



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DOKTORA TEZİ

SİSMİK İZOLASYON VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ HİBRİT KONTROL SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ

Ayla OCAK

DANIŞMAN
Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

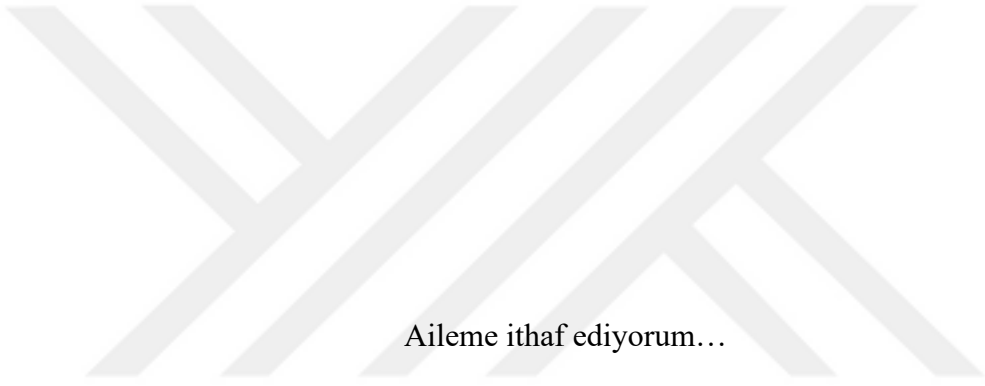
Haziran, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayla OCAK tarafından, Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ danışmanlığında hazırlanan " SİSMİK İZOLASYON VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ HİBRİT KONTROL SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ " başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 26/06/2025 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Sinan Melih NİGDELİ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Ümit IŞIKDAĞ Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Yapı Bilgisi Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Barış SAYIN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret



Aileme ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

SİSMİK İZOLASYON VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ HİBRİT KONTROL SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 2211-C numaralı “TÜBİTAK Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora bursu” kapsamında desteklenmiştir. Bu tez çalışması, Yüksek Öğretim Kurulu'nun (YÖK) “YÖK 100/2000 Doktora projesi” bursları ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Depremler, başta ülkemiz toprakları olmak üzere birçok coğrafyayı etkisi altına alan ve insan yaşamını olumsuz etkileyen çevresel faktörlerin başında gelmektedir. Özellikle yakın fay gibi oldukça yıkıcı etkilere sahip ve yapıda büyük hasarlara yol açan depremlerin yapıdan uzaklaştırılması ihtiyacı, güvenilir yapıların tasarlanması ve gelecek nesillere sürdürülebilir bir yaşam bırakılması için hayati öneme sahiptir. Toplum mühendisleri olarak yaşamı inşa etme görevi inşaat mühendislerindedir. Deprem gibi kuvvetli titreşimlerin önlenmesi, sürdürülebilir ve uzun ömürlü yapılar için elzemdir. Bu tez çalışması kapsamında, yakın fayın yapıdaki etkisini en aza indirmeye yönelik, taban izolasyon sistemleri ve bu sistemlere ek ayarlı sıvı sönümleyici kullanımının katkısı araştırılmış, hibrit kontrol sisteminin optimum tasarım süreci üzerine çalışılarak, makine öğrenmesi ile bu sistemlerin tasarım özelliklerini tahmin eden yapay zekâ modelleri geliştirilmiştir. Tezimde ve akademik araştırmalarımda beni sabırla dinleyen, çalışmaya ve araştırmaya teşvik ederek daima destekçim olan, bir sarraf inceliği ve nezaketiyle yetkin mühendisler yetiştiren, iyi bir gelecek inşa etme ideallerine canı gönülden inandığım ve çalışma azmimi borçlu olduğum kıymetli hocalarım Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ ve Prof. Dr. Sinan Melih NİGDELİ'ye tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Eğitim hayatımda, yapay zekâ çalışmalarım için rehber edindiğim, geniş ufkundan ve ön görüşlerinden ilham aldığım ve üretken tavrına derin saygı duyduğum değerli hocam Prof. Dr. Ümit IŞIKDAĞ'a saygılarımı sunarım. Araştırmalarımda her zaman yanımda olup başarabileceğime inandıran sevgili kardeşim Rabia OCAK'a ve bana daima güvenen, hayattaki başarısından ilham aldığım sevgili kardeşim Muhsin OCAK'a teşekkür ederim. Tüm eğitim hayatım boyunca, beni destekleyerek şefkatini hiç esirgemeyen, okuma azmimi borçlu olduğum sevgili annem İlknur OCAK ve babam Ali OCAK'a tüm samimiyetimle teşekkür ederim. Son olarak tez çalışmamı gerçekleştirmemde, TÜBİTAK kurumunun 2211C-Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora bursu kapsamında sağlamış olduğu destek ve Yüksek Öğretim Kurulu'nun YÖK 100/2000 projesi altında sağladıkları desteklerden ötürü teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2025

Ayla OCAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xv
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
2.1. YAPISAL KONTROL	4
2.2. PASİF KONTROL SİSTEMLERİ	5
2.2.1. Pasif Titreşim Sönümleyiciler.....	5
2.2.1.1. Metalik Sönümleyiciler	6
2.2.1.2. Sürtünme Tipi Sönümleyiciler.....	7
2.2.1.3. Visko-Elastik Sönümleyiciler.....	8
2.2.1.4. Viskoz Sönümleyiciler.....	9
2.2.1.5. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler.....	11
2.2.1.6. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler.....	11
2.2.2. Taban İzolasyon Sistemleri	18
2.2.2.1. Elastomerik Sistemler	20
2.2.2.2. Kaymaya Dayalı Taban İzolasyon Sistemleri	21
2.2.2.3. Yaylı Sistemler	22
2.3. TABAN İZOLASYON SİSTEMLERİNE SÖNÜMLEYİCİ İLAVESİ	23

2.3.1. Sismik İzolasyonlu ve Ayarlı Sıvı Sönümleyicili Sistemler	26
2.4. TABAN İZOLASYON SİSTEMLERİ VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLERİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TASARIMI	28
3. YÖNTEM	30
3.1. OPTİMİZASYON	30
3.1.1. Jaya Algoritması	32
3.1.2. Armoni Arama Algoritması	34
3.2. SİSMİK TABAN İZOLATÖRÜ VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLERLE SİSTEM TASARIMI VE HAREKET DENKLEMLERİ	36
3.3. SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARIN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	40
3.4. SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	42
3.5. MAKİNE ÖĞRENMESİ	44
3.5.1. Denetimli Öğrenme	44
3.5.2. Denetimsiz Öğrenme	45
3.5.3. Yarı Denetimli Öğrenme	45
3.5.4. Pekiştirmeli Öğrenme	46
3.6. MAKİNE ÖĞRENMESİNDE ÖZELLİK ÇIKARIMI	47
3.7. REGRESYON ALGORİTMALARI	48
3.8. MODEL METRİKLERİ	50
3.9. MODEL DEĞERLENDİRMESİ	51
4. BULGULAR	53
4.1. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ SİSTEMLERİN YAKIN FAY ALTINDA OPTİMUM TASARIMI.....	54
4.1.1. Optimizasyon Tasarım Kısıtları ve Amaç Fonksiyonu	57
4.1.2. Sismik İzolasyonlu Yapı Tasarımı.....	58
4.1.3. Sismik İzolasyonlu ve Ayarlı Sıvı Sönümleyicili Yapı Tasarımı.....	62
4.2. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ BİR SİSTEMİN TASARIM ÖZELLİKLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ.....	67
4.2.1. Makine Öğrenmesi Modeli	71
5. TARTIŞMA.....	75
5.1. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ SİSTEMİN OPTİMİMUM TASARIM DEĞERLENDİRMESİ.....	75

5.2. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ SİSTEMİN TAHMİN MODELİ DEĞERLENDİRMESİ.....	79
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR.....	92
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	109
ETİK KURUL İZİN YAZISI	110
KURUM İZİN YAZILARI.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	112



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kontrol sistemi türleri	4
Şekil 2.2: X şekilli ADAS cihazı (Additional Damping and Stiffness) (Whittaker vd., 1991)..	6
Şekil 2.3: Üçgen plakalı TADAS cihazı (Triangular-Plate Added Damping and stiffness) (Tsai vd., 1993)	7
Şekil 2.4: Sürtünme tipi sönümleyici (Okut, 2006)	7
Şekil 2.5: Geliştirilmiş Pall sürtünme tipi sönümleyici (Wu vd., 2005)	8
Şekil 2.6: a) Visko-elastik sönümleyici, b) yerleşim yeri (Aldemir ve Aydın, 2005)	9
Şekil 2.7: Viskoz sönümleyici kesitleri: a) akümülatörlü, b) piston geçiş çubuklu (Kaleybar ve Tehrani, 2021)	10
Şekil 2.8: Viskoz sönümleyici yerleşimi: a) zikzak, b) diyagonal, c) alt mafsal destekli, d) üst mafsal destekli (Zhang vd., 2012)	10
Şekil 2.9: Ayarlı kütle sönümleyici mekanik modeli	11
Şekil 2.10: Ayarlı sıvı sönümleyici çalışma mekanizması	12
Şekil 2.11: Ayarlı sıvı sönümleyici çeşitleri: a) Salınan plaklı ve çubuklu, b) Sıvı kollu (Soong ve Constantinau, 1994)	13
Şekil 2.12: a) One Wall Center binası (onewallcentre.ca), b) Kullanılan TLCD kesiti (Irwin ve Breukelman, 2001)	14
Şekil 2.13: a) Comcast Center binası, b) Yapıda kullanılan TLCD şekli (motiveering.ca) ..	15
Şekil 2.14: a) One Rincon Hill Tower (skyscrapercenter.com), b) TLMD yerleştirilen bölgenin yakın ölçekli görüntüsü ve TLMD şekli (techeblog.com)	16
Şekil 2.15: a) British Airways i360 Towers, b) Genel görünüş (bauder.co.uk)	16
Şekil 2.16: a) Higashi Kobe Bridge (bridgeofweek.com), b) Köprüde kullanılan TLCD şekli (Kitazawa vd., 1992)	17
Şekil 2.17: a) Nagasaki Airport Tower (megaconstrucciones.net), b) Kulenin ölçekli görüntüsü, c) Kulede kullanılan TLD (Tamura vd., 1995)	18

Şekil 2.18: Zemin titreşimleri altında yapı davranışı: a) geleneksel yapı, b) taban izolatörlü yapı	19
Şekil 2.19: Yüksek sönümlü kauçuk izolatör	20
Şekil 2.20: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör	21
Şekil 2.21: Sürtünmeli sarkaç izolatör	22
Şekil 2.22: Sismik izolatör hareketinin temsili gösterimi	23
Şekil 3.1: Jaya optimizasyonu akış diyagramı	33
Şekil 3.2: Armoni arama algoritması akış diyagramı	35
Şekil 3.3: Silindirik tabanlı ayarlı sıvı sönümleyici örneği	36
Şekil 3.4: Denetimli öğrenme akış diyagramı	45
Şekil 3.5: Denetimsiz öğrenme akış diyagramı	45
Şekil 3.6: Yarı denetimli öğrenme akış diyagramı	46
Şekil 3.7: Pekiştirmeli öğrenme akış diyagramı	47
Şekil 3.8: K-katlı çapraz doğrulama yöntemi	52
Şekil 4.1: a) İzolatörlü yapı modeli, b) Sönümleyici ilave edilmiş hibrit sistem modeli	53
Şekil 4.2: İzolatör ve TLD'li 10 katlı yapısal sistem modeli	55
Şekil 4.3: İzolatörlü 11DOF yapı modeli	58
Şekil 4.4: %30 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde, yakın fay darbe kayıtları altında 11DOF sistemi için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	60
Şekil 4.5: %20 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde, yakın fay darbe kayıtları altında 11DOF sistemi için kritik deprem analizinin grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	60
Şekil 4.6: %40 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde, darbesiz yakın fay kayıtları altında 11DOF sistem için kritik deprem analizinin grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	62
Şekil 4.7: %30 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde, darbesiz yakın fay kayıtları altında 11DOF sistem için kritik deprem analizinin grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	62
Şekil 4.8: %40 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde ve yakın fay darbe kayıtları altında 13DOF sistem için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	64

Şekil 4.9: %50 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde ve yakın fay darbe kayıtları altında 13DOF sistem için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	65
Şekil 4.10: %40 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde ve darbesiz yakın fay kayıtları altında 13DOF sistemi için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	67
Şekil 4.11: %30 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde ve darbesiz yakın fay kayıtları altında 13DOF sistemi için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi	67
Şekil 4.12: İzolatör + TLD sistem modeli	68
Şekil 4.13: Korelasyon matrisi grafiği	70
Şekil 5.1: Darbeli yakın fay darbe kayıtları altında optimize edilmiş periyotlar: (a) 50 cm yer değiştirme sınırı için, (b) 60 cm yer değiştirme sınırı için	78
Şekil 5.2: Darbesiz yakın fay darbe kayıtları altında optimize edilmiş periyotlar: (a) 50 cm yer değiştirme sınırı için, (b) 60 cm yer değiştirme sınırı için	78
Şekil 5.3: Kontrol sistemi tahmin modellerinin test R^2 değerleri grafiği.	81
Şekil 5.4: Kontrol sistemi tahmin modellerinin test RMSE değerleri grafiği	81
Şekil 5.5: R için Lightgbm modeli gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti	83
Şekil 5.6: h için Catboost modeli gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti	83
Şekil 5.7: Db için Catboost modeli gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti	83
Şekil 5.8: Cr için Rastgele orman algoritması modeli gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti	84
Şekil 5.9: Tb için Lightgbm modeli gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.	84
Şekil 5.10: Td için Rastgele orman algoritması modeli gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti	84

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Sıvı sönümleyici uygulanmış yapı örnekleri	13
Tablo 2.2: Sismik izolatör ve ayarlı sıvı sönümleyici kullanılan kontrol sistemi çalışmaları ...	27
Tablo 3.1: Sismik izolatör kullanılan kontrol sistemi çalışmaları	41
Tablo 3.2: Sönümleyici kullanılan optimizasyon çalışmaları	42
Tablo 4.1: Darbeli yakın fay kayıtları alt kümesi (Fema, 2009)	56
Tablo 4.2: Darbesiz yakın fay kayıtları alt kümesi (Fema, 2009)	56
Tablo 4.3: Optimizasyon parametreleri	56
Tablo 4.4: Yakın fay darbe kayıtları altında AHS ile optimize edilmiş 11DOF sistemi için optimum izolatör parametreleri	59
Tablo 4.5: 11DOF sistem için kritik deplasmana göre yakın fay darbe kaydında izolatör seviyesi deplasmanları	59
Tablo 4.6: Darbeli yakın fay uyarımı altında 11DOF izolatörlü sisteminin kritik deprem analiz sonuçları	59
Tablo 4.7: AHS ile optimize edilmiş 11DOF sistem için darbesiz yakın fay kayıtları altında optimum izolatör parametreleri	61
Tablo 4.8: 11DOF sistem için kritik deplasmana göre darbesiz yakın fay kayıtlarında izolatör seviyesi deplasmanları	61
Tablo 4.9: Darbesiz yakın fay uyarım altında 11DOF izolatörlü sistemin kritik deprem analiz sonuçları	61
Tablo 4.10: Yakın fay darbe kayıtları altında AHS ile optimize edilmiş 13DOF sistem için optimum sistem parametreleri	63
Tablo 4.11: 13DOF sistem için kritik deplasmana göre yakın fay darbe kayıtlarında izolatör seviyesi deplasmanları	63
Tablo 4.12: Yakın fay darbe uyarımları altında 13DOF sisteminin kritik deprem analiz sonuçları	64
Tablo 4.13: AHS ile optimize edilmiş 13DOF sistem için, darbesiz yakın fay kayıtları altında optimum sistem parametreleri	65

Tablo 4.14: 13DOF sistem için kritik deplasmana göre darbesiz yakın fay kayıtlarında izolatör seviyesi deplasmanları	65
Tablo 4.15: Darbesiz yakın fay uyarımları altında 13DOF sistemin kritik deprem analiz sonuçları	66
Tablo 4.16: Tasarım parametreleri ve limitler	68
Tablo 4.17: Veri kümesine ait 10 satır	69
Tablo 4.18: Veri seti istatistiksel özellikleri	69
Tablo 4.19: R tahmin modelleri performans metrikleri	71
Tablo 4.20: h tahmin modelleri performans metrikleri	72
Tablo 4.21: Db tahmin modelleri performans metrikleri	72
Tablo 4.22: Cr tahmin modelleri performans metrikleri	73
Tablo 4.23: Tb tahmin modelleri performans metrikleri	73
Tablo 4.24: Td tahmin modelleri performans metrikleri	74
Tablo 5.1: Darbeli yakın fay depremleri için kritik deprem analizi sonuçlarına göre yer değiştirme ve toplam ivme azalma yüzdeleri	76
Tablo 5.2: Darbesiz yakın fay depremleri için kritik deprem analizi sonuçlarına göre yer değiştirme ve toplam ivme azalma yüzdeler	76
Tablo 5.3: VIF değerleri	80

