimlerinin aksine süresizdir. Süresiz terimlerin ödül fonksiyonunu baskılaması eğitimin ilerleyişi için tehlikeli olabilmektedir. Fakat buradaki gibi doğru kullanılması durumunda, DDPG denetleyici belirlenen sınırları kısa sürede öğrenmektedir.
- R_1 terimi, takip hatasını azalmasına bağlı olarak üstel artan bir ödül değeri oluşturması için tasarlanmıştır. Takip hatasının ρ değerine eşit veya küçük olması durumunda elde edilen ödül azami seviyeye ulaşarak sabit kalmaktadır.

olarak belirtilebilir. Son olarak $P_{1,2,3,4}$ ve R_1 terimlerinin toplamı φ 'ya bölünerek nihai R ödül fonksiyonuna ulaşılır. Bu çalışmada ödül fonksiyonu için kullanılan katsayılar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Ödül fonksiyonunda kullanılan katsayılar

α	β	ω	λ	μ	ρ	φ
0,1	100	0,35	5600	0,1	0,01	1000,3

2.4.2. YSA Yapılarının ve Hiper Parametrelerin Belirlenmesi

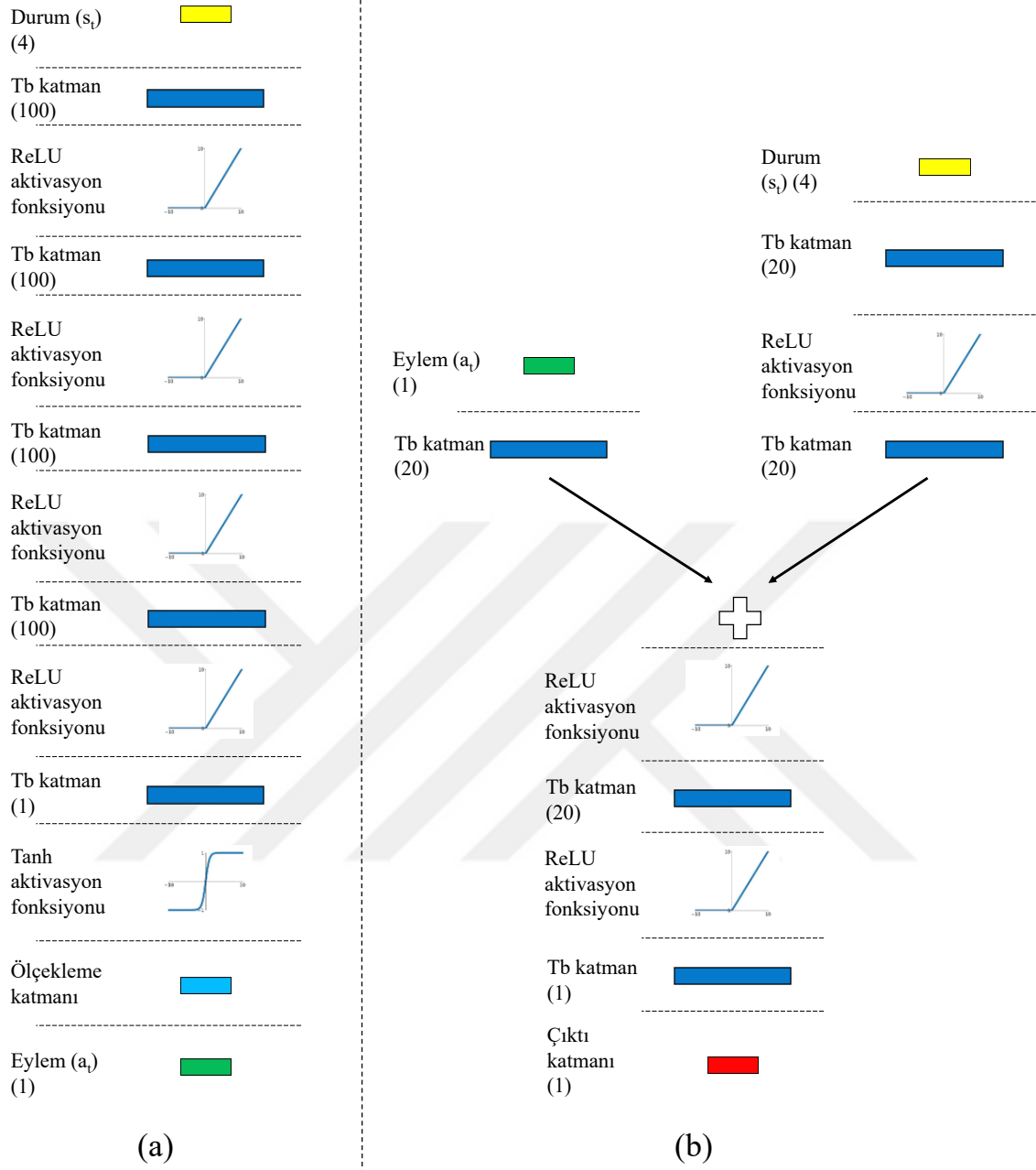
Eğitim için kullanılacak yapıların belirlenmesi için Coşkun ve İtik (2022) tarafından kullanılan yaklaşım benimsenmiştir. Bu bağlamda, DDPG denetleyicide yer alan aktör ve kritik YSA'ların yapısı basit ağ yapılarıyla başlayarak belirlenmiştir. Her ağ yapısı için eğitimler yürütülmüş ve bu süreçler detaylıca incelenmiştir. Eğitimde belirlenen eksikliklere göre aktör ve kritik YSA'lar geliştirilmiştir. YSA'ların az katman ve nöron içerdiği durumlarda alınan ödülün çok hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Buna karşın, DDPG denetleyicinin kısıtlı denetim performansı sunduğu belirlenmiştir. Örnek olarak, denetleyicinin basamak, sinüs ve rampa konum referans sinyallerinden birisini orta seviyede takip edebilecek denetim performansı sergilemesi gösterilebilir. Bu durumu değiştirmek için YSA'ların katman ve nöron sayısı artırıldığında ise elde edilen ödülün düşük bir hızla sürekli arttığı gözlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar içerisinde seçilen bir eğitimde alınan ödülün azami değere ulaşması için 10000 bölüm kadar eğitime devam edilmiştir. Sonuç olarak, DDPG denetleyicinin aldığı ödülü belli bir noktaya kadar arttırdığı fakat sonrasında çok daha düşük ödüller aldığı belirlenmiştir. Bu durumun son 4000 bölüm içerisinde döngüsel olarak tekrarlandığı görülmüştür. Sonuç olarak, YSA'ları gereğinden daha çok basitleştirmenin veya karmaşıktırmanın iyi bir eğitimi garanti etmediği belirlenmiştir.

Elde edilen bulgulardan yola çıkılarak farklı YSA yapıları ile çalışmalar sürdürülmüştür. Bu süreçte hiper parametre seçimine yönelik çalışmalara devam edilmiştir. Literatürde hiper parametre ve YSA yapısı seçimine yönelik bilgiler bir öneri mahiyetinde yer almaktadır. Çoğu durumda da uygulamaya özel öneriler verilmektedir. Bu nedenden dolayı hiper parametrelerin ve YSA yapılarının seçimi için sonsuz olasılık bulunmaktadır. Bu geniş seçenek yelpazesi içinde çalışırken, seçilen değerlerin sonuçlarını hızla gözlemlemek büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenden dolayı, ön çalışmalar boyunca eğitimde kullanılan öğrenme oranı $[0,01 \ 0,1]$ aralığında seçilmiştir. Eğitimde olumlu yönde ilerleme gösteren değerler belirlenerek daha düşük öğrenme oranıyla tekrar çalışılmıştır. Bu adımların tekrarlanması sonucunda istenen denetim performansını sunan hiper parametre değerleri belirlenmiş ve Tablo 6'da sunulmuştur. YSA'ların oluşturulması için ise tam bağlı (*İng.* Fully connected, Tb) katmanlar ve doğrultulmuş doğrusal birim (*İng.* Rectified linear unit, ReLU) aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Aktör YSA 4 adet s_t durum değişkenini kabul eden bir giriş katmanına ve 1 adet denetim sinyalinin çıkmasına

imkân tanıyan çıkış katmanına sahiptir. Giriş ve çıkış katmanları arasında ise 4 gizli katman bulunmaktadır. Her gizli katman 100 adet nöron içermektedir. Çıkış katmanından önce 1 adet ölçekleme katmanı YSA'ya dahil edilmiştir. Ön çalışmalar süresince edinilen bulgular, ölçekleme katmanının eğitim süresini önemli bir oranda kısalttığını göstermiştir. Ölçekleme katmanının işlevi ± 1 aralığında olan YSA çıktısını ± 10 aralığına yükseltmektir. Asli görevi aktör YSA tarafından üretilen a_t eylemini değerlendirmek olan kritik YSA, çatallı bir yapı olarak tasarlanmıştır. Kritik YSA'da s_t durumu değişkenleri farklı YSA katmanlarında ön işlemden geçtikten sonra a_t eylem değeri kullanılarak elde edilen YSA katmanı ile birleşmektedir. Son olarak, çıktı katmanıyla a_t eyleminin uygunluğuna dair bir sayısal değer oluşturulmaktadır. Aktör ve kritik YSA'lar ise Şekil 33'te verilmiştir.

Tablo 6. DDPG eğitimi için kullanılan hiper parametreler

Öğrenme oranı (Aktör YSA)	0,001	Hedef Yumuşatma faktörü	0,001
Öğrenme oranı (Kritik YSA)	0,0001	Hedef Güncelleme frekansı	10
İndirim katsayısı, γ	0,99	O-U Gürültü varyansı	8
Tekrarlamalı bellek deposu boyutu	10^6	O-U Gürültü varyansı azalma oranı	0,0001
Mini örneklem sayısı	64	Örnekleme zamanı, s	0,01



Şekil 33. DDPG denetleyici için belirlenen (a) aktör ve (b) kritik YSA'lar

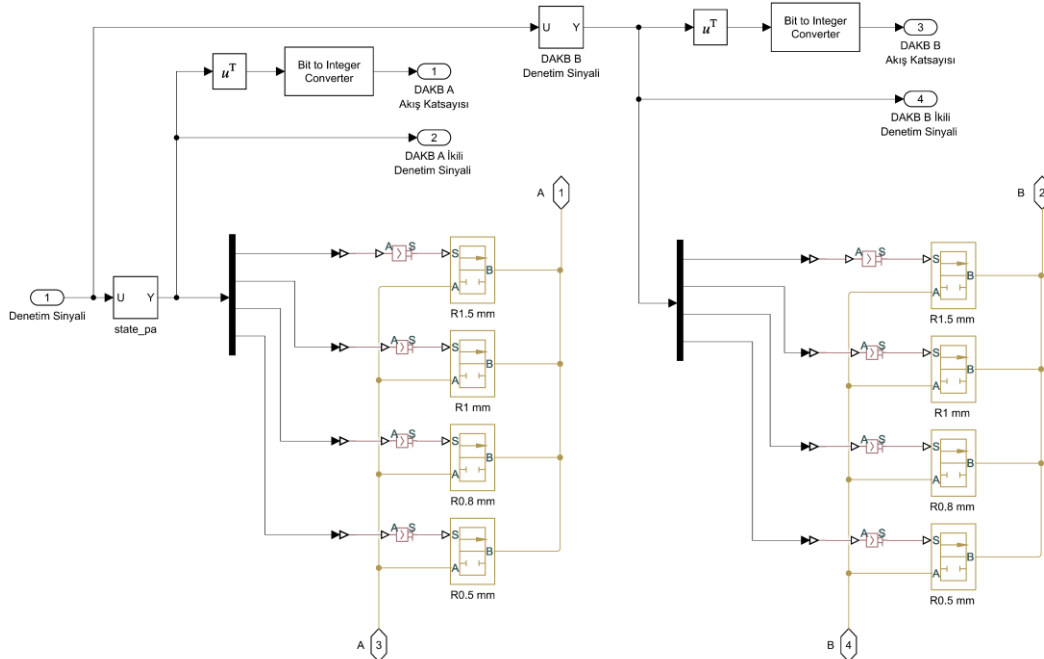
2.4.3. DDPG Denetleyici Eğitimi

DDPG denetleyici için gözlenecek durum değişkenleri, ödül fonksiyonu, hiper parametreler ve YSA yapıları yapılan ön çalışmalarla belirlenmiştir. Eğitimin gerçekleştirilmesi için düzenlenen nihai benzetim ortamının şematik gösterimi Şekil 34'te verilmiştir. Eğitim için kullanılan konum referans sinyali ise Şekil 30'da sunulmuştur.

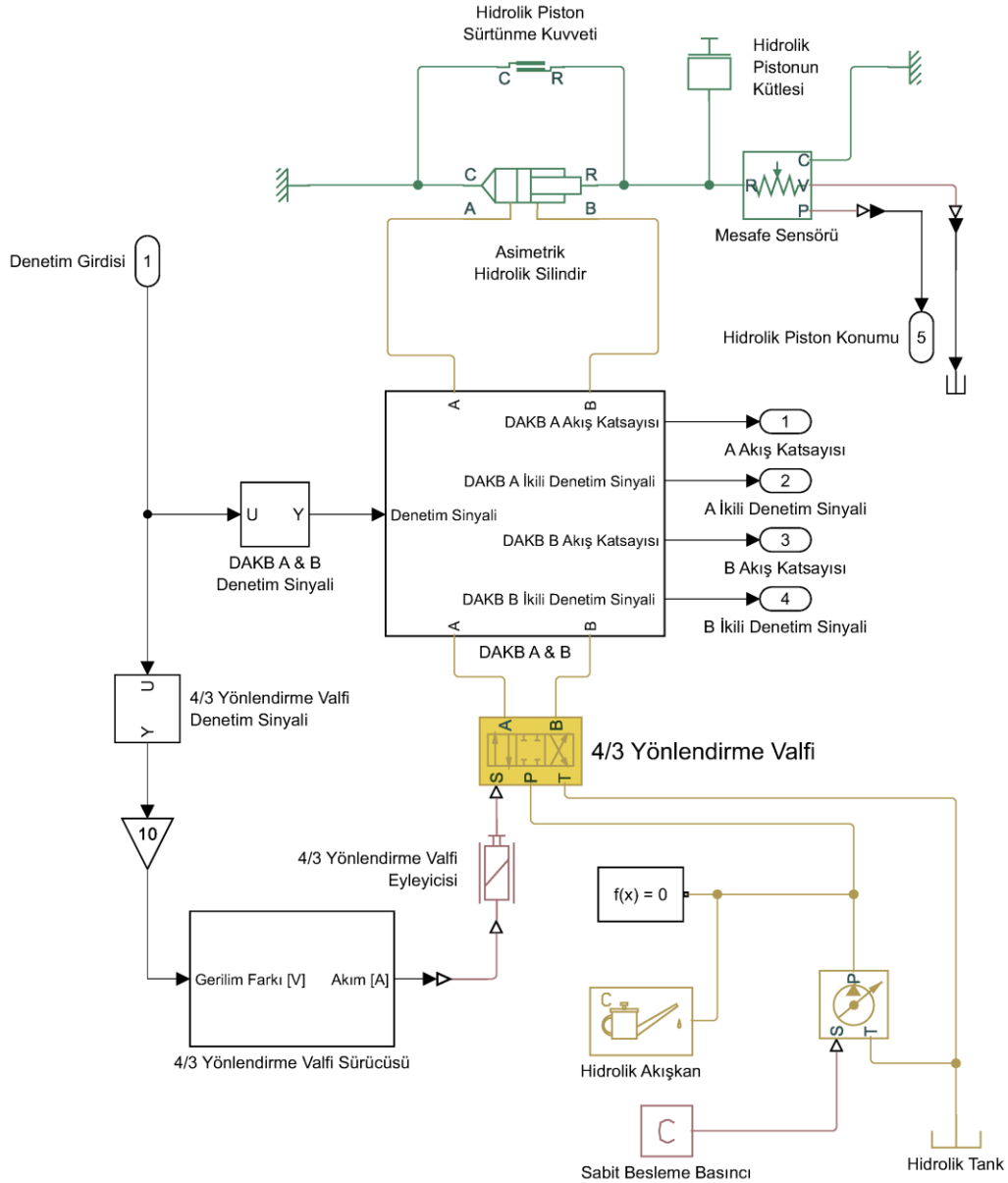
2.5. D-EHS'nin DDQN Denetleyici ile Konum Denetimi

D-EHS'nin konum denetiminde kullanılan DDQN denetleyicinin eğitimi için gerekli bileşenlerin (s_t durumu, ödül fonksiyonu, hiperparametreler ve YSA yapısı) seçimi, DDPG denetleyici için kullanılan yaklaşım benimsenerek yapılmıştır. D-EHS'nin yönlendirme biriminde 8 adet popet valf ve 1 adet 4/3 yönlendirme valfi bulunmaktadır. 9 valfin aktif olarak denetlendiği durumda çözüm uzayında 451 farklı valf kombinasyonu yer almaktadır. DDQN denetim yöntemi, çözüm uzayındaki her bir denetim yöntemin puanlayarak en uygun çözümü belirlemektedir. Her zaman adımında 451 farklı eylemin değerlendirilmesi eğitimi oldukça yavaşlatmaktadır. Bu nedenden dolayı, D-EHS konum denetim çalışması için iki farklı yaklaşım denenmiştir. İlk yaklaşımda tek bir DDQN denetleyici bütün valfler için gerekli olan denetim çıktısı oluşturacak biçimde eğitilmiştir. İkinci yaklaşımda ise eğitim sürecini hızlandırmak adına DAKB A, DAKB B ve 4/3 yönlendirme valfi için ayrı ayrı DDQN denetleyiciler kullanılmıştır. Bu kısımda her iki yaklaşımı uygulamak için gerçekleştirilen işlemler verilmiştir.

D-EHS'nin matematik modelinin eldesi bölüm 1.5.2'de detaylıca anlatılmıştır. Buna karşın, Matlab Simulink yazılımının sunduğu avantajlardan yararlanabilmek için D-EHS modeli Simulink Simscape Fluids modülü kullanılarak tekrar oluşturulmuştur (Şekil 36 ve Şekil 37).



Şekil 36. DAKB A ve B'nin Simulink Simscape Fluids modülü kullanılarak modellenmesi



Şekil 37. D-EHS'nin Simulink Simscape Fluids modülü kullanılarak modellenmesi

2.5.1. Tek DDQN Denetleyici ile Konum Denetimi

Pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyicilerin genelinde olduğu gibi DDQN denetleyici için gözlenecek ortam değişkenlerinin (s_t durum), ödül fonksiyonunun, YSA yapısının ve hiper parametrelerin belirlenmesi öncelikli gerekliliktir. Buna karşın, bu unsurların belirlenmesi konusunda kesin bir yol bulunmamaktadır. Bu nedenle, G-EHS ve D-EHS'nin benzer sistem dinamiklerine sahip olmasından yola çıkılarak DDPG için

belirlenen değerler başlangıç noktası olarak kullanılmıştır. Sonrasında, bölüm 2.4'te DDPG denetleyici için gerçekleştirilen işlemler tek DDQN denetleyici için de tekrarlanmıştır.

Ön çalışmalar için Matlab Simulink yazılımı kullanılarak Şekil 32'de verilene benzer bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. İlk yapılan çalışmalarda, tek DDQN denetleyiciye beslenecek s_t durum verisi olarak $\dot{x}$ hidrolik piston konumunun türevi, e konum takip hatası, $\dot{e}$ konum takip hatasının türevi ve 9 adet denetim sinyali tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tatminkâr olmasına karşın işlem yükünü hafifletmek için birtakım değişikliklere gidilmiştir. Bu bağlamda, tek DDQN denetleyiciye beslenen s_t durum verisi x hidrolik piston konumu, $\dot{x}$ hidrolik piston konumunun türevi, e konum takip hatası ve $\dot{e}$ konum takip hatasının türevi olmak üzere 4 adete indirgenmiştir.

Ödül fonksiyonu için ise, (32)'de verilen DDPG denetleyicisinin ödül fonksiyonu, D-EHS'nin süreksiz denetim sinyallerini kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Gerçekleştirilen diğer değişikliklerle beraber ödül fonksiyonu nihai halini almıştır:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \min\left(0, -\alpha \frac{d}{dt}|e_t|\right) \\
 P_2 &= -\beta|e_t| \\
 P_3 &= -\omega \left|\frac{d}{dt}e_t\right| \\
 P_5 &= -\sum \left|\frac{d}{dt}c_t(i_A)\right| \\
 P_6 &= -\sum \left|\frac{d}{dt}c_t(i_B)\right| \\
 P_7 &= -\left|\frac{d}{dt}v_{t,yön}\right| \\
 R_1 &= \frac{\mu}{(\max(\rho, |e_t|))^2} \\
 R &= \frac{1}{\varphi}(P_1 + P_2 + P_3 + P_5 + P_6 + P_7 + R_1)
 \end{aligned} \tag{33}$$

Ödül fonksiyonunda yer alan $P_{1,2,3}$ ve R_1 terimleri bölüm 2.4.1'de detaylıca açıklanmıştır. Ön çalışmalarda $P_{1,2,3}$ ve R_1 terimleri kullanılarak denetim performansı yüksek DDQN denetleyicisi eğitilebilmiştir. Eğitilen DDQN denetleyicinin konum takibi sırasında ürettiği denetim sinyali gözlemlendiğinde, denetleyici davranışının aç-kapa denetleyiciye yakınsadığı görülmüştür. Bu sebepten dolayı ödül fonksiyonu $c_t(i_A)$ ve

$c_t(i_B)$ DAKB denetim sinyali terimleri kullanılarak genişletilmiştir. Eklenen terimler DAKB’lerde yer alan valflerin davranışını düzenlemesine rağmen, yönlendirme valfinin sürekli olarak durum değiştirmesi D-EHS’nin deneysel kullanımı için sorun teşkil edecek seviyeye çıkmıştır. Bu sorunu çözmek amacıyla P_7 terimi ödül fonksiyonuna dahil edilmiştir. İlgili terimler farklı katsayılarla çarpılarak toplanmış ve R ödül fonksiyonu elde edilmiştir. Ön çalışmalar sonucunda belirlenen katsayılar Tablo 7’de verilmiştir.

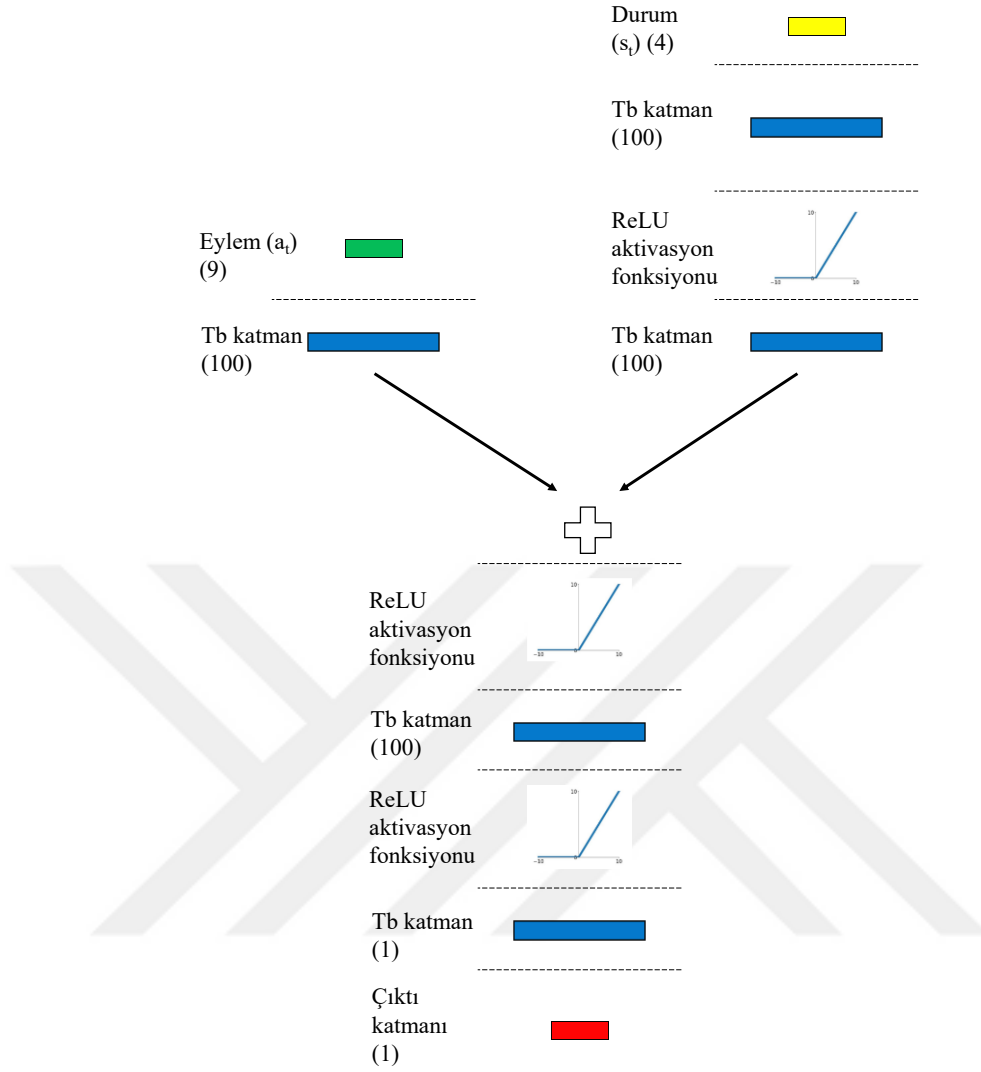
Tablo 7. Tekli DDQN denetleyicinin ödül fonksiyonu katsayıları

α	β	ω	μ	ρ	φ
5	20	15	0,03	0,01	600

Ön çalışmalar esnasında π politika fonksiyonu olarak kullanılacak YSA yapısının belirlenmesine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, her gizli katmanında 100 nöron bulunan 5 katmanlı ağ yapısının eylem seçimi için iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Şekil 38).

Tablo 8. Tek DDQN denetleyici eğitimi için kullanılan hiper parametreler

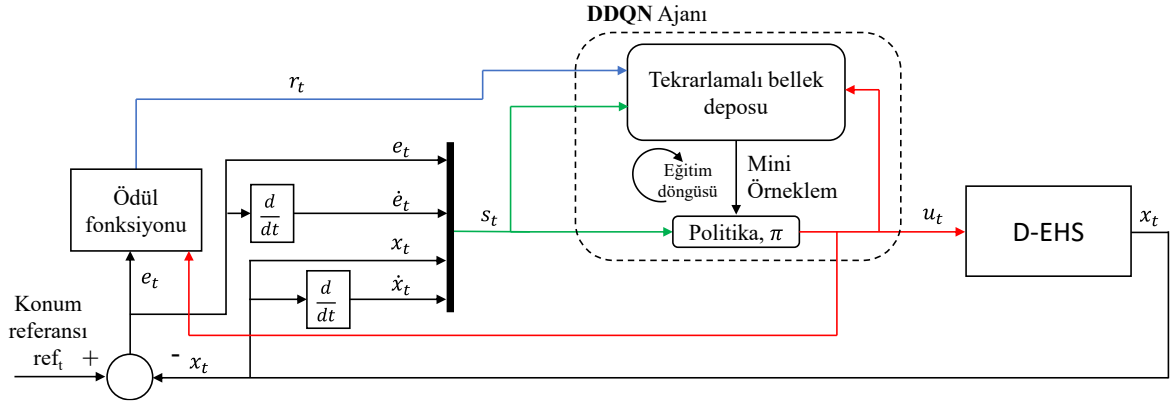
Öğrenme oranı	0,0001
İndirim katsayısı, γ	0,99
Tekrarlamalı bellek deposu boyutu	10^6
Mini örneklem sayısı	16
Örnekleme zamanı, s	0,05
Hedef Yumuşatma faktörü	0,001
Hedef Güncelleme frekansı	5
Rastgele eylem seçme oranı	1
Rastgele eylem seçimi azalma oranı	0,0005
Asgari rastgele eylem seçme oranı	0,01



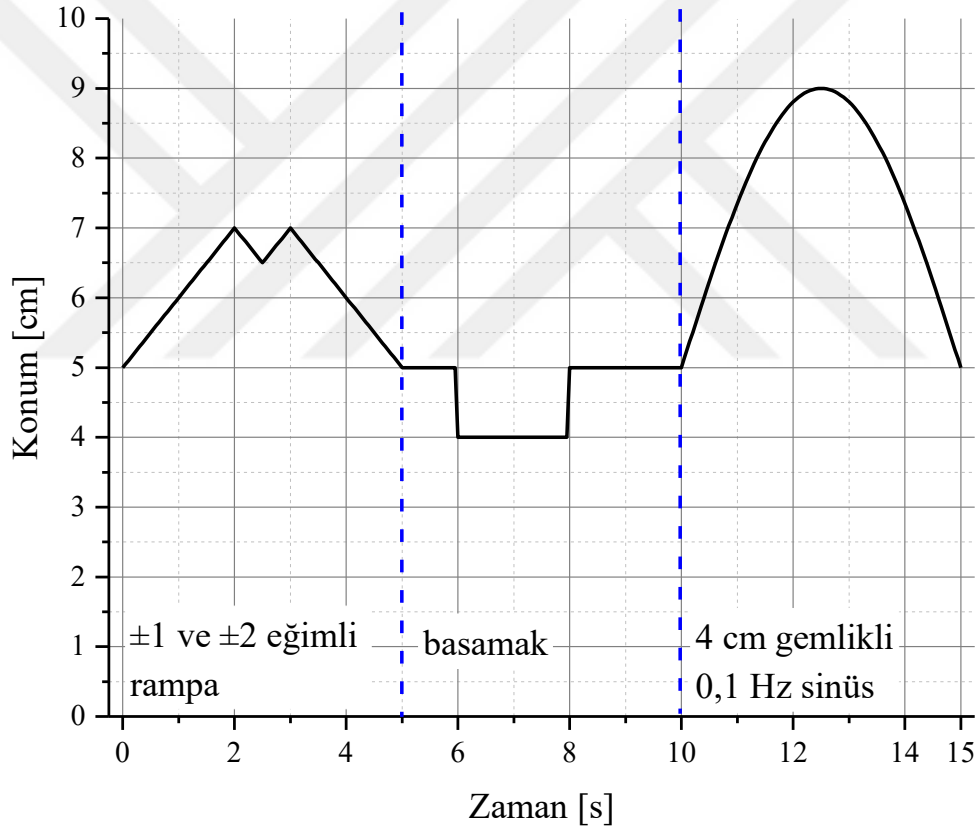
Şekil 38. Tekli DDQN denetleyicide π politika fonksiyonu olarak YSA

Belirlenen s_t durum, ödül fonksiyonu ve YSA yapısı ile beraber başarılı bir eğitim sağlayan hiper parametreler Tablo 8’de belirtilmiştir.

Tek DDQN denetleyici eğitimi için yürütülen ön çalışmalar sonucunda, eğitimin gerçekleştirileceği nihai benzetim ortamı oluşturulmuştur (Şekil 39). Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere, tek DDQN denetleyici her eylemi π politika YSA ile sınadıktan sonra en yüksek kalitedeki eylemi seçmektedir. Her zaman adımında 451 farklı çözüm uzayı ile bu döngüyü sürdürmek eğitim sürecini uzatmaktadır. Bu nedenle, tek DDQN denetleyici eğitimi için Şekil 30’da verilen konum referansı ile aynı karakteristiğe sahip fakat daha kısa süren bir çoklu konum referans sinyali tasarlanmıştır (Şekil 40).



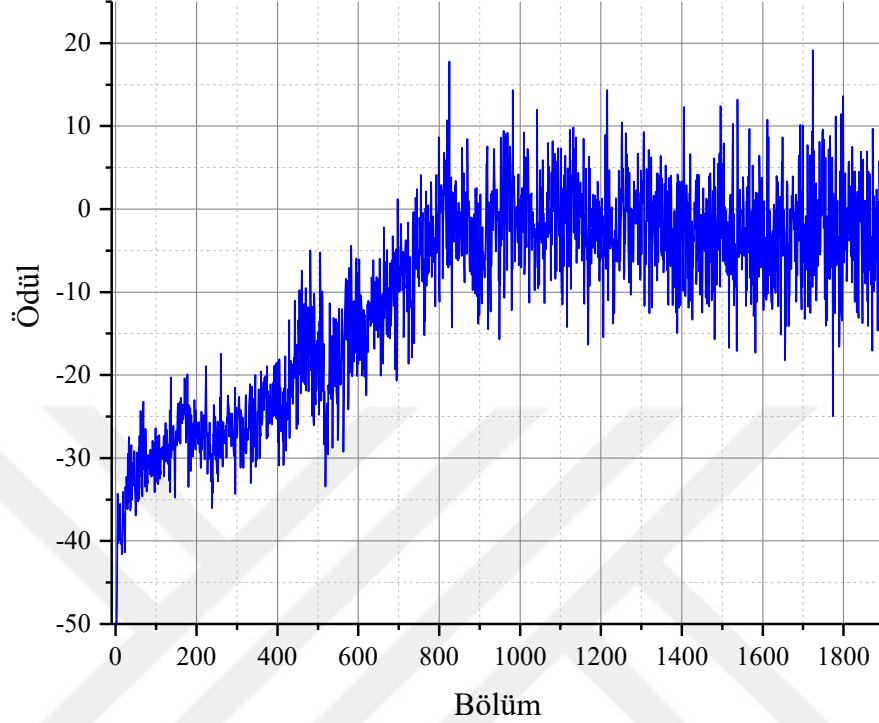
Şekil 39. Tek DDQN denetleyici eğitimi için düzenlenen benzetim ortamı



Şekil 40. Tek DDQN denetleyici eğitiminde kullanılan kısaltılmış çoklu konum referans sinyali

Benzetim ortamında gerçekleştirilen eğitim 1922 bölüm sürmüştür (Şekil 41). Denetleyici ilk bölümlerden itibaren aldığı ödülü arttırmaya başlamıştır. 800 bölüm kadar ödül miktarı artmaya devam ettikten sonra denetleyici, alınan ödül açısından, kararlı bir noktaya ulaşmıştır. Sonraki 1100 bölüm süresince alınan ödülün belli bir aralık dışında

değişmediği, yani ortalamada aynı kaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere kararlı olarak adlandırılan bu kısımdan bir denetleyici seçilmiştir.



Şekil 41. Tek DDQN denetleyici eğitimi süresince alınan ödülün değişimi

2.5.2. Çoklu DDQN Denetleyici ile Konum Denetimi

Tez kapsamında tasarlanan ve imal edilen D-EHS’de denetime etkiyen üç farklı valf sistemi bulunmaktadır: DAKB A, DAKB B ve yönlendirme valfi. Tek DDQN denetleyici ile bu üç sistem denetlenmek istendiğinde, her zaman adımında 451 valf kombinasyonunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Fakat, her bir sistem için ayrı bir DDQN denetleyici kullanılırsa bu sayı $(2^4) + (2^4) + 3 = 35$ olmaktadır. Burada, 2^4 terimi her DAKB’nin valf kombinasyonu sayısını ve 3 ise yönlendirme valfinin bulunabileceği durumları göstermektedir. Belirtilen hususlar göz önünde bulundurularak Matlab Simulink ortamında oluşturulan benzetim ortamı Şekil 42’de verilmiştir.

Ön çalışmalar için başlangıç noktası olarak bölüm 2.5.1’de belirlenen değerler kullanılmıştır. Bu durumda denetleyiciler birbirinin eylemlerinden haberdar olmadığı için konum referans sinyali takip edebilecek ortak bir çıktı üretememiştir. Kullanılan çoklu konum referansının farklı karakteristikler barındırması da DDQN denetleyicilerin başarılı

olarak değiştirilmektedir. Müdahale sonucunda düzenlenen denetim sinyali aynı zamanda eğitime de dahil edilmektedir. Bunun sonucunda, denetleyiciler yüksek takip hatası durumunda gerekli olan valf kombinasyonunu öğrenmektedir. Takip hatası belirlenen sınırlar içinde kaldığı durumda ise konum takibi çoklu DDQN denetleyici ile gerçekleştirilmektedir.

Gözlenecek s_t durum değişkenleri için başlangıç noktası olarak, tekli DDQN denetleyici eğitiminde kullanılan ortam bilgileri (x hidrolik piston konumu, $\dot{x}$ hidrolik piston konumunun türevi, e konum takip hatası ve $\dot{e}$ konum takip hatasının türevi) seçilmiştir. Denetleyicilerin uyumlu çalışabilmesi için birbiri hakkında bilgi sahibi olması gerekmektedir. Bu amaçla denetleyicilerin a_t eylem çıktısı s_t durum değişkenlerine dahil edilmiştir. DAKB'lerin eylem sinyali ise ikili (0 veya 1) biçimde kullanılmıştır. Sonuç olarak 13 adet s_t durum değişkeni, çoklu DDQN denetleyici eğitiminde kullanılmıştır. Ön çalışmalarda durum değişkenleri arasındaki büyüklük farkının eğitimi olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu sorunu çözmek amacıyla, seçilen durum değişkenlerinin sınır değerleri belirlenmiş ve her bir durum değişkeni belirli katsayılarla çarpılmıştır.

DDQN denetleyicilerin her birisi konum referans takibi için farklı görevler üstlenmektedir. Bu durumda, ödül fonksiyonları belirlenirken bu ayrım göz önünde bulundurulmalıdır. Ödül fonksiyonları oluşturulurken ilk olarak, konum takip hatası kullanılarak oluşturulan

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \min\left(0, -\alpha \frac{d}{dt}|e_t|\right) \\
 P_2 &= -\beta|e_t| \\
 P_3 &= -\omega \left|\frac{d}{dt}e_t\right| \\
 R_1 &= \frac{\mu}{(\max(\rho, |e_t|))^2}
 \end{aligned} \tag{35}$$

genel terimleri tüm denetleyicilerin ödül fonksiyonuna dahil edilmiştir. Ödül fonksiyonlarını denetleyicilere göre özelleştirmek için ise denetleyiciler tarafından belirlenen eylem sinyallerinin türevi kullanılmıştır. DAKB A ve DAKB B için üretilen eylem sinyalleri ayrıca durum değiştiren aç-kapa popet valflerin büyüklüğüne göre katsayıyla çarpılmıştır. Sonuç olarak P_{A1} , P_{A2} , P_{B1} , P_{B2} ve $P_{yön}$ terimleri elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
P_{A1} &= -\varepsilon \sum \left| \frac{d}{dt} c_t(i_A) \right| \\
P_{A2} &= -\vartheta c_t(i_A) \\
P_{B1} &= -\varepsilon \sum \left| \frac{d}{dt} c_t(i_B) \right| \\
P_{B2} &= -\vartheta c_t(i_B) \\
P_{yön} &= - \left| \frac{d}{dt} v_{t,yön} \right|
\end{aligned} \tag{36}$$

Denetleyicilere özel terimlerin genel terimler ile toplanarak ölçeklenmesi ile nihai ödül fonksiyonları elde edilmiştir.

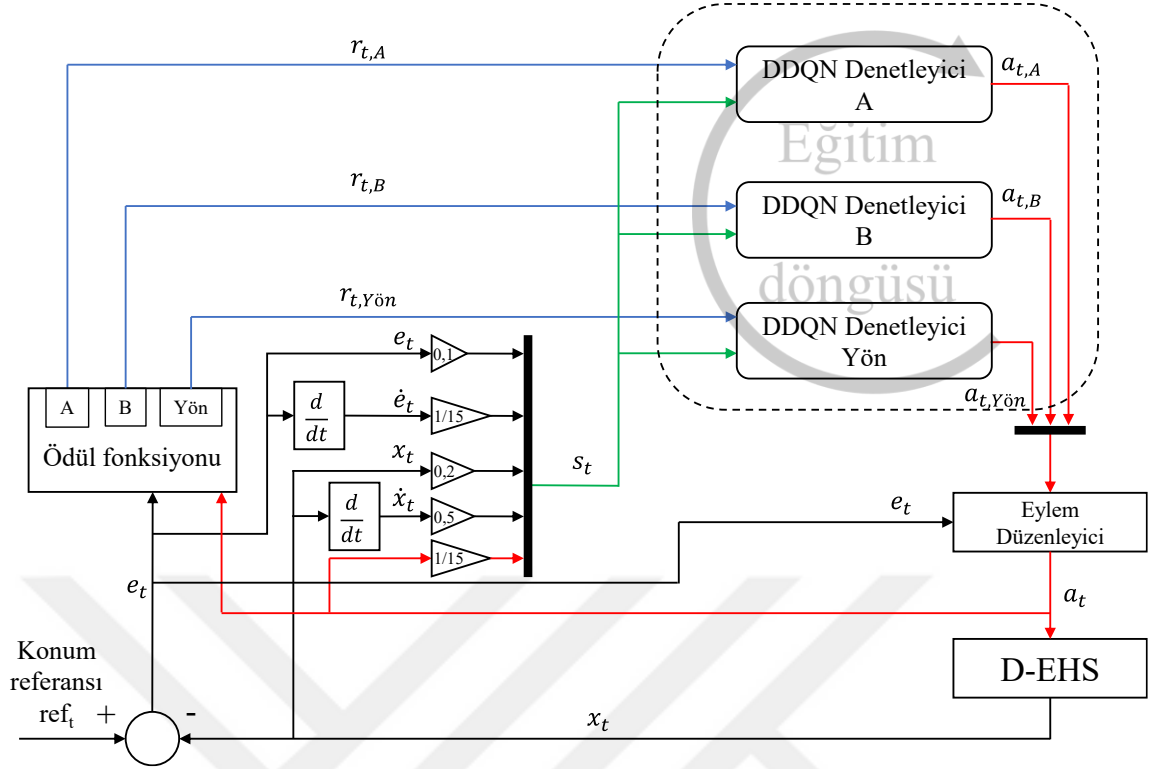
$$\begin{aligned}
R_A &= \frac{1}{\varphi} (P_1 + P_2 + P_3 + P_{A1} + P_{A2} + R_1) \\
R_B &= \frac{1}{\varphi} (P_1 + P_2 + P_3 + P_{B1} + P_{B2} + R_1) \\
R_{yön} &= \frac{1}{\varphi} (P_1 + P_2 + P_3 + P_{yön} + R_1)
\end{aligned} \tag{37}$$

Ödül fonksiyonlarında kullanılan katsayılar Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Çoklu DDQN denetleyicinin ödül fonksiyonu katsayıları

α	β	ω	μ	ρ	ε	ϑ	φ
5	20	15	0,03	0,01	0,5	[0,8 0,4 0,2 0,1]	600

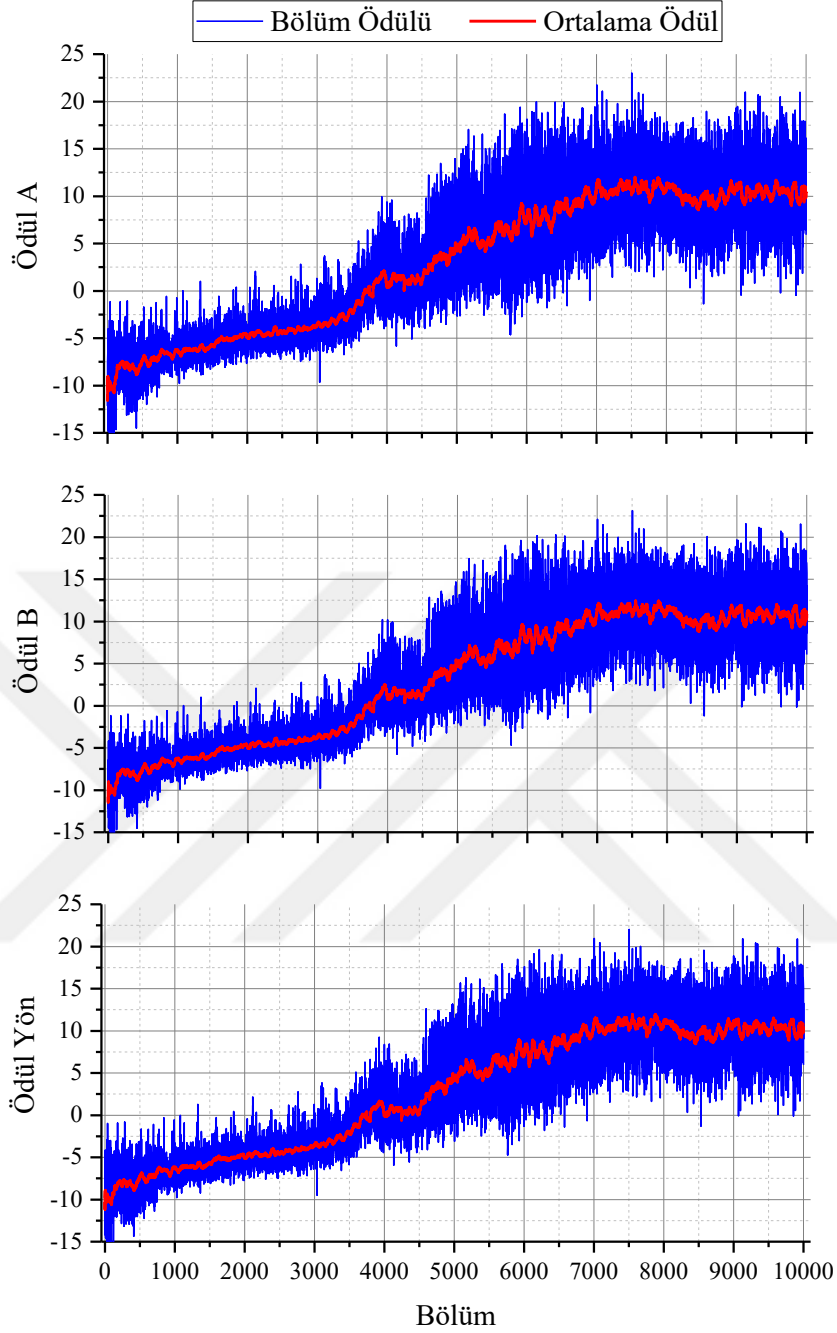
Çoklu DDQN denetleyici eğitimi için tekli DDQN denetleyici eğitiminde kullanılan YSA yapısı tercih edilmiştir. DDQN denetleyicilerin denetlediği valf sayısı azaldığı için gizli katmanlardaki nöron sayısı da bu doğrultuda 50’ye düşürülmüştür. Eğitim için kullanılan hiper parametreler de tekli DDQN eğitiminde kullanılanlara benzer seçilmiştir (Tablo 10). Belirlenen parametrelere göre oluşturulan benzetim ortamının şematik gösterimi Şekil 43’te ve gerçekleştirilen eğitimin ilerleyişi Şekil 44’te verilmiştir.



Şekil 43. Çoklu DDQN denetleyici eğitimi için düzenlenen benzetim ortamı

Tablo 10. Çoklu DDQN denetleyici eğitiminde kullanılan hiper parametreler

Öğrenme oranı	0,0001
İndirim katsayısı, γ	0,99
Tekrarlamalı bellek deposu boyutu	10^6
Mini örneklem sayısı	128
Örnekleme zamanı, s	0,05
Hedef Yumuşatma faktörü	0,001
Hedef Güncelleme frekansı	50
Rastgele eylem seçme oranı	1
Rastgele eylem seçimi azalma oranı	0,0005
Asgari rastgele eylem seçme oranı	0,01



Şekil 44. Çoklu DDQN denetleyici eğitiminin ilk kısmında alınan ödüllerin değişimi

Hazırlanan benzetim ortamında gerçekleştirilen çoklu DDQN denetleyici eğitiminin ilk kısmı 10000 bölüm sürmüştür (Şekil 44). Eğitim süresince alınan ödül değeri 7000. bölüm civarına kadar artış göstermiştir. Bu noktadan sonra ise ortalama ödül değeri düşük genlikli salınımlar sergilemiştir. Eğitimin ikinci kısmı için kullanılacak DDQN denetleyiciler ödülün görece sabit kaldığı kısımlardan seçilmiştir.

DDQN denetleyiciler eğitimin ilk kısmında D-EHS'nin yavaş dinamiklerine maruz kalmış ve bu şartlar altında hidrolik pistonun konum takibini gerçekleştirmiştir. İkinci kısımda ise ani değişimler içeren çoklu konum referansı eğitim için kullanılmıştır (Şekil 40). İlk eğitimden seçilen denetleyicinin çıktıları incelendiğinde DAKB A ve DAKB B için seçilen valf durumlarının konum referans sinyali ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yönlendirme valfi durumunun ise sürekli değiştiği gözlenmiştir. Valf ömrüne olumsuz etkide bulunabilecek bu durumun düzeltilmesi için $P_{yön}$ terimi

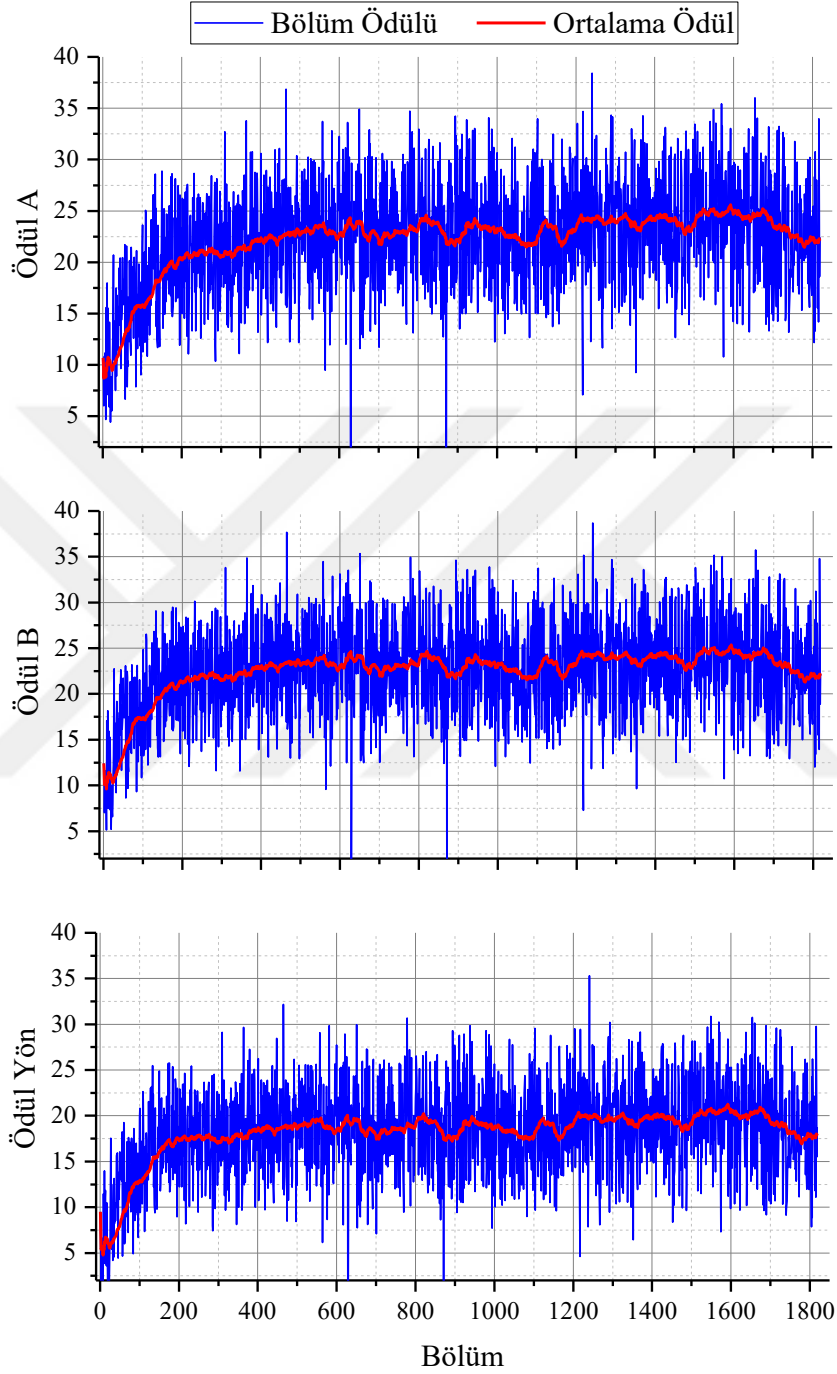
$$P_{yön,rev} = -3 \left| \frac{d}{dt} v_{t,yön} \right| \quad (38)$$

olarak değiştirilmiş ve $R_{yön}$ ödül fonksiyonuna dahil edilmiştir. İlk kısımdaki eğitim parametreleri değiştirilmeden 1819 bölüm süren ikinci kısım eğitimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 45). Amaçlandığı üzere, çoklu DDQN denetleyici, ilk eğitimde öğrenilen bilgileri kullanarak, ikinci eğitimin başlangıcından itibaren alınan ödülü arttırmayı başarmıştır. Böylelikle, eğitim yaklaşık 300 bölüm sonra kararlı hale ulaşmıştır. Ayrıca, yönlendirme valfinin durum değişim sıklığı da yeni eğitimle beraber azalmıştır. Buna karşın, denetim performansı üzerinde herhangi bir olumsuz etki meydana gelmemiştir.

2.6. Konum Denetimi için DDQN Denetleyicinin Deneysel Eğitimi

Denetleyici tasarımı için en önemli unsur denetlenecek sistem hakkında yeterli bilgiye sahip olmaktır. Gerçekleştirilen bu tezde sistemle ilgili bilgiler, matematik modeli üzerinden elde edilmiştir. Buna rağmen, sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri üretici tarafından sağlanan bilgilerle uyuşmayabilir. Bundan dolayı, elde edilen model ile sistem cevabı arasında farklar meydana gelebilir. Buna sebep olabilecek diğer bir etmen ise sistem dinamiklerine etkiyen unsurların tamamına matematik modelinde yer verilmemesidir. Karmaşık ve pek çok terim içeren bir model, denetleyici tasarım çalışmasını zorlaştırabileceği için bu yaklaşım tercih edilmektedir. Sonuç olarak, denetleyici baskın sistem dinamiklerini barındıran bir matematik modeli kullanılarak tasarlanmış olur. Beklendiği üzere, gerçek sistem ile sistem modeli arasındaki uyumsuzluk denetleyicinin deneysel denetim performansı üzerinde olumsuz bir etki meydana getirir. Uyuşmazlığı gidermek için farklı sistem tanılama yöntemleriyle deneysel sistemin

kapsamlı bir modelini elde etmek tercih edilen bir seçenektir. Diğer seçenek ise denetleyiciyi direkt olarak deney düzeneğini kullanarak tasarlamaktır.