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
C	: Sönüm katsayısı matrisi
c_b	: İzolatör sönüm katsayısı
c_d	: TLD sönüm katsayısı
c_N	: Yapının en üst kat sönüm katsayısı
c_s	: Çalkalanan sıvının sönüm katsayısı
c_1	: Yapının 1.kat sönüm katsayısı
g	: Yer çekimi ivmesi
h	: TLD tankı sıvı yüksekliği
h_{max}	: Maksimum TLD tankı sıvı yüksekliği
$HMCR_{in}$: Hafıza dikkate alma oranı başlangıç değeri
K	: Rijitlik matrisi
k_b	: İzolatör rijitliği
k_d	: TLD rijitliği
k_N	: Yapının en üst kat rijitliği
k_s	: Çalkalanan sıvı rijitliği
k_1	: Yapının 1.kat rijitliği
M	: Kütle matrisi
m_b	: İzolatör kütlesi
m_{bs}	: İzolatörlü yapı kütlesi
m_d	: TLD tank ve pasif sıvının toplam kütlesi
m_N	: Yapının en üst kat kütlesi
m_s	: Çalkalanan sıvı kütlesi
m_{st}	: TLD'nin toplam sıvı kütlesi
$m_{structure}$: Yapı kütlesi
m_1	: Yapının 1.kat kütlesi
mt	: Maksimum iterasyon sayısı
m_{tank}	: TLD tankın boş kütlesi
m_{TLD}	: Sönümleyici tankın toplam kütlesi

m_{total}	: Sönümleyici, izolatör ve yapının toplam kütlesi
N	: Örnek sayısı
PAR_{in}	: Ton ayarlama oranı başlangıç değeri
R	: TLD tankı taban yarıçapı
R^2	: R-kare skoru (R-Squared)
R_j^2	: j. Değişkene ait R^2 değeri
R_{max}	: Maksimum TLD tankı taban yarıçapı
$stmax$: TLD yer değiştirme kısıtı
t	: İterasyon numarası
T_b	: İzolatör periyodu
T_s	: Çalkalanan sıvının periyodu
VIF_j	: j. Değişkene ait varyans enflasyon faktörü
w_b	: İzolatörün doğal açısal frekansı
X	: Yapı yer değiştirmesi
X_b	: İzolatör yer değiştirmesi
X_d	: TLD tank yer değiştirmesi
$X_{i,best}$: Çözüm matrisindeki en iyi çözüm
$X_{i,j}$: i. değişkene ait j. çözüm
$X_{i,new}$: Yeni aday çözüm
$X_{i,worst}$: Çözüm matrisindeki en kötü çözüm
X_j	: j. bağımsız değişken
X_{max}	: Maksimum tasarım limiti
X_{min}	: Minimum tasarım limiti
X_N	: Yapının en üst kat yer değiştirmesi
X_n	: n. armoni
X_{new}	: Yeni armoni vektörü
X_s	: Çalkalanan sıvının yer değiştirmesi
X_1	: Yapının 1.kat yer değiştirmesi
\dot{X}	: Yapı hızı
\ddot{X}	: Yapı ivmesi
\ddot{X}_g	: Yer ivmesi
y_i	: Gözlem değeri
\bar{y}_i	: Gözlem değerleri ortalaması

\hat{y}_i	: Tahmin edilen değer
ζ_b	: İzolatör sönüm oranı
ζ_d	: TLD sönüm oranı
ζ_s	: Çalkalanan sıvının sönüm oranı
ν	: Sıvı kinematik viskozitesi
μ	: TLD-Yapı kütle oranı
ρ	: Yoğunluk

Kısaltmalar

Açıklama

ADAS	: Ek sönümleme ve rijitlikli (Additional Damping and Stiffness)
AHS	: Uyarlanabilir armoni arama algoritması (Adaptive Harmony Search)
ANN	: Yapay sinir ağı (Artificial Neural Network)
Cr	: Ayarlı sıvı sönümleyici sönüm oranı
Crs	: TLD tank sıvısı sönüm oranı
D	: İzolatör hareket limiti
Db	: İzolatör sönüm oranı
ERNN	: Tekrarlayan sinir ağı (Ensemble of Recurrent Neural Network)
FD	: Sürtünme sönümleyici (Friction Damper)
FEMA	: Quantification of Building Seismic Performance Factors
FPS	: Sürtünmeli Sarkaç Sistemi (Friction Pendulum System)
HDRB	: Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatör (High Damping Rubber Bearing)
HMCR	: Armoni hafıza dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate)
HMS	: Armoni hafıza boyutu (Harmony Memory Size)
LDRB	: Düşük Sönümlü Kauçuk İzolatör (Low Damping Rubber Bearing)
LRB	: Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör (Lead Rubber Bearing)
MAE	: Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error)
MAPE	: Ortalama mutlak yüzde hata (Mean Absolute Percentage Error)
MARS	: Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğtileri (Multivariate Adaptive Regression Splines)
MD	: Metalik sönümleyici (Metallic Damper)
ML	: Makine öğrenmesi (Machine Learning)
MR	: Manyeto reolojik
MSE	: Ortalama karesel hata (Mean Squared Error)
PAR	: Ton ayarlama oranı (Pitch Adjusting Rate)

PCA	: Temel bileşen analizi (Principle Component Analysis)
PCR	: Temel bileşen regresyonu (Principle Component Regression)
RMSE	: Kök ortalama karesel hata (Root Mean Squared Error)
TADAS	: Üçgen plakalı ek sönüm ve rijitlikli (Triangular-Plate Added Damping and Stiffness)
Tb	: İzolatör periyodu
Td	: Ayarlı sıvı sönümleyici periyodu
TLCD	: Ayarlı Sıvı Kolon Sönümleyici (Tuned Liquid Column Damper)
TLD	: Ayarlı Sıvı Sönümleyici (Tuned Liquid Damper)
TLMD	: Ayarlı Sıvı Kütle Sönümleyici (Tuned Liquid Mass Damper)
TLMCD	: Ayarlı Sıvı Çoklu Kolon Sönümleyici (Tuned Liquid Multi Column Damper)
TLWD	: Ayarlı Sıvı Duvar Sönümleyicisi (Tuned Liquid Wall Damper)
TMD	: Ayarlı Kütle Sönümleyici (Tuned Mass Damper)
TSD	: Ayarlı Çalkalama Sönümleyicisi (Tuned Sloshing Damper)
VD	: Viskoz Sönümleyici (Viscous Damper)
VED	: Visko-elastik Sönümleyici (Viscoelastic Damper)
VIF	: Varyans enflasyon faktörü (Variance Inflation Factor)
X	: İzolatörlü yapının en üst kat maksimum toplam ivmesi
2DOF	: İki serbestlik dereceli (2 Degree of Freedom)
3DOF	: Üç serbestlik dereceli (3 Degree of Freedom)
10DOF	: On serbestlik dereceli (10 Degree of Freedom)
11DOF	: Onbir serbestlik dereceli (11 Degree of Freedom)
13DOF	: Onüç serbestlik dereceli (13 Degree of Freedom)

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[SİSMİK İZOLASYON VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ HİBRİT KONTROL SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ]

[Ayla OCAK]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

[Danışman: Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ]

Sismik taban izolatörleri, yapısal ivmenin azaltılmasında ve deplasman kontrolünde etkili kontrol cihazlarıdır. Çok katlı yapılarda yapı ağırlığıyla izolatör zorlanmakta, enerji yeteri kadar izolasyon katmanında sönmelenemeyerek üst yapıya aktarılmaktadır. Sismik izolatörlere gelecek kuvvetli titreşimler, izolatörün fazla hareketiyle sonuçlanarak, izolatör bağlantı noktalarında mekanik hasara ya da izolasyon katmanında malzeme deformasyonuna yol açabilmektedir. Yakın fay gibi yıkıcı özellikleri olan ve büyük yer değiştirmelere sebep olan depremlerde, izolasyonlu sistemlere sönmüleyici ilavesi önerilmektedir. Ayarlı sıvı sönmüleyici (TLD) sistemler, yapısal deplasmanları azaltmada, bünyesindeki sıvının çalkalanmasından faydalanan kontrol cihazlarıdır. Bu iki sistemin hibrit kullanımı, yapıda toplanan ivme ve deplasmanların azaltılmasında etkilidir. Bu tez çalışmasında, sismik taban izolatörü ve TLD'den oluşan hibrit bir sistemin optimum tasarım süreci ve TLD yerleştirilecek alanın boyut limitlerini dikkate alarak sistem özelliklerini tahmin eden bir makine öğrenmesi modeli oluşturulması hedeflenmiştir. Yapılan ilk uygulamada, yakın fay depremleri altındaki bir yapının tabanına sismik izolatör ve en üst katına TLD yerleştirilmiş, izolatörlü sistemin farklı sönmü ve hareketlilik kapasiteleri için izolatöre TLD ilavesinin, yapısal kontrole etkisi araştırılmıştır. İzolatör ve sönmüleyici özellikleri, yapının maksimum ivmesini azaltmaya yönelik uyarlanabilir armoni arama algoritması ile optimize edilmiştir. TLD ilavesinin, yakın fayın

izolatör seviyesindeki yerdeştirmeleri sınırlayarak hasar almasını önleyici etkileri olduğu belirlenmiştir. Tez çalışmasında yapılan ikinci uygulamada, yapı kütlesinden bağımsız olarak sismik izolatör ve TLD'li hibrit kontrol sistemine sahip bir yapının tasarım parametrelerini tahmin eden bir makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiştir. Darbeli yakın fay depremleri altındaki standart bir yapının deprem davranışı Matlab Simülink aracılığıyla simüle edilmiş, jaya algoritması optimizasyonu ile optimum tasarım parametreleri ve yapı davranışı kaydedilmiştir. Elde edilen optimum tasarım özellikleri ve çeşitli parametrelerle veri seti oluşturulmuştur. Kontrol sistemi yerleştirilecek alanın boyut limitleri ve sıvı özellikleri dikkate alınarak, TLD tank boyutları, izolatör ve TLD sönümlenme oranları ve periyotlarını tahmin eden makine öğrenmesi modelleri üretilmiştir. Geliştirilen öğrenme modelleri arasında en etkili algoritmalar belirlenmiş, tahmin edilen değişkenler arasında TLD tank yarıçapı, sıvı yüksekliği ve izolatör periyodu özelliklerinin %96'yı aşan bir doğrulukla ve %8 civarında ortalama mutlak hatayla tahmin edilebildiği belirlenmiştir. |

Haziran 2025 , [137] sayfa.

Anahtar kelimeler: Sismik taban izolatörü, ayarlı sıvı sönümleyici (TLD), yakın fay optimizasyonu, makine öğrenmesi |

ABSTRACT

[Ph.D. THESIS]

**[OPTIMIZATION OF HYBRID CONTROL SYSTEMS WITH SEISMIC ISOLATION
AND TUNED LIQUID DAMPER AND PREDICTION WITH MACHINE LEARNING]**

[Ayla OCAK]

**İstanbul University-Cerrahpaşa
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering
Ph.D. Program in Civil Engineering**

[Supervisor : Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ]

Seismic base isolators are effective control devices in reducing structural acceleration and displacement control. In multi-storey structures, the isolator is forced by the weight of the structure, and the energy is not sufficiently absorbed in the isolation layer and is transferred to the superstructure. Strong vibrations that will occur to seismic isolators may result in excessive movement of the isolator, causing mechanical damage at the isolator connection points or material deformation in the isolation layer. In earthquakes with destructive features such as near fault and causing large displacements, the addition of a damper to isolation systems is recommended. Tuned liquid damper (TLD) systems are control devices that utilize the sloshing of the liquid within them in reducing structural displacements. The hybrid use of these two systems is effective in reducing the acceleration and displacements accumulated in the structure. In this thesis, it is aimed to create a machine learning model that estimates the system properties by considering the optimum design process of a hybrid system consisting of a seismic base isolator and TLD and the size limits of the area where the TLD will be placed. In the first application, a seismic isolator was placed at the base of a structure under near-fault earthquakes

and TLD was placed at the top floor, and the effect of TLD addition to the isolator on the structural control was investigated for different damping and mobility capacities of the isolator system. Isolator and damper properties were optimized with an adaptive harmony search algorithm to reduce the maximum acceleration of the structure. It has been determined that the addition of TLD has preventive effects on the isolator from being damaged by limiting the displacements at the isolator level of the near fault. In the second application carried out in the thesis study, a machine learning model was developed that estimates the design parameters of a structure with a hybrid control system with seismic isolator and TLD, independent of the building mass. The earthquake behavior of a standard structure under pulsed near-fault earthquakes was simulated via Matlab Simulink, and the optimum design parameters and structure behavior were recorded with the Jaya algorithm optimization. A data set was created with the optimum design properties and various parameters obtained. Considering the size limits of the area where the control system will be placed and the liquid properties, machine learning models that predict TLD tank dimensions, isolator and TLD damping ratios and periods were produced. The most effective algorithms were determined among the developed learning models, and it was determined that among the predicted variables, TLD tank radius, liquid height and isolator period properties could be predicted with an accuracy exceeding 96% and a mean absolute error around 8%.

June 2025, 137 pages.

Keywords: Seismic base isolator, tuned liquid damper (TLD), near fault, optimization, machine learning

1. GİRİŞ

Taban izolasyon sistemleri, yapının çeşitli titreşim kaynaklarından izole edilmesi için gerekli kontrol sistemlerini ifade etmektedir. Bu sistemler özellikle deprem kaynaklı titreşimlerin sönümlenmesinde dikkate değer ölçüde performans sağlamaktadır. Sismik izolatörler deprem gibi dinamik etkilerin yapıda oluşturacağı enerjiyi hızla sönümlemektedir (Yücesoy, 2005). Depremin ivmesini hızla düşürerek yapıdaki hasarı minimum düzeye indirebilmektedir. Bu sistemlerin kullanımı, ülkemizde bir başlangıç olarak çeşitli 1. ve 2. derece deprem bölgelerinde inşa edilecek olan 100 yatak ve üzeri hastaneler için sismik yalıtımlı olma zorunluluğu getirilmiştir (<https://sygm.saglik.gov.tr>). Hastanelerin yanı sıra ülkemizde çeşitli viyadükler, Ankara Büyükşehir Belediyesi Kongre ve Ticaret Merkezi, Atatürk Havalimanı, Sabiha Gökçen Havalimanı, Antalya Havalimanı gibi farklı yapılarda da uygulamaları mevcuttur (Şengel vd., 2009). Yapı kontrol sistemleri yaygınlaşarak ülkemiz yönetmeliklerine adım adım girmeye başlamıştır. Maliyeti açısından başlangıçta hastane gibi önemli yapıların tasarımında uygulama zorunluluğu başlatılan bu sistemlerin kullanımının tasarımdaki düzenlemelerle normal yapıların tasarımında da yaygınlaşması beklenmektedir. Çok katlı yapılarda yapı ağırlığı, izolatör katmanında titreşimin azaltılmasına yönelik esnek davranması beklenen izolatörlerin hareketini zorlaştırmaktadır. Sismik izolatörler, on katın üzerindeki yapılarda, yapı ağırlığı ve izolatör hareketliliği açısından yaşanan zorluklar sebebiyle kontrol performansı etkilenen ve ek sönümleme mekanizmalarına ihtiyaç duyan cihazlardır. İzolatöre bir sönümleyici ilavesiyle oluşturulacak hibrit sistemler sayesinde çok katlı yapılarda kullanımı uygun olmaktadır. Depremin tehlikeli düzeylerde yaşamı olumsuz etkileyen ülkemiz toprakları için yapı tasarımında bu tür sistemlerin araştırılması ve iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Özellikle bu sistem tasarımlarının optimum hale getirilmesi için yapılacak optimizasyon işlemi, tasarımdan alınacak üst düzey performans için gereklidir. Bu tez kapsamında çeşitli yapı modelleri için sismik izolatör ve sönümleyicili hibrit sistemlerin tasarım optimizasyonu araştırılmıştır. Bunun yanında optimum ayarlanmış sismik izolatör ve sönümleyicili hibrit sistemin, yapay zekanın bir alt dalı olan makine öğrenmesi metoduyla, yakın fay depremleri altında optimum tasarım parametrelerini tahmin eden bir yapay zekâ modelinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında oluşturulacak hibrit sistemin tasarım optimizasyonu için doğadaki olaylar ve canlı davranışlarından ilham alarak geliştirilen çeşitli metasezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, canlıların yiyecek arama, avlanma, yön bulma, öğrenme vb. içgüdüsel davranışlarının matematiksel bir formüle dökülmesi ile geliştirilmiş bir yöntemdir. Örnek olarak, kambur balinaların, avlanırken dönerek oluşturduğu spiral şeklindeki kabarcıklardan esinlenen balina optimizasyon algoritması, arıların, yiyecek aramak için izlediği yoldan geliştirilen yapay arı kolonisi algoritması, görme duyuları işlevsiz olan yarasaların, yön bulmak için ekolokasyon kullanımını baz alan yarasa algoritması, bir sınıfın öğrenme ve kendi içlerinde öğrendiklerini paylaşarak öğretme sürecinden yola çıkan, öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon, arı ve kuş gibi tozlaşmaya yardımcı canlıların, Levy adı verilen uçuşundan esinlenerek çiçeklerin tozlaşma sürecini kullanan çiçek tozlaşma algoritması ve en iyi armoniyi arama sürecinden ilham alan, armoni arama algoritması gibi algoritmalar canlı içgüdüsel davranışlarından geliştirilen metasezgisel algoritmalar bazılarında (Geem vd., 2001; Karaboğa, 2005; Yang, 2010; Rao vd., 2011; Yang, 2012; Mirjalili ve Lewis, 2016). Metasezgisel algoritmaların mantığında adım adım bir çözüm üretimi ve her çözümün eskisiyle kıyaslanarak en iyi olan çözümü bulana dek iterasyon miktarınca tekrarlandığı bir akış diyagramı bulunmaktadır. Her algoritmanın kendine özgü tasarimsal faktörü vardır. Çiçek tozlaşma algoritması için bu faktör anahtar olasılığı adlı bir değişken iken armoni arama algoritması için armoni hafıza dikkate alma oranı ya da ton ayarlama oranı faktörleridir. Çözüm üretim sürecinde, geliştirilen algoritma denklemleri kullanılmakta, bir veya daha fazla aşamadan oluşarak yeni çözüm vektörleri oluşturulmaktadır. Yeni üretilen çözümler eski çözümlerle karşılaştırılarak optimum çözüme ulaşılmaktadır.

Optimizasyon, tasarımdan alınacak verimin artışı için önemlidir. Ancak bu işlemlerin tekrarı zaman ve maliyet gerektirmektedir. Günümüzde, çeşitli verilerden bilgi çıkarımı yapan birçok akıllı makineler geliştirilmiştir. Optimizasyonu, veri üretimi için kullanmak, optimum yapısal sistem tasarımları için gelecek vaat etmektedir. Yapay zekâ yöntemleri, veri ile makinelerin eğitilerek, tahmin etme yeteneklerini geliştirdiği bir ortama zemin hazırlamaktadır. Optimizasyon sonrası verilerin depolanarak yapay zekâ modellerinde kullanılması, hızlı bir tasarım üretim sürecini sağlayabilmektedir. Makine öğrenmesi, yapay zekanın bir alt dalıdır. Verilerden otomatik bilgi çıkarımı yapan algoritmalarla deneyimle, daha iyi olmasını, insan müdahalesinin daha az olmasını ve deneyimle iyileşmenin artmasını ön gören bir yaklaşımdır. Eldeki veri setinin makineye öğretilmesiyle tahmin yapmasını sağlayan bir model

oluşturmaktadır. Örnek olarak, şeker hastalığının tespitinde kullanılan tetkiklerin sonuçlarını barındıran bir veri seti ile makine eğitildiğinde, yeni bir hastanın tetkik sonuçlarından hastanın şeker hastalığının olup olmaması durumu oluşturulan model sayesinde başarılı şekilde tahmin edilebilmektedir. Çeşitli bilim alanlarında başvurulan bu yöntem inşaat mühendisliği alanında da sıklıkla tercih edilmektedir. İnşaat mühendisliğinde zeminlerin hidrolik iletkenliği, zemin sıvılaşması, yangın sonrası betonun basınç dayanımı, betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve inşaat maliyeti gibi çeşitli alanlarda çalışmaları bulunmaktadır (Zhang vd., 2020; Matel vd., 2022; Özbulut vd., 2022; Rehman vd., 2022; Toufigh ve Palizi, 2022).

Bu tez çalışmasında iki uygulama üzerine odaklanılmaktadır. Birinci uygulamada, çok serbestlik dereceli yalnızca izolatörlü ve izolatör ile ayarlı sıvı sönümleyicinin (TLD) birlikte kullanıldığı iki yapısal sistem tasarlanmıştır. Bu iki sistem modelinin kontrol sistemi tasarım parametreleri yakın fay depremleri (Fema, 2009) altında, armoni arama algoritmasının uyarlanmasıyla elde edilen uyarlanabilir armoni arama algoritması aracılığıyla optimize edilmiştir. Sonrasında, optimum tasarım parametreleriyle ivmenin kritik olduğu depremler için kritik deprem analizleri yapılarak izolatöre sönümleyici ilavesinin katkıları araştırılmış, kontroldeki performansları değerlendirilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan ikinci uygulamada, tabandan izole edilmiş standart bir yapı kütleli alınarak en üst katına TLD yerleştirilmiş, yakın fayın darbe etkili depremleri altında, sönümleyici yerleştirilecek farklı alan boyutları ve izolatör hareket kabiliyeti için optimum izolatör ve TLD parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen parametreler bir veri setine dönüştürülmüş, makine öğreniminde kullanılmıştır. Eğitim sonrasında, izolatör hareket limitine ve TLD yerleştirilecek alan boyutlarına göre optimum kontrol sistemi tasarım parametrelerini tahmin eden bir makine öğrenmesi modeli geliştirilmiştir.

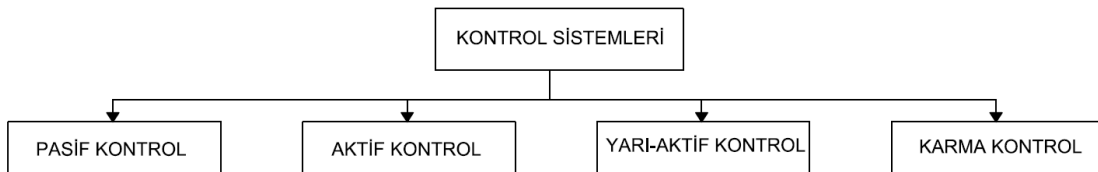
Bu tez çalışması kapsamında, optimizasyon ve makine öğrenmesi yöntemleri, kullanılan metasezgisel algoritmalar ve makine öğrenmesi algoritmaları, sismik taban izolatörlü ve TLD'li hibrit sistemin optimum tasarımı ve hareket denklemlerine dair bilgiler ve model değerlendirme metriklerine 3. Bölümde yer verilmiştir. Optimizasyondan elde edilen optimum kontrol sistemi tasarım parametreleri ve kritik deprem analizleriyle, makine öğrenmesi modellerinden elde edilen bulgular 4. Bölümde verilmiş, optimum verilerden oluşan kontrol tasarım performansı ve makine öğrenmesi modellerinin tahmin başarısı 5. Bölümde tartışılmıştır. Tüm değerlendirmeler sonucu elde edilen ana sonuçlar 6. Bölümde anlatılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Tezin bu bölümünde, yapısal kontrol genel çerçevesiyle sunulmakta, pasif kontrol sistemlerinde çeşitli titreşim sönümleyiciler ve taban izolasyon çeşitleri verilmektedir. Ayrıca taban izolasyon sistemlerine sönümleyici ilavesinin sebepleri ve sisteme katkılarına yer verilmiştir. Ek olarak alt başlıklarda, taban izolasyon sistemleri ve ayarlı sıvı sönümleyicilerin makine öğrenmesi ile tasarımı ve modellenmesi konuları aktarılmıştır.

2.1. YAPISAL KONTROL

Yapısal kontrol, yapıya inşa aşamasında ya da sonradan eklenerek, yapının dış etkenlerden korunmasına karşı alınan önlemleri ifade etmektedir. Yapıya hasar verme veya yapı kullanımını olumsuz etkileme durumu söz konusu olan, rüzgâr ve deprem gibi her türlü titreşim kaynağı kontrole tabi tutulmaktadır. Bunun için yapıya eklenecek kütle ve yay benzeri çeşitli elemanlar kullanılarak yapısal kontrol sağlanmaktadır. Yapısal kontrolün tarihi, 19. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. Yapısal kontrol sistemi sayılabilecek ilk örnek olarak Japonya'da John Milne tarafından uygulanan, ahşap bir yapının sismik korumasında evin metal bilyeler üzerine konumlandırılması gösterilebilir (Aldemir, 1999; Okut, 2006). Kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde, sistemin faydalandığı sürtünme, kayma ve akma benzeri özellikler kullanılmaktadır. Genel çalışma prensibi, yapıya iletilen dinamik yüklerin enerjisini sönümlemede sisteme gelen enerjiyi kullanarak ya da dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla kontrolü sağlamaktadır. Kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji duymadığı takdirde pasif kontrol, sönümlemek için gerekliyi dışarıdan temin ettiğinde aktif kontrol, sınırlı bir enerji kaynağına ihtiyaç duyduğunda yarı-aktif kontrol ve pasif ve aktif cihazların birlikte kullanıldığı karma kontrol sistemleri olmak üzere alt dallara ayrılmaktadır. Şekil 2.1'de, Kontrol sistemi tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Kontrol sistemi türleri.

2.2. PASİF KONTROL SİSTEMLERİ

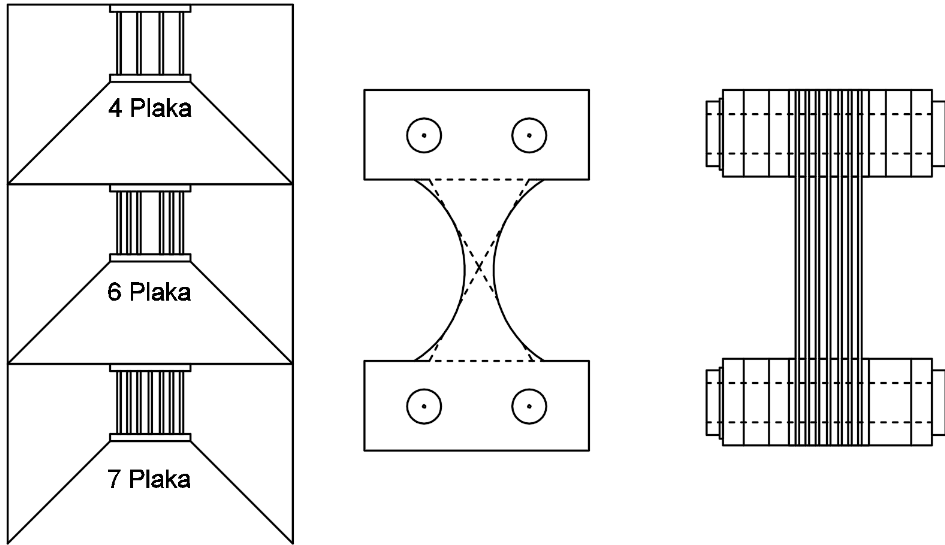
Pasif kontrol sistemleri, dış bir enerji kaynağı olmaksızın sisteme gelen enerjinin sönümde kullanıldığı kontrol sistemleridir. Bu sistemler, genellikle yapıya bir yay ve kütle aracılığıyla bağlanmakta, yapısal sisteme gelen dinamik yüklerin etkisini enerji kaynağı olarak kullanmaktadır. Yapıya iletilen dinamik kuvvetlerin yarattığı enerjinin yayılmasını azaltmak için kuvvetlerin oluşturduğu başlangıç enerjilerini absorbe etmektedirler (Naimi ve Waheb, 2019). Dışarıdan bir enerji gerektirmemeleri sebebiyle, kendine yetebilen ekonomik sistemler olarak bilinmektedir. Pasif cihazlar kararlı, tasarım ve uygulaması kolay, çalıştırmak için ek bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duymayan kontrol elemanlarıdır (Christenson, 2002; Saaed vd., 2013). Buldukları yapıya gelen kuvvet ve deformasyonları kullanarak dikkate değer miktarlarda bir sönümleme kuvveti üretmektedirler. Yapısal tepki artışına bağlı olarak sönümleme kuvvetini arttırmaları sebebiyle pasif kontrol barındıran yapılar, akıllı yapılar olarak tanımlanabilir (Cheng vd., 2008). Pasif kontrol sistemleri pasif titreşim sönümleyiciler ve taban izolasyon sistemleri olarak iki grup pasif cihaz grubunu temsil etmektedir.

2.2.1. Pasif Titreşim Sönümleyiciler

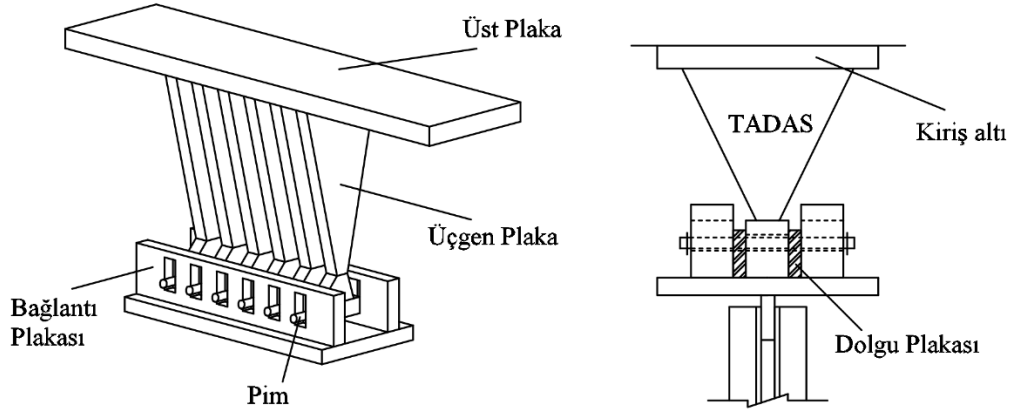
Pasif titreşim sönümleyiciler, malzemelerin sürtünme-kayma özellikleri ya da akma deformasyon enerjisini kullanarak, titreşim kontrolünü sağlayan cihazlardır. Deprem ve rüzgâr gibi çeşitli titreşim kaynaklarının sönümlenmesinde oldukça etkilidirler. Sismik titreşimlerin önlenmesi için yapıya iletilen kuvvetlerin başlangıç enerjisini dağıtmak amacıyla, pasif titreşim sönümleyicilerin kullanımına dair Kelly vd., çeliğin plastik deformasyon enerjisini kullanmış, yapısal sistemler için kontrol cihazlarının geliştirilmesine katkıda bulunmuştur (Kelly vd., 1972). Her geçen yıl yeni ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesiyle malzeme özelliklerini, hız ve yer değiştirmeyi baz alan pasif titreşim sönümleyicilerin kullanımı giderek artmaktadır. Pasif cihazlar arasında, metalin akma ve deformasyon enerjisi özelliklerini kullanan yer değiştirmeye bağlı metalik sönümleyiciler, viskoz akışkan bir sıvının katı kütleler arasındaki giriş hızını temel alan viskoz sönümleyiciler, visko-elastik malzemenin kayma hareketini kullanan visko-elastik sönümleyiciler, malzemenin sürtünme özelliklerinden faydalanan sürtünme tipi sönümleyiciler, titreşimi katı bir kütleye ya da sıvı bir kütleye aktararak sönümü sağlayan ayarlı kütle ve ayarlı sıvı sönümleyiciler enerjisi dağıtılma cihazları olarak kullanılmaktadır.

2.2.1.1. Metalik Sönümleyiciler

Metalik sönümleyiciler (Metallic Damper, MD), metal malzemenin akma deformasyon enerjisinden faydalanan yer değiştirmeye bağlı tasarlanan pasif cihazlardır. Çelik veya kurşun kullanılarak tasarlanmaktadır. Metallerin, plastik deformasyon enerjisini sönümde kullanan sistemlerdir. Kullanılan çeliğin içerisindeki karbon miktarı, çeliğin sertliğini ve dayanımını etkileyerek sünekliğini azaltmakta, gevrek hale gelen malzemenin plastik deformasyonun az bir miktarda olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca metallerdeki korozyon da sönümleyicinin kontrol performansına etki etmektedir. Bu durumlar göz önüne alınarak, metalik sönümleyici tasarımlarında yumuşak çeliğin kullanılması ve daha dirençli hale getirilmesi tavsiye edilmektedir. Metaldeki akmanın üniform olması ve gerilmenin eşit dağılımı için genellikle X şekilli, dikdörtgen veya üçgen formda tasarlanmaktadır. Bilinen en yaygın çeşitleri, ek sönümleme ve rijitliğe sahip, ADAS ve TADAS sönümleyicileridir. ADAS, X şekilli ve TADAS üçgen plakalı olarak tasarlanmaktadır (Whittaker vd., 1991; Tsai vd., 1993). Şekil 2.2’de X şekilli ADAS cihazı ve Şekil 2.3’te üçgen plakalı TADAS cihazı örnekleri gösterilmektedir.



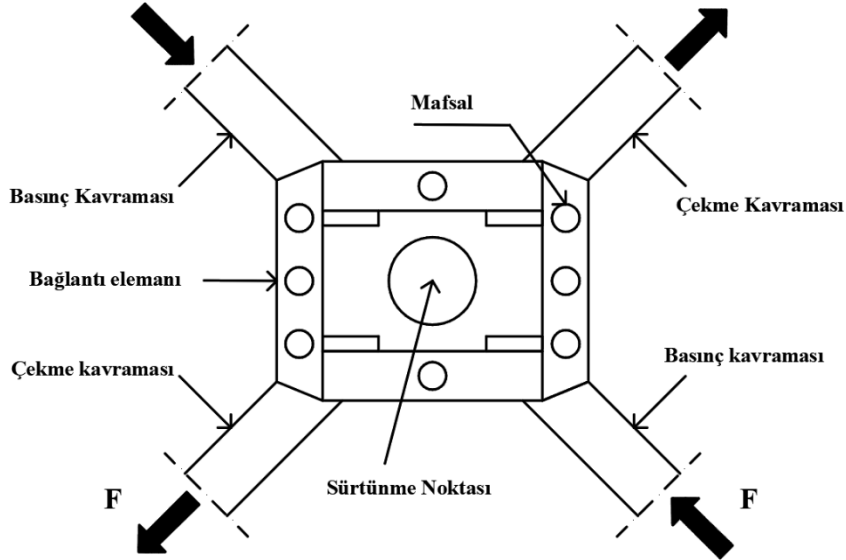
Şekil 2.2: X şekilli ADAS cihazı (Additional Damping and Stiffness) (Whittaker vd., 1991).



Şekil 2.3: Üçgen plakalı TADAS cihazı (Triangular-Plate Added Damping and Stiffness) (Tsai vd., 1993).

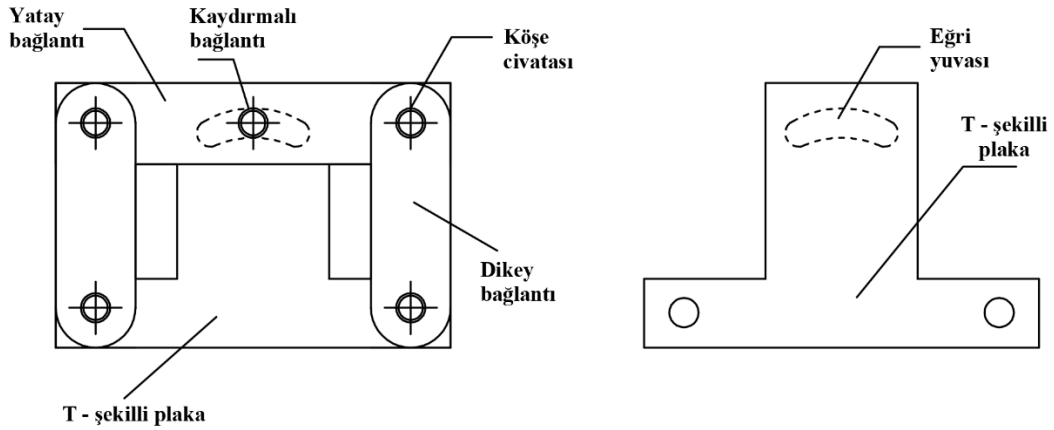
2.2.1.2. Sürtünme Tipi Sönümleyiciler

Sürtünme tipi sönümleyiciler (Friction Damper, FD), malzemenin kayma-sürtünme hareketinden faydalanarak, oluşan sürtünme enerjisini sönümde kullanan pasif cihazlardır. Pall'ın, çapraz şekle sahip kavramalar ve çelik çubuklardan oluşan modeli, sürtünmeli sönümleyicilerin temelini oluşturmaktadır (Pall vd., 1993). Şekil 2.4'te bu modelin örnek bir gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.4: Sürtünme tipi sönümleyici (Okut, 2006).