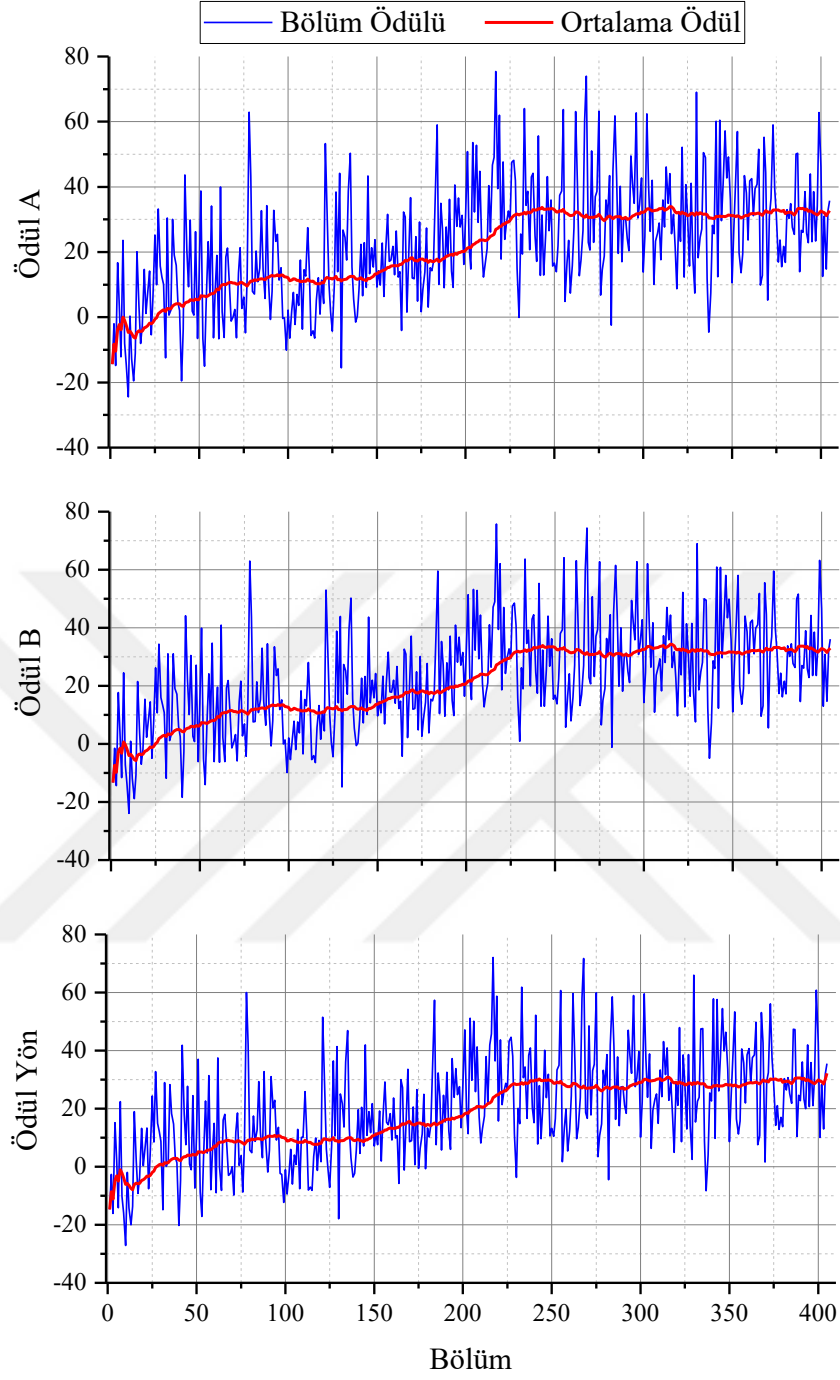


Şekil 45. Çoklu DDQN denetleyici eğitiminin ikinci kısmında alınan ödüllerin değişimi

D-EHS'nin konum denetimi için ilk olarak üç valf sistemi tek DDQN denetleyici ile denetlenmiştir. Sonrasında, her bir zaman adımında gerçekleştirilmesi gereken işlem

sayısını azaltmak için her valf sistemi için ayrı DDQN denetleyici kullanılmıştır. DDQN denetleyicinin deney düzeneğinde alınan veriler kullanarak gerçek zamanlı olarak eğitilmesi için veri işleme süresi sistemin örnekleme zamanından daha yüksek olmamalıdır. Aç-kapa popet valflerin tepki süresi (<50 ms) sebebiyle D-EHS konum denetimi için seçilen örnekleme zamanı 50 ms'dir. Çoklu DDQN denetleyici eğitimi için kullanılan parametreler ve yaklaşım ile gerçek zamanlı eğitimde veri işleme süresi 50 ms'nin altına indirilebilmiştir. Bu amaçla, sadece mini örneklem sayısı 32 ve hedef güncelleme frekansı 10 olarak değiştirilmiştir, diğer hiper parametreler olduğu haliyle kullanılmıştır. Çoklu DDQN denetleyici eğitiminin 1.kısımında görüldüğü üzere, ödül değeri kararlı haline 7000 bölüm sonra ulaşabilmiştir. İlgili parametreler incelendiğinde, $6/0,05=120$ adımdan oluşan bölümlerin her bir adımında mini örneklem boyutu kadar (128 adet) örneklemin algoritma tarafından işlendiği anlaşılmaktadır. Bu durumda, 7000. bölüme kadar 896000 ve eğitimin tamamında 1 milyondan fazla adımın değerlendirildiği görülmektedir. Gerçek zamanlı eğitimin benzer ilerleyiş göstermesi durumunda, deney düzeneğinin 16 saatten daha uzun süre çalışması gerekmektedir. Bu durum ise pratik açıdan kabul edilebilir değildir. Diğer bir yaklaşım, hali hazırda D-EHS'nin matematik modeli üzerinde eğitilmiş çoklu DDQN denetleyicilerin başlangıç noktası olarak kullanılmasıdır. Böylelikle, denetleyici eğitimi rastgele katsayılarla oluşturulmuş YSA yapılarıyla başlamamış olur. Benzetim ortamında D-EHS dinamiklerine göre eğitilmiş YSA'lar sayesinde istenen konum denetim performansına kısa sürede ulaşılabilir.

Belirtilen açıklamalar doğrultusunda, deneysel sistem üzerinde gerçek zamanlı olarak yürütülen denetleyici eğitimi için, benzetim ortamında eğitilmiş DDQN denetleyicileri başlangıç noktası olarak kullanılmıştır. Gerçek zamanlı eğitim süresince alınan ödülün değişimi Şekil 46'da verilmiştir. Beklendiği üzere, alınan ödül erken eğitim bölümlerinden itibaren artış göstermeye başlamış ve kısa sürede kararlı noktaya ulaşmıştır.



Şekil 46. Deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin eğitim süresince aldığı ödüllerin değişimi

3. BULGULAR

Gerçekleştirilen doktora tezinin bu kısmında bölüm 2’de detaylı olarak anlatılan çalışmaların sonuçları grafik olarak sunulmuştur. İlgili denetim yöntemlerinin konum takip performansı hem benzetim hem de deneysel olarak elde edilen verilerle grafiklerde sunulmuştur. Kazanç belirleme ve denetleyici eğitim çalışmalarıyla uyumlu olarak, çalışmalar 20 bar besleme basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Denetleyicilerin örnekleme zamanı olarak ise G-EHS’de 0,01 saniye ve D-EHS’de 0,05 saniye kullanılmıştır. Tezin odak noktası olan D-EHS’nin DDQN denetleyicilerle denetlenmesine yönelik ilave çalışmalara da bu kısımda yer verilmiştir. Böylelikle, önerilen yöntemin ve tasarlanan sistemin eğitim dışı koşullardaki performansı incelenmiştir. PID kazançlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen çalışmalarda IAE performans kriteri kullanılmıştır. Pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyicilerin eğitimleri ise kendilerine özel olarak hazırlanmış ödül fonksiyonlarıyla gerçekleştirilmiştir. Denetleyicilerin takip performanslarını hem birbiriyle hem de konum takip referansları özelinde karşılaştırmak istendiğinde iki kriter de yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, denetleyicilerin takip performansı takip hatasının karekök ortalaması (*İng.* Root mean square, RMS) kriteri kullanılarak değerlendirilmiş ve ilgili şekiller üzerinde belirtilmiştir.

Bu kısım içerisinde ilk olarak G-EHS’nin konum denetiminde kullanılan ve PSO ile kazançları belirlenen PID denetleyinin çalışmasına yer verilmiştir. Grafiklerinin daha anlaşılabilir olması amacıyla her bir konum referans türü için gerçekleştirilen çalışma ayrı grafik olarak verilmiştir. DDPG denetleyici için yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar belirtilen anlatıma uygun olarak PID denetleyiciden sonra verilmiştir. D-EHS için farklı yaklaşımlarla üç pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyici eğitilmiştir. İlk olarak, üç valf sisteminin tek DDQN denetleyici ile denetlendiği çalışmaya yönelik sonuçlar sunulmuştur. Devamında ise valf sistemlerinin ayrı denetleyicilerle denetlendiği çoklu DDQN denetleyici ile elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak, çoklu DDQN denetleyicinin deney sistemi kullanılarak iyileştirilmesi ile erişilen konum referansı takibinin sonuçlarına yer verilmiştir.

3.1. PID Denetleyici ile Konum Takibi

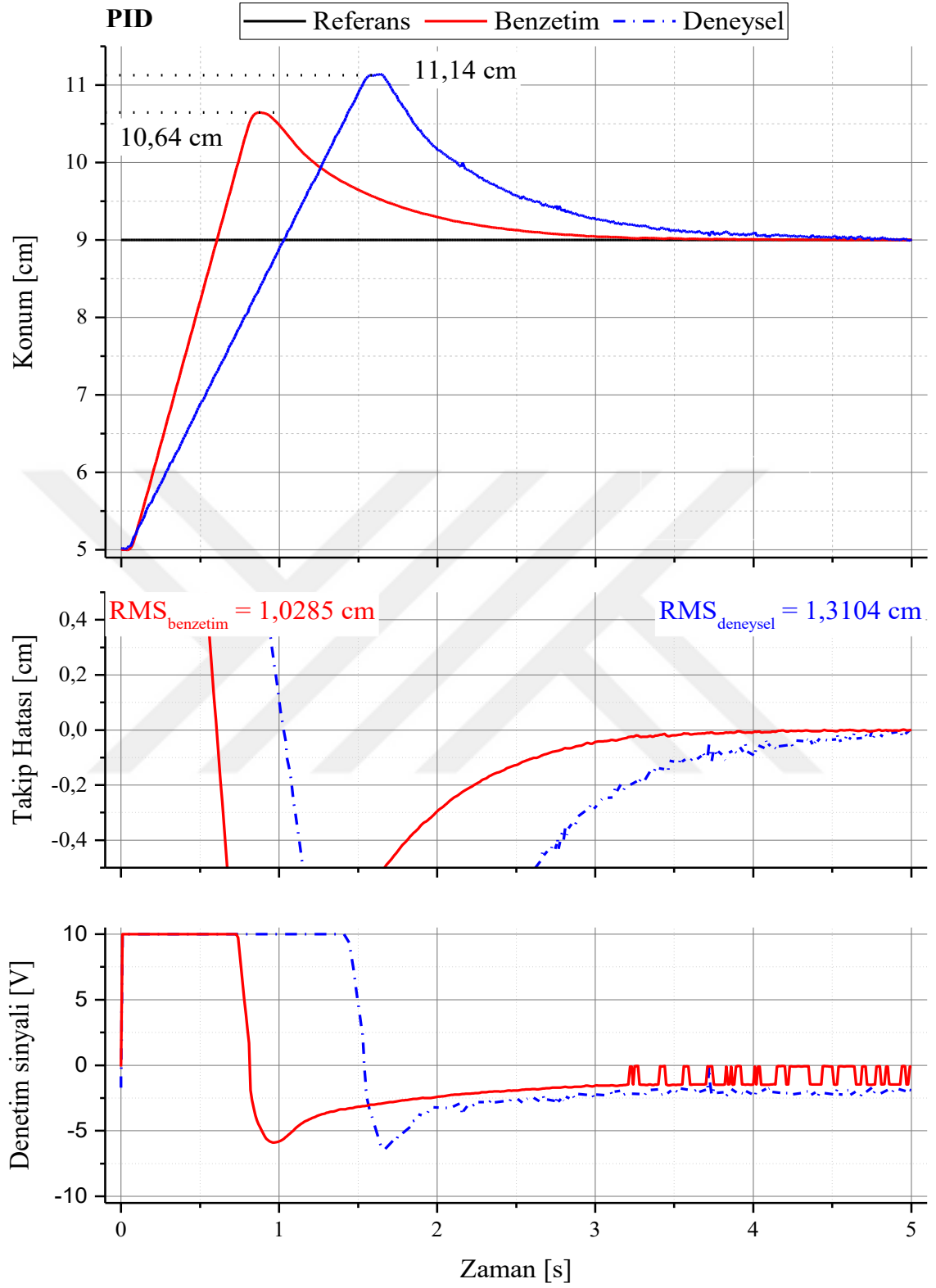
Bu kısımda, kazançları çoklu konum referansı için belirlenen PID denetleyiciyle gerçekleştirilen çalışmalar sunulmuştur. Basamak konum referansının takibi için yürütülen benzetim ve deneysel çalışmaların sonuçları Şekil 47’de verilmiştir. Benzetim ortamında gerçekleştirilen çalışmanın deneyselden daha hızlı ilerlediği ve 0,4 saniye önce istenen konuma ulaştığı görülmektedir. Benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarının istenen konum değerine ulaşması arasındaki zaman farkı besleme basıncındaki dalgalanma ile açıklanabilir. Benzetim ortamında yapılan çalışmada hidrolik sistemin besleme basıncı sabit 20 bar olarak kabul edilmiştir, buna karşın deney düzeneğinde besleme basıncı 11 bar seviyesine kadar düşmektedir. Konum denetimi meydana gelen aşma her iki çalışmada da dikkat çekmektedir. PID denetleyici yapısı itibarıyla, benzer karakteristik özelliklere sahip referanslar için kullanılmaya uygundur. Çoklu konum referansı gibi birbirinden farklı yapıdaki referanslar için eğitildiğinde ise denetim performansında büyük kayıplar gözlenmektedir. Burada meydana gelen aşma ise bu durumun sonucudur. Aşma sonrasında PID denetleyici referans konumuna ulaşmak için denetim çıktısını düzenlemektedir, fakat kazançların basamak konum referansına uyumlu olmaması nedeniyle bu değeri ölü bölgeyi çok az bir farkla geçebilmektedir. Sonuç olarak, benzetim ve deneysel çalışmalarda oturma süresi, sırasıyla, 2,28 saniye ve 3,31 saniye olarak ölçülmektedir.

PID denetleyici ile gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise ± 2 cm/s ve ± 1 cm/s hız değerleri temel alınarak oluşturulmuş rampa konum referansının takibidir (Şekil 48). Konum referansının ani yön değiştirdiği kısımlarda deneysel sistemin besleme basıncı 12-15 bar aralığına düşmektedir. Buna karşın, benzetim ve deneysel çalışmaların takip performansı birbirine yakındır. Benzetim çalışmasında ortaya çıkan takip hatası 0-4 ve 5-9 saniyeleri arasında genel olarak deneysel takip hatasından daha küçüktür. Ani yön değişiminin olduğu 4-5 saniyeleri arasındaysa benzetim çalışmasındaki takip hatası artmaktadır. Performans kriteri olarak takip hatasının RMS değerine bakıldığında, ilgili kısımdaki başarısı nedeniyle denetleyici, deneysel çalışmada yüksek denetim performansına ulaşmıştır.

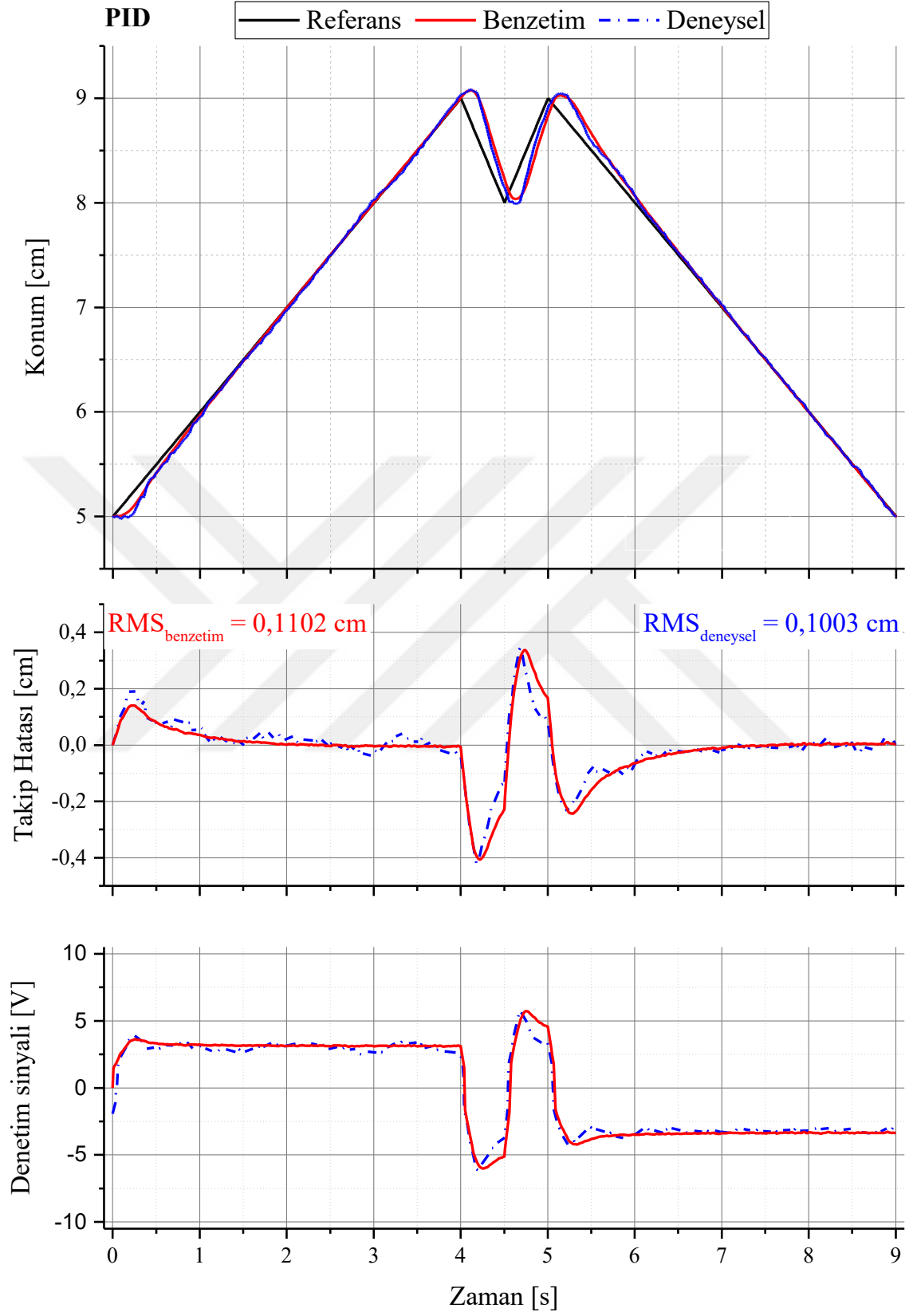
PID denetleyici ile gerçekleştirilen son çalışma ise sinüs konum referansının takibidir. Benzetim ve deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 49’da verilmiştir. Benzetim çalışmasının başlangıcı incelendiğinde hidrolik piston konumunun 0,14 saniye sonra değiştiği ve bu süreçte takip hatasının 0,33 cm ile azami değerine ulaştığı

görülmektedir. Çalışmanın geri kalanında ise denetleyici her iki ortamda da benzer takip performansı sergilemiştir. Konum referansının yön değiştirdiği kısımlarda ise $\sim \pm 0,2$ cm takip hatası gözlenmektedir. PID denetleyici, gerçekleşen değişim karşısında gereken denetim sinyalini üretemediği için bu kısımlarda aşma meydana gelmiştir. Yön değişimi olmayan kısımlarda ise takip hatası $\pm 0,1$ cm aralığında seyretmiştir.

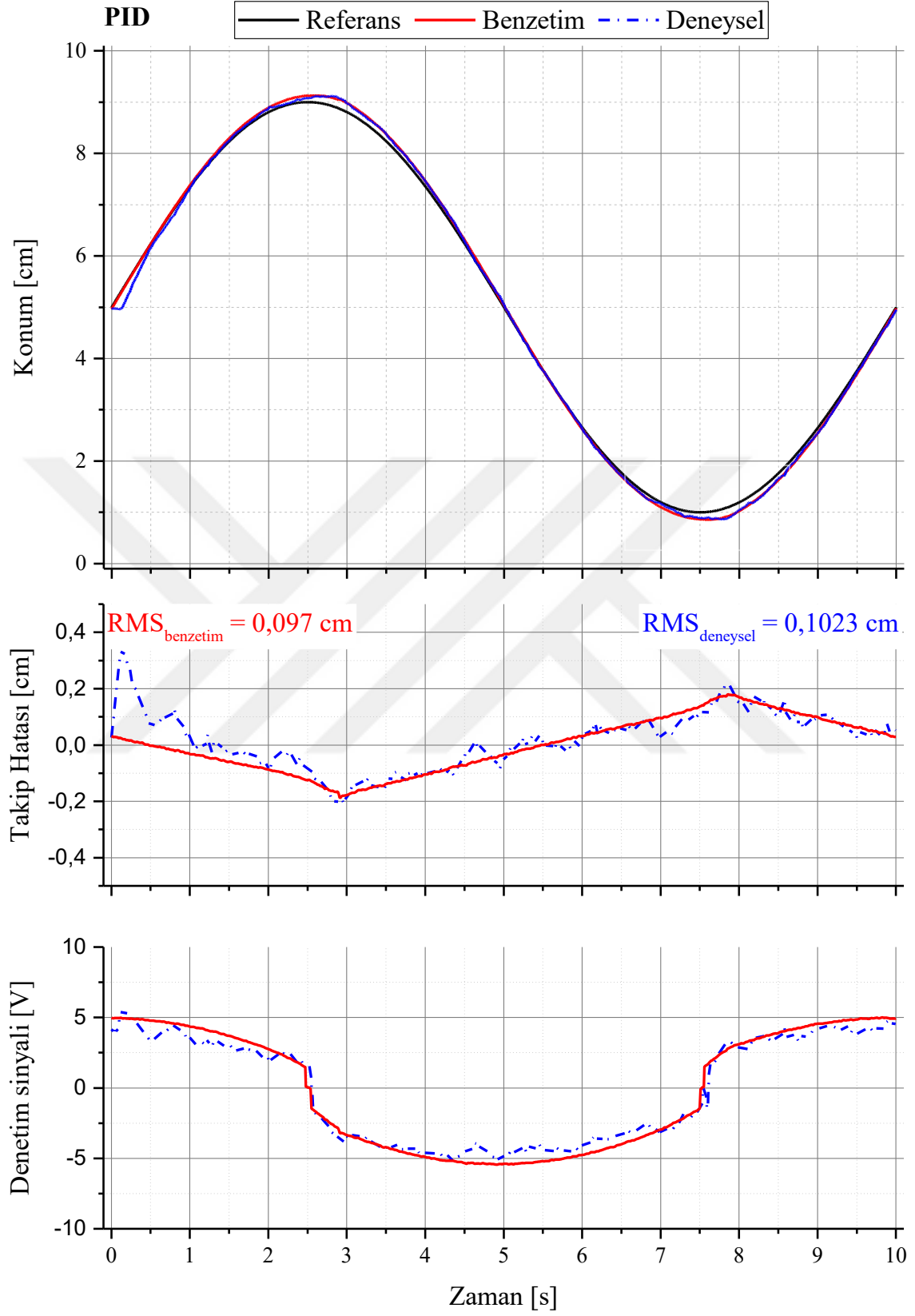




Şekil 47. PID denetleyici ile basamak konum referansı takibi



Şekil 48. PID denetleyici ile rampa konum referansı takibi



Şekil 49. PID denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

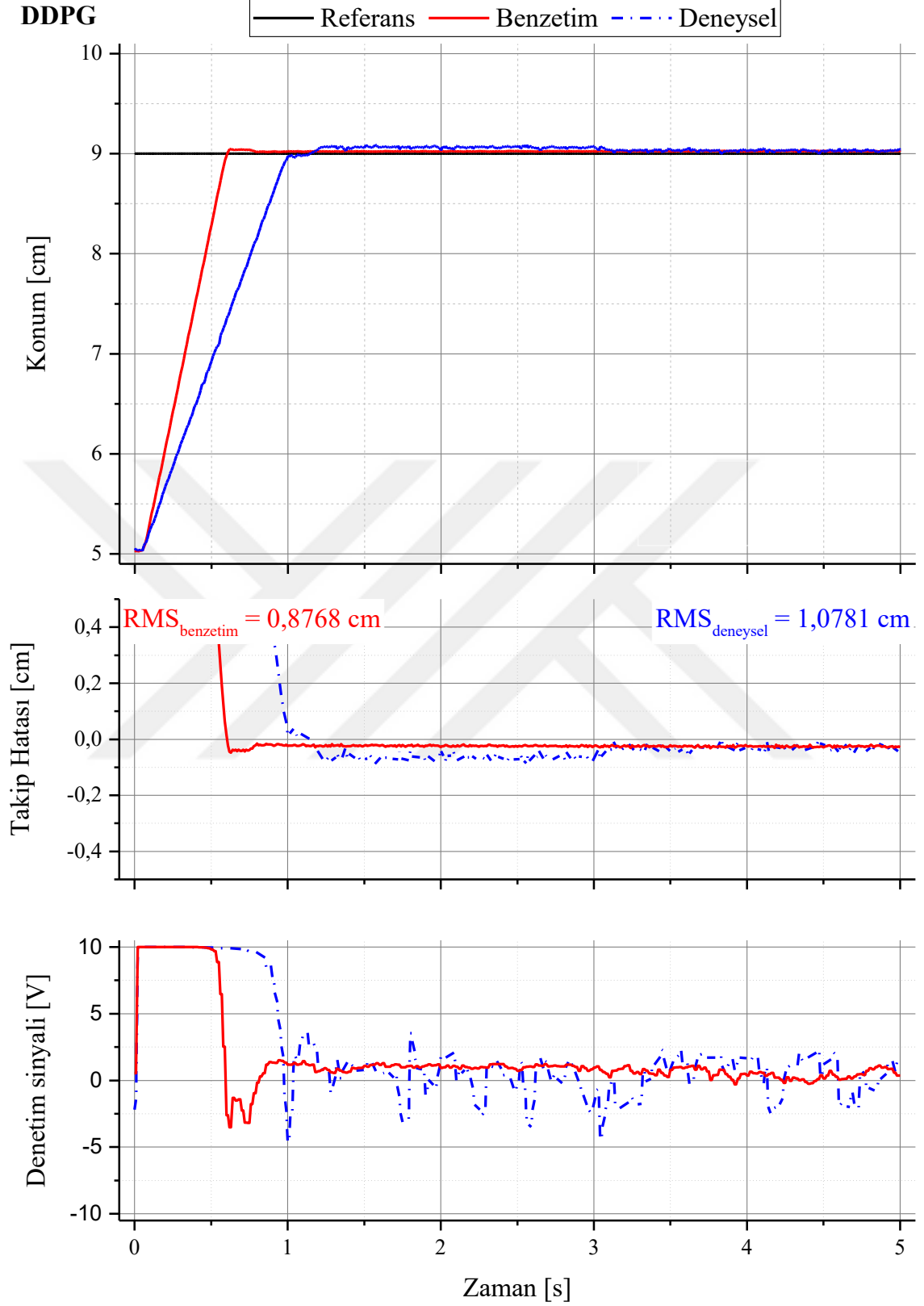
3.2. DDPG Denetleyici ile Konum Takibi

Çoklu konum referansı ve G-EHS modeli kullanılarak eğitilen DDPG denetleyici çalışmaları bu kısım altında verilmiştir. Anlatım sırası olarak PID denetleyici çalışmalarının anlatımında takip edilen sıra kullanılmıştır. Bu bağlamda, DDPG denetleyici ile gerçekleştirilen basamak konum referansı takip çalışmaları Şekil 50’de verilmiştir. Beklendiği üzere, DDPG denetleyici benzetim ortamında daha kısa sürede belirlenen konuma ulaşmakta ve takibi çok düşük ($<0,025$ cm) kararlı hal hatasıyla sürdürebilmektedir. Deneysel çalışmada ise hidrolik piston istenen konuma ulaştıktan sonra $\sim 0,08$ cm aşma ile takibe devam etmektedir. Denetleyici aşmayı gidermek için ~ 2.5 V denetim sinyali üretmekte fakat bu değer akış oluşturmak için yeterli olmamaktadır. Üretilen denetim sinyali değeri ~ 5 V’a yaklaştığında ise takip hatası benzetimle aynı seviyeye inmektedir. Oransal valfin matematik modelinde, üretici verileriyle uyumlu olarak, ölü bölge $\pm 1,35$ V arasında yer alacak biçimde tanımlanmıştır. Buna karşın deneysel çalışmada hidrolik pistonun hareket edebilmesi için oransal valfe ölü bölge sınırının 3,5 katı kadar denetim girdisi uygulanması gerekmiştir. Üretici bilgileriyle modellenen valf ile G-EHS’de kullanılan valf arasındaki bu farklılığa rağmen DDPG denetleyici başarılı bir şekilde istenen konum referansı değerine ulaşabilmiştir.