Pall tarafından geliştirilen model yıllar içerisinde geliştirilerek yeni ve gelişmiş sürümleri kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2.5'te klasik cihazdan daha ekonomik ve basit tasarlanmış, geliştirilmiş Pall sürtünme tipi sönümleyici örneği gösterilmektedir.

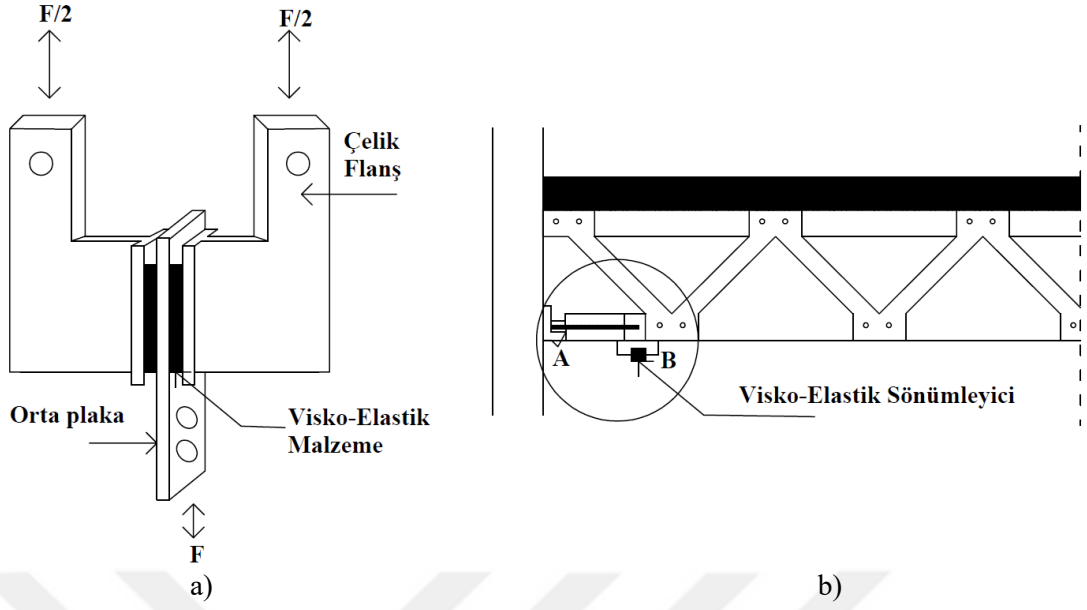


Şekil 2.5: Geliştirilmiş Pall sürtünme tipi sönümleyici (Wu vd., 2005).

Sürtünme tipi sönümleyicilerin performansı, metalik sönümleyicilerde olduğu gibi malzeme özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Sönümleyicinin, kullanılan malzemenin sürtünme özelliklerini etkileyebilecek her türlü kirlilik ve korozyondan korunması, kontrol cihazı ömrü açısından önemlidir. Malzeme korozyonunu etkileyebilecek, sürtünme tipi sönümleyicilerde sıklıkla kullanılan çeliğin, düşük karbonlu yumuşak çelikten seçilmesi kaçınılması gereken bir durumdur. Bu tür sönümleyicilerde, sürtünmeyi etkileyecek etkenlere dikkat edilmesi önemli düzeylerde enerji kaybını düşürmektedir (Chan ve Tang, 2022).

2.2.1.3. Visko-Elastik Sönümleyiciler

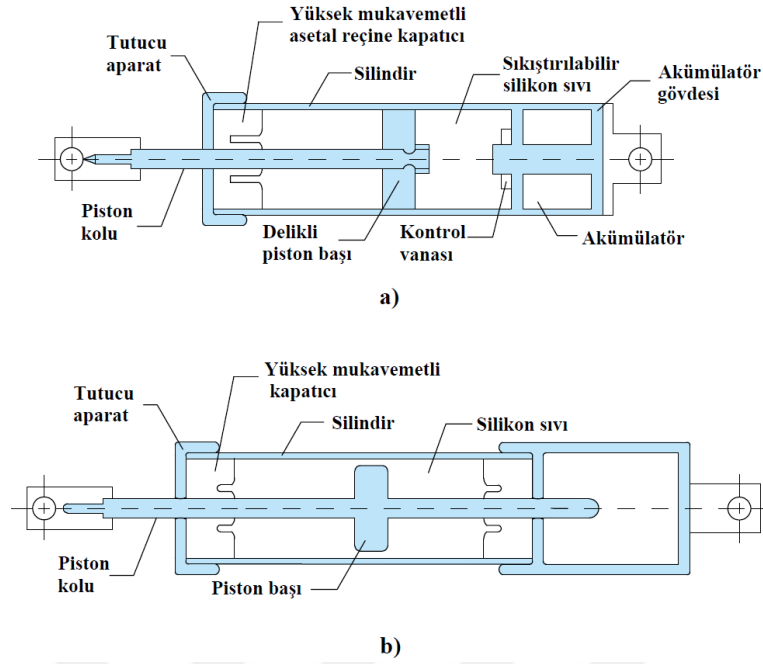
Visko-elastik sönümleyiciler, cihazdaki visko-elastik malzemenin plakalar arasındaki kayma hareketinden faydalanarak enerjiyi sönümleyen titreşim sönümleme cihazlarıdır. Sönümleyicide yer alan visko-elastik malzemenin hareketinden doğan kinetik enerji, ısı enerjisine çevrilerek sönümde kullanılmaktadır. Visko-elastik malzemenin plakalar arasındaki kayma hızıyla oluşturulan kinetik burada depolanmaktadır. Malzemenin elastikiyeti açısından ısıya karşı duyarlıdır. Sıcaklık artışına bağlı olarak visko-elastik sönümleyici performansı düşmektedir (Mahmoodi, 1969; Modhej ve Zahrai, 2021). Sönümleyicide kullanılan visko-elastik malzeme, dikdörtgen, kare ya da dairesel şekilde olabilmektedir. Şekil 2.6'da visko-elastik sönümleyici (Viscoelastic Damper, VED) örneği ve yerleşim detayı gösterilmektedir.



Şekil 2.6: a) Visko-elastik sönümleyici, b) yerleşim yeri (Aldemir ve Aydın, 2005).

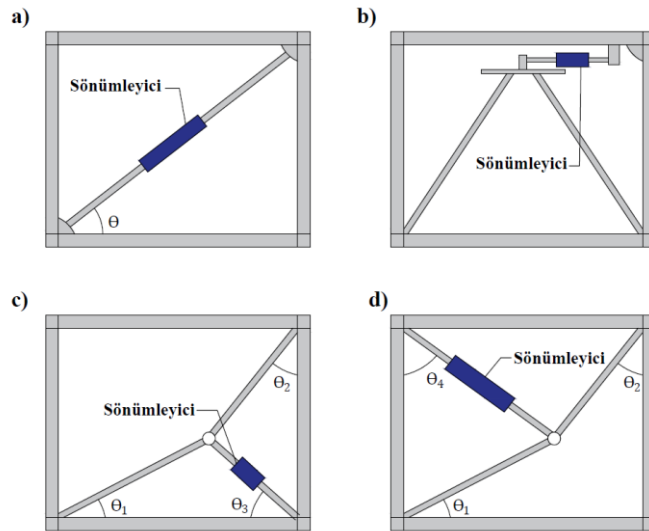
2.2.1.4. Viskoz Sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler, piston benzeri bir sistem içerisinde, viskoz akışkan bir malzemenin kayma hızından faydalanan sönümlenme cihazlarıdır. Visko-elastik sönümleyicilerle benzer şekilde, kayma hareketinden üretilen enerjinin ısıya çevrilmesi ve sönümde kullanılması prensibine dayanmaktadır. Constantinou'nun, çelik pistonları, viskoz akışkan olarak silikon yağının içerisinde hareket ettirerek oluşturduğu enerjiyi bir akümülatör ile biriktirdiği örneği, viskoz sönümleyicilerin ilk uygulaması olarak bilinmektedir (Okut, 2006). Akümülatörlü örneklerin dışında, piston geçiş çubuğu ile de tasarlanabilmektedirler. Şekil 2.7'de, iki tasarım için viskoz sönümleyici (Viscous Damper, VD) kesit görünümü gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Viskoz sönümleyici kesitleri: a) akümülatörlü, b) piston geçiş çubuklu (Kaleybar ve Tehrani, 2021).

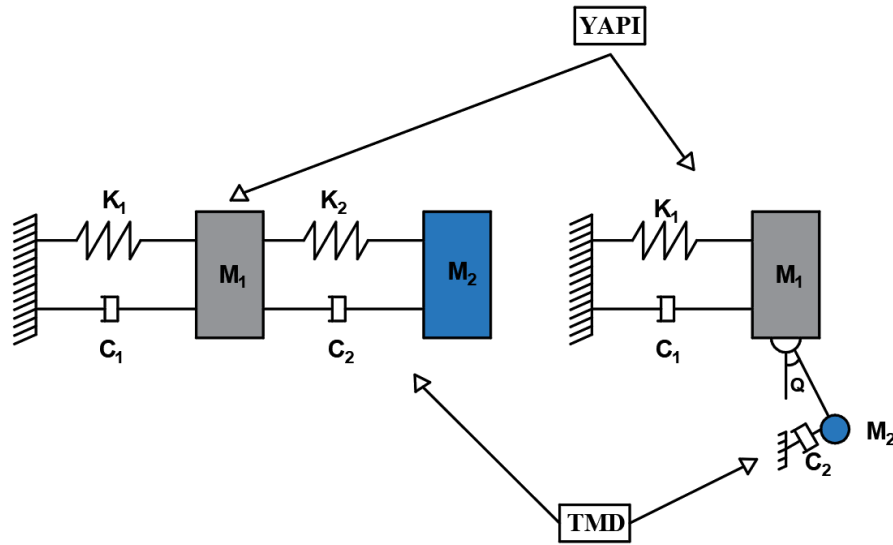
Pistonun hareketiyle akışkan bölmeleri arasında akmaktadır. Akışkanın bölme büyüklüklerine göre büyükten küçüğe ya da zıttı şekilde hareket etmesi, basınç kaybına ve dolayısıyla enerjinin dağıtılmasıyla sonuçlanmaktadır (Agrawal ve Amjadian, 2022). $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki düşük ve yüksek sıcaklıklarda çalışmak için uygundur (Constantinou ve Symans, 1992; Agrawal ve Amjadian, 2022). Viskoz sönümleyiciler, diyagonal şekilde, zikzak ya da alt ve üst mafsal destekleriyle sisteme yerleştirilebilmektedir. Şekil 2.8’de Viskoz sönümleyici yerleşim örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Viskoz sönümleyici yerleşimi: a) zikzak, b) diyagonal, c) alt mafsal destekli, d) üst mafsal destekli (Zhang vd., 2012).

2.2.1.5. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler

Ayarlı kütle sönümleyiciler, yapıya bir yay ve katı kütle ile bağlanmış yer değiştirmeye bağlı titreşim sönümleyicilerdir. Sisteme gelen dış yüklerin enerjisini yay aracılığıyla depolamakta ve yapıya bağlanmış kütleyle aktarmaktadır. Kütle bu enerjiyi, salınımlar yaparak sönümlenmektedir. Kütle sönümleyicinin frekansı iyi bir titreşim kontrolü için yapının doğal frekansını karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır (Rakicevic vd., 2012). Frahm'ın önerdiği bu sistemin, basit bir mekanik düzeneğe sahip olması, maliyet açısından sağladığı avantajlar ve çalışma güvenliği onu diğer titreşim sönümleyiciler arasında ön plana çıkarmaktadır (Frahm, 1911; Yang vd., 2022). Dünya üzerinde bina, köprü, kule ve baca gibi çeşitli yapı örneklerinde birçok uygulaması bulunmaktadır. Kanada'da Canadian National Tower, Amerika'da Citicorp Center ve John Hancock Tower, İngiltere'de Millennium Bridge, Katar'da Aspire Tower, Japonya'da Chiba Port Tower, Tayvan'da Taipei 101 Tower ve Çin'de World Financial Center gibi yapılara yerleştirilmiş örnekleri bulunmaktadır (Gutierrez ve Adeli, 2013; Yang vd., 2022). Şekil 2.9'da klasik bir ayarlı kütle sönümleyici (Tuned Mass Damper, TMD) mekanizması verilmektedir.

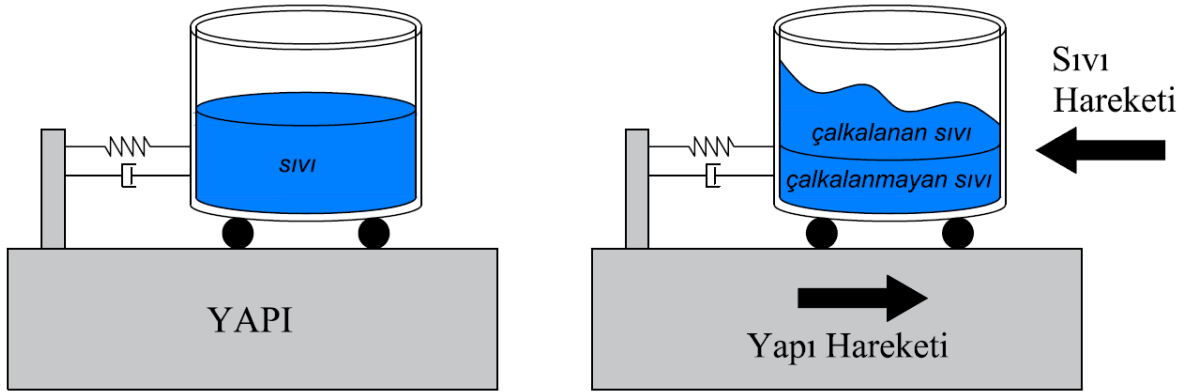


Şekil 2.9: Ayarlı kütle sönümleyici mekanik modeli.

2.2.1.6. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler

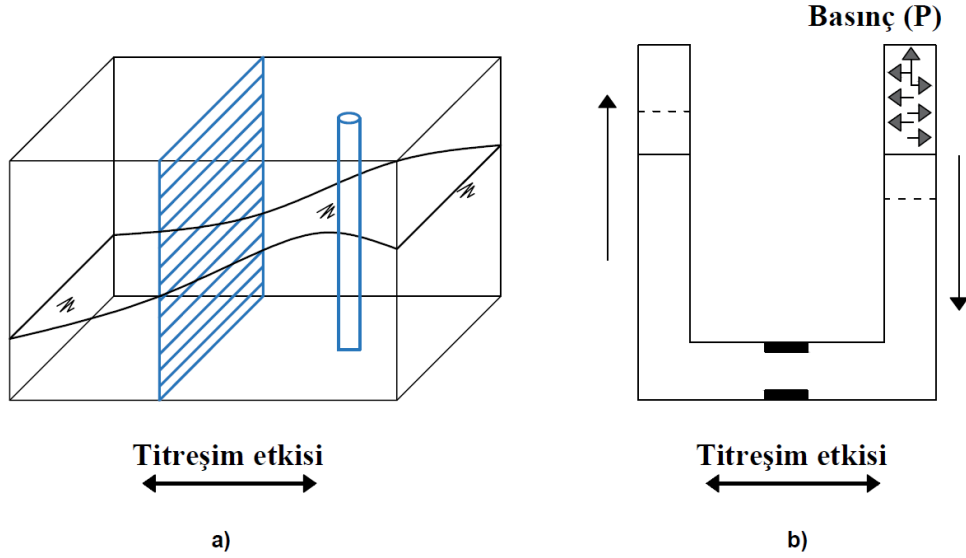
Ayarlı sıvı sönümleyiciler, kütle sönümleyicilerin bir türevi olan, titreşimi katı kütle yerine sıvı kullanarak sağlayan titreşim sönümleyicilerdir. Sıvıların çalkalanma mekanizmalarından faydalanarak enerjiyi sönümlenmektedirler. Kütle sönümleyicilerle benzer şekilde katı kütle de barındırmaktadır. Bahsi geçen katı kütle, sıvı sönümleyici tankın kütlesi ve çalkalanmayan sıvının kütlesidir. Abramson, sıvıların tamamen çalkalanmayarak, bir

kısımının katı bir kütle gibi davrandığını çalışmasıyla ortaya koymuştur (Abramson, 1966; Rouf, 2005). Ayarlı sıvı sönümleyicili sistemlerde, sisteme gelen dış yüklerin enerjisi kullanılarak, yapı hareketine zıt yönde sıvı çalkalanmakta ve enerji sönümlenmektedir. Şekil 2.10'da klasik bir silindirik tabanlı ayarlı sıvı sönümleyici örneğinin çalışma mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Ayarlı sıvı sönümleyici çalışma mekanizması.