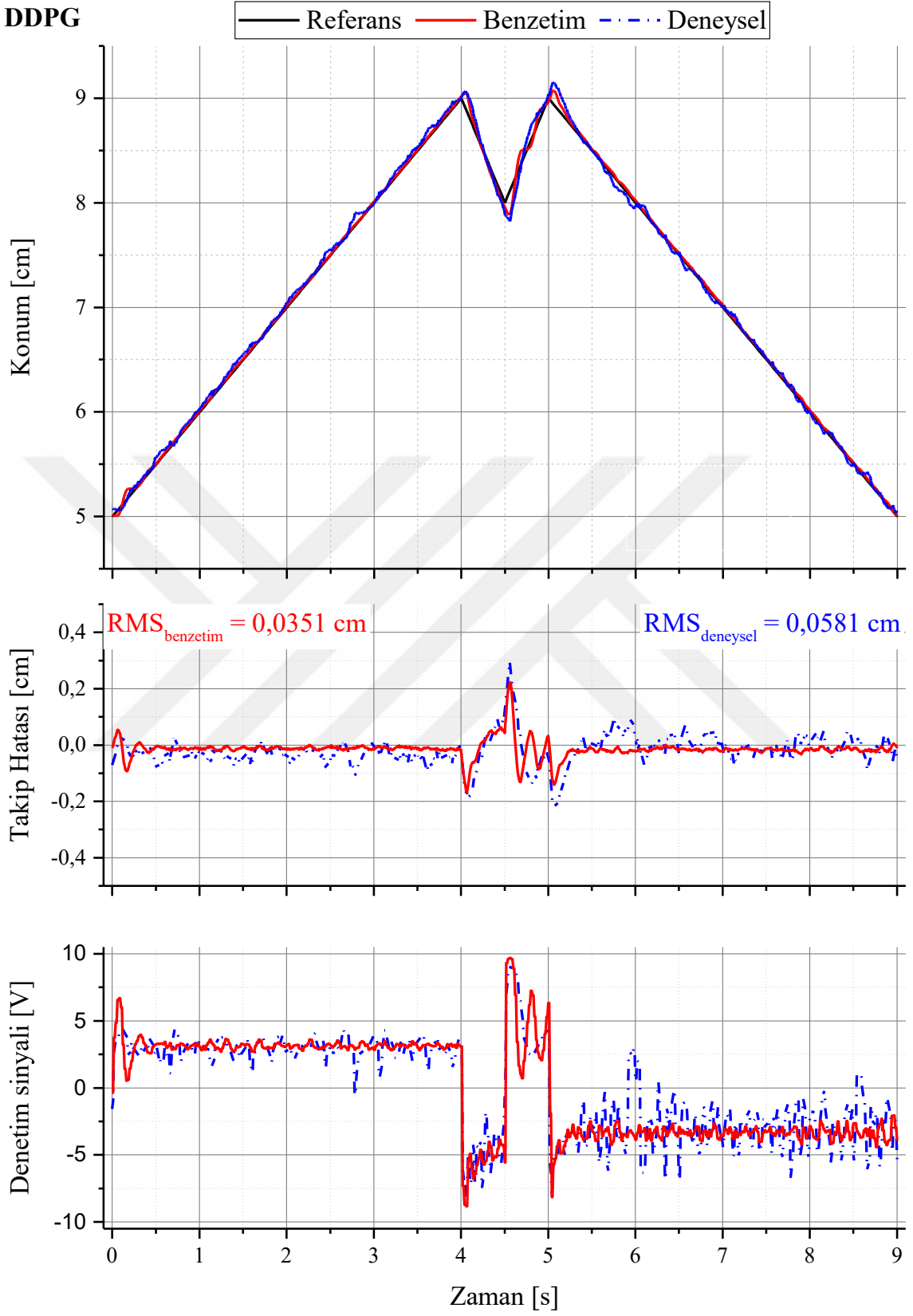
DDPG denetleyicinin sabit hızlı konum referansı karşısındaki performansını gözlemek amacıyla rampa konum referans sinyaliyle de çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 51). Elde edilen sonuçlar DDPG denetleyicinin benzetim ve deneysel çalışmalarda birbirine benzer performans sergilediğini göstermiştir. DDPG denetleyici çalışmalarında ölçüm gürültüsünü önlemek için herhangi bir filtre kullanılmamıştır. Bunun etkisi ise denetim sinyalinin gürültülü yapısıyla gözlenebilmektedir. Konum referansı 0-4 saniyeleri aralığında sabit hızla artmaktadır. Denetim sinyali ilgili aralık için incelendiğinde, ölçüm gürültüsü sebebiyle meydana gelen pikler görülmektedir. Diğer ilgi çekici kısım ise 5-6 saniyeleri arasındaki kısalma hareketi kısmında gözlenmektedir. 0-4 saniyeleri arasında benzetim ve deneysel çalışmalarda edilen denetim sinyalleri birbirine benzemektedir. Kısalma hareketinin olduğu kısım incelendiğinde ise deneysel çalışmadaki denetim sinyalinin görece yüksek genlikli salınımlar yaptığı görülmektedir.

Çalışmalar kapsamında sinüs konum referans sinyali ile gerçekleştirilen takip çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 52’de yer almaktadır. DDPG denetleyici 4 cm genlikli ve 0,1 Hz frekans değerine sahip sinüs sinyalinin bir periyodunu içeren çoklu

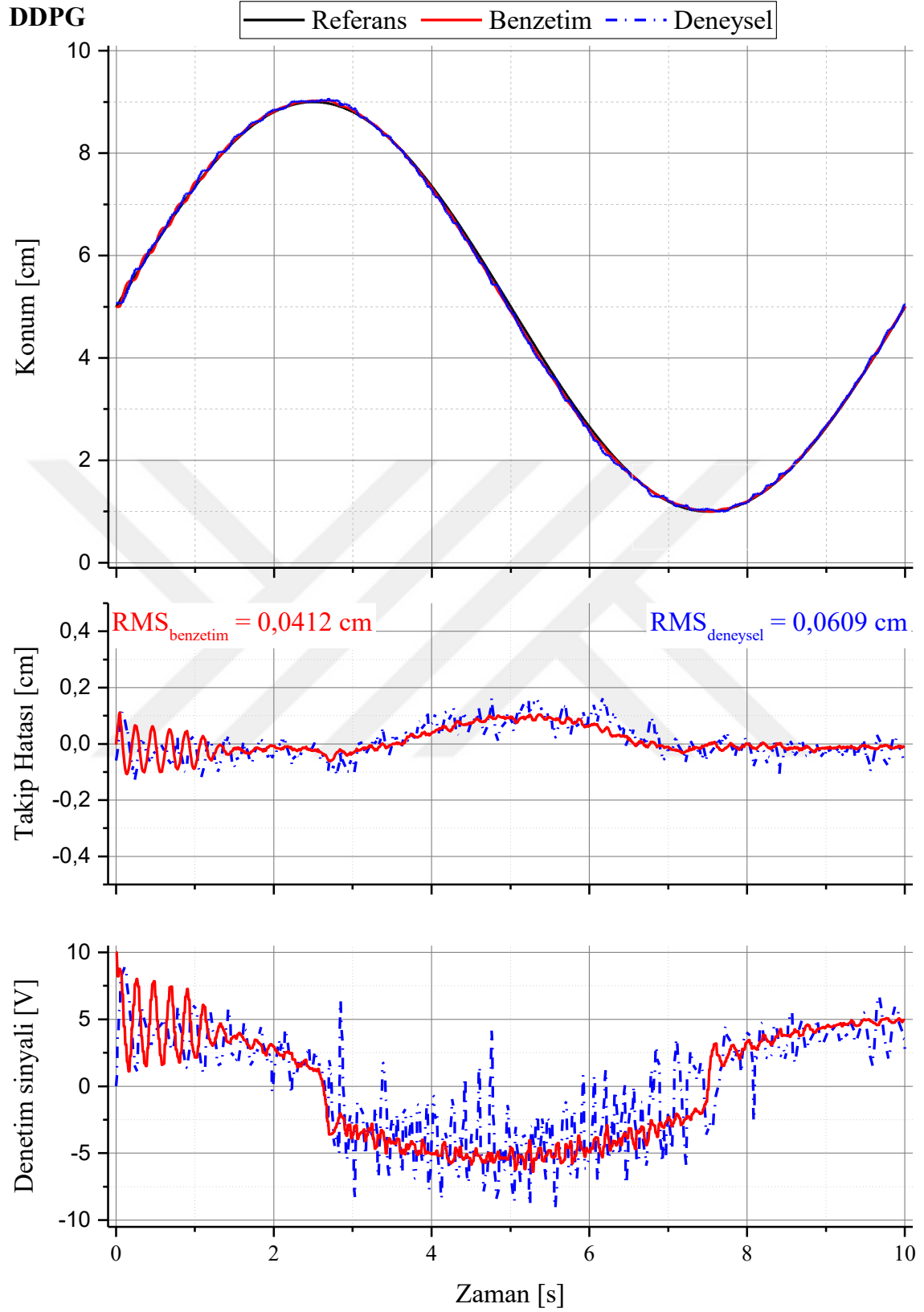
konum referans sinyali ile eğitilmiştir. Elde edilen verilere incelendiğinde, hidrolik pistonun uzama ve kısalma yönlerinin denetim performansı arasında fark olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak hidrolik piston dinamiklerinin uzama ve kısalma yönlerinde farklı olması gösterilebilir. Kısalma yönündeki piston hareketine (2,5-7,5 saniyeleri arası) karşılık gelen denetim sinyali incelendiğinde, DDPG denetleyicinin eğitim sırasında tecrübe etmediği etkilerle karşılaştığı söylenebilir. Bu durumda dahi takip hatasının düşük olmasının ($<0,15$ cm) sebebi olarak denetleyicinin farklı karakteristiklerdeki referans sinyalleriyle eğitilmesi gösterilebilir. Böylelikle, ortaya çıkan farklı dinamik etkiler ile öğrenilenler arasında bağ kurulabilmekte ve denetleyicinin denetim performansı asgari düzeyde etkilenmektedir. Uzama yönündeki hareket (0-2,5 saniyeleri ve 7,5-10 saniyeleri arası) esnasında hidrolik piston üzerine etkiyen dinamikler oldukça benzerdir. Fakat, DDPG denetleyicinin verilen aralıklardaki denetim performansı birbirinden farklıdır. Bunun nedeni olarak DDPG denetleyici eğitimi için seçilen durum değişkenleri veya hidrolik piston – hidrolik silindir arasındaki sürtünmenin her noktada aynı olmaması gösterilebilir.



Şekil 50. DDPG denetleyici ile basamak konum referansı takibi

DDPG

Şekil 51. DDPG denetleyici ile rampa konum referansı takibi



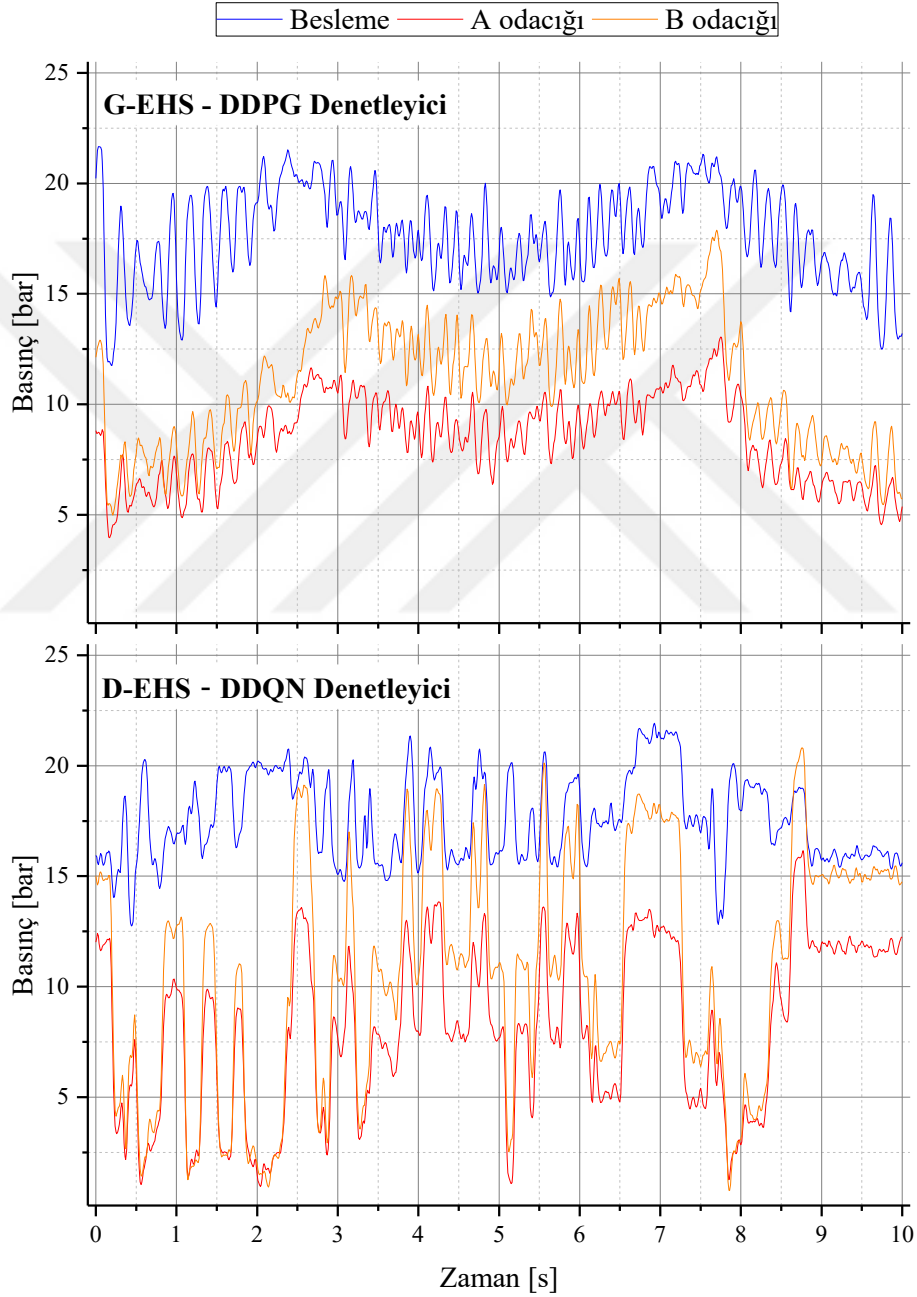
Şekil 52. DDPG denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

3.3. Tek DDQN Denetleyici ile Konum Takibi

Bu çalışmada kullanılan D-EHS'nin yönlendirme birimi, DAKB A, DAKB B ve yönlendirme valfi olmak üzere üç valf sistemi barındıran D-BAY'dan oluşmaktadır. Bu kısımda üç sistemin tek DDQN denetleyici ile denetlendiği konum denetim çalışmalarına yer verilmiştir. Tek DDQN denetleyici eğitiminde her zaman adımında 451 valf kombinasyonunun sırasıyla ilgili durum için incelenmesi ve en iyi Q değerine sahip olanının seçilmesi gerekmektedir. Tek DDQN denetleyici eğitim çalışmalarını yavaşlatan bu duruma bir çözüm olarak daha kısa bir çoklu konum referans sinyali geliştirilmiştir. Bu kısımda anlatılan denetleyici eğitimi de kısaltılmış çoklu konum referans sinyali ile yürütülmüştür. G-EHS üzerinde PID ve DDPG denetleyicilerle yapılan çalışmalarda bir adet denetim sinyali yeterli olmuştur. D-EHS için yapılacak çalışmalarda ise D-BAY içerisinde yer alan 8 adet aç-kapa popet valf ve 1 adet yönlendirme valfi için 9 adet denetim sinyaline ihtiyaç duyulmaktadır. Grafiklerde her bir sinyalin ayrı olarak gösterilmesi pratik bir yaklaşım olmamaktadır. Bu durum, her bir DAKB'nin 4 bit denetim sinyalini onluk sisteme çevirerek çözülmüştür. Böylelikle, DAKB'lerin durumu [0,15] aralığındaki tam sayılarla ifade edilmiştir. Hidrolik pistonun hareket yönünü değiştiren yönlendirme valfinin gösterimi için ise gölgelendirme yaklaşımı kullanılmıştır. Hidrolik pistonun hareketi uzama yönündeyse verilen grafiğin üst yarısı; kısılma yönündeyse alt yarısı açık mavi tonunda gölgelendirilmiştir. Grafikte gölgelendirme verilmemişse yönlendirme valfi kapalı konumdadır ve sistemde hidrolik akış meydana gelmemektedir.

Tek DDQN denetleyici ile basamak konum referans takibi çalışmasından alınan veriler Şekil 54'te sunulmuştur. Elde edilen veriler denetleyicinin her iki çalışmada da benzer davranışlar sergilediğini göstermektedir. Benzetim çalışmasında hidrolik piston istenen konuma yaklaşıncı DAKB'lerin durumunu kademeli olarak küçültmektedir. Takip hatası $<0,1$ cm olduğunda ise denetleyici 9 valfi de kapatmaktadır. Aynı incelemeyi deneysel çalışma için yaptığımızda ise DAKB'lerin asgari ve azami durum değerleri arasında farklı değerler aldığı görülmektedir. G-EHS üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda besleme basıncında meydana gelen dalgalanmaların denetim performansı üzerindeki olumsuz etkisine değinilmişti. Bu dalgalanma D-EHS'nin besleme basıncında pik biçiminde meydana gelmektedir. İki sistemin basınç değişimleri arasındaki belirgin farklılık Şekil 53'te verilmiştir. Burada G-EHS ve D-EHS'de gerçekleştirilen deneysel sinüs konum referans çalışmasından elde edilen veriler sunulmuştur. G-EHS'nin

yönlendirme birimindeki oransal valf sayesinde odacık basınçları belli bir değer etrafında salınım yapmaktadır. Sinüs sinyalinin sürekli ve değişim hızının düşük olmasına rağmen D-EHS'nin değerlerinde salınım yerine sert değişimler gözlenmektedir. Bu durumun 0,05 saniye düzeyindeki sistem zaman adımıyla birleşmesi sonucunda denetim performansı kötü yönde etkilenmektedir.

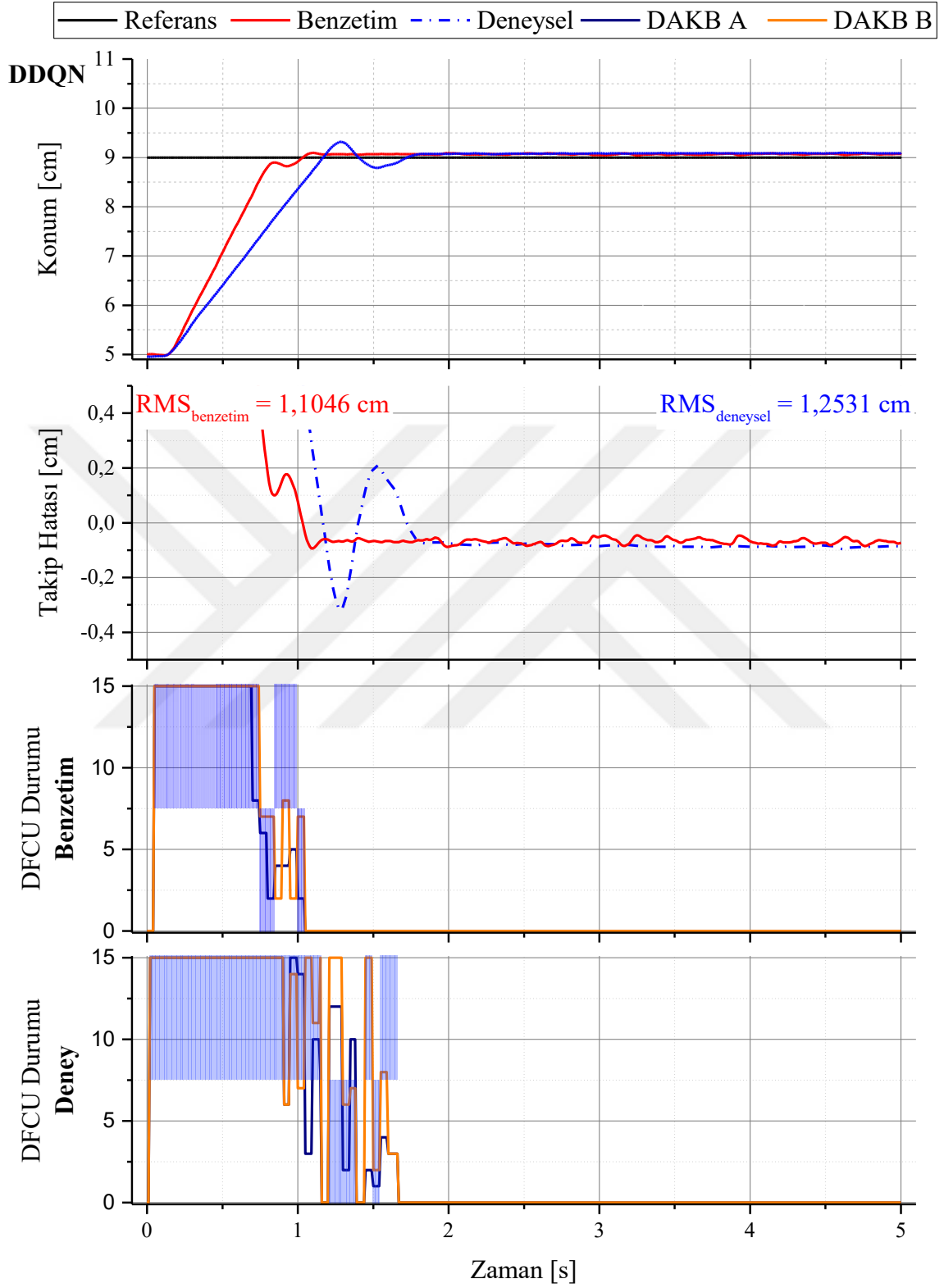


Şekil 53. D-EHS ve G-EHS deney sistemlerinde sinüs konum referansı takibinde ölçülen basınç değişimleri

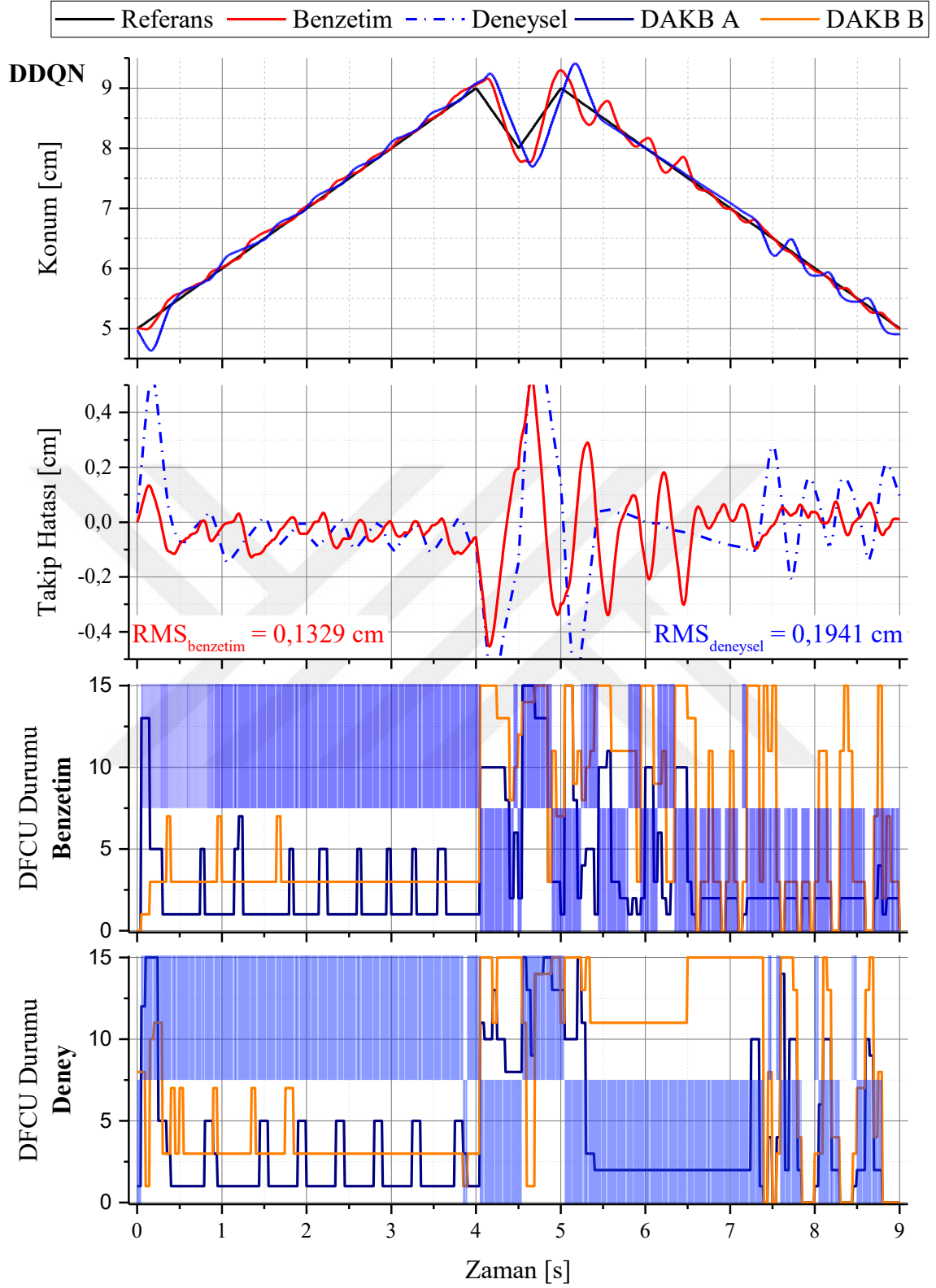
Tek DDQN denetleyici ile D-EHS üzerinde gerçekleştirilen ikinci çalışma rampa konum referansı takibidir (Şekil 55). DAKB'lerin akış katsayılarının değişmesi süresiz bir davranıştır. Eğer istenen akış değeri iki süresiz değerin arasında kalıyorsa, denetleyici DAKB'leri durumunu sürekli değiştirerek ilgili değeri sağlamaya çalışır. Konum takibinin 0-4 saniyeleri aralığında bu durum gözlenmektedir. Tek DDQN denetleyici takip hatasını asgari düzeyde tutabilmek için hidrolik pistonu 1 cm/s hızında hareket ettirmelidir. Deneysel ve benzetim çalışmalarında istenen hız değeri DAKB'lerin sabit bir durumda kalması ile sağlanamadığı için tek DDQN denetleyici DAKB durumlarını 5 ile 1 arasında sürekli olarak değiştirmektedir. Deneysel çalışmada sabit DAKB durumları ile istenen hız değerinin oluşturulabildiği bir durum ise 5,5-7 saniyeleri arasında ortaya çıkmaktadır. Bu kısımda, DAKB A = 2 ve DAKB B = 11 – 15 durumlarındayken –1 cm/s hız değeri kararlı olarak sağlanabilmektedir. Ani işaret değişiminin olduğu kısımlar incelendiğinde, her iki çalışma için tek DDQN denetleyicinin geç tepki verdiği görülmektedir. Bu durum önceki çalışmalarla uyumludur. Fakat, D-EHS ile gerçekleştirilen çalışmalarda örnekleme zamanının 0,05 saniye olarak seçilmesi tepki süresini daha da uzatmaktadır. Belirtilen nedenlerden ötürü, ani yön değişimi olan kısımlarda takip hatası 0,5 cm'nin üzerine çıkmaktadır. Takip çalışmasının geneli incelendiğinde yönlendirme valfi durum değişiminin takip edilen konum referansı ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yönlendirme valfinin benzetim ve deneysel çalışmalar arasındaki uyumu incelendiğinde, 5-9 saniyeleri arasında yönlendirme valfinin farklı davranışları dikkat çekmektedir. Bunun gerekçesi olarak, hidrolik piston üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğü gösterilebilir. Benzetim çalışması sabit besleme basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ise besleme basıncının 12 bar seviyesine kadar düştüğü gözlenmiştir. Sonuç olarak, benzetim çalışmasında hidrolik pistonun üzerine etkiyen basınç değerleri deneysel çalışmadakinden daha büyük olmaktadır. Bu durum seçilen zaman adımı nedeniyle yüksek tepki süresine sahip denetleyici ile birleşince takip hatası artmaktadır. Yönlendirme valfi de takip hatasını azaltmak için deneysel çalışmadan daha farklı davranış sergilemektedir.