Sıvı sönümleyiciler, tankın taban geometrisine göre isim almaktadır. Sıvıların çalkalanma mekanizmalarından faydalanmaları sebebiyle, tankın boyutları enerji sönümü için önem arz etmektedir. Düz tabanlı ayarlı sıvı sönümleyiciler dayanıklılık söz konusu olduğunda eğimli tabana sahip sönümleyicilerden daha iyi olarak görülmekte ancak tank sıvısının az olduğu durumda eğimli tabana sahip sönümleyiciler ön plana çıkmaktadır (Zhang, 2020; Cavalagli vd., 2021). Ayrıca tankın taban ve yükseklik boyutları için yapılan bir çalışmada, yüksekliğin, tabandaki etkili sıvı uzunluğuna oranının %15'ten fazla olması önerilmektedir (Fujino vd., 1992). Ayarlı sıvı sönümleyici tasarımları iki ana model üzerinden çeşitlendirilmektedir. Bu tasarımlar, klasik salınan sıvı sönümleyici ve ayarlı sıvı kollu sönümleyicidir. Şekil 2.11'de salınan çubuk ve plaklı sıvı sönümleyici ve sıvı kollu sönümleyici örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.11: Ayarlı sıvı sönümleyici çeşitleri: a) Salınan plaklı ve çubuklu, b) Sıvı kolu (Soong ve Constantinou, 1994).

Ayarlı sıvı sönümleyiciler, bakım, onarım ve kurulum kolaylığına sahip, eski yapılara ya da yeni inşa edilecek yapılara uygulanabilir sistemlerdir. Sönümleyici tank içerisinde bulunan sıvının karakteristik özelliklerini kullanması sebebiyle, sönüm özelliklerinin artırılabilceği birçok özellik barındırmaktadır. Tank içerisinde kullandığı sönümleyici sıvısının yoğunluğu ve viskozitesi gibi özellikler ile kontrol performansı artırılabilir (Xin vd., 2009; Debbarna vd., 2010; Sun vd., 2010; Cheng vd., 2015; Das ve Choudhury, 2017). Kontrol performansını arttıracak parametrelerin çeşitliliği, ayarlı sıvı sönümleyici cihazları cazip kılmaktadır.

Dünya üzerinde ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) kullanılan yapı örneklerinin sayısı giderek artmaktadır. Ayarlı sıvı sönümleyici (TLD), ayarlı sıvı kolu sönümleyici (tuned liquid column damper, TLCD) ve ayarlı çalkalama sönümleyicisi (tuned sloshing damper, TSD) eklenmiş yapı uygulamalarının bir özeti Tabi 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1: Sıvı sönümleyici uygulanmış yapı örnekleri.

Yapı Adı	Konum	Kullanılan Sistem
One Wall Centre	Vancouver, Kanada	TLCD
Comcast Center	Philadelphia, ABD	TLCD
Random House Tower	New York, ABD	TLCD
One Rincon Hill South Tower	San Francisco, ABD	TLMD
British Airways i360	Brighton, İngiltere	TLD
Hyatt Hotel	Osaka, Japonya	TLCD
Narita Airport Tower	Chiba, Japonya	TSD

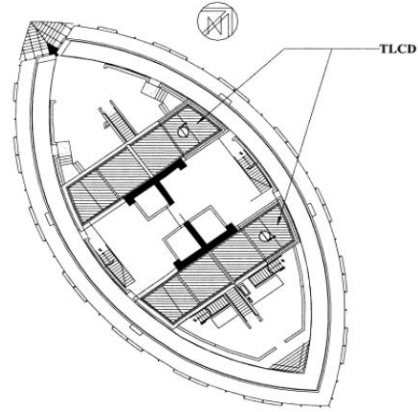
Tablo 2.1 (devam):

Shin Yokohama Prince Hotel	Yokohama, Japonya	TLCD
Yokohama Marine Tower	Yokohama, Japonya	TSD
Higashi Kobe Bridge	Kobe, Japan	TLCD
Gold Tower	Utazu, Japan	TSD
Tokyo International Airport Tower	Tokyo, Japonya	TLD
Nagasaki Airport Tower	Nagasaki, Japonya	TLD

Tablo 2.1’de gösterilen TLD ve türevlerinin kullanıldığı yapılar arasında birçok örnek bulunmaktadır. One Wall Center binası, ince uzun tasarımıyla, rüzgâr titreşimlerinden oldukça etkilenen ve TLCD kullanılarak titreşim kontrolü sağlanan yapı örneklerinden biridir. Bu yapıda rüzgâr titreşimlerini önlemeye yönelik, 4 kat yüksekliğinde ve 227 bin litreyi aşan kapasitedeki 2 ayarlı sıvı kolon sönümleyici tank yerleştirilmiş, suyun harmonik frekansı ile titreşimlerin bastırılması hedeflenmiştir (Garrido Kogan, 2016). Rüzgâr tüneli testlerine göre tahmin ettikleri 10 yıllık ivmelenmeyi dikkate alarak, yapının en üstüne yangın söndürmeyi de kullanım amacına dahil eden TLCD yerleştirilmiş, itfaiye görevlilerinin kullanımı için gerekli su pompası ve jeneratör dahil edildiğinde dahi, ekonomik bir tasarım sunduğu anlaşılmıştır (Irwin ve Breukelman, 2001). Şekil 2.12’te One Wall Center binası ve kullanılan TLCD kesiti gösterilmektedir.



a)



b)

Şekil 2.12: a) One Wall Center binası (onewallcentre.ca), b) Kullanılan TLCD kesiti (Irwin ve Breukelman, 2001).

Comcast Center binası rüzgâr titreşimlerini önlemeye yönelik tasarlanmış ABD’de TLCD uygulanan ilk yapıdır (Gutierrez Soto ve Adeli, 2013). Yapıya, 1300 tonluk su alma kapasitesine sahip, 900 ton öz ağırlığı olan tek bir ayarlı sıvı kolon sönümleyici (TLCD) yerleştirilmiş, en ince eksenindeki yatay yer değiştirmeleri azaltmak hedeflenmiştir (Konar vd., 2024). Yapıldığı dönem için türünün en büyük sönümleyicisine sahip TLCD sistemi ile bina salınımı önlenmiş, maliyet tasarrufu sağlanmıştır (motioneering.ca). Şekil 2.15’te Comcast Center binası ve kullanılan sönümleyici türünü tanıtan bir görsel gösterilmektedir.



Şekil 2.13: a) Comcast Center binası, b) Yapıda kullanılan TLCD şekli (motioneering.ca).

TLD uygulanmış yapı örnekleri arasında, One Rincon Hill South Tower yapısı kullandığı sönümleyici çeşidiyle farklıdır. Kulede, TLD’nin bir çeşidi olan ayarlı sıvı kütle sönümleyici (Tuned Liquid Mass Damper, TLMD) kullanılmıştır. San Andreas fayının bulunduğu bu bölgedeki depremler ve kasırgalara yol açan kuvvetli rüzgârları önlemeye yönelik yapının en üst katına TLMD’ler yerleştirilmiştir. Rüzgâr titreşimlerine karşı yapı üstünde bulunan su tankı içerisindeki bölme şeklinde ekranlar, yapının ivmesine göre suyun salınımını ayarlamaya yardımcı olmaktadır (sfgate.com). Sönümleyici tasarımında, 45 bin galon su kapasiteli 4 tank kullanılmış, inşaat sırasında ivmeölçerlerden toplanan verilere göre son su derinliğine karar verilmiştir (Klemencic vd., 2008). Şekil 2.14’te One Rincon Hill South Tower yapısı ve TLMD yerleştirilen en üst katın yakın bir gösterimi verilmektedir.

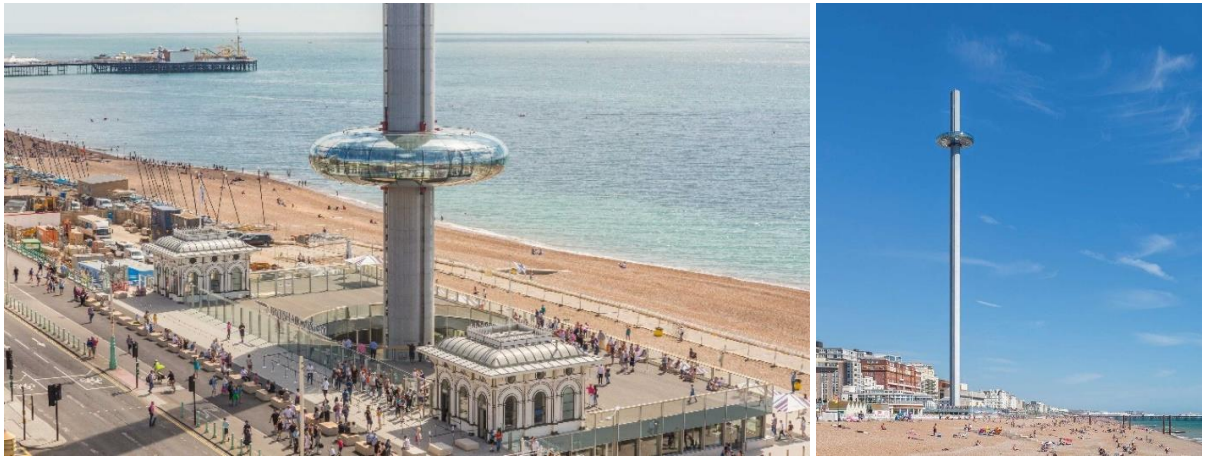


a)

b)

Şekil 2.14: a) One Rincon Hill Tower (skyscrapercenter.com), b) TLMD yerleştirilen bölgenin yakın ölçekli görüntüsü ve TLMD şekli (techeblog.com).

TLD uygulanmış yapılar arasında dikkat çeken bir diğer yapı British Airways i360 yapısıdır. Bu yapı, İngiltere’de sahil kenarına inşa edilmiş ve oldukça rüzgâr alan bir bölgede bulunmaktadır. Çapına oranla oldukça ince ve uzun bir yapı olan British Airways i360 kulesi, rüzgâr titreşimlerinin önlenmesinde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yapıda yolcu taşıyan hareketli camdan bir teleferik bölmesi bulunmakta ve 360 derece görüş alanı sağlayan bir gözlem kulesi görevi görmektedir. Şekil 2.15’te British Airways i360 yapısını gösteren iki görsel verilmiştir.

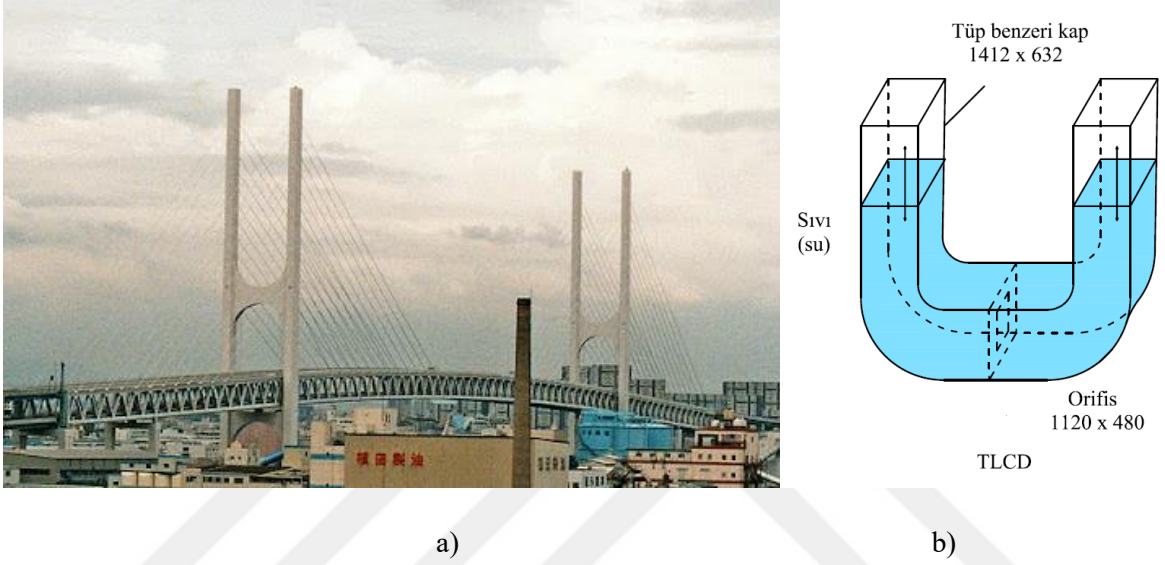


a)

b)

Şekil 2.15: a) British Airways i360 kulesi, b) Genel görünüş (bauder.co.uk).

Higashi Kobe Bridge, inşaat aşamasında TLCD kullanılan uzun açıklıklı kablo destekli köprülerden biridir. Köprü askılarının ana taşıyıcı elemanları olan pylonların inşaatı sırasında titreşim kontrolü sağlamak için TMD ve TLCD kullanılmıştır. Köprü kulesinin tepesine uyarıcı ve sönümleyiciler yerleştirilerek titreşim testleri yapılmış, sönümleyici verimliliği doğrulanmıştır (Kitazawa vd., 1992). Şekil 2.16’da Higashi Kobe Bridge ve kullanılan TLCD şekli gösterilmektedir.

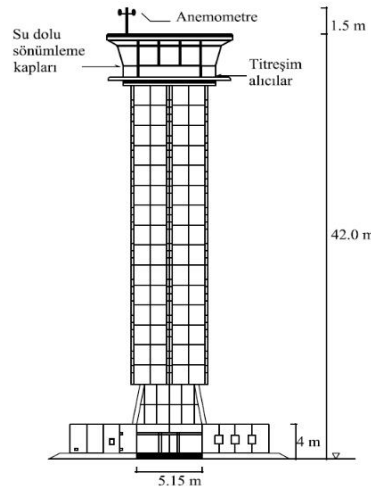


Şekil 2.16: a) Higashi Kobe Bridge (bridgeofweek.com), b) Köprüde kullanılan TLCD şekli (Kitazawa vd., 1992).

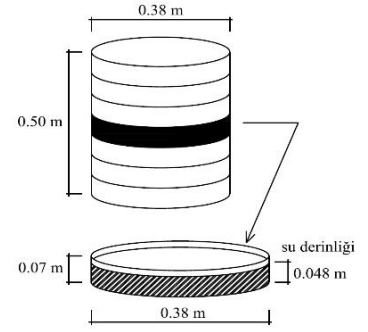
Nagasaki Airport Tower, rüzgâr titreşimlerine maruz kalan çoklu sığ kaplardan oluşturulan TSD yerleştirilmiş yapı örneklerinden biridir. Kulede, trafik kontrol odası ve merdiven sahanlıklarına toplamda 950 kg’lık 25 ünitesi olan TSD yerleştirilmiştir (Kareem vd., 1999). Şekil 2.17’de Nagasaki Airport Tower’a ait bir görsel ve kulede kullanılan TSD şekli gösterilmektedir.



a)



b)

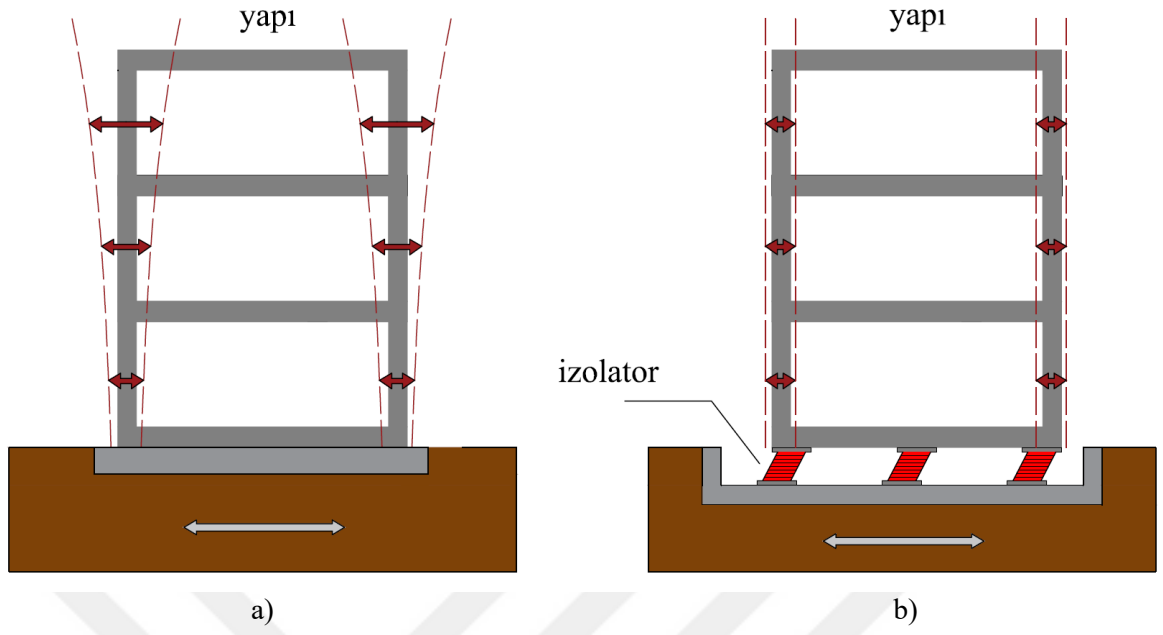


c)

Şekil 2.17: a) Nagasaki Airport Tower (megaconstrucciones.net), b) Kulenin ölçekli görüntüsü, c) Kulede kullanılan TLD (Tamura vd., 1995).

2.2.2. Taban İzolasyon Sistemleri

Taban izolasyon sistemleri, üst yapı ile zemin arasındaki ilişkiyi kesmek için geliştirilmiş kontrol cihazlarını ifade etmektedir. Başta deprem olmak üzere kuvvetli titreşimlerin sönümlenmesinde yardımcı olmaktadır. Yapıya zeminden iletilecek bir titreşimin üst yapıya aktarımını taban seviyesinde tutmakta ve en az hasar düzeyi için izolasyon katmanında titreşim sönümlenmesi gerçekleşmektedir. Köprü ve bina tasarımlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yerleştirildikleri bölgede, kullanılan izolasyon cihazının özelliklerine göre yaptığı salınımlarla, titreşimlerin yarattığı mekanik enerjiyi izolasyon katmanında hapsedmekte ve sönümlenmektedir. Geleneksel bir yapının zemin titreşimleri karşısında gösterdiği davranış ve taban izolatörü kullanılmış bir yapının davranışı Şekil 2.18'de gösterilmektedir.