Tek DDQN denetleyici ile yürütülen son çalışma sinüs konum referansının takibidir (Şekil 56). Benzetim ve deneysel çalışmalar incelendiğinde takip hatasının genel olarak $\pm 0,2$ cm aralığında kaldığı görülmektedir. Deneysel takip hatası daha yakından incelendiğinde ise en yüksek hata değerlerinin konum referansının yön değiştirdiği kısımlarda meydana geldiği dikkat çekmektedir. D-EHS ile ulaşılabilecek en düşük

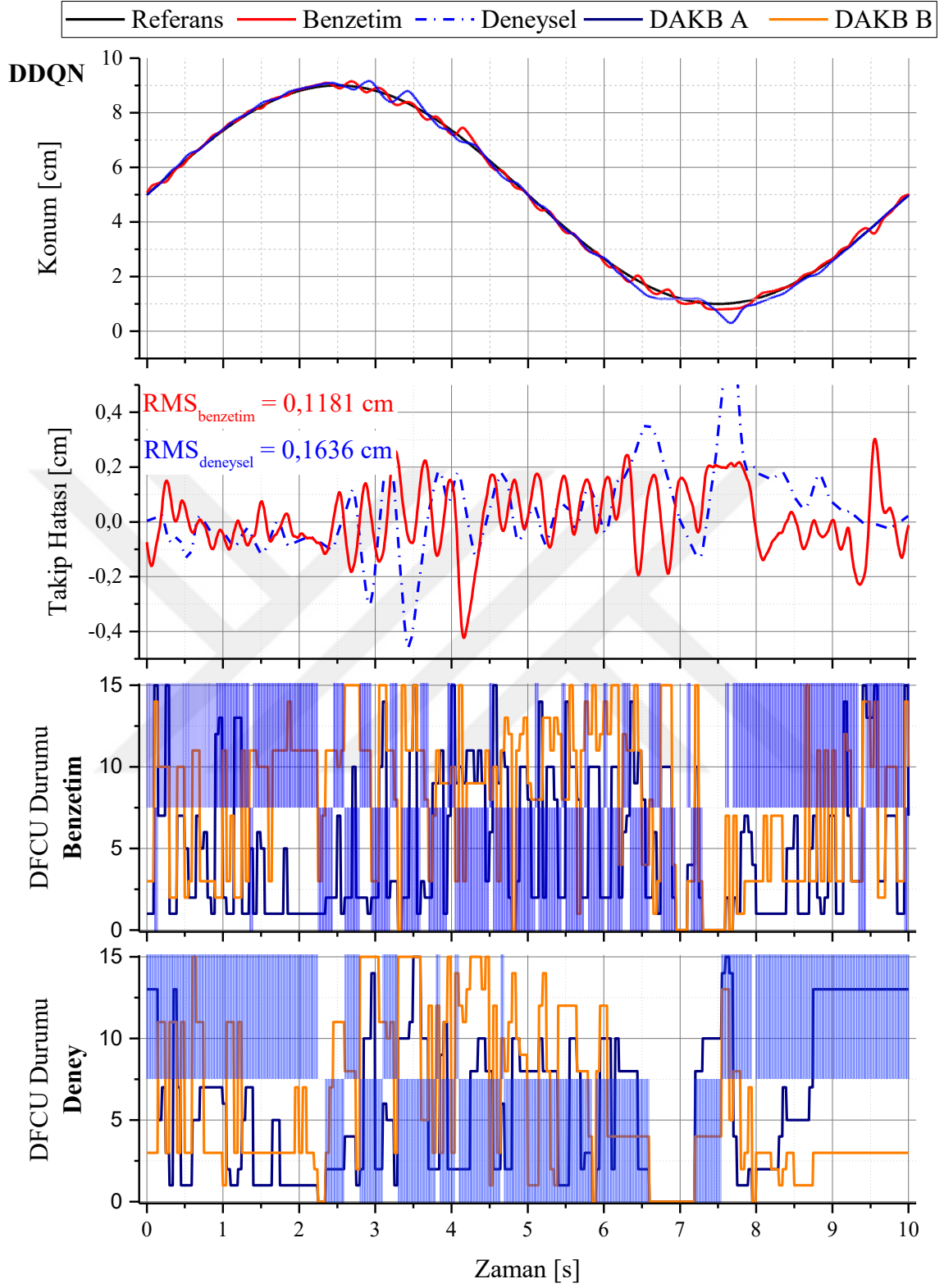
hidrolik akışkan debisi en küçük akış katsayısına sahip valf ile direkt olarak ilgilidir. Çalışmaların yürütüldüğü sistemde 8 adet eş aç-kapa popet valf kullanılmıştır. Valflerin akış katsayıları farklı çaplardaki orifisler ile belirlenmiştir. Bu durumda, D-EHS’de erişilebilen en düşük debi değeri en küçük orifis çapına bağlıdır. Sinüs konum referans sinyalinin değişim hızı yön değiştirmeden önceki ve sonraki bölgelerde en düşük değerine ulaşır. Düşük değişim hızını karşılamak için DAKB’deki en küçük orifis çapına sahip valfin durumu açık olarak değiştirilir. Eğer seçilen valf istenen düşük debi değerini tam olarak karşılamıyorsa takip hatası artış gösterir. Bu ihtimal DAKB tasarımında ele alınmıştır. Orifis çaplarının çalışmalarda kullanılan konum referanslarıyla uyumlu olarak seçilmesi ile takip hatasının artmasına sebep olabilecek bu durum tasarım aşamasında giderilmiştir. Diğer bir olasılık ise tek DDQN denetleyicinin en küçük DAKB durum değerini seçmemesidir. Takip hatasının arttığı kısımlara denk gelen durum değerleri incelendiğinde, DAKB A ve DAKB B’nin değerlerinin 1-15 aralığında dalgalandığı görülmektedir. Bu durumda, takip hatasındaki artışın nedeni tek DDQN denetleyicinin en iyi DAKB değerini belirleyememesi olarak ortaya çıkmaktadır. Benzetim ve deneysel çalışmaların DAKB durum değişimleri karşılaştırıldığında deneysel çalışmadaki değişim sıklığının daha düşük olduğu görülmektedir. Rampa konum referansı için gerçekleştirilen çalışmada hidrolik pistona etkiyen basınç değerleri büyüdükçe DDPG denetleyicinin aç-kapa popet valflerin durumunu sıklıkla değiştirdiği gözlenmiştir. Benzer bir durum sinüs konum referans sinyalinin takibinde de meydana gelmektedir. Benzetim ortamındaki besleme basıncının sabit olması denetleyicinin daha yüksek basınç değerleriyle baş etmesi gereksinimini doğurmuştur. Buna bağlı olarak benzetim çalışmalarındaki DAKB’lerin durum değişim sıklığı artmıştır.



Şekil 54. Tek DDQN denetleyici ile basamak konum referansı takibi



Şekil 55. Tek DDQN denetleyici ile rampa konum referansı takibi



Şekil 56. Tek DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

3.4. Çoklu DDQN Denetleyici ile Konum Takibi

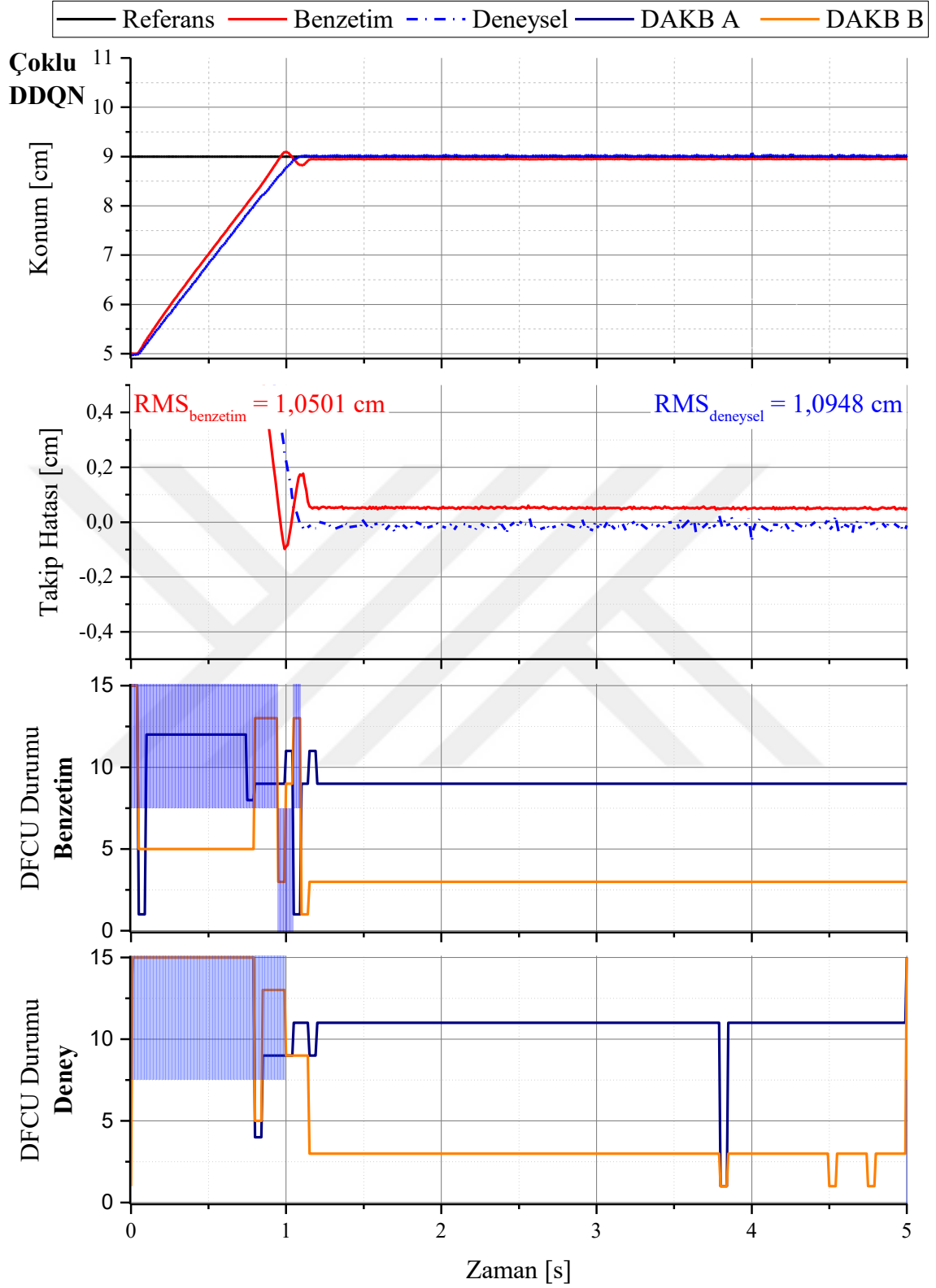
Çoklu DDQN denetleyici, D-EHS’de yer alan üç valf sistemini ayrı ayrı denetleyen üç adet DDQN denetleyiciden oluşmaktadır. Bu denetleyici eğitim sürecinde zaman adımı başına düşen işlem sayısını azaltmak için önerilmiştir. Bu yaklaşımla, her zaman adımında değerlendirilmesi gereken valf kombinasyonu 451’den 35’e indirgenmiştir. Çoklu konum referansı ile eğitilen çoklu DDQN denetleyici ile gerçekleştirilen konum takip çalışmaları bu kısım altında verilmiştir.

Deney düzeneğindeki besleme basıncının belirlenen 20 bar değerinin altına düşmesinin etkisi, önceki çalışmalarda olduğu gibi, basamak konum referansı takibinde de görülmektedir (Şekil 57). Benzetim ortamında gerçekleştirilen çalışmada, hidrolik piston ~0,1 cm aşma sonrası <0,1 cm kararlı hal takip hatasıyla basamak konum referansını takip etmektedir. Deneysel çalışmada ise denetleyici sifıra yakın kararlı hal hatası ile takibi sürdürmektedir. DAKB durumları incelendiğinde, denetleyicinin belirlediği DAKB durumlarının her iki çalışmada birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Benzetim çalışmasında DAKB’ler çoğunlukla 5-12 durumları arasında değişmiştir. İstenen konum referansına yaklaştıktan sonra denetleyici, sık durum değişiklikleriyle takip hatasını asgari düzeye indirmiştir. Deneysel çalışmada ise DAKB’ler azami durum değeri ile ilerlemiştir. Buradaki farklılığın temel sebebi, her iki sistemdeki besleme basıncıdır. Benzetim sisteminde sabit 20 bar besleme basıncı kullanılırken deneysel sistemdeki besleme basıncı, DAKB’lerin durumuna göre, 12-20 bar arasında değişmektedir. Denetleyici bu farkı telafi etmek için deneysel sistemde azami DAKB durumunu seçmiştir.

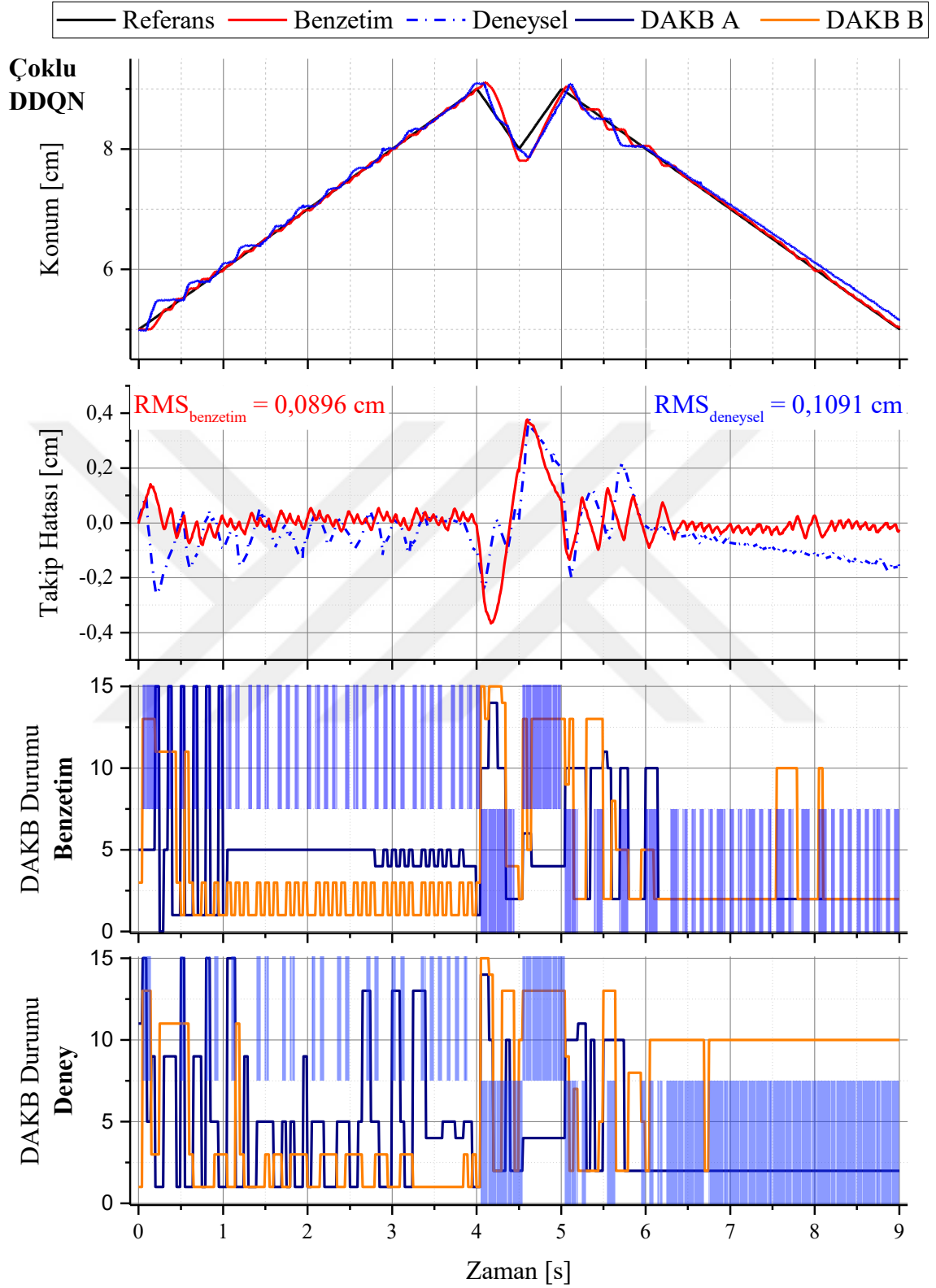
Çoklu DDQN denetleyici ile gerçekleştirilen diğer çalışma, rampa konum referansının takibidir (Şekil 58). Takip hatası incelendiğinde denetleyicinin benzetim çalışmasında deneyselle göre daha iyi takip performansı sergilediği görülmektedir. Konum referansının ani yön değiştirdiği kısımlarda takip hatası artmaktadır. Takip çalışmasıyla ilgili dikkat çeken bir diğer unsur 0-4 saniyeleri ve 5-9 saniyeleri arasındaki zaman dilimleridir. Benzetim çalışmasıyla elde edilen veriler denetleyicinin her iki kısımda da çok düşük takip hatasına ulaşabildiğini göstermektedir. Deneysel çalışmada ise denetim performansı azalmakta ve denetleyicinin iki farklı davranışı ortaya çıkmaktadır. İlk kısımda denetleyicinin sabit hızlı (1 cm/s) konum referansı için belirlediği DAKB durumları basamak benzeri bir takibe neden olmaktadır. İlgili kısma karşılık gelen denetim sinyalleri incelendiğinde benzetim çalışmasındakilerle benzer olduğu görülmektedir. Bu

durumda, denetleyicinin ortamdan elde ettiği durum verisine göre uygun davrandığı fakat deney düzeneğindeki bozucu etkilerin denetim performansını zayıflattığı söylenebilir. İkinci kısımda ise denetleyicinin artan takip hatasına kayıtsız kaldığı görülmektedir. 6.saniye itibariyle takip hatası sıfıra yaklaşmakta ve DAKB durumları uygun değerlerde sabitlenmektedir. Bu noktadan sonra takip hatası doğrusal olarak artarak $\sim 0,16$ cm'ye kadar ulaşmaktadır. Takip hatasının arttığı kısımda, DAKB durumlarının takip hatasını azaltacak yönde düzenlenmediği gözlenmektedir. Eğitimde kullanılan ödül fonksiyonu takip hatası, DAKB durumları ve yönlendirme valfinin zamanla değişen bileşenlerine dayalı ceza terimlerini içermektedir. Söz konusu durumda, valf durumlarını değiştirerek elde edilecek ödül ceza terimlerinin toplamından daha düşük olduğu için denetleyici herhangi bir eylemde bulunmamıştır. İlgili durum eğitimin yeni bir ödül fonksiyonu ile tekrarlanmasıyla veya ortamdan gelen hata durum bilgisinin birden büyük bir katsayı ile çarpılmasıyla giderilebilir.

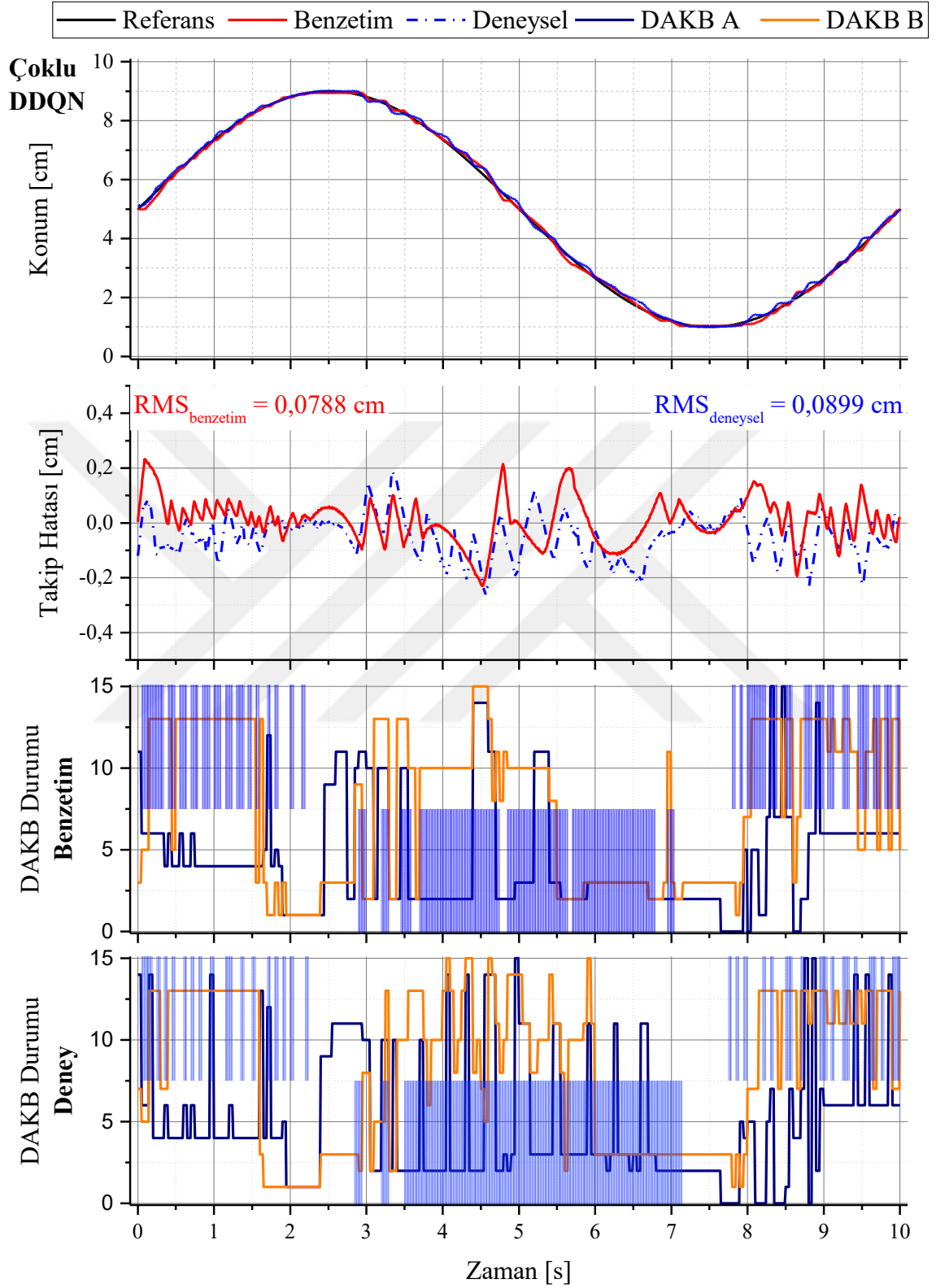
Çoklu DDQN denetleyicinin denetim performansını incelemek amacıyla, önceki denetleyicilerle yapılan çalışmalara benzer bir şekilde değişken hız değerlerine sahip sinüs konum referansı kullanılmıştır (Şekil 59). Takip çalışmasının geneli incelendiğinde benzetim ve deneysel verilerin birbiriyle uyumlu olduğu ve takip hatasının çoğunlukla $\pm 0,2$ cm aralığında kaldığı görülmektedir. Konum referans sinyalinin yön değiştirdiği 2,5-7,5 saniyeleri aralığında yönlendirme valfi 2. durumda olmalıdır. Çoklu DDQN denetleyici ile gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalar, yönlendirme valfinin bu beklentiye uygun şekilde hareket ettiğini göstermektedir.



Şekil 57. Çoklu DDQN denetleyici ile basamak konum referansı takibi



Şekil 58. Çoklu DDQN denetleyici ile rampa konum referansı takibi



Şekil 59. Çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

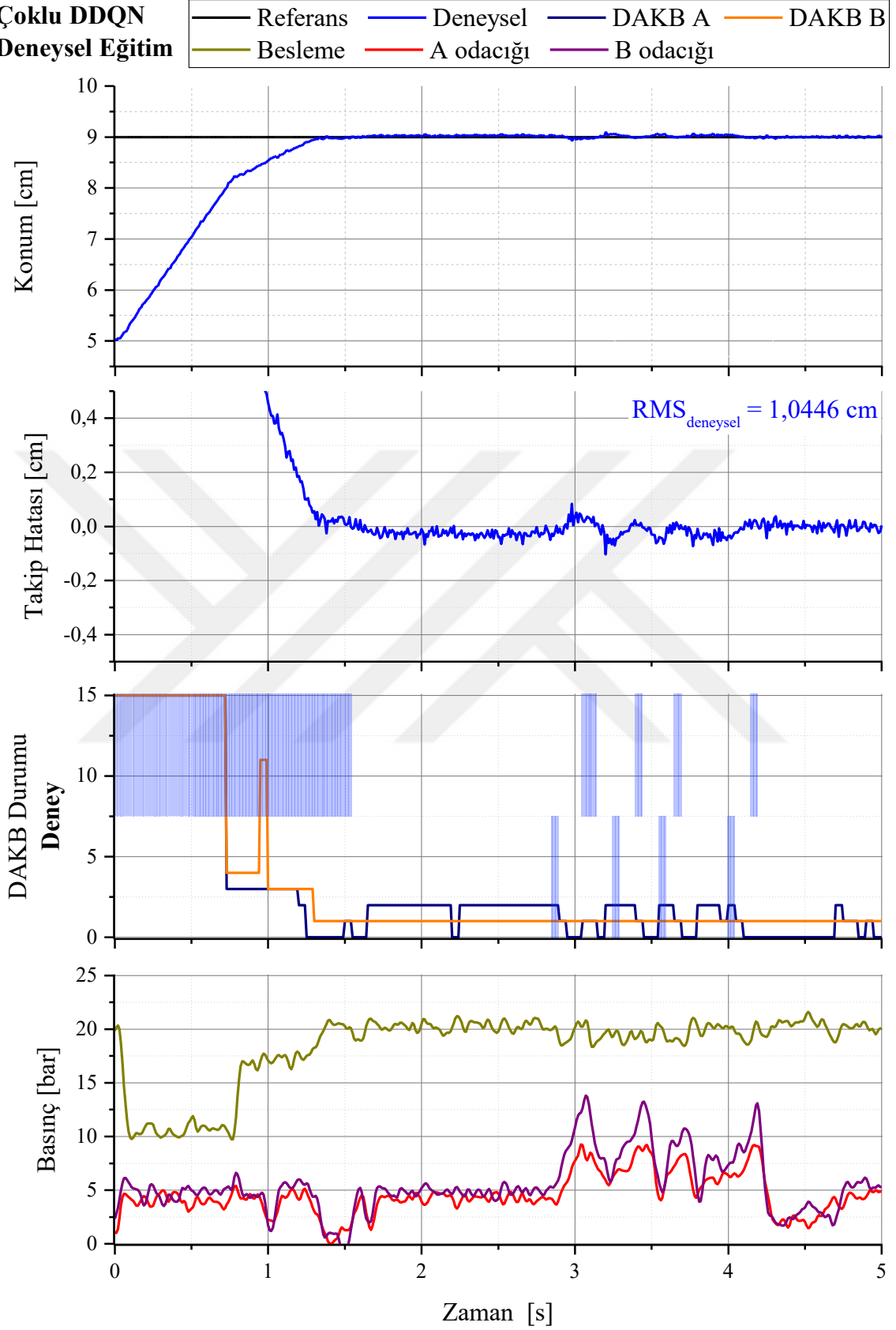
3.5. Deneysel Eğitim ile İyileştirilen Çoklu DDQN Denetleyici ile Konum Takibi

Çoklu DDQN denetleyici, D-EHS'nin konum denetiminde tek DDQN denetleyiciden daha başarılı sonuçlara ulaşmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda benzetim sonuçlarının daima deneyselde elde edilenlerden daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni ise deney düzeneğinde denetim performansına etkiyen etmenlerin tamamının benzetim sisteminde karşılığının olmamasıdır. Bu sorunu çözmek için karmaşık bir modelleme sürecinin uygulanması bir seçenek olabilir. Diğer seçenek ise deney düzeneği üzerinde gerçek zamanlı denetleyici eğitimi yürütmektir. Gerçekleştirilen bu tez kapsamında ikinci yaklaşım seçilmiş ve bu kısımda gerçek zamanlı eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin takip performansına yönelik deneysel çalışmalar sunulmuştur. D-EHS'nin karşılaşılabileceği farklı senaryolar karşısında denetim performansındaki değişimi incelemek için gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları ise alt bölüm içerisinde verilmiştir. Oluşturulan senaryolar eğitim dışı konum referansı takibi, besleme basıncının değiştirilmesi ve DAKB arızası olarak sıralanabilir.

Deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilen eğitim çalışması sonucunda denetleyicinin basamak konum referans takip performansı artmıştır. Bunun en belirgin göstergesi konum takibinde kararlı hal hatasının sifıra yaklaşması ve aşma meydana gelmemesidir (Şekil 60). DAKB'lerin durumları incelendiğinde takip edilen konum referansıyla uyumlu valf kombinasyonlarının seçildiği gözlenmiştir. Hidrolik piston referans konum değerine yaklaşırken ilk olarak azami DAKB durumları seçilmiştir ve takip hatası $\sim 0,75$ cm seviyesine geldiğinde daha düşük durumlara geçiş yapılmıştır. Bu davranışın temeli eğitim aşamasında kullanılan eylem düzenleyici yapıdır. Eylem düzenleyici, takip hatasının 2 cm'den büyük olduğu durumlarda aç-kapa popet valflerin tamamını açık duruma getirmektedir. Yönlendirme valfinin durumunu ise takip hatasını azaltacak şekilde düzenlemektedir. Sonuç olarak, eylem düzenleyici kullanılmadan gerçekleştirilen deneysel çalışma, denetleyicinin istenen davranışı öğrendiğini göstermektedir.