Şekil 2.18: Zemin titreşimleri altında yapı davranışı: a) geleneksel yapı, b) taban izolatörlü yapı.

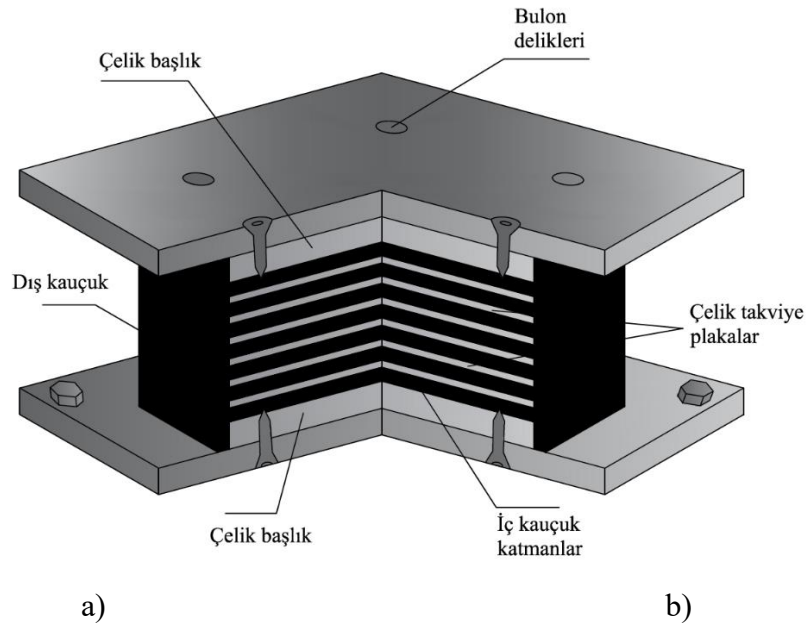
Taban izolasyon sistemleri, yapıya iletilecek titreşimlerin azaltılmasını, yapının temel frekansını olabildiğince sismik titreşimlerin etkin frekansından uzaklaştırarak sağlamaktadır (Matsagar ve Jangid, 2008; Li vd., 2013b; Eltahawy vd., 2021; Jin vd., 2023). Yapı periyodunu uzatarak, sismik titreşimlerin izolasyon katmanında esnek hareketlerle zayıflamasını hedeflemektedir. Sismik izole edilmiş yapılarda, büyük yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Ayrıca yapı ağırlığının fazla olduğu çok katlı yapılarda, izolatörler yeteri kadar hareket edemeyerek sismik titreşimlerin üst yapıya ulaşmasının önüne geçilememektedir. Bu gibi durumlar için sönümleyici ilavesi önerilmektedir. Sismik koruma için taban izolasyon sistemlerinde, izolatör seviyesindeki yer değiştirmeleri azaltmak ve yapısal tepkiyi iyileştirmek için sönümleyici ilavesi yapılmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999; Iskhakov ve Ribakov, 2007). İzolatörlerin ivme azaltma kapasitesine ek olarak sönümleyicilerin yapısal deplasmanları sınırlandırmalarından faydalanılmakta ve sismik denge sağlanmaktadır.

Taban izolasyon sistemleri, pasif kontrol altında değerlendirilen maliyetli sistemlerdir. Bakım ve onarımları teknik bilgi gerektirmektedir. Genellikle yıllık periyotlarda ya da büyük bir deprem sonrası bakımı yapılmaktadır. Ana malzemelerinin onarıma uygun olması ve tekrar kullanılabilirliği açısından işlevseldir. Kullanılan izolasyon çeşidine göre performansını etkileyebilecek durumlar için önlem alınmaktadır. Kapalı bir mekânda yerleştirildiklerinde, izolasyon yatağındaki sürtünmeyi etkileyebilecek toz gibi kirlilik unsurlarına dikkat edilmektedir. Açık mekanlarda yerleştirilen izolasyon sistemleri, olumsuz hava koşulları, pürüz

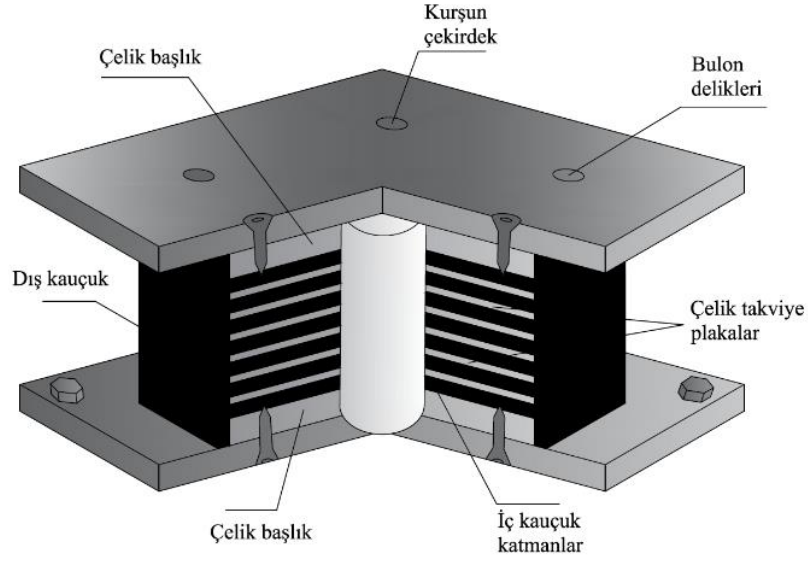
yaratabilecek her türlü kirlilik ya da korozyona sebep olabilecek sudan etkilenebilmektedir. İzolatörlerin doğrudan betona yerleştirildiği durumlarda, betonun hava sıcaklığından etkilenecek çatlama, izolatör etkinliğini azaltabilmektedir. Soğuk hava koşulları altında yerleştirilen izolatörlerin bu durumlardan en az düzeyde etkilenmesi için çelik plakalar kullanılmaktadır (Sağiroğlu vd., 2018). Temel çevresel etkilerin dışında, izolatör yerleştirilen yapı çevresindeki, patlama ve tadilat gibi titreşimler de izolasyon sistemlerinin mekanik aksamalarına etki ederek onarım gerektirmektedir. İzolasyon sistemlerinin gerekli bakım ve onarım önlemlerinin alınmasıyla kontrol sisteminin kullanım ömrünü uzatmak mümkündür. Taban izolasyon sistemleri elastomerik, kaymaya dayalı ve yaylı sistemler olmak üzere 3 başlıkta incelenmektedir.

2.2.2.1. Elastomerik Sistemler

Elastomerik sistemler, çelik plakalar, lamine pedler ve kauçuk katmanlardan oluşturulan, tarihi 1936 yılına tarihlenen izolasyon sistemleridir (Sayed-Ahmed, 2012). Yatayda kauçuk malzemenin esnekliğinden faydalanarak enerjiyi sönmülemekte ve düşeyde çelik plakalar ile rijitliği sağlamaktadır. Düşük sönmümlü (Low Damping Rubber Bearing, LDRB), yüksek sönmümlü (High Damping Rubber Bearing, HDRB) ve kurşun çekirdekli kauçuk (Lead Rubber Bearing, LRB) yatak çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de sırasıyla yüksek sönmümlü kauçuk izolatör ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatör çeşitleri görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 2.19: Yüksek sönmümlü kauçuk izolatör.



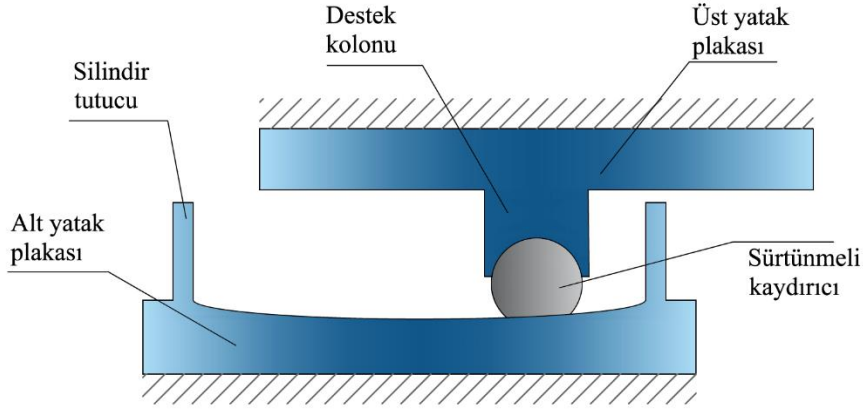
Şekil 2.20: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör.

Elastomerik izolatörler, çelik plakalar arasına sıralanmış, çelik ve kauçuk katmanlardan üretilmektedir. Yüksek sönümlü ve düşük sönümlü kauçuk izolatörler üretim ve uygulama bakımından neredeyse aynıdır. Yüksek sönümlü kauçuk sistemlerin farkı, kauçuğun daha yüksek sönümlemeye sahip olmasıdır. Düşük sönümlü kauçuk izolatörler ek sönümleme elemanları gerektirmektedir. Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler, kauçuğa sönüm kapasitesini arttırmaya yönelik yağ, reçine, vulkanizasyon maddeleri, karbon siyahı ve plastikleştiriciler gibi malzemelerin ilavesiyle elde edilmektedir (Kazuto ve Kimura, 2020; Pöschl vd., 2020; Chen vd., 2022; laibin.com.tr). Kurşun kauçuk izolatörler, merkezinde kurşun çekirdek bulunan çelik plaka ve kauçuk katmanlardan oluşan elastomerik sistemlerdir. Merkezdeki çekirdeğin görevi sönümleme kabiliyetini arttırmaktır.

2.2.2.2. Kaymaya Dayalı Taban İzolasyon Sistemleri

Çelik bir plaka üzerinde malzemenin kayma hareketinden faydalanarak sönümleme sağlayan izolasyon sistemleridir. Temel çalışma prensibi, üst yapı ile taban arasında kayan bir izolasyon sisteminin kurulmasına dayanmaktadır. Yapısal tepkilerin azaltılmasında bu sistemlere yönelik, kayma yüzeylerindeki gerekli sürtünme özelliklerinin sağlanması için üst ve alt yapı arasında motor yağı, kum ve grafit tozu benzeri malzemeleri içeren bir bağlantı elemanı önerilmiştir (Qamaruddin, 1978; Arya vd., 1978; Avinash vd., 2022). Önerilen sistem sürtünme tipi bir bağlantıdır. Bu sistemin dezavantajı, sismik bir titreşim sonrası, üst yapının yer değiştirmesini kalıcı hale getirebilmesidir. Üst yapı konumunun eski haline dönebilmesi için bir geri yükleme mekanizması kurularak sürtünmeli sarkaç sistem (Friction pendulum

system, FPS) önerilmiştir (Zayas vd., 1990; Avinash vd., 2022). Şekil 2.21’de sürtülmeli sarkaç sistem örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.21: Sürtülmeli sarkaç izolatör.

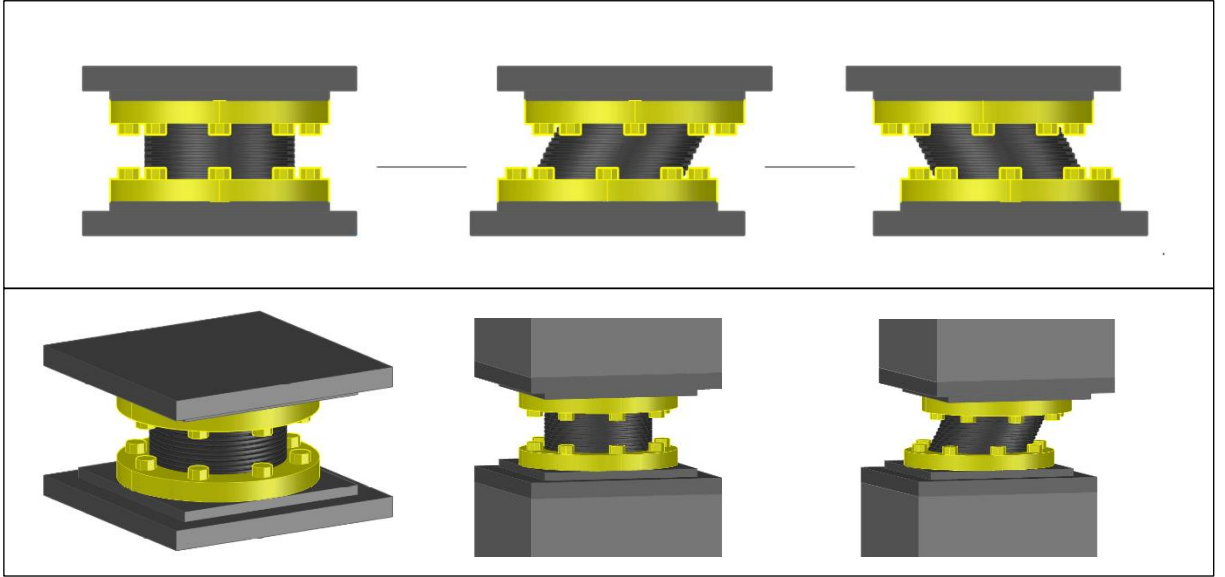
Sürtülmeli sarkaç sistemler, çelik yüzeyde, sürtünme özelliğine göre kaplanmış sarkacın hareket etmesiyle yapını periyodunu attırmayı ve burulmayı azaltmayı amaçlamaktadır. Kaydırıcı eleman sürtünme özelliği düşük olan kompozit malzemelerle kaplanmaktadır. Zamanla çoklu sürtülmeli kayar yüzeylere sahip sistemler geliştirilerek sarkaç sisteme ek sönümleme sağlanmıştır.

2.2.2.3. Yaylı Sistemler

Temel izolasyon çeşitlerinde, genellikle yatay yönelimli hareketleri engellemeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Elastomerik ve kaymaya dayalı izolasyon sistemleri yatay yer değiştirmeleri karşılamak üzere planlanmaktadır. Yapılan son araştırmalar, titreşimlerin dikey yönde yaratacağı ivmelenmenin olumsuz etkilerini azaltma gerekliliğini vurgulamaktadır. Taban izolasyonlu bina örneklerinde yapılan uygulamalarda, dikey yöndeki ivmelenme, zemine göre anlamlı mertebede artarak yapıyı olumsuz etkilediği görülmüştür (Furukawa vd., 2013; Ryan vd., 2016; Eltahawy vd., 2021). Bu durumun önüne geçmek adına, yay tipi izolasyon sistemleri geliştirilmiştir. Temel çalışma prensibi, yatay ve düşeyde esnek hareketlerle sönümü sağlamaktır. Ancak sönümü sağlamak için viskoz sönümleyicilere ihtiyaç duymaktadır. İki sistemin birlikte sönümü sağlaması için çelik yay ve viskoz sönümleyiciden oluşan sistemler geliştirilmiştir.

2.3. TABAN İZOLASYON SİSTEMLERİNE SÖNÜMLEYİCİ İLAVESİ

Yapı kontrol sistemleri, yapıların çeşitli titreşim kaynaklarından en az düzeyde etkilenmesini sağlayacak şekilde düzenlenmiş, sönümlenme mekanizmalarıdır. Yapıya dışarıdan etki edecek herhangi bir dış yük karşısında bu sistemler, yapıda biriken enerjiyi absorbe ederek yapısal tepkiyi kontrol etmeyi hedeflemektedir. Sismik taban izolatörleri, yapıya iletilen titreşimlerin hızla sönümlenmesini sağlayan ve ivme azaltma etkisiyle ön plana çıkan kontrol cihazlarından biridir. Özellikle deprem kaynaklı titreşimlerin önlenmesinde, zeminden iletilen enerji ile yapı arasındaki bağı kırarak sismik enerjinin üst yapıya aktarımını kısıtlamaktadır. Zeminden iletilen titreşimlerin ivmesini dikkate değer oranlarda azaltmakta ve deformasyonları, yapıdaki izolasyon tabakasında meydana gelen yer değiştirmeleri karşılamaya yönelik sismik izolatörlerde sınırlandırılacak şekilde çalışmaktadır (Komodromos, 2008). Sismik titreşimleri sönümlenmede, gövdesindeki esnek yapıdan faydalanarak yaptığı yönelimli hareketlerle, titreşimin büyük bir kısmını taban seviyesinde sönümlenmektedir. İzolatör hareketinin temsili bir gösterimi Şekil 2.22’de gösterilmektedir.



Şekil 2.22: Sismik izolatör hareketinin temsili gösterimi.

İzolatörün hareketliliğini sağlayan sünek malzeme, titreşimlerin olabildiğince zemin seviyesinde sınırlı kalmasını sağlayan başlıca etmenlerdendir. Sünekliğin düzeyi, titreşimin sönümlenmesi için önemlidir. Ancak fazla sünek bir izolatör tasarımı, izolatörün gereğinden fazla hareket etmesine ve düşük titreşimler altında dahi yapı maliyetini olumsuz etkileyecek yapısal hasara sebep olabilmektedir. Gereğinden daha rijit tasarım ise izolatörün hareketliliğini azaltıp yeteri kadar enerjiyi sönümlenememesine yol açmaktadır. Şiddetli depremler,

izolatörlerin aşırı hareket etmesine sebep olan durumların başında gelmektedir. Yakın fay depremleri, yıkıcı etkileriyle bilinen ve yapıda büyük yer değiştirmelere yol açan sismik etkilere sebep olmaktadır. Yapıların izolasyon tabakasında meydana gelecek rijitlik azalması, yakın fay depremleri altında izolasyon sisteminin yer değiştirme ihtiyacının artmasına sebep olabilmektedir (Yu vd., 2025). Sistemin yer değiştirme talebindeki bu artış, izolatörlerin hasar almasına kadar sonuçlara yol açmaktadır. Bu nedenle izolatörlerin çevresinde sismik boşluklar bırakılmakta, kapama elemanları ve hendek duvarlar yapılmaktadır. Böylece izolatörlerin etrafında rahatça hareket ettiği bir alan bırakılması ve çalışırken tasarımın korunması hedeflenmektedir. Ancak izolatörlerin aşırı hareketiyle sonuçlanan durumlarda, izolatörler hendek duvarlara (Masroor ve Mosqueda, 2012; Masroor ve Mosqueda, 2015), sürtünmeli sarkaç yatakların sınırlayıcılarına çarpabilmekte ya da kauçuk yatakların dengesizleşmesine sebep olabilmektedir (Bao ve Becker, 2018). 20.Yüzyıl sonlarında, sismik izolasyonlu yapıların yakın fay depremleri altında uygulanabilirliği konusunda araştırmalar yapılmış (Hall vd., 1995; Heaton vd., 1995; Jangid ve Kelly, 2001) ve bir çözüm olarak sönümleyici ilavesi önerilmiştir (Kelly, 1999). Yakın fay depremlerine maruz yapıların sismik güvenliği konusunda, izolatörlere ilave sönümleyici kullanımına dair yapılan araştırmalar, sönümleyici desteğinin izolatörlü sistem tepkisini iyileştirmede ilave bir görev üstlendiğini göstermiştir (Lu vd., 2008; Etedali vd., 2013; Lu vd., 2013; Prakash vd., 2022; Yu vd., 2022; Jouneghani vd., 2023).