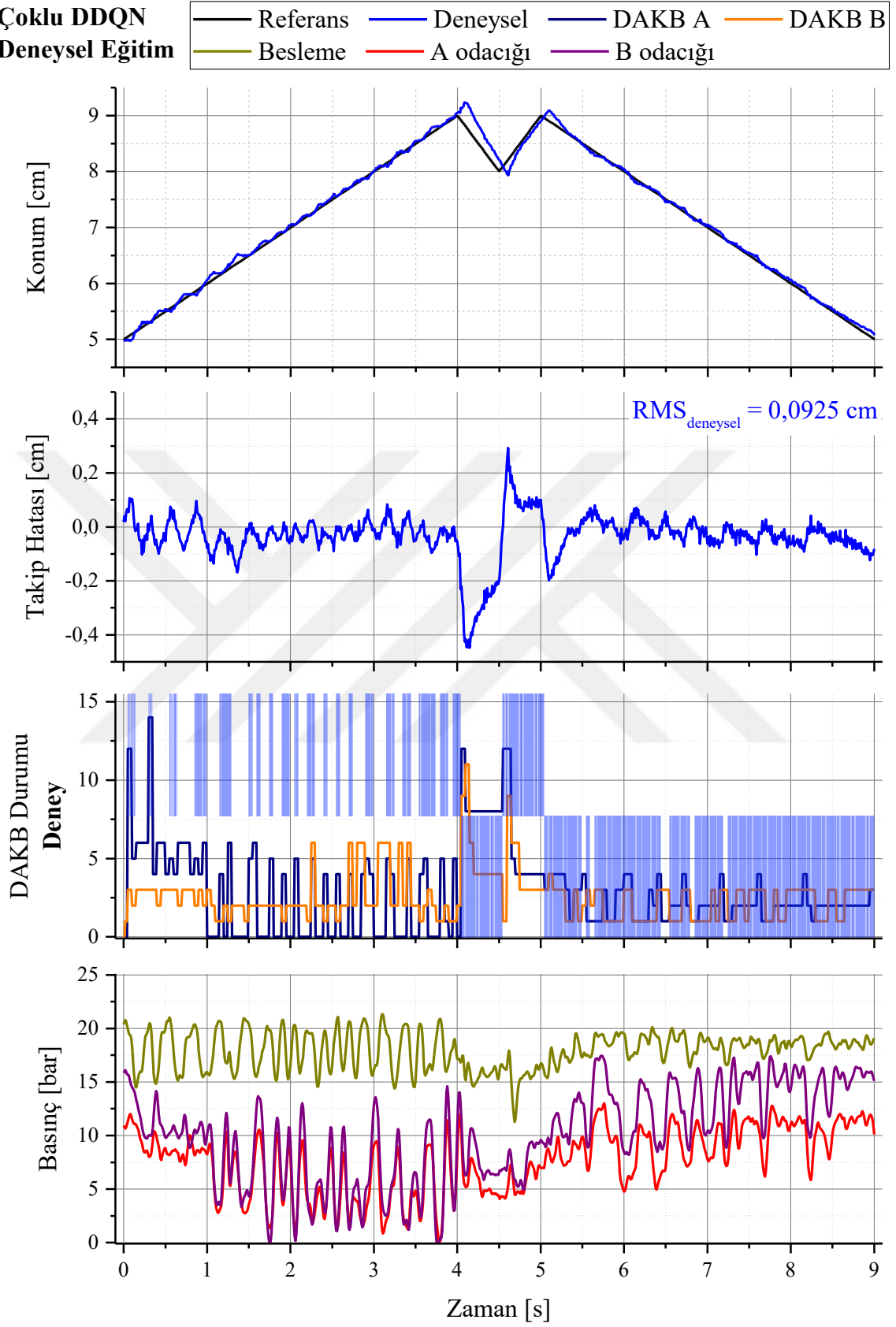
Rampa konum referansı ile gerçekleştirilen çalışmada denetleyicinin denetim performansı deneysel eğitim öncesine göre belirgin bir şekilde artmıştır. Benzetim ortamında eğitilen çoklu DDQN denetleyici, takip hatasını $\pm 0,1$ cm aralığında sürdürme konusunda güçlük yaşamakta ve artan takip hatasını engellemek için uygun eylemleri gerçekleştirememektedir. Ancak, deneysel takip çalışmasıyla, 0-4 saniyelerini ve 5-9 saniyelerini içeren aralıklar incelendiğinde, her iki sorunun da başarılı bir şekilde

**Çoklu DDQN
Deneysel Eğitim**



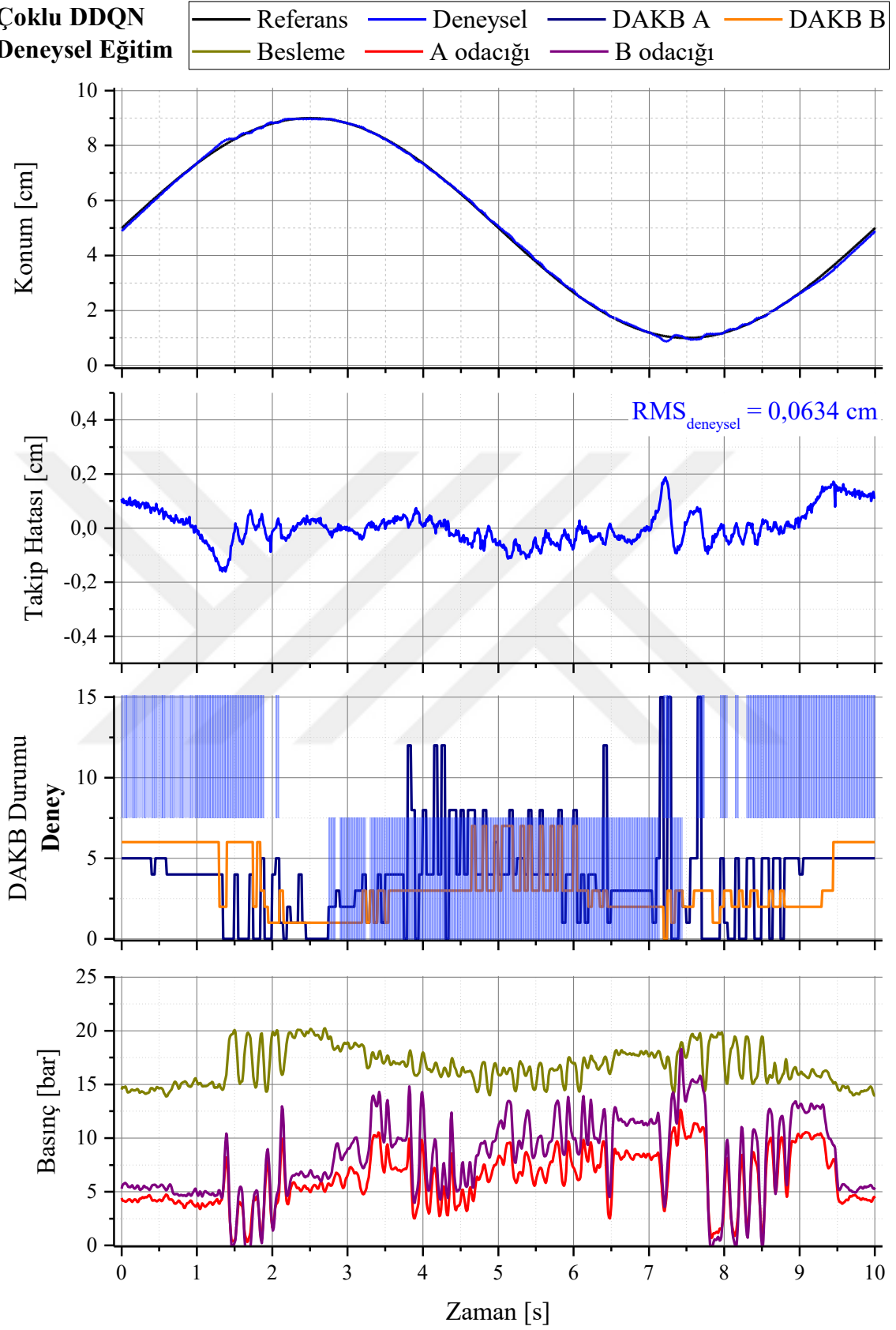
Şekil 60. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile basamak konum referansı takibi

**Çoklu DDQN
DeneySEL EğİtİM**



Şekil 61. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile rampa konum referansı takibi

**Çoklu DDQN
DeneySEL Eğitim**



Şekil 62. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

3.5.1. Eğitim Dışı Koşulların Denetim Performansı Üzerine Etkisi

Deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin eğitim dışı koşullarda gösterdiği denetim performansı, bu bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla incelenmiştir. İlk olarak, DAKB'lerde bulunan aç-kapa popet valflerin arızalanarak kapalı halde kalması durumunda denetim performansında meydana gelen değişiklikler üzerinde durulmuştur. Ardından, denetleyicinin farklı konum referanslarını takip etme performansını değerlendirmek amacıyla, 4 cm genlikli 0,05 Hz ve 0,15 Hz frekansta sinüs sinyali ve 5. derece polinom kullanılarak oluşturulan konum referanslarının takibi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, besleme basıncının denetleyicinin denetim performansı üzerindeki etkisini incelemek için 15 bar ve 25 bar basınç değerlerinde konum takibi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin genel uygulanabilirliğini ve dış etkenlere dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

D-EHS'nin G-EHS'ye göre üstün olduğu bir konu, valf arızalarıyla ilgilidir. G-EHS'de bulunan oransal valfin arızalanması durumunda, yönlendirme biriminin tamamen değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak D-EHS, içerisinde birçok aç-kapa valf bulundurduğundan, benzer bir arıza durumunda arızalı valfin akış katsayısına bağlı olarak hizmet vermeye devam edebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada, aç-kapa popet valf arızası durumunda deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin konum denetim performansı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 63). Bu amaçla, çoklu konum referansı içerisinde bulunan 4 cm genlikli 0,1 Hz frekansında sinüs sinyali kullanılmıştır. DAKB A ve DAKB B'ye ait aç-kapa popet valfler, sırasıyla, $a_{1,2,3,4}$ ve $b_{1,2,3,4}$ olarak isimlendirilmiştir. Valflerin numaralandırılması akış katsayısına göre küçükten büyüğe doğru yapılmıştır. Çalışmada a_1 , b_1 , a_2 , b_2 ve bunların kombinasyonu olmak üzere 8 farklı valf hatası durumu değerlendirilmiştir. İlgili grafiklerin sol tarafında çalışmanın hangi valf veya valfler arızalıyken gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Ayrıca, karşılaştırılma yapılabilmesi için arızasız durumdaki DAKB'lerle elde edilen takip hatası verisine de grafiklerde yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, valf arızası durumunda takip hatasının çoğunlukla $\pm 0,4$ cm aralığında kaldığı gözlenmektedir. Burada, b_2 valfinin arızalanması sonucunda $+0,5$ cm ve $-1,6$ cm aralığında değişen takip hatası bir istisna olarak ortaya çıkmaktadır. Takip hatasının çalışmayan valflerin akış katsayısının toplamıyla orantılı olarak artması mantıklı bir çıkarımdır. Fakat, valf arızası durumuna

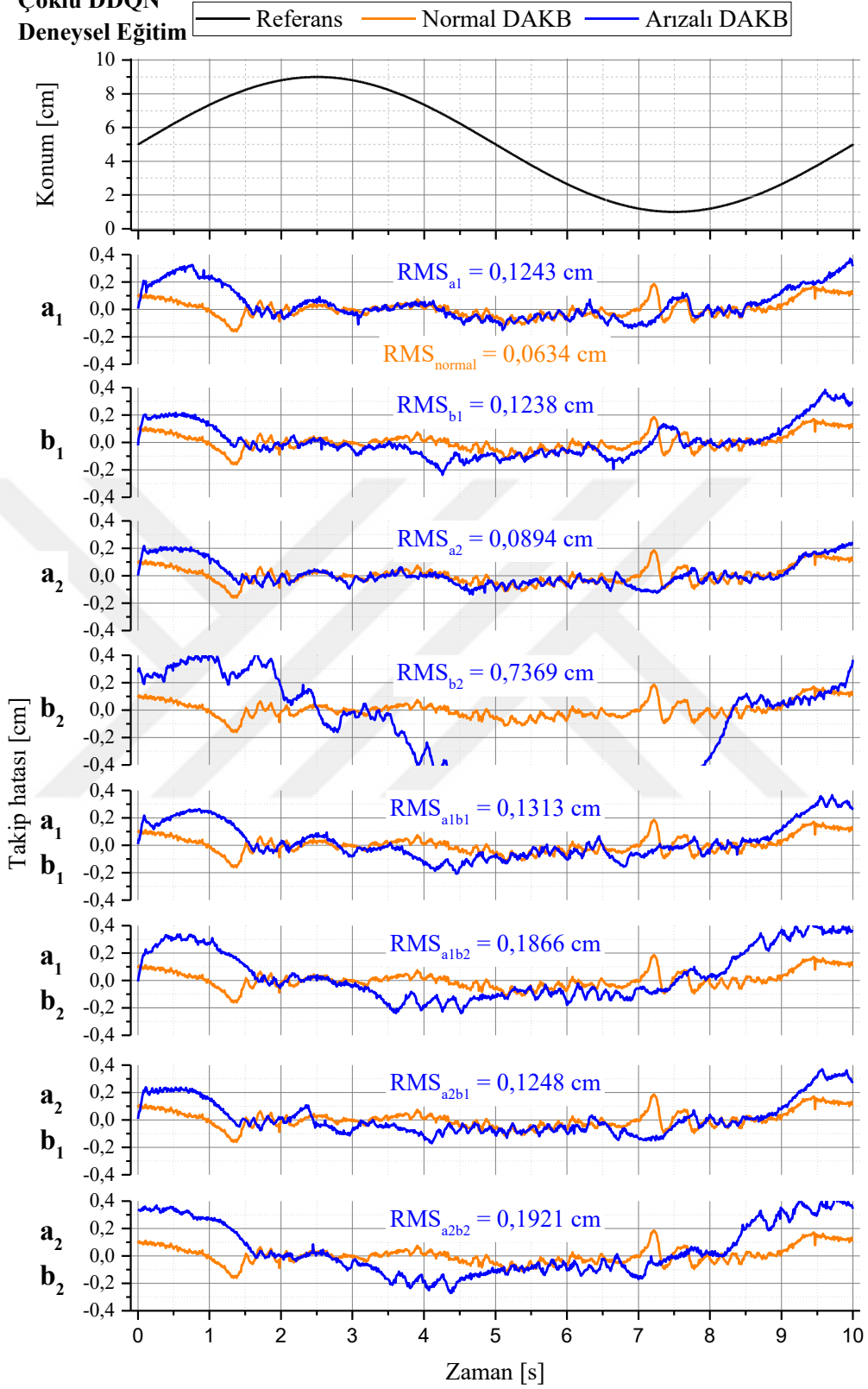
karşı eğitilmeyen denetleyicinin denetim performansı bu beklentiyle birebir uyuşmamaktadır. Örnek olarak, DAKB A'nın en küçük akış katsayısına sahip a_1 valfinin bozulduğu durumda takip hatasının RMS değeri (RMS_{a1}) 0,1243 cm'dir. a_1 valfinin iki katı akış katsayısına sahip a_2 valfinin arızalanması sonucunda RMS_{a2} değeri %30 azalarak 0,0894 cm olmaktadır. Aynı inceleme DAKB B'de yer alan aynı valflerle tekrarlandığında takip hatası RMS değerinin 6 kat arttığı görülmektedir. Bu durum, valf arızalarının sistem üzerinde karmaşık etkiler yarattığını ve bu etkilerin doğrusal bir şekilde artış göstermediğini ifade etmektedir. Özellikle, aynı akış katsayısına sahip a_2 ve b_2 valflerinin arızalandığı durumlar incelendiğinde, takip hatasındaki artışın birbiriyle uyuşmadığı görülebilir. Valf arızasına bağlı olarak takip hatasındaki değişimi tahmin edebilmek amacıyla, valf arızası olmayan durumda gerçekleştirilen takip çalışmasında valflerin kullanılma sıklıklarının incelenmesi, sınırlı bir öngörü sağlamaktadır (Tablo 11).

Tablo 11. Arızasız DAKB A ve DAKB B ile gerçekleştirilen konum takibinde aç-kapa popet valflerin açık durumda bulundukları zaman adımı sayısı

a_4	a_3	a_2	a_1	b_4	b_3	b_2	b_1
100	556	150	421	0	286	846	550

a_2 ve b_2 valflerinin ayrı ayrı arızalı olduğu durumlar için yapılan çalışmalarda takip hatasının aynı ölçüde değişmediği belirtilmişti. Tablo 11'de verilen bilgiler doğrultusunda, a_2 valfinin 150 ve b_2 valfinin ise 846 zaman adımı süresince açık durumda bulunduğu görülmektedir. Bir adet valfin arızalandığı durum için takip hatasının RMS değerinin valfin kullanım süresiyle doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Arızalanan valf sayısı birden çok olduğu durumda ise kullanım sıklığı ve takip hatası arasında doğrusal bir bağıntı kurmak mümkün olmamaktadır.

Çoklu DDQN
Deneysel Eğitim



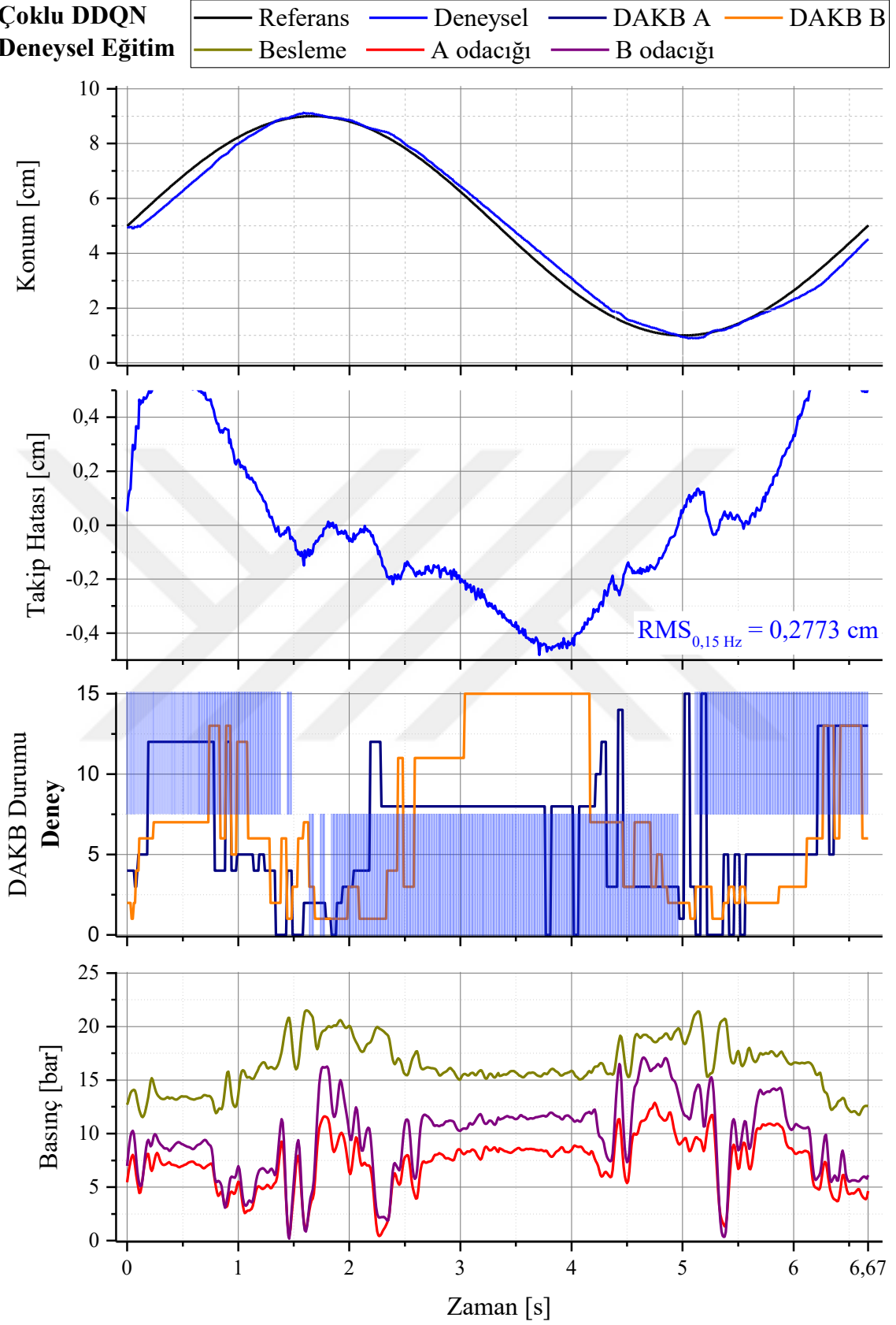
Şekil 63. Farklı aç-kapa popet valflerin arızalanması sonucunda konum takip performansının değişimi

Belli konum referanslarıyla eğitimi gerçekleştirilen denetleyicinin farklı referanslar karşısındaki başarımını incelemek için üç farklı referansla çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda, 4 cm genlikli ve 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı ile gerçekleştirilen deneysel çalışma Şekil 64'te verilmiştir. Referans ve hidrolik piston konumunu gösteren grafik incelendiğinde, konum takibinde meydana gelen belirgin faz farkı dikkat çekmektedir. Buna ek olarak, konum referansının hız değerinin azami (her iki yönde de) seviyeye ulaştığı kısımlarda takip hatasının arttığı görülmektedir. D-EHS'nin 20 bar besleme basıncı altında ulaşabileceği debi değerinin bu çalışmada kullanılan konum referansını takip etmeye yeteceği ön çalışmalarla teyit edilmiştir. Takip hatasının olası sebeplerini belirlemek için hatanın -0,4 cm'ye ulaştığı 3 – 4 saniyeleri aralığını detaylı incelemek yeterli olacaktır. Bu aralığa karşılık gelen durum değerleri DAKB A = 8 ve DAKB B = 15'tir. Yani, denetleyici DAKB'lerin sunabileceği azami toplam akış katsayısı değerini kullanmamıştır. Denetleyici eğitim esnasında 0,15 Hz frekanslı konum referansının sahip olduğu hız profilini tecrübe etmemiştir. Bu nedenden dolayı da seçilebilecek en uygun eylemi belirlemek konusunda yetersiz kalmıştır.

Eğitimde kullanılan sinüs konum referansından daha düşük frekanslı bir sinyal ile yürütülen diğer bir deneysel çalışmanın sonuçları Şekil 65'te sunulmuştur. 4 cm genlikli ve 0,05 Hz frekansa sahip sinüs konum referansının hız değerleri eğitimde kullanılan 4 cm genlikli ve 0,1 Hz frekansa sahip sinüs sinyalden daha küçüktür. Bu sebepten dolayı, gerçekleştirilen çalışmada eğitimde kullanılan sinüs konum sinyalden daha düşük hata değerine ulaşılmıştır. Takip hatası grafiği incelendiğinde değerlerin $\pm 0,1$ cm aralığında kaldığı görülmektedir. Denetim performansının bu derece iyi olmasının sebeplerinden bir diğeri, DAKB durum değerlerinin ani değişimler göstermemesidir. Bunun sonucunda, besleme basıncı 20 bar seviyesi civarında kalarak denetime etkiyen büyük bir belirsizliği ortadan kaldırmaktadır.

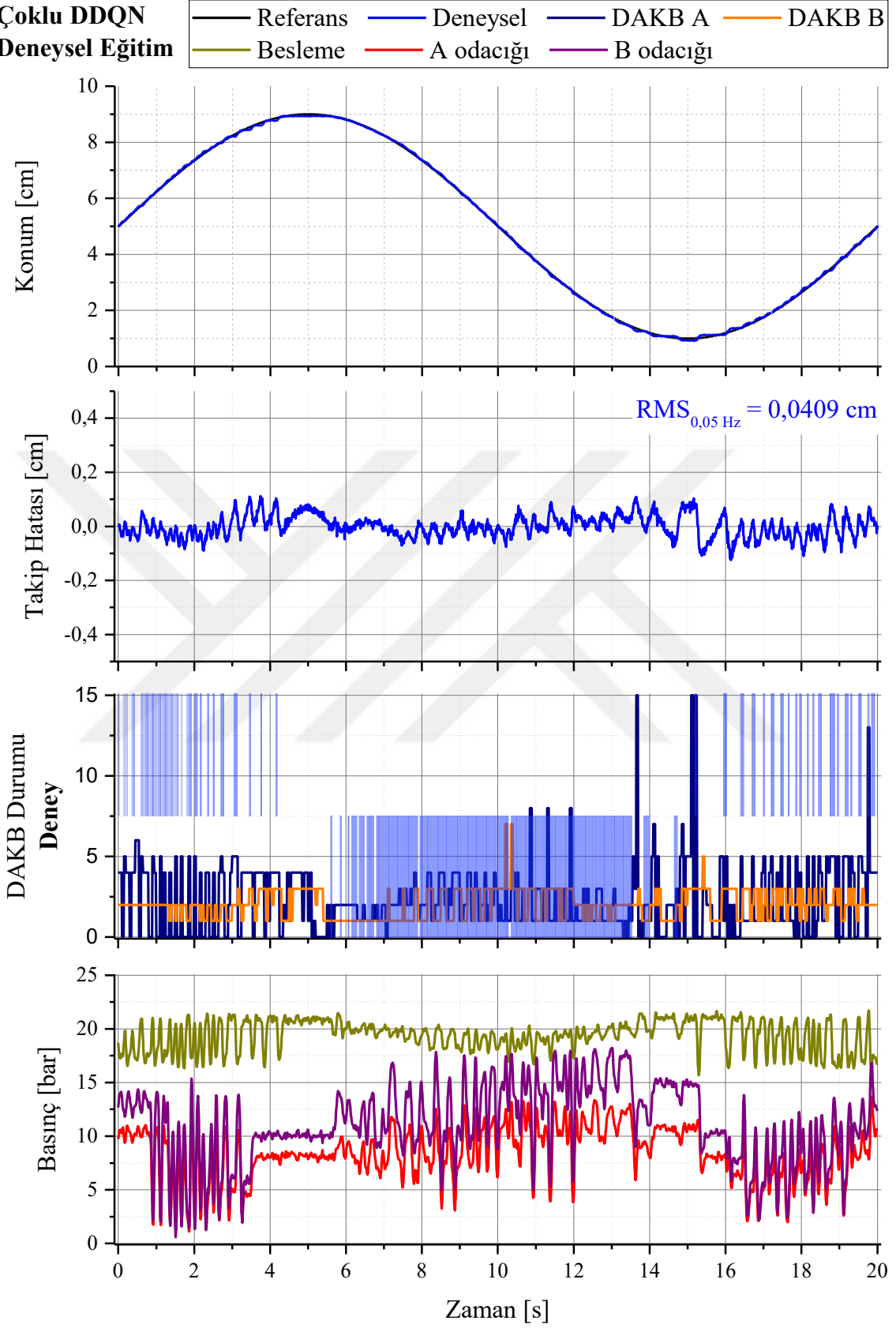
Denetleyicinin farklı konum referansları karşısındaki başarımını sınamak için yapılan son çalışmada 5.dereceden polinomla oluşturulmuş bir konum referansı kullanılmıştır (Şekil 66). Denetleyici oldukça iyi bir takip performansı sergileyerek eğitim sinyalden daha düşük takip hatasına ulaşmayı başarmıştır ($RMS_{polinom5} = 0,0395$ cm). İlgili grafik yakından incelendiğinde, takip hatasının $\pm 0,1$ cm aralığında kaldığı görülmektedir. Takip boyunca DAKB'lerin durum değerleri, genel olarak, 4 – 6 aralığında tutulmuştur. Kısalsa hareketinde ise bu 2-12 aralığına yükselmiştir.

**Çoklu DDQN
DeneySEL Eğitim**



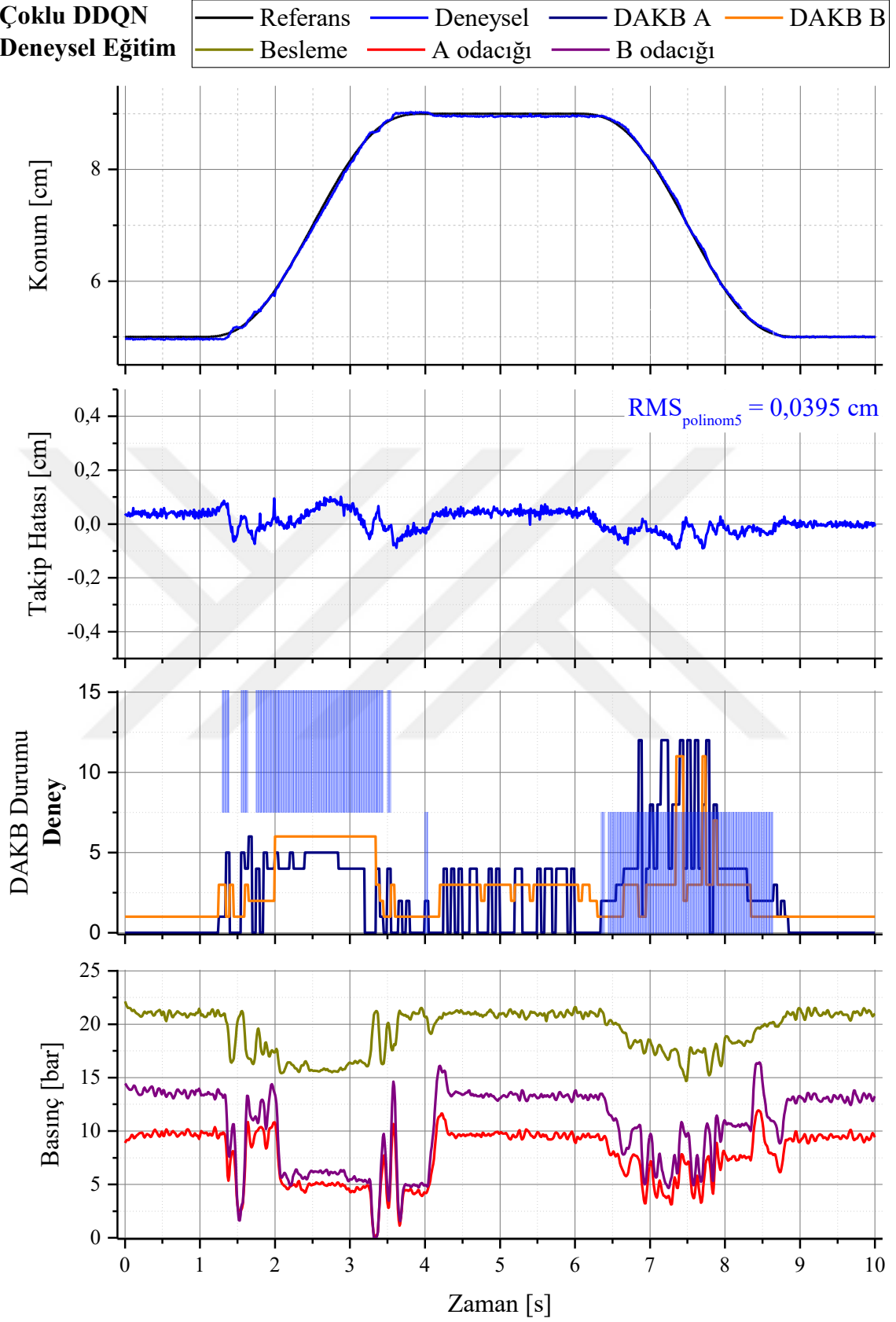
Şekil 64. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

**Çoklu DDQN
DeneySEL Eğitimi**



Şekil 65. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,05 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı takibi

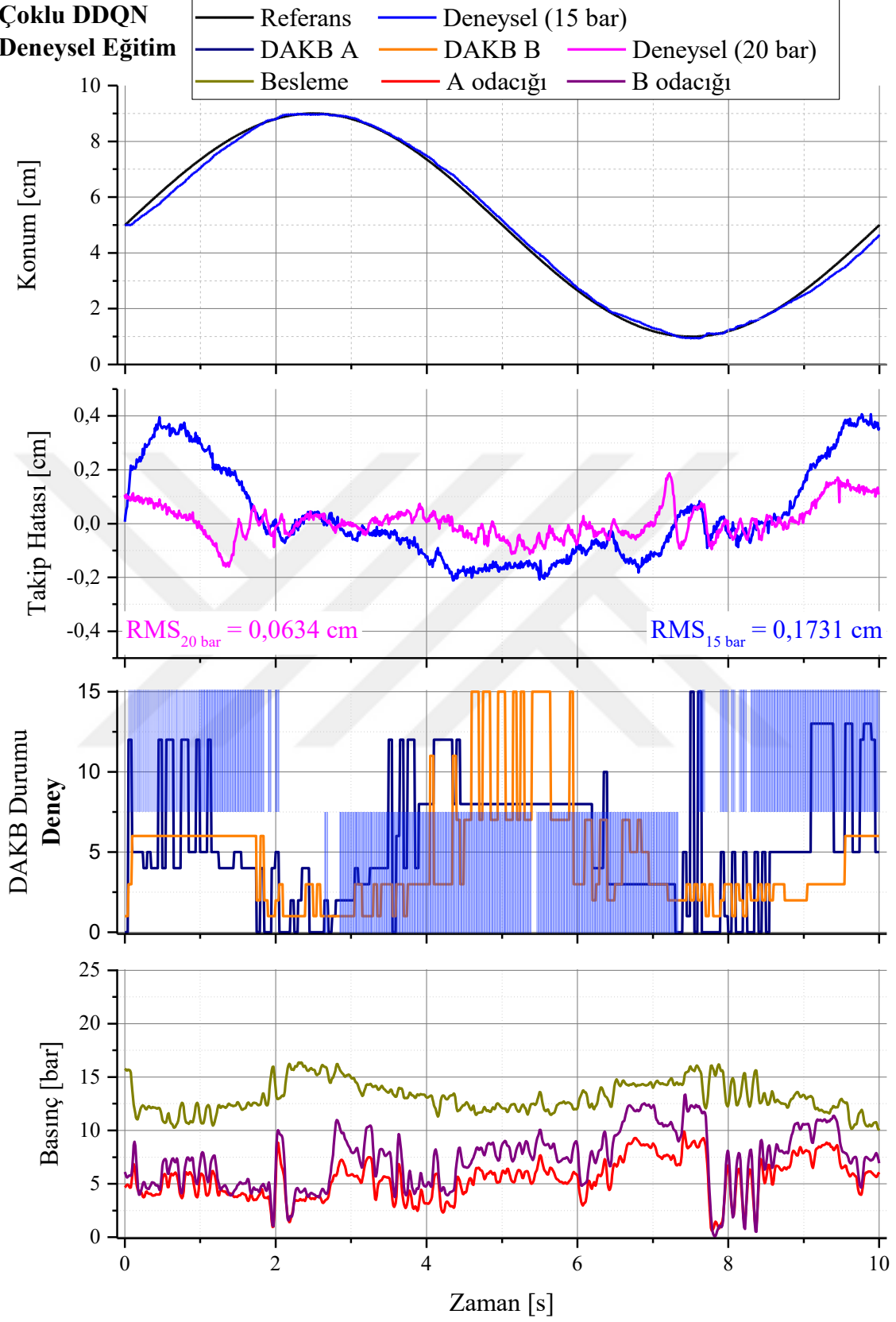
**Çoklu DDQN
DeneySEL Eğitim**



Şekil 66. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 5.derece polinom kullanılarak oluşturulmuş konum referansı takibi

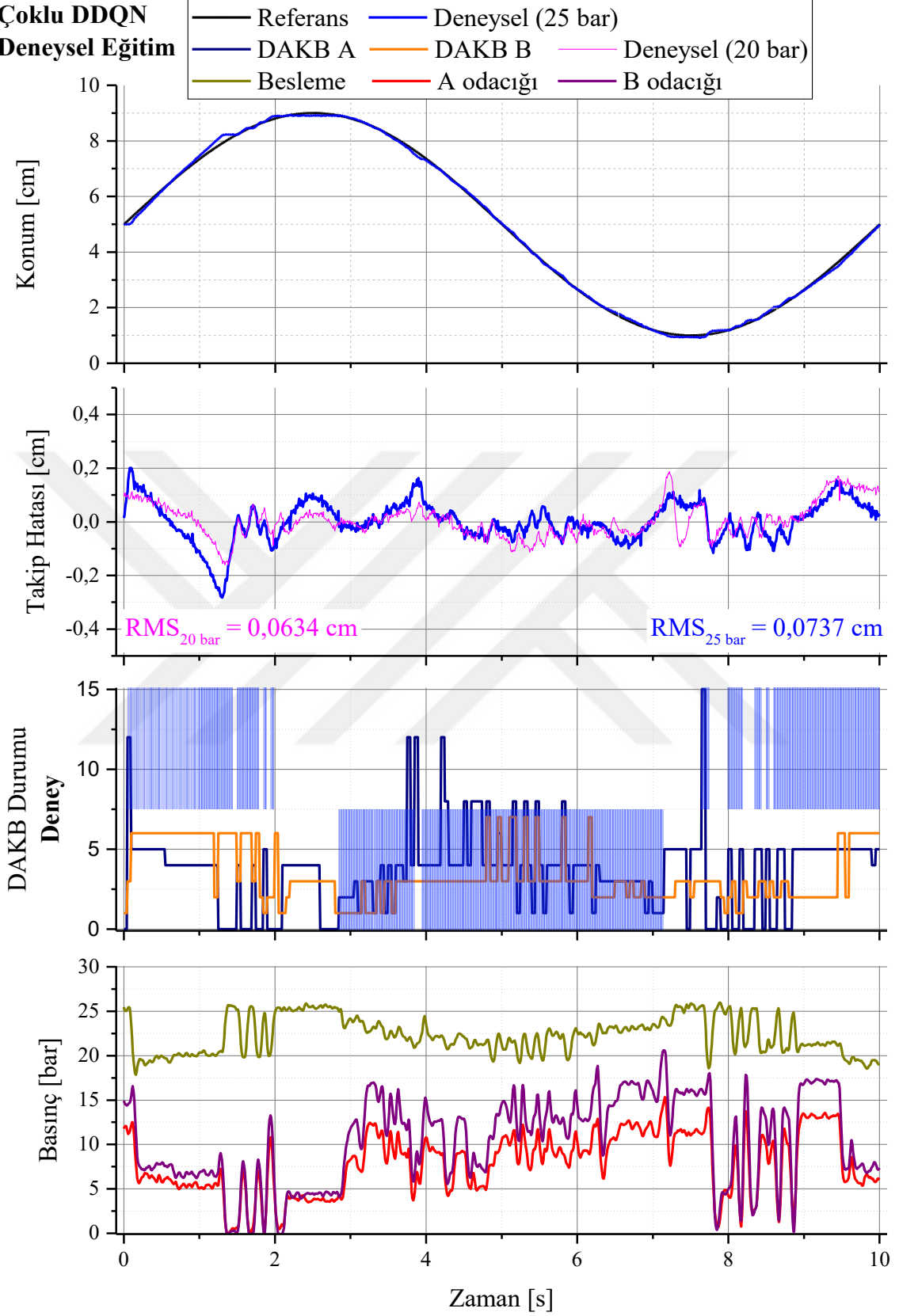
EHS'lerin kapasitesini belirleyen en önemli kıstaslardan birisi besleme basıncıdır. Bu tez kapsamında kullanılan EHS'ler göz önünde bulundurulduğunda, besleme basıncının değeri hidrolik pistonun uygulayabileceği azami kuvveti belirlemektedir. Besleme basıncı, valf girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkını belirleyen değişkenlerden biri olduğu için, aynı zamanda hidrolik akışkan debisine ve hidrolik pistonun hızına da etkiyen bir sistem özelliğidir. Çalışma ortamında farklı sorunlar (Basıncılı akışkan hattına çok sayıda hidrolik eyleyici sistemin bağlanması, hidrolik kaçaklar vb.) nedeniyle besleme basıncı değişebilir. Bazı durumlarda da kasıtlı olarak bu değişiklik gerçekleştirilir. Sebepten bağımsız olarak, denetleyicinin bu durumlar altındaki denetim performansı genel kullanım için önemlidir. Eğitim dışı koşulların irdelendiği bu kısımdaki son çalışma, deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin farklı besleme basıncı değerlerindeki denetim performansının deneysel olarak incelenmesidir. Çalışma kapsamında, denetleyici eğitiminde kullanılan besleme basıncı değeri %25 azaltılarak (15 bar) ve %25 artırılarak (25 bar) konum takibi gerçekleştirilmiştir. 15 bar besleme basıncı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları Şekil 67'de verilmiştir. Denetleyici, takip hatasını çoğunlukla $\pm 0,2$ cm aralığında tutarak konum referansını başarıyla izlemiştir. Uzama yönündeki takipte ise hata 0,4 cm'ye kadar çıkmıştır. Valf durumları incelendiğinde, denetleyicinin konum referansı ile uyumlu valf kombinasyonlarını seçtiği görülmektedir. Buna karşın, takip hatası eğitim şartları altında ulaşılan değerden daha yüksek çıkmıştır. Aynı çalışma 25 bar besleme basıncı altında tekrarlandığında, takip hatası eğitimde elde edilen seviyeye yaklaşmıştır (Şekil 68). Yüksek besleme basıncı altında DAKB'lerin durum değerleri incelendiğinde düşük durum seviyeleriyle takibin tamamlandığı görülmektedir. Takip süresince denetleyicinin yüksek durum değişimlerini tercih etmemesi denetim performansına olumlu yansımıştır. Takibin genelinde DAKB'lerin durum değerleri 0-8 arasında değişmiştir.

**Çoklu DDQN
Deneysel Eğitim**



Şekil 67. Deneyisel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansının 15 bar besleme basıncı altında takibi

Çoklu DDQN
DeneySEL Eğitim



Şekil 68. DeneySEL eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile 4 cm genlikli 0,15 Hz frekansına sahip sinüs konum referansının 25 bar besleme basıncı altında takibi

4. İRDELEME

Bu tez kapsamındaki çalışmaların değerlendirmesi ve karşılaştırılması bu kısımda gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, belirlenmiş performans lerine göre oluşturulmuş tablolar ve grafikler kullanılmıştır. D-EHS'nin denetim performansını değerlendirebilmek ve kıyaslayabilmek için G-EHS'den elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu sebeple, G-EHS'nin konum denetimi çalışmaları iki farklı denetleyiciyle gerçekleştirilmiştir. D-EHS için ise DDQN denetleyici tabanlı üç farklı yaklaşım kullanılmıştır. G-EHS ve D-EHS için yapılan değerlendirme ve karşılaştırmalarda deneysel verilerden yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan denetleyicilerin tamamında basamak, sinüs ve rampa sinyallerinin birleşiminden oluşan çoklu konum referansı kullanılmıştır. Detaylı bir öngörü sunabilmek amacıyla, denetleyicilerin performansları değerlendirilirken her sinyal için ayrı ayrı performans değeri hesaplanmıştır. Bununla beraber, takip hatasının mutlak değeri alınarak ulaşılan azami değer de ilgili tabloda sunulmuştur. Basamak konum referansı için azami değer yerine aşma miktarı verilmiştir.

4.1. G-EHS'nin Konum Denetimi

4.1.1. PID Denetleyicinin Değerlendirilmesi

PID denetleyiciyle gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. PID denetleyici ile çoklu konum referansının deneysel takip performansı

Referans Türü	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]
Basamak	1,3104	2,14
Rampa	0,1003	0,42
Sinüs	0,1023	0,21
Çoklu	0,6051	2,14

PID denetleyici en iyi denetim performansını ± 1 cm/s ve ± 2 cm/s olmak üzere 4 farklı hız değeri kullanılarak oluşturulan rampa konum referansında göstermiştir. Değişken

hız değerlerine ve görece yumuşak hız geçişlerine sahip sinüs konum referansında da rampa konum sinyaline oldukça yakın performans elde edilmiştir. En kötü denetim performansı ise basamak konum referansında ortaya çıkmıştır. Takip hatası RMS değerinin diğer çalışmalardan daha yüksek olmasının önemli bir sebebi 2,14 cm olarak ölçülen aşmadır.

4.1.2. DDPG Denetleyicinin Değerlendirilmesi

DDPG denetleyici yapısı itibariyle, farklı karakteristiklere sahip sinyallerin, örneğin çoklu konum referansı gibi, takip edilmesi gerektiği durumlarda daha etkili çözümler sunmaktadır. DDPG denetleyici ile gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13. DDPG denetleyici ile çoklu konum referansının deneysel takip performansı

Referans Türü	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]
Basamak	1,0781	0,09
Rampa	0,0581	0,29
Sinüs	0,0609	0,16
Çoklu	0,4952	0,29

DDPG denetleyici basamak, rampa ve sinüs konum referanslarında azami takip hatasını 3 mm altında tutmuştur. Takip hatası RMS değeri olarak denetim performansı değerlendirildiğinde, en iyi denetim performansının rampa konum referansında ortaya çıktığı görülmektedir. PID çalışmasına benzer biçimde, ikinci en iyi performans sinüs konum referansında elde edilmiştir.

4.1.3. PID ve DDPG Denetleyicilerin Kıyaslanması

G-EHS üzerinde gerçekleştirilen referans konum takibi çalışmasında kullanılan PID ve DDPG denetleyicilerin performansını gösterir değerler Tablo 14'te yer almaktadır. Sonuçlar, tüm referans türlerinde DDPG denetleyicinin, PID denetleyiciye kıyasla daha üstün konum takip sonuçları elde ettiğini göstermektedir. Özellikle, basamak konum

referansında DDPG denetleyici, takip hatası RMS değerinde %17,73'lük bir azalma sağlamıştır. RMS değerine paralel olarak, aşma miktarı da %95 oranında azalmıştır. Benzer iyileşme diğer konum referanslarının takibinde de gözlenmiştir. Sinüs ve rampa konum referanslarında takip hatasının RMS değeri, sırasıyla, %40,47 ve %42,07 oranında azalmıştır.

Tablo 14. PID ve DDPG denetleyicilerinin konum takip performansının karşılaştırılması

Referans Türü	PID Denetleyici		DDPG Denetleyici		Takip hatası RMS % değişim
	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]	
Basamak	1,3104	2,14	1,0781	0,09	17,73
Rampa	0,1003	0,42	0,0581	0,29	42,07
Sinüs	0,1023	0,21	0,0609	0,16	40,47
Çoklu	0,6051	2,14	0,4952	0,29	18,16

4.2. D-EHS'nin Konum Denetimi

4.2.1. Tek DDQN Denetleyicinin Değerlendirilmesi

Tek DDQN denetleyici ile D-EHS'nin konum denetiminde elde edilen takip hatası RMS değerleri ve azami takip hataları Tablo 15'te verilmiştir

Tablo 15. Tek DDQN denetleyici ile çoklu konum referansının deneysel takip performansı

Referans Türü	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]
Basamak	1,2531	0,31
Rampa	0,1941	0,66
Sinüs	0,1636	0,72
Çoklu	0,5883	0,72

DDQN denetleyici, sinüs konum referans takibinde en düşük takip hatası RMS değerine ulaşmıştır. Rampa konum referansında elde edilen takip hatası RMS değeri, sinüs takip referansından daha yüksektir. Buna karşın, azami takip hatası değeri rampa konum referans takibinde daha küçüktür. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, denetleyicinin sinüs konum referansı takibini genel olarak düşük hata ile gerçekleştirdiğini ve az sayıda noktada takip hatasının anlık olarak arttığı söylenebilir. Bununla beraber, rampa konum referansı sırasında ortaya çıkan takip hatası değerlerinin, sinüs konum referansı takibine göre, daha geniş bir aralıkta sürekli dalgalandığı ifade edilebilir.

4.2.2. Çoklu DDQN Denetleyicinin Değerlendirilmesi

Çoklu DDQN denetleyici ile gerçekleştirilen deneysel takip çalışmasından elde edilen sonuçlar takip hatasının RMS değeri ve azami takip hatası türünden Tablo 16’da sunulmuştur.

Tablo 16. Çoklu DDQN denetleyici ile çoklu konum referansının deneysel takip performansı

Referans Türü	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]
Basamak	1,0948	0,02
Rampa	0,1091	0,38
Sinüs	0,0899	0,26
Çoklu	0,5133	0,38

Rampa ve sinüs konum referansları üzerinde yapılan incelemede, verilen takip hatası RMS ve azami takip hatası değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Çoklu DDQN denetleyici, en düşük takip hatası RMS değerini sinüs konum referansı takibinde elde etmiştir. Ayrıca, dikkat çeken bir diğer husus, basamak konum referansı takibindeki aşma miktarıdır. Ölçülen 0,02 cm değeri aynı zamanda deneysel çalışmalarda kullanılan lazer mesafe sensörünün okuyabileceği en küçük mesafe değeridir. Diğer bir deyişle, çoklu DDQN denetleyici sıfır veya sıfıra yakın aşma değeri ile basamak referansını başarıyla takip edebilmiştir.

4.2.3. Deneysel Eğitim ile İyileştirilen Çoklu DDQN Denetleyicinin Değerlendirilmesi

Deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin farklı konum referanslarında elde ettiği takip performansı ve azami takip hatası Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. Deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin çoklu konum referansı deneysel takip performansı

Referans Türü	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]
Basamak	1,0446	0,10
Rampa	0,0925	0,44
Sinüs	0,0634	0,19
Çoklu	0,4821	0,44

Denetleyici en iyi takip performansını değişken hız değerleri içeren sinüs konum referansı takibinde elde etmiştir. Sürekli değişen hız değerine rağmen takip esnasında azami takip hatası 0,19 cm olarak ölçülmüştür. 4 farklı hız değerinden oluşan rampa konum referansında ise denetleyici 0,0925 cm ile ikinci en iyi takip hatası RMS değerine ulaşmıştır. Son olarak, denetleyici basamak konum referansını %2,5 aşma ile takip etmiştir.

4.2.4. DDQN Tabanlı Denetleyicilerin Kıyaslanması

D-EHS ile gerçekleştirilen konum takibi çalışmalarında kullanılan denetleyicilerin başarımı bu kısımda kıyaslanmıştır. Tek DDQN, çoklu DDQN ve deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicilerinin karşılaştırılması Tablo 18’de verilmiştir. Basamak, rampa ve sinüs konum referanslarının takibinde elde edilen başarımlar incelendiğinde, deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici en iyi değerleri sunmuştur. İkinci sırada ise basamak konum referansı takibini %0,5 aşma ile gerçekleştiren çoklu DDQN denetleyici bulunmaktadır.

Tablo 18. DDQN tabanlı denetleyicilerin konum takip performanslarının karşılaştırılması

		Basamak	Rampa	Sinüs	Çoklu
Tek DDQN denetleyici	Takip hatası RMS [cm]	1,2531	0,1941	0,1636	0,5883
	Azami takip hatası [cm]	0,31	0,66	0,72	0,72
Çoklu DDQN denetleyici	Takip hatası RMS [cm]	1,0948	0,1091	0,0899	0,5133
	Azami takip hatası [cm]	0,02	0,38	0,26	0,38
Deneyssel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici	Takip hatası RMS [cm]	1,0446	0,0925	0,0634	0,4821
	Azami takip hatası [cm]	0,1	0,44	0,19	0,44

Başarım açısından ilk iki sıradaki denetleyiciler kıyaslandığında, deneysel eğitimle iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici rampa konum referansı takibinde %52 daha iyi performans göstermiştir. Sinüs konum referansında ise bu değeri %61'e kadar yükseltmiştir.

4.3. G-EHS ve D-EHS'nin Konum Denetim Performansının Kıyaslanması

G-EHS'nin konum takibinde en düşük takip hatası değerine DDPG denetleyici ile ulaşılmıştır. D-EHS'de ise deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyiciyle ulaşılmıştır. Bu sebepten dolayı, G-EHS ve D-EHS'nin konum takip performansı yönünden kıyaslanması için belirtilen denetleyiciler tercih edilmiştir (Tablo 19). G-EHS için yürütülen çalışmaların tamamında örnekleme zamanı 0,01 saniye olarak kullanılmıştır. Buna karşın, deneysel sistemde kullanılan aç-kapa popet valflerin tepki süresinin kısıtlayıcı etkisi sebebiyle D-EHS'nin örnekleme zamanı 0,05 saniye olarak seçilmiştir.

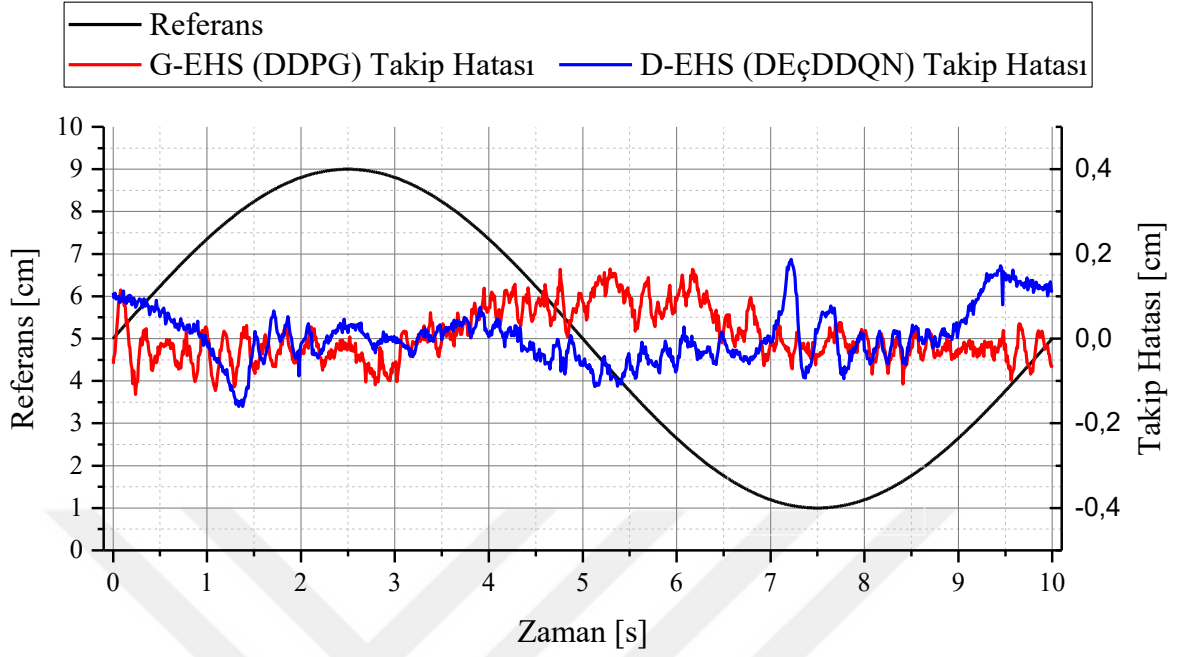
Tablo 19'da yer alan değerler incelendiğinde, yüksek örnekleme zamanına rağmen D-EHS performansının çoğunlukla G-EHS ile kıyaslanabilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Değişken hız değerlerinden oluşan sinüs konum referansı takibinde D-EHS, G-EHS'nin takip performansına yaklaşmıştır. İki çalışmada da takip hatası $\pm 0,2$ cm aralığını aşmamıştır (Şekil 69). Basamak konum referansında ise G-EHS'yi geçmeyi

başarmıştır. G-EHS istenen konum referansına daha önce ulaşmasına rağmen kararlı hal hatası nedeniyle takip hatası RMS değeri 1,0781 cm olmuştur. Buna karşın, D-EHS belirlenen konum değerine 0,4 saniye geç ulaşmasına rağmen 1,0446 cm ile daha düşük takip hatası RMS değerine ulaşmıştır. Burada belirleyici etken, D-EHS'nin basamak konum referansında sıfıra yakın kararlı hal hatası sergilemesi olmuştur. D-EHS'nin en kötü performans sergilediği konum referansı ise rampa olmuştur. Deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ve D-EHS ile gerçekleştirilen çalışma yakından incelendiğinde, azami takip hatasının ani yön değişim noktalarında meydana geldiği görülmektedir (Şekil 70). Çalışmanın diğer kısımlarında takip hatası, DDPG denetleyiciye benzer şekilde, çoğunlukla $\pm 0,1$ cm aralığında kalmıştır. Belirtilen aralıkta meydana gelen azami takip hatasının nedeni ise yüksek örnekleme zamanıdır. DDQN tabanlı denetleyici takip hatasının artmaya başladığı ilk andan itibaren yönlendirme valfi durumunu gerekli şekilde değiştirmiştir. Benzer biçimde, DAKB durumlarını da bu doğrultuda düzenlemiştir. Örnekleme zamanı kaynaklı kısıtlar nedeni ile ani değişim noktalarında takip hatası DDPG denetleyiciyle erişilen düzeye indirgenememiştir.