İzolatörler üretim, kurulum, bakım ve onarım gibi yüksek maliyetler gerektirebilecek kompleks sistemlerdir. Bu sistemlerin iyileştirilmesinde ilave edilecek sönümleyicilerin dış bir enerji kaynağına ihtiyaç duymayan sistemler olması, inşaat maliyetlerinden de kazanç sağlamaktadır. Sönümleyiciler, pasif, aktif, yarı-aktif ve hibrit kontrol cihazları olarak sınıflandırılmaktadır (Datta, 2010). Pasif sönümleme sistemleri, yapıya etkiyen titreşimleri sönümlemede kullanım sağladığından ekonomiktir. Bir kütle ve yay aracılığıyla yapıya bağlanmış bir mekanizmadan oluşmaktadır. Pasif kontrol sistemleri, dış bir enerji kaynağı gerektirmeden yapı rijitliğini ve sönümlemesini sağlayan ve yapının hareketine zıt yönde kontrol kuvvetleri oluşturan cihazların kullanıldığı, aktif kontrol sistemleri ise büyük miktarlarda dış enerji gerektiren ve yapıya önceden belirlenmiş miktarda kuvvet uygulayan aktüatörlerin kullanıldığı sistemlerdir (Luca vd., 2005). Yarı-aktif kontrol sistemleri, aktif kontrol sisteminden daha az enerji gerektirir ve sönümleme karakteristiği istenen şekilde ayarlanabilmektedir. Hibrit kontrolde, aktif ve pasif cihazlar birlikte kullanılmaktadır. Temelde benzer sönümleyici cihazları kullanan bu sistemler, işleyiş ve enerji kullanımı, parametre ayarı gibi konularda birbirinden ayrılmaktadır. Literatürde sismik izolasyon sistemlerinin, pasif

(Zelleke vd., 2015; De Domenico vd., 2018; Walsh vd., 2019; Mazloun vd., 2023), yarı aktif (Özbulut vd., 2011; Fu vd., 2019; Barrera-Vargas vd., 2020; Wang vd., 2022) ve aktif kontrol sistemleriyle (Jaballah vd., 2022; Akbari vd., 2024; Zhang vd., 2024) kullanımına dair çeşitli uygulama örnekleri bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, manyeto reolojik (MR) sönümleyici ve taban izolatörlü bir sistemin yerleştirildiği bir yapı ile iki serbestlik dereceli (2DOF) bir model oluşturulmuş, hibrit sistemde MR damperin kontrole etkisini incelenmiştir (Chen vd., 2014). Bir başka çalışmada, yapıya eklenmiş 5 izolatör çeşidine, viskoz sönümleyici, visko-elastik sönümleyici ve sürtünme tipi sönümleyici ilavesinin yapı kontrolüne etkisini araştırılmış, bu üç sönümleyicinin de izolatör yer değiştirmesini azalttığı ve esnek sürtünmeli taban izolatörlü ve viskoz damperli sistemin en etkin deplasman düşüşü sağladığını tespit edilmiştir (Zelleke vd., 2015). Kataria ve Jangid (2016), bir köprünün sismik izole edilmesinde, çeşitli izolatörler ile yarı aktif sertlik sönümleyici kullanımını araştırmış, sismik kontrol için uygun sistemler olduğunu gözlemlemiştir. Kandemir Mazanoğlu (2017), tabandan izole edilmiş iki bitişik binanın darbe etkisiyle çarpmasını önlemek için doğrusal viskoz damper ile birbirine bağlandığı bir sistem oluşturmuş, sabit tabanlı binalara kıyasla, tabandan izoleli binaların damper kapasite ihtiyacını azalttığını belirlemiştir. Saha vd. (2018), sismik uyarımlar altındaki bir otoyol köprüsünün izolasyonunda, polinom sürtünmeli sarkaç izolatörü ile viskoz akışkan damper ve doğrusal olmayan akışkan viskoz sönümleyicinin kullanımını incelemiş, bu sönümleyicilerin sismik tepkiyi azaltmada oldukça etkili olduklarını ve doğrusal akışkan viskoz damperin sismik tepkiyi azaltmada daha ön plana çıktığını gözlemlemiştir. Stanikzai vd. (2019), deprem yer hareketleri altındaki tabandan izole edilmiş bir yapıda, tek ayarlı, çok ayarlı ve dağıtılmış çok ayarlı kütle sönümleyici monte edilmesinin sismik tepkiyi azaltma etkisini araştırmış, her kat seviyesine kütle sönümleyici ilavesinin üst kat ivmesini azalttığını ve dağıtılmış çoklu ayarlı kütle sönümleyicinin daha etkili olduğunu tespit etmiştir. Deringöl ve Güneyisi (2020), moment çerçevesel bir binanın sismik korunmasında, çeşitli izolatör türleri ile sürtünme sönümleyicinin birlikte kullanıldığı damperli izolasyon sistemini araştırmış, kullanılan izolatör çeşitlerinin sönümleyici ile uygulanmasının, mutlak ivmeyi yükseltmeden katlar arası ötelemeyi kısıtladığını gözlemlemiştir. Talyan vd. (2021), sismik uyarımlar altındaki köprülerin tepkisi üzerinde, çeşitli taban izolatörleri ve sönümleyicilerden oluşan hibrit sistem örneklerini araştırmış, karşılaştırdıkları sistemler arasında taban kesme kuvveti ve izolatör yatak yer değiştirmelerini azaltmada en etkili kurşun çekirdekli kauçuk yatak veya sürtünmeli sarkaç izolasyonu ile akışkan viskoz sönümleyicilerin kullanımını olduğunu belirlemiştir. Javanmardi vd. (2022), çelik kablolu bir köprünün sismik koruması için sismik

izolatör ve metalik damperin kullanıldığı bir hibrit izolasyon sistemi oluşturmuş, sismik tepkiyi azaltmada etkili bir sistem olduğunu tespit etmiştir. Banerjee ve Matsagar (2023), hastane binasının sismik izolasyonu için bağımsız fiber takviyeli elastomerik taban izolatörü ve taban katına yerleştirilmiş ayarlı kütle sönümleyici kullanmış, sönümleyici ilavesinin dikkate değer oranlarda tepe yatak deplasman tepkisini azalttığını gözlemlemiştir. Islam ve Jangid (2024), taban izolatörlü sıvı depolama tanklarına, negatif sertlik ve âtil sönümleyicileri ilave etmiş, yakın alan ve uzak alan deprem uyarımları karşısında, sönümleyici ilavesiz sisteme kıyasla daha iyi kontrol performansı sağladığını belirlemiştir.

2.3.1. Sismik İzolasyonlu ve Ayarlı Sıvı Sönümleyicili Sistemler

Sismik izolatörler, deprem kaynaklı titreşimlerin önlenmesinde, sismik titreşimlerin sebep olduğu ivmelenmenin azaltılmasında etkilidir. Ancak yakın fay gibi yıkıcı etkileri olan ve büyük yer değiştirmelere sebep olan depremlerde, izolatör hasarına sebep oluşabileceği için dikkatle tasarlanması gerekmektedir. Bu durumları karşılamaya yönelik tasarlanan izolatörlerin geometrileri ve maliyeti, izolatörlerin aktarılan kuvvetleri azaltma ve daha ekonomik çözümler sunma amacıyla ters düşebildiği ayrıca bazı yakın fay bölgelerinde sınırlı düzeyde kontrol avantajı sağladığı belirtilmektedir (Providakis, 2009). Bu nedenle, yakın fay hareketleri altındaki bölgelerin sismik korumasında izolatörlere ilave edilecek sistemlerin daha az maliyetli sistemler olması sismik izoleli yapıların arttırılması için gerekli görülmektedir. Pasif sönümleme cihazları, yapıya gelen yüklerin enerjisini sönümlemede kullanarak sunduğu enerji tasarrufuyla ön plana çıkmaktadır. Yapıya bir kütle ve yay aracılığıyla bağlanan bu sistemler, kontrolde malzeme akma-deformasyonu, sürtünme özellikleri, kayma mekanizması gibi durumlardan faydalanarak titreşim kontrolü sağlamaktadır. Bu sistemlerin en sık kullanılanları arasında katı bir kütle ve yaydan oluşan ayarlı kütle sönümleyiciler (Tuned Mass Damper, TMD) bulunmaktadır. Kütlenin yer değiştirmesi ile yapıdaki enerjinin sönümlenmesi hedeflenmektedir. Ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD), katı kütle yerine sıvıların kullanıldığı TMD'dir. TLD tankı içindeki sıvı, yapının hareketine karşı salınım yaparak enerjiyi sönümlemektedir. Sıvıların yoğunluk ve viskozite gibi çeşitli karakteristik özelliklerini kullanan bu sistemler, özellikle deprem ve rüzgâr kaynaklı titreşimlerin sönümlenmesinde tercih edilen pasif cihazlar arasında yer almaktadır. TLD'lerin sismik izolatörlerle birlikte kullanımına dair literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde yer alan sismik izolatörlü ve TLD'li kontrol sistemi içeren başlıca çalışmalar Tablo 2.2'de özetlenmektedir.

Tablo 2.2: Sismik izolatör ve ayarlı sıvı sönümleyici kullanılan kontrol sistemi çalışmaları.

Çalışma Özeti	Referans
Rüzgâr titreşimlerine maruz TLD eklenen bir yapı tabanına kararlı bağlanmamış elyaf takviyeli elastomerik izolatörler yerleştirilerek titreşim kontrolündeki etkisi araştırılmış, TLD ilavesinin ekonomik ve etkili bir çözüm olduğu tespit edilmiştir.	Love, vd., 2011
Tabandan izole edilmiş küçük ölçekli üç katlı bir kesme çerçevesi, farklı frekans ayarlama oranlarında ayarlı sıvı kolon sönümleyiciler (Tuned Liquid Column Damper, TLCD) kullanılarak deneysel bir çalışma yürütülmüş, taban izolasyon sisteminin yer değiştirme ihtiyacını azalttığı ve yapısal sistem performansını arttırdığını tespit edilmiştir.	Furtmüller vd., 2019
Deprem titreşimlerinin sönümlenmesinde, çelik kesme binalara eklenmiş kurşun-kauçuk yatak sistemler ve TLD'lerden oluşan sistemin kontrol performansı araştırılmış, hibrit sistemin izolasyon seviyesindeki yer değiştirme ihtiyacını azalttığı belirtilmiş ve sistemin daha etkili olduğu kütle oranı ve frekans oranı değerleri ifade edilmiştir.	Shoaei ve Oromi, 2019
Yüksek bir yapı tabanına sismik izolasyon için taban izolatörü (Base Isolator, BI) ve TLCD ilave edilerek optimum tasarım özellikleri elde edilmiş, TLCD'nin alt sisteme bağlanmasının, katlar arası kayma ve toplam ivmelerde önemli miktarda bir değişiklik yapmadığı gözlemlenmiştir.	Salaas vd., 2023.
Taban izolasyonlu bir yapı tabanına, sürtünmeli sarkaç ile güçlendirilmiş bir TLD yerleştirilerek sismik titreşim kontrolü performansı incelenmiş, gerekli sıvı miktarı ve izolasyon taban alanının azaltılmasıyla daha hafif sistem tasarımı sağlandığını belirtilmiştir.	Zhao vd., 2023
Taban izolatörü kullanılmış tek serbestlik dereceli (Single Degree of Freedom, SDOF) bir yapıya, geleneksel olmayan ayarlı sıvı kolon sönümleyici inerter yerleştirilmiş, taban izolatörünün yer değiştirmesini azaltmaya yönelik optimizasyon uygulanarak sayısal analizlerle sismik performansı değerlendirilmiştir.	Masnata vd., 2023
Bir havaalanı kontrol kulesinin rüzgâr titreşimlerini sönümlemede üçlü sürtünmeli sarkaç ayarlı sıvı sönümleyici cihazın kullanımı araştırılmış, yapısal yer değiştirme ve yapısal ivmenin azaltılmasında dikkate değer oranda etkisi olduğu tespit edilmiştir.	Hu vd., 2023

Tablo 2.2 (devam):

Gauss beyaz gürültü uyarımlarının iletildiği taban izolatörlü bir yapıya, TLCD cihazın kayıcı bir türevinin ilavesinin kontrole etkisi araştırılarak deneysel olarak test edilmiş, izolasyon tabakası yer değiştirmelerini yüksek oranlarda azaltabileceği belirtilmiştir.	Masnata ve Pirrotta, 2024
--	------------------------------

2.4. TABAN İZOLASYON SİSTEMLERİ VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLERİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TASARIMI

Günümüzde yapay zekâ teknolojilerinin gelişmesiyle, insan beyninin yapabildiği tasarım yapma, çözüm üretme, çıkarımda bulunma vb. birçok iş, makineler aracılığıyla yapılabilmektedir. Makine öğrenmesi, yapay zekanın bir alt dalı olan, makinenin veri ile eğitimi sonucu çıkarımda bulunma özelliğini kazanmasını ifade eden bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Makine öğrenmesi ile çeşitli yapay zekâ algoritmaları kullanılarak tahmin modelleri üretilmektedir. Kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda, makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak, sönümleyici parametre tahmini, sönümleyici dağılımı, yapı davranış tahmini, yorulma tahmini, performans değerlendirmesi, sönümleme kuvveti tahmini, yapısal sağlık izleme sistemi gibi yapay zekâ modelleri geliştirilmiştir (Chong vd.; 2014; Yücel vd., 2019; Li ve Zao, 2019; Farrokhi ve Rahimi, 2020; Bae vd., 2020; Bahiuddin vd., 2021; Sun vd., 2022). İzolasyon sistemleri içeren yapılara dair makine öğrenmesi çalışmalarında sismik güvenilirlik değerlendirilmesi, taban plaka tasarımında hava kabarcık oranı hesabı, izolatör ve sönümleyicili sistem modellemesi ve tasarımı, yapısal tepki tahmini, izolasyon sisteminin tepe yer değiştirme tahmini, izolatör tasarımı, sismik yanıt tahmini ve kauçuk yatak ömrünün tespiti, sönüm kapasitesi tahmini gibi konular işlenmiş, yapay sinir ağları, evrişimli sinir ağı, doğrusal regresyon, lasso regresyonu, ridge regresyonu, rastgele orman algoritması, destek vektör makinesi, karar ağacı algoritması, naive bayes, doğrusal diskriminant analiz ve k-en yakın komşu algoritması gibi yapay zeka algoritmaları denenmiştir (Moeindarbari ve Taghikhany, 2018; Nakabayash vd., 2020; Barakat, 2020; Al-Rawashdeh vd., 2022; Nguyen vd., 2022; Habib ve Yıldırım, 2022; Yavas vd., 2023; Zeng vd., 2024; Ocak vd., 2024b).

Ayarlı sıvı sönümleyiciler, yapay zekâ ile tasarımı oldukça yeni olan literatürde sınırlı örnekleri bulunan kontrol sistemleridir. Literatürdeki uygulama örneklerinden özetle: 20 katlı bir binanın rüzgâr ve sismik titreşimlere karşı kontrolünde, yarı aktif ayarlı sıvı çoklu kolon sönümleyici (TLMCD) kullanıldığı ayarlı sıvı duvar sönümleyici (TLWD) sistemde,

tekrarlayan sinir ağlarıyla (Ensemble of Recurrent Neural Network, ERNN) çoklu tehlike uyarılarına göre kontrol kuvveti tahmin edilmiş ve darbe azaltma stratejisi olarak uygunluğu değerlendirilmiştir (Wang vd., 2022). Yükseltilmiş bir su tankının TLD olarak görev aldığında sismik yer hareketleri altındaki dinamik tepkisi değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (Multivariate Adaptive Regression Splines, MARS) ve yapay sinir ağı (Artificial Neural Network, ANN) kullanılarak, susuz ve %60 su içeren tank için tahmin edilmiş, MARS modeline kıyasla ANN modelinin yer değiştirme tepkisini tahmin etmede daha başarılı olduğu tespit edilmiştir (Tahera vd., 2025).