Tablo 19. DDPG ve deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicilerinin konum takip performansının karşılaştırılması

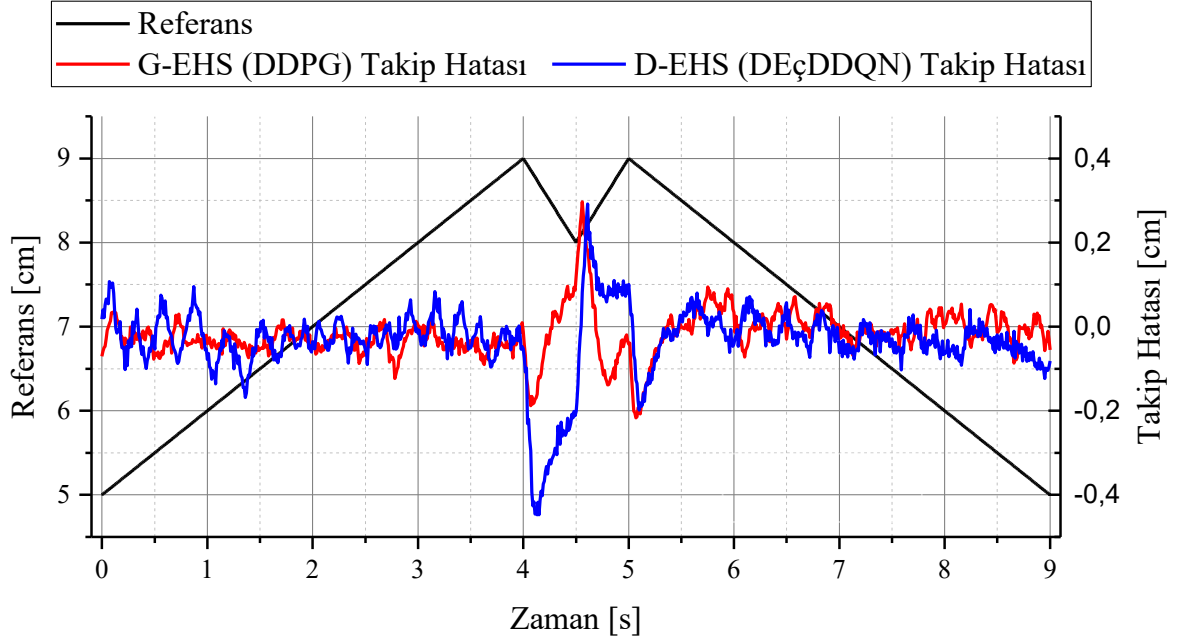
	G-EHS		D-EHS		Takip hatası RMS % değişim
	DDPG Denetleyici		Deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici		
Referans Türü	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]	
Basamak	1,0781	0,09	1,0446	0,10	3,11
Rampa	0,0581	0,29	0,0925	0,44	-59,21
Sinüs	0,0609	0,16	0,0634	0,19	-4,11
Çoklu	0,4952	0,29	0,4821	0,44	2,64

G-EHS ve D-EHS: Sinüs Konum Referansı Takibi



Şekil 69. G-EHS'nin ve D-EHS'nin sinüs konum referansı takip performanslarının karşılaştırılması

G-EHS ve D-EHS: Rampa Konum Referansı Takibi



Şekil 70. G-EHS'nin ve D-EHS'nin rampa konum referansı takip performanslarının karşılaştırılması

4.4. Eğitim Dışı Koşulların Deneysel Eğitim ile İyileştirilen Çoklu DDQN Denetleyicinin Takip Performansına Etkisi

D-EHS'nin konum denetimi için deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Eğitimde belirlenen koşullar altında D-EHS, G-EHS ile kıyaslanabilecek düzeyde konum denetim performansı sergilemiştir. Eğitim dışı koşullarda D-EHS'nin performansının hangi oranda değişeceğini belirlemek için farklı çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalarda elde edilen değerler Tablo 20' de verilmiştir.

Tablo 20. Deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyicinin eğitim dışı koşullardaki takip performansı

Referans Türü	Koşul	Takip hatası RMS [cm]	Azami takip hatası [cm]	Takip Hatası RMS % değişimi
Sinüs	Eğitim koşulları	0,0634	0,19	-
	a1 valfi arızalı	0,1243	0,37	-96,06
	b1 valfi arızalı	0,1238	0,38	-95,27
	a2 valfi arızalı	0,0894	0,24	-40,01
	b2 valfi arızalı	0,7369	1,62	-1062,30
	a1 ve b1 valfleri arızalı	0,1313	0,37	-107,10
	a1 ve b2 valfleri arızalı	0,1866	0,44	-194,32
	a2 ve b1 valfleri arızalı	0,1248	0,37	-96,85
	a2 ve b2 valfleri arızalı	0,1921	0,46	-203,00
	15 bar besleme basıncı	0,1731	0,41	-173,03
	25 bar besleme basıncı	0,0737	0,28	-16,25
	Farklı frekans 0,05 Hz	0,0409	0,12	35,49
	Farklı frekans 0,15 Hz	0,2773	0,53	-337,38
5.derece Polinom	Farklı referans	0,0395	0,1	37,7

Çalışmaların tamamına yakını 4 cm genlikli ve 0,1 Hz frekansına sahip sinüs konum referansı ile yürütülmüştür. Tabloda eğitim dışı durum 'koşul' sütunu altında belirtilmiştir. Örneğin, eğitim dışı koşullarda gerçekleştirilen iki çalışmada referans sinyalinin türü ve

genliği sabit kalmasına rağmen frekans değeri 0,05 Hz ve 0,15 Hz olarak değiştirilmiştir. Eğitim koşulları dahilinde sinüs konum referansı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmayla ilgili değerler tablonun ilk satırında belirtilmiştir. Eğitim dışı koşullar için takip performansı takip hatasının RMS değeri olarak belirlenmiş ve eğitim şartlarında elde edilen takip hatası RMS değerine göre yüzdelik değişimi hesaplanmıştır. Hesaplanan değer tablonun son sütununda verilmiştir.

Eğitim dışı koşullarda gerçekleştirilen çalışmaların değerlendirilmesine, tabloda verilen sıraya uygun olarak, valf arızası ile başlanmıştır. Valf arızası durumlarında D-EHS'nin konum takip performansının büyük oranda azalmaktadır. Tek valf arızası durumları için takip hatası çoğunlukla $\pm 0,4$ cm aralığında kalmaktadır. Kullanım sıklığı az olan a_2 valfinde bu aralık $\pm 0,24$ cm'ye kadar indirgenmektedir. Arızalı valfin kullanım sıklığı yüksek olduğu durumlarda takip performansı da benzer biçimde azalmaktadır. En yüksek kullanım sıklığına sahip b_2 valfi bozulduğunda takip hatası RMS değerinin 11 kat artması bu ifadeyi doğrulamaktadır. D-EHS'nin takip performansı iki valfin arızalanması durumunda dahi $\pm 0,4$ cm aralığında kalabilmektedir. Valf arızası durumunda G-EHS'nin yönlendirme biriminin tamamının değiştirilmesi gerekmektedir. D-EHS'de ise arızalı valf veya valflerin değiştirilmesi yeterli olmaktadır. Değiştirilmesi gereken aç-kapa popet valflerin oransal valflerden daha düşük maliyetli olması D-EHS'yi önemli kılan bir unsurdur. EHS çalışmalarında karşılaşılabilen diğer bir durum ise besleme basıncındaki değişimdir. Tez kapsamında normal şartlar altında gerçekleştirilen çalışmalarda azami besleme basıncı değeri 20 bar olarak belirlenmiştir. Eğitim dışı koşulların değerlendirildiği çalışmalarda ise azami değerin 15 bar ve 25 bar olmasının takip performansı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. 20 bar besleme basıncında gerçekleştirilen sinüs konum referansı takibinde hidrolik piston üzerine etkiyen kuvvetin RMS değeri 1548,3 N'dur. Bu değer, 15 bar besleme basıncında 1165,5 N ve 25 bar besleme basıncında 2113,2 N olmaktadır. Düşük besleme basıncında hidrolik piston üzerine etkiyen kuvvetin azalması ile sürtünme kuvveti gibi etmenlerin denetim performansı üzerindeki bozucu etkisi artmıştır. D-EHS'de kullanılan DDQN tabanlı denetleyici eğitilirken etki seviyesi artmış performans bozucu etmenlerle karşılaşmadığı için takip hatası RMS değeri, yaklaşık, 2 kat artmıştır. Besleme basıncının 25 bar'a yükselmesi ile hidrolik pistona etkiyen kuvvet %36 artmıştır. Artan kuvvetle beraber sürtünme kuvvetinin hidrolik pistona etkiyen kuvvete oranı azalmıştır. Buna karşın, kuvvet etkisiyle beraber hidrolik pistonun birim zamanda kat edebileceği mesafe artmıştır. Eğitimde benzer bir durumlar karşılaşmamasına rağmen, denetleyici takip

performansını büyük oranda korumayı başarmıştır. Son olarak, D-EHS ve DDQN tabanlı denetleyicinin farklı konum referanslarındaki performansı deneysel çalışmayla sınanmıştır. Sinüs konum referansının frekansı 0,15 Hz'e çıkarıldığında hidrolik pistonun birim zamanda 0,1 Hz sinüs sinyaline göre daha fazla mesafe kat etmesi gerekmektedir. Denetleyici eğitimde kullanılan sinüs konum referans ile $\pm 2,51$ cm/s aralığında değişen hız değerleri için eğitilmiştir. Yani, 4 cm genlikli ve 0,15 Hz frekansa sahip sinüs konum referansını takip etmek için ihtiyaç duyulan $\pm 3,78$ cm/s aralığındaki hız değerlerinin büyük bir kısmı için eğitimsizdir. Bunun sonucunda, ilgili konum referansının takibinde takip hatası RMS değeri normal değer 4 katından daha fazla artmıştır. Yapılan açıklamaya göre denetleyicinin tecrübe ettiği aralıkta yer alan konum referanslarında performans kaybının en düşük seviyede olması veya olmaması beklenmektedir. Bu öneriyi sınamak için öncelikle eğitim dışı konum referansı olarak 4 cm genlikli ve 0,05 Hz frekansına sahip sinüs sinyali seçilmiştir. İlgili sinyalin hız değerleri $\pm 1,25$ cm/s aralığında değişmektedir. Gerçekleştirilen deneysel takip çalışması incelendiğinde takip hatası RMS değerinin 0,0409 cm olduğu görülmektedir. Bu değer normal koşullar altında elde edilen 0,0634 cm'den %35,49 daha düşüktür. Seçilen diğer eğitim dışı konum referansı ise 5.derece polinomla oluşturulmuştur. İlgili konum referansının hız değerleri ise $\pm 2,5$ cm/s aralığında değişmektedir. İlgili konum referansının takibinde takip hatası RMS değeri 0,0395 cm olarak ölçülmüştür. Elde edilen RMS değeri eğitim şartları altında elde edilenden %37,7 daha düşüktür. Sonuç olarak, denetleyicinin tecrübe ettiği hız sınırları göz önünde bulundurularak seçilen konum referanslarında takip performansı kayda değer ölçüde artmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, G-EHS'ye karşı enerji verimliliği ve maliyet konularında üstünlük sağlayan D-EHS'in konum denetimi için çalışmalar yürütülmüştür. D-EHS'nin en önemli kıstaslarından birisi işlevselliğinin G-EHS ile kıyaslanabilir düzeyde olmasıdır. Bundan dolayı, aynı konum çalışmaları G-EHS ile de gerçekleştirilmiştir. D-EHS için denetleyici tasarım süreci uğraştırıcı ve karmaşık aşamalar içermektedir. Bu durum ise D-EHS ile yapılan çalışmalarda dar boğaza neden olmaktadır. Diğer taraftan veriye dayalı bir denetim yöntemi olan pekiştirme öğrenme tabanlı denetleyiciler D-EHS denetimi için uygun bir yaklaşım olmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme ile karmaşık denetleyici tasarım süreci yerini yüksek işlem gücü ihtiyacına bırakmaktadır. Günümüzde işlemcilerin (*İng.* Central Processing Unit, CPU) kapasitesinin artması ve grafik işlemcilerin (*İng.* Graphics Processing Unit, GPU) veri işlemede aktif olarak kullanılmasıyla beraber pekiştirmeli öğrenme için gereken işlem gücünü temin etmek bir sorun olmamaktadır. Gerçekleştirilen çalışmaların tamamının son kullanıcıya sunulan düzeyde bir CPU ile yürütüldüğü göz önünde bulundurulduğunda, pekiştirmeli öğrenmenin denetleyici tasarımını ne ölçüde kolaylaştırdığı anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında öncelikle G-EHS ve D-EHS'nin matematik modeli elde edilmiştir. Elde edilen matematik modeli ve PSO yaklaşımı kullanılarak PID denetleyici kazançları belirlenmiştir. Konum referansının farklı karakterdeki sinyallerden oluşması nedeniyle PID denetleyici bütün sinyallerde istenen başarıyı gösterememiştir. Bunun üzerine, bir pekiştirmeli öğrenme yöntemi olan DDPG denetleyici G-EHS'nin konum denetimi için eğitilmiştir. Benzer aşamalar D-EHS için de tekrarlanmıştır. Bu amaçla, süreksiz eylem uzayında etkinliği ile bilinen DDQN denetleyicinin hiper parametre seçimi ve eğitimi gerçekleştirilmiştir. D-EHS'nin konum denetimi için yapılan ilk çalışmada tek DDQN denetleyici kullanılmıştır. D-EHS'de bulunan 8 adet aç-kapa popet valf ve 1 adet yönlendirme valfi sebebiyle seçilebilecek 451 farklı valf kombinasyonu ortaya çıkmaktadır. Eğitim sürecini uzatan bu durumu ortadan kaldırmak için D-EHS'nin yönlendirme biriminde bulunan DAKB A, DAKB B ve yönlendirme valfi için ayrı DDQN denetleyiciler tasarlanmış ve eğitilmiştir. Böylece, bir örnekleme zamanı içerisinde değerlendirilen valf kombinasyonu sayısı 451'den 35'e düşürülmüştür. Eğitimin hızlı ilerlemesiyle aynı işlem gücüyle daha kısa sürede farklı hiper parametrelerin denenmesi ve uygun değerlerin seçilmesi mümkün olmuştur. İşlem gücü gereksinimi

açısından daha verimli hale gelen çoklu DDQN denetleyici deney düzeneği kullanılarak iyileştirilmiştir. Bunun için, matematik modeli üzerinde eğitilen çoklu DDQN denetleyici, deney düzeneğinde gerçek zamanlı eğitim ile iyileştirilmiştir.

D-EHS’de kullanılan DDQN tabanlı denetleyicinin deney düzeneğinde iyileştirilmesi hususu denetim performansı açısından D-EHS’yi öne geçiren bir unsurdur. Buna karşın, D-EHS’nin örnekleme zamanı, fiziksel kısıtlar nedeniyle, G-EHS’den 5 kat daha büyüktür. Aradaki bu fark bariz bir biçimde D-EHS’nin performansını kötüleştirmektedir. Deney düzeneğinde gerçekleştirilen eğitimle bu durumun bertaraf edilmesi ve EHS’lerin eşit biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak, G-EHS (DDPG denetleyici) ve D-EHS (deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici) ile yürütülen konum denetim çalışmalarında D-EHS’nin G-EHS’ye yakın ve bazı durumlarda G-EHS’den daha iyi konum denetim performansına ulaştığı görülmüştür. Deneysel eğitim ile iyileştirilen çoklu DDQN denetleyici, D-EHS’nin dinamiklerini öğrenerek farklı karakteristiklerdeki konum referanslarını başarılı bir şekilde takip edecek valf kombinasyonlarını belirlemeyi başarmıştır. Eğitim dışı koşullar altında (Valf arızası, değişken besleme basıncı ve farklı konum referansları) dahi, önerilen denetleyici D-EHS’nin takip performansını belli bir seviyeye kadar koruyabilmiştir.

Sonuç olarak, D-EHS, sunduğu avantajlar sayesinde, G-EHS'nin yerini alabilecek yetkinliğe sahip olduğu deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Bu tez çalışması sonucunda, konum bilgisinin dışında herhangi bir ek girişe ihtiyaç duymayan bir denetleyici başarıyla tasarlanmıştır. Bu sayede, G-EHS ile benzer kontrol performansına ulaşırken basınç sensörü gibi ek maliyet unsurlarından kaçınılmıştır.

6. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında D-EHS ve görece yeni bir denetim yaklaşımı olan pekiştirmeli öğrenmenin yetkinlikleri, belirlenen "eğitim koşulları" dahilinde ve konum referans takibi performansı üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, D-EHS'in ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyicilerin yeterliliğini göstermiş, ancak aynı zamanda üzerinde düşünülmesi gereken diğer önemli konuları da ortaya koymuştur. Bu konular şunlardır:

- D-EHS içinde bulunan DAKB'lerin sürekli olmayan yapısı, her DAKB durumu değiştiğinde ani basınç dalgalanmalarına yol açmaktadır. Bu dalgalanmalar, denetim performansını olumsuz etkileyebilir ve uzun vadede sisteme yapısal zarar verebilir. Bu nedenle, sistem basıncını düzenlemek için ek maliyet getirmeyen ve denetim performansını asgari düzeyde etkileyen çözümler bulunmalıdır.
- Literatür incelendiğinde, D-EHS'lerde aynı valf sayısı ve dizilimine sahip DAKB'lerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Farklı valf sayılarına ve dizilimlerine sahip DAKB'lerin bir arada kullanıldığı senaryoların, D-EHS performansı üzerindeki etkisi araştırılmalıdır.
- Bu çalışmada önerilen ve eğitilen DDQN tabanlı denetleyici için seçilen durum verileri, anlık sistem bilgilerini içermektedir. Durum verilerinin geçmişe dönük bilgileri (t , $t-1$, $t-2$, ..., $t-n$) içerecek şekilde düzenlenmesinin, D-EHS performansı üzerindeki etkisi araştırılmalıdır.

Bu konuların araştırılması, D-EHS'in daha iyi performans göstermesi ve daha etkili bir şekilde kullanılabilmesi için önemli katkılar sağlayabilir.

7. KAYNAKLAR

- Abuowda, K., Okhotnikov, I., Noroozi, S., Godfrey, P., & Dupac, M. (2020). A review of electrohydraulic independent metering technology. *ISA Transactions*, 98, 364–381. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.057>
- Armoogum, S., & Li, X. (2019). Big Data Analytics and Deep Learning in Bioinformatics With Hadoop. İçinde *Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems* (ss. 17–36). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816718-2.00009-9>
- Armstrong-Hélouvry, B., & de Wit, C. C. (1995). Friction Modeling and Compensation. İçinde *The Control Handbook*. CRC Press.
- Bayrak, A., Tatlicioglu, E., & Zergeroglu, E. (2018). Backstepping control of electrohydraulic arm. *2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018*, (October), 25–27. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751833>
- Boaventura, T., Buchli, J., Semini, C., & Caldwell, D. G. (2015). Model-Based Hydraulic Impedance Control for Dynamic Robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6), 1324–1336. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2482061>
- Borghi, M., Zardin, B., Pintore, F., & Belluzzi, F. (2014). Energy savings in the hydraulic circuit of agricultural tractors. *Energy Procedia*, 45, 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.038>
- Boström, P., Linjama, M., Morel, L., Siivonen, L., & Marina, W. (2007). *Design and validation of digital controllers for hydraulics systems. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 21-23, 2007*, (TUCS Techn). Tampere, Finland: Turku Centre for Computer Science (TUCS). Tarihinde adresinden erişildi <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.6051&rep=rep1&type=pdf>
- Breidi, F., Helmus, T., & Lumkes, J. (2016). The impact of peak-and-hold and reverse current solenoid driving strategies on the dynamic performance of commercial cartridge valves in a digital pump/motor. *International Journal of Fluid Power*, 17(1), 37–47. <https://doi.org/10.1080/14399776.2015.1120138>
- Bu, F., & Yao, B. (2000). Observer based coordinated adaptive robust control of robot manipulators driven by single-rod hydraulic actuators. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3(April), 3034–3039. <https://doi.org/10.1109/robot.2000.846488>
- Činkelj, J., Kamnik, R., Čepon, P., Mihelj, M., & Munih, M. (2010). Closed-loop control of hydraulic telescopic handler. *Automation in Construction*, 19(7), 954–963. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.012>

- Coskun, M. Y., & İtik, M. (2023). Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system. *ISA Transactions*, 139(xxxx), 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.04.005>
- Coskun, M. Y., & İTİK, M. (2022). Elektrohidrolik bir sistemin pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyici ile konum denetiminin gerçekleştirilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 280–288. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1163241>
- Cura, T. (2012). A particle swarm optimization approach to clustering. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 1582–1588. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.123>
- Dell'Amico, A., Carlsson, M., Norlin, E., & Sethson, M. (2013). Investigation of a Digital Hydraulic Actuation System on an Excavator Arm. *Proceedings from the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, June 3-5, 2013, Linköping, Sweden*, 92, 505–511. <https://doi.org/10.3384/ecp1392a50>
- Ding, R., Xu, B., Zhang, J., & Cheng, M. (2016). Bumpless mode switch of independent metering fluid power system for mobile machinery. *Automation in Construction*, 68, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.006>
- Ding, R., Zhang, J., Xu, B., & Cheng, M. (2018). Programmable hydraulic control technique in construction machinery: Status, challenges and countermeasures. *Automation in Construction*, 95(38), 172–192. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.001>
- Ding, R., Zhang, J., Xu, B., Cheng, M., & Pan, M. (2019). Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes. *Energy Conversion and Management*, 188(January), 447–461. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.023>
- Eriksson, B., & Palmberg, J. (2011). Individual metering fluid power systems: challenges and opportunities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 225(2), 196–211. <https://doi.org/10.1243/09596518JSCE1111>
- Fallahi, M., Zareinejad, M., Baghestan, K., Tivay, A., Rezaei, S. M., & Abdullah, A. (2018). Precise position control of an electro-hydraulic servo system via robust linear approximation. *ISA Transactions*, 80(June), 503–512. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.06.002>
- Fujimoto, S., van Hoof, H., & Meger, D. (2018). Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods. *35th International Conference on Machine Learning, ICML 2018*, 4, 2587–2601. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1802.09477>
- Guo, Q., Yu, T., & Jiang, D. (2017). Saturated Adaptive Control of an Electrohydraulic Actuator with Parametric Uncertainty and Load Disturbance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), 7930–7941. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2694352>

- Haarnoja, T., Zhou, A., Hartikainen, K., Tucker, G., Ha, S., Tan, J., ... Levine, S. (2018). Soft Actor-Critic Algorithms and Applications. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1812.05905>
- Huova, M., Laamanen, A., & Linjama, M. (2010). Energy efficiency of three-chamber cylinder with digital valve system. *International Journal of Fluid Power*, 11(3), 15–22. <https://doi.org/10.1080/14399776.2010.10781011>
- Huova, M., Linjama, M., & Huhtala, K. (2013). Energy efficiency of digital hydraulic valve control systems. *SAE Technical Papers*, 9. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2347>
- Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., & Petrov, P. (2012). Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 13(12), 926–942. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1100318>
- Jelali, M. and Kroll, A. (2004). *Hydraulic servo-systems, modelling, identification and control*. *Hydraulic servo-systems, modelling, identification and control*. London: Springer- Verlag.
- Kalaifarassan, G., & Krishnamurthy, K. (2019). Digital hydraulic single-link trajectory tracking control through flow-based control. *Measurement and Control (United Kingdom)*. <https://doi.org/10.1177/0020294019842889>
- Kalyoncu, M., & Haydim, M. (2009). Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage. *Mechatronics*, 19(6), 847–858. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.04.010>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, 4, 1942–1948 c.4. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Ketonen, M., & Linjama, M. (2019). Digital Hydraulic IMV System in an Excavator – First Results. İçinde *The Fourteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Tampere, Finland.
- Kim, W., Won, D., Shin, D., & Chung, C. C. (2012). Output feedback nonlinear control for electro-hydraulic systems. *Mechatronics*, 22(6), 766–777. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.03.008>
- Klinger, T., Andreeva, T., Bozhenkov, S., Brandt, C., Burhenn, R., Buttenschön, B., ... Zuin, M. (2019). Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation. *Nuclear Fusion*, 59(11), 112004. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab03a7>
- Lillicrap, T. P., Hunt, J. J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y., ... Wierstra, D. (2015). Continuous control with deep reinforcement learning. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1509.02971>
- Linjama, M., Huova, M., Boström, P., Laamanen, A., Siivonen, L., Morel, L., ... Vilenius, M. (2007). Design and implementation of energy saving digital hydraulic control system. İçinde *The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power* (ss.

341–359).

- Linjama, M., Huova, M., & Huhtala, K. (2016). Model-based force and position tracking control of an asymmetric cylinder with a digital hydraulic valve. *International Journal of Fluid Power*, 17(3), 163–172. <https://doi.org/10.1080/14399776.2016.1185876>
- Linjama, M., Koskinen, K. T., & Vilenius, M. (2003a). Accurate trajectory tracking control of water hydraulic cylinder with non-ideal on/off valves. *International Journal of Fluid Power*, 4(1), 7–16. <https://doi.org/10.1080/14399776.2003.10781151>
- Linjama, M., Laamanen, A., & Vilenius, M. (2003b). Is it time for digital hydraulics? İçinde *The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power* (s. 36).
- Linjama, M., Paloniitty, M., Tiainen, L., & Huhtala, K. (2015). Mechatronic Design of Digital Hydraulic Micro Valve Package. *Procedia Engineering*, 106(June), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.013>
- Mahor, A., Prasad, V., & Rangnekar, S. (2009). Economic dispatch using particle swarm optimization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2134–2141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.007>
- Mattila, J., Koivumäki, J., Caldwell, D. G., & Semini, C. (2017). A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2), 669–680. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2668604>
- Merritt, H. E. (1967). *Hydraulic Control Systems*. John Wiley & Sons.
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., & Riedmiller, M. (2013). Playing Atari with Deep Reinforcement Learning, 1–9. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1312.5602>
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., ... Hassabis, D. (2015a). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature14236>
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., ... Hassabis, D. (2015b). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature14236>
- Onat, C., Daskin, M., & Turan, A. (2017). Gain scheduling linear model of an electro-hydraulic actuator. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 7(3), 301–306. <https://doi.org/10.11121/ijocta.01.2017.00487>
- Ozalp, A. F., Polat, R., Cetinkaya, C., & Cetin, M. H. (2021). Investigation of a Digital Hydraulic Valve Operated by Servo Motors. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(6), 7957–7963. <https://doi.org/10.48084/etasr.4598>
- Sarkar, B. K., Mandal, P., Saha, R., Mookherjee, S., & Sanyal, D. (2013). GA-optimized feedforward-PID tracking control for a rugged electrohydraulic system design. *ISA*

- Transactions*, 52(6), 853–861. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.07.008>
- Shaer, B., Kenné, J.-P., Kaddissi, C., & Fallaha, C. (2018). A chattering-free fuzzy hybrid sliding mode control of an electrohydraulic active suspension. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(1), 222–238. <https://doi.org/10.1177/0142331216652468>
- Sibaliya, T. V. (2019). Particle swarm optimisation in designing parameters of manufacturing processes: A review (2008–2018). *Applied Soft Computing Journal*, 84, 105743. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105743>
- Silver, D., Lever, G., Heess, N., Degris, T., Wierstra, D., & Riedmiller, M. (2014). Deterministic policy gradient algorithms. *31st International Conference on Machine Learning, ICML 2014*, 1, 605–619.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement Learning: An Introduction* (Second). The MIT Press. Tarihinde adresinden erişildi <http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html>
- Uhlenbeck, G. E., & Ornstein, L. S. (1930). On the Theory of the Brownian Motion. *Physical Review*, 36(5), 823–841. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.36.823>
- URL-1. (2023, 18 Haziran). Tek sürgülü 4/3 oransal valfin kesit görünümü: <https://www.akder.org/tr/makale/239-4-3-yoen-valfi-nedir> adresinden alınmıştır.
- van Hasselt, H., Guez, A., & Silver, D. (2015). Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning. *30th AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2016*, 2094–2100. Tarihinde adresinden erişildi <http://arxiv.org/abs/1509.06461>
- Vázquez, C., Aranovski, S., Freidovich, L., & Fridman, L. (2014). Second order sliding mode control of a mobile hydraulic crane. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2015-Febru*(February), 5530–5535. <https://doi.org/10.1109/CDC.2014.7040254>
- Wang, H., Chen, Z., Huang, J., Quan, L., & Zhao, B. (2022). Development of High-Speed On–Off Valves and Their Applications. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00720-5>
- Wang, Y., Mao, M., Chang, L., & D. Hatziaargyriou, N. (2023). Intelligent Voltage Control Method in Active Distribution Networks Based on Averaged Weighted Double Deep Q-network Algorithm. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 11(1), 132–143. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000146>
- Won, D., Kim, W., & Tomizuka, M. (2017). High-gain-observer-based integral sliding mode control for position tracking of electrohydraulic servo systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(6), 2695–2704. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2764110>
- Wos, P., & Dindorf, R. (2015). Modeling and Analysis of the Hydraulic Servo Drive System. İçinde *Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer International Publishing* (ss. 253–262). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26886-6>

- Yao, B., Bu, F., Reedy, J., & Chiu, G. T. C. (2000). Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: Theory and experiments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(1), 79–91. <https://doi.org/10.1109/3516.828592>
- Yao, J., Jiao, Z., Ma, D., & Yan, L. (2014). High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(2), 633–641. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2252360>
- Zhang, Q., Kong, X., Yu, B., Ba, K., Jin, Z., & Kang, Y. (2020). Review and Development Trend of Digital Hydraulic Technology. *Applied Sciences*, 10(2), 579. <https://doi.org/10.3390/app10020579>



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yavuz COŞKUN 2006 yılında Gemlik Celâl Bayar Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra aynı yıl Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı ve 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Gedik Eğitim Vakfı'nın Uluslararası/Avrupa Kaynak Mühendisliği eğitimini tamamlayarak Uluslararası/Avrupa Kaynak Mühendisi ünvanını aldı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2016 yılında mezun oldu. Aynı yıl doktora eğitimine başladı.

Tez kapsamında SCI kapsamında yapılan yayın aşağıda verilmiştir.

Coskun, M. Y., & İtik, M. (2023). Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system. ISA Transactions. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.04.005>