3. YÖNTEM

Sunulan tez çalışmasında, taban izolasyonlu bir yapının kontrol sistemi tasarımı için optimizasyon işlemi ve kontrol sistemi parametrelerinin tahmini için makine öğrenmesi modelleri oluşturulması hedeflenmiştir. Tez çalışmasında, optimizasyon işlemi için iki farklı metasezgisel algoritma kullanılmıştır. Tezde yapılan ilk uygulamada, çok katlı bir yapı için yakın fay depremlerine karşı optimum tasarlanmış izolatör ve sönümleyicili hibrit sistem ve yalnızca izolatörlü sistem performanslarının karşılaştırılması üzerine odaklanılmış, TLD ilavesinin katkısı araştırılmıştır. Tasarım optimizasyonu için Geem ve diğerlerinin (2001) geliştirdiği armoni arama algoritmasının (harmony search algoritması, HS) bir türevi olan uyarlanabilir armoni arama algoritması (adaptive harmony search, AHS) kullanılmıştır. HS algoritması, sismik uyarımlar altında TLD'lerin optimum tasarımı için daha önce denenmiş, algoritma faktörlerinin uyarlanmasıyla elde edilen AHS algoritmasının daha iyi kontrol performansı parametreleri üreterek yapısal tepkiyi azalttığı gözlemlenmiştir (Ocak vd., 2022b). Hibrit sistem ve yalnızca izolasyonlu sistem için bu algoritma tercih edilmiştir. Tezin ikinci araştırma konusu olan hibrit sistem tasarımı için kontrol sistemi parametrelerini tahmin eden bir model oluşturulması sürecinde veri, optimizasyonla üretilmiştir. Tahmin modeli için gerekli optimum tasarım özelliklerinden oluşan verinin üretim süreci, zaman alıcı ve hesaplama maliyeti gerektirmektedir. Ayrıca, tezin ilk uygulamasında seçilen yapının özelliklerine göre bir optimum sistem üretilmiştir. Yapay zekâ modelinin daha geniş kapsamlı olması ve veri üretim hızının artırılması amacıyla, belirli bir yapı modeli yerine tek katlı bir yapıda standart bir kütle alınmış, optimizasyon süresini kısaltmak amacıyla optimum çözüme ulaşma hızı açısından, Rao (2016) tarafından geliştirilen ve tek bir fazdan oluşan Jaya algoritması tercih edilmiştir. Tahmin modeli geliştirilmesi için yapılan makine öğrenmesi uygulaması, regresyon türü bir problem olarak ele alınmış, çeşitli denetimli öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Bu bölümde, optimizasyon işlemi, kullanılan optimizasyon algoritmaları, makine öğrenmesi yöntemi, öğrenme algoritmaları, model değerlendirme ve model doğrulama teknikleri verilmektedir.

3.1. OPTİMİZASYON

Optimizasyon, bir problemin çözümünde, ulaşmak istenilen hedef doğrultusunda en uygun çözüme ulaşma sürecini ifade eden bir yöntemdir. Problemin amacına göre çeşitli senaryolar üretmek, en iyi sonucun alınması hedeflenmektedir. Tek bir amaç fonksiyonu

kullanılarak ya da birden fazla amaç gözetilerek yapılabilmektedir. Örnek olarak bir yapı tasarımı için amaç, en güvenli ve ekonomik tasarımın elde edilmesidir. Optimizasyon işlemi, yapı için optimize edilen çeşitli tasarım parametrelerini arttırıp azaltarak denemeler yapılmakta, yapı güvenlik kriterleri için gerekli sınır değerler içinde kalarak, en ekonomik tasarımı aramaktadır. Optimizasyon sonucunda, tasarım için optimum değere ulaşılmaktadır.

İnşaat mühendisliği alanında, optimizasyon çalışmalarının konusu genellikle malzeme, iş ve işçilik giderleri gibi temel yapısal maliyetlerin azaltılması, yapı tasarım güvenliği ve sürdürülebilir yapılara yönelik enerji tasarrufu olmaktadır. Optimizasyonda daha az malzemeye güvenli tasarım sınırları içerisinde kalarak optimum yapı tasarımlarının elde edilmesi hedeflenmektedir. Optimizasyon işlemi için son yıllarda sıklıkla adından söz edilen metasezgisel algoritmalar tercih edilmektedir. Metasezgisel algoritmalar, ilham kaynağı olarak doğayı, canlı yaşamını ve içgüdüsel davranışları konu alan ve bu olayların matematiksel formüllere dönüştürülmesi ile elde edilen bir optimizasyon aracıdır. Özellikle doğa olayları, canlıların öğrenme, yiyecek arama, avlanma ve yön bulma gibi becerilerinden esinlenen örnekleri bulunmaktadır (Kennedy ve Eberhart, 1995; Dorigo vd., 1996; Geem vd., 2001; Karaboğa, 2005; Yang, 2010; Rao vd., 2011; Yang, 2012; Mirjalili vd., 2014; Rao, 2016). Canlı içgüdüsel davranışlardan esinlenenlere örnek olarak gri kurt optimizasyon algoritması (Mirjalili vd., 2014) ve doğa olaylarından esinlenen algoritmalara örnek olarak çiçek tozlaşma algoritması (Yang, 2012) gösterilebilir. Gri kurt optimizasyon algoritması, gri kurtların yaşamının incelenmesiyle, kurtlar arasındaki hiyerarşik düzene dayanan sosyal davranışlardan ve avlanma stratejilerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Algoritmanın temel dayanağı, gri kurtlar içgüdüsel davranışlarından gelmektedir. Çiçek tozlaşma algoritması ise çiçeklerin bir tozlayıcı (kuş, arı vb. canlılar) ya da kendiliğinden tozlaşması sürecinden esinlenilmiştir. Tozlaşma için bir tozlayıcı olmadığı durumda dahi süreç devam etmektedir. Tozlaşmanın doğal döngüsü için tozlayıcı olmadan da kendiliğinden gerçekleşebilmektedir.

Tez çalışmasında, metasezgisel algoritmalar jaya algoritması ve armoni arama algoritmaları kullanılmaktadır. Kullanılan iki algoritma, yapısal sistem tasarımlarının optimizasyonunda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu algoritmalar, birçok çalışmada başarıyla uygulanmış ve tez çalışmasının konusu olan yapıların sismik kontrolü için optimum sistem tasarımı ile uyumludur. Rao tarafından geliştirilmiş Jaya algoritmasının, kontrol sistem tasarımı için etkili sonuçlar verdiği çalışmaların sayısı artış göstermektedir (Bekdaş vd., 2019; Çoşut vd., 2023; Tharehallimata ve Narasimhamu, 2023). Ayrıca armoni arama algoritmasının, çeşitli

mühendislik alanlarındaki çalışmalarındaki etkinliği bilinmektedir (Siddique ve Adeli, 2015; De Almeida 2019; Ulusoy vd., 2021). Armoni arama algoritması, jaya algoritmasından farklı olarak algoritma faktörüne sahiptir. Tasarım faktörleri, algoritmanın performansını etkileyebilmektedir. Armoni arama algoritmasının faktörlerinin uyarlanması optimizasyon sonucuna katkı sağladığı çalışmalarla desteklenmektedir (Keshtegar ve Etedali, 2018; Toklu vd., 2021 Alkhadashi vd., 2021). Bu durumun önüne geçmek adına armoni arama algoritmasının tasarım faktörleri uyarlanarak, uyarlanmış armoni arama algoritması kullanılmıştır. Algoritmaların inşaat mühendisliği çalışmalarındaki etkinliği göz önüne alınarak uygulamalarda tercih edilmiştir. Optimizasyonda kullanılan algoritmalara ilişkin bilgiler, alt başlıklarda sunulmaktadır.

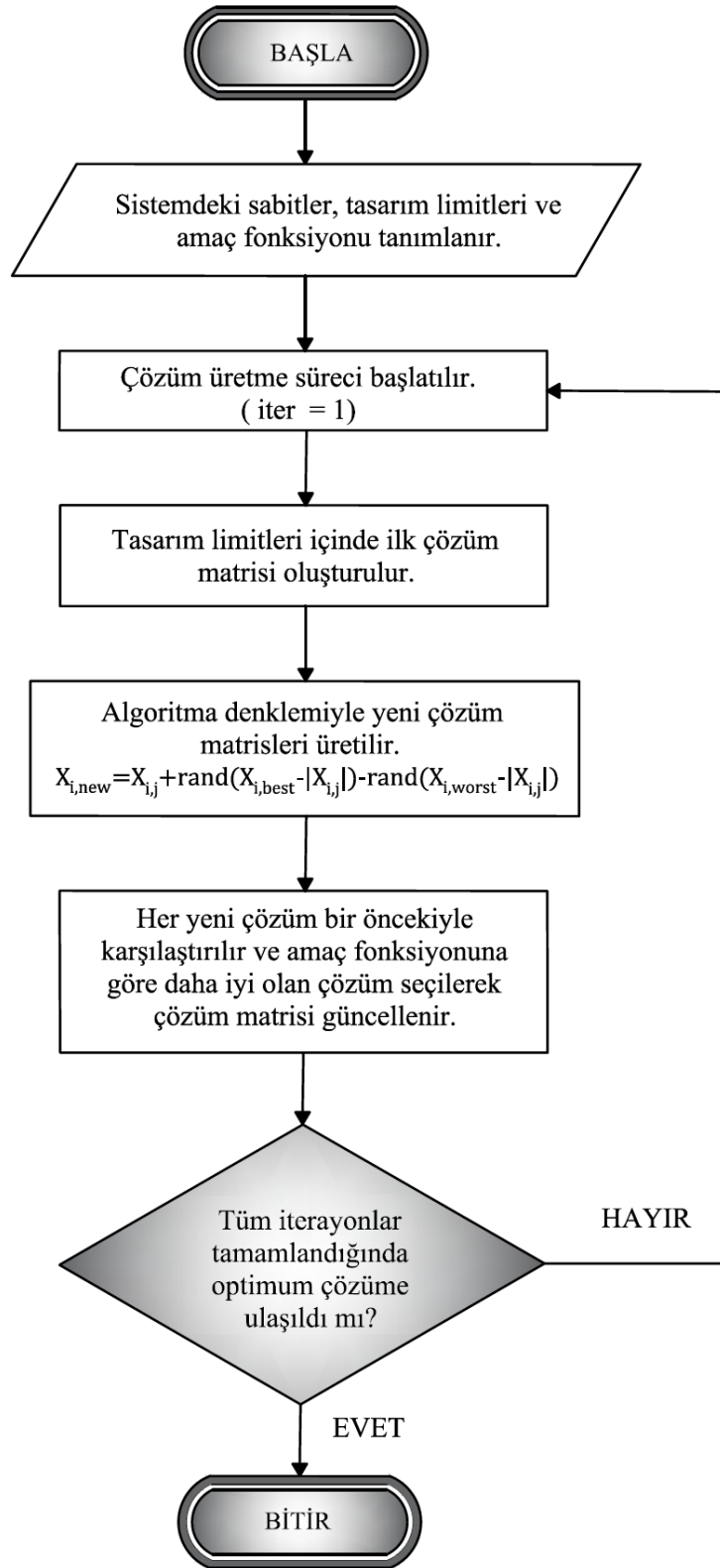
3.1.1. Jaya Algoritması

Jaya algoritması, Rao (2016) tarafından geliştirilmiş, tek bir aşamadan oluşan metasezgisel bir algoritmadır. Optimum çözüme ulaşma hızı, uygulama kolaylığı ve anlaşılır yapısı sebebiyle avantajlara sahiptir. Tasarımsal bir algoritma faktörü içermemesi, benzer sezgisel algoritmalarla oranla daha başarılı olmasını sağlamaktadır. Jaya algoritması ile kontrol sistemlerine dair optimizasyon çalışmalarında, yapıya ait tasarım sabitleri, popülasyon ve iterasyon sayısı gibi değerler tanımlanmakta, optimize edilecek değişkenlerin alt ve üst limitleri belirlenerek çözüm üretme süreci başlatılmaktadır. Jaya algoritması çözüm üretimi için gerekli algoritma Denklem 3.1’de verilmektedir.

$$X_{i,new} = X_{i,j} + rand(X_{i,best} - |X_{i,j}|) - rand(X_{i,worst} - |X_{i,j}|) \quad (3.1)$$

Denklemden gösterilen $X_{i,new}$, yeni aday çözümü, $X_{i,j}$, i . değişkene ait j . çözümü belirtmektedir. Çözüm matrisindeki en iyi çözüm $X_{i,best}$ ve en kötü çözüm $X_{i,worst}$ ile gösterilmektedir.

Optimizasyonda, her iterasyon için yeni çözümler üretilmekte, eski çözümler yeni çözümlerle kıyaslanarak problemin amaç fonksiyonuna yönelik en uygun çözümler belirlenmekte ve iterasyonlar tamamlandığında optimum çözüme ulaşılmaktadır. Jaya algoritması ile optimizasyon işlemine dair örnek bir akış diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Jaya optimizasyonu akış diyagramı.

3.1.2. Armoni Arama Algoritması

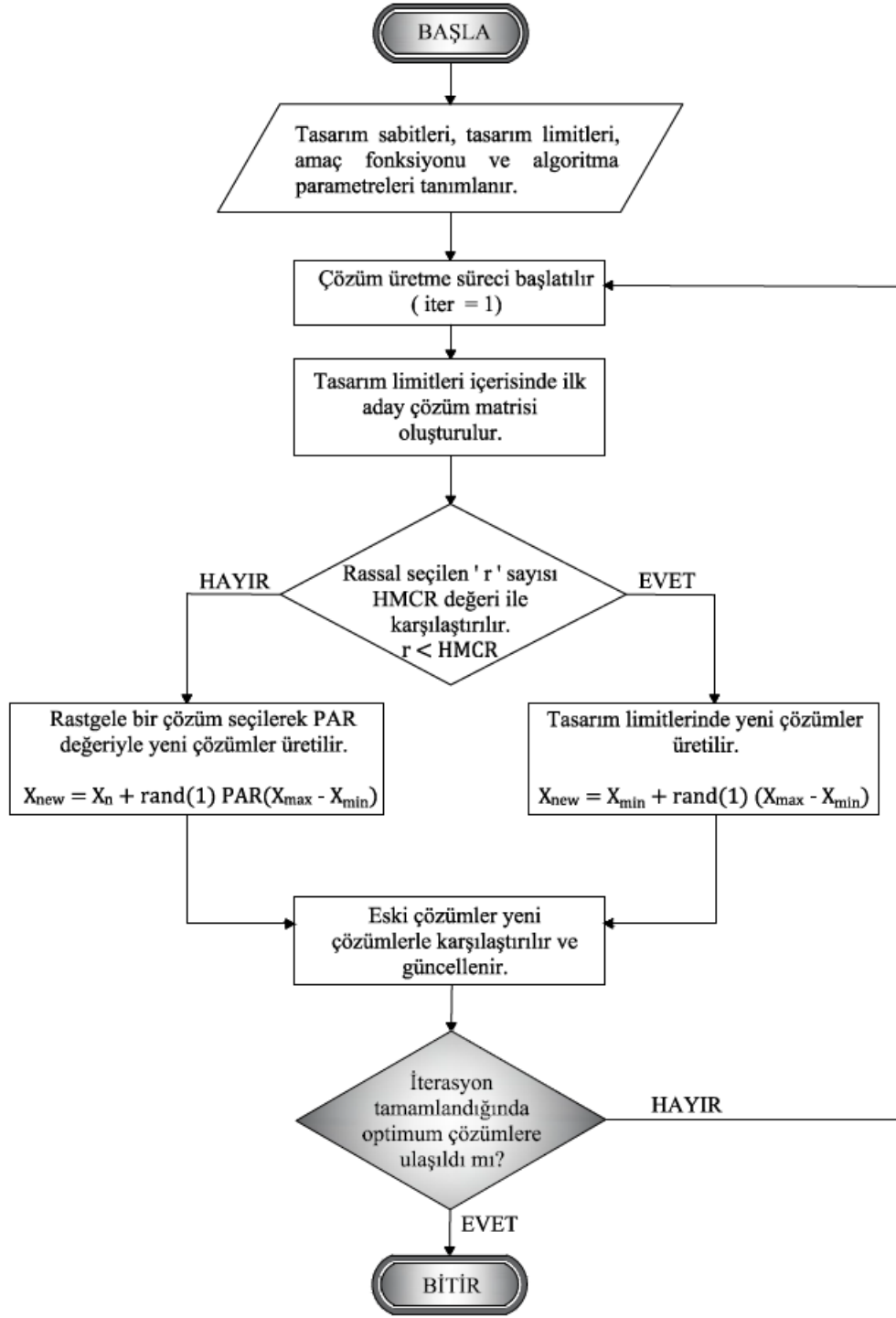
Armoni arama algoritması Geem vd. (2001) tarafından geliştirilmiş, insanın işitme duyusunu baz alan ve kulağa hoş gelen bir melodinin aranması sürecini içeren metasezgisel bir algoritmadır. Optimizasyon işlemi için kullanımında, performansını etkileyen tasarımsal algoritma faktörleri bulundurulur. Bunlar, en iyi armoniyi arama sürecinde, armoni vektörlerinin üretim denklemlerine karar verme sürecine etki etmektedir. Bir problem için optimum çözüm arayışında, öncelikle tanımlanan tasarım limitleri dahilinde rassal bir armoni vektörü üretilmektedir. Oluşturulan ilk vektöründen sonra, armoni hafıza boyutu (Harmony Memory Size, HMS) miktarınca üretilen armoniler hafızada saklanmaktadır. Yeni bir armoni vektörünün üretim denklemlerine karar vermede armoni hafıza dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate, HMCR) kullanılmaktadır. Bu faktörün 0-1 arasında rassal seçilen bir sayıdan büyük olması durumunda armoni vektörleri algoritma faktöründen bağımsız Denklem 3.2'deki gibi rassal olarak üretilmektedir. Rassal seçilen değerin HMCR değerinden büyük ya da eşit olması durumunda ise yeni armoniler, ton ayarlama oranı (Pitch Adjusting Rate, PAR) adı verilen algoritma faktörü kullanılarak Denklem 3.3'teki gibi üretilmektedir.

$$X_{new} = X_{min} + rand (X_{max} - X_{min}) \text{ if } HMCR > rand \quad (3.2)$$

$$X_{new} = X_n + rand PAR (X_{max} - X_{min}) \text{ if } HMCR \leq rand \quad (3.3)$$

Denklemlerde verilen X_{new} , yeni armoni vektörünü, X_{max} ve X_{min} , sırasıyla maksimum ve minimum tasarım limitini, X_n , n. armoniyi ve PAR ton ayarlama oranını belirtmektedir.

Armoni üretim süreci iterasyon miktarınca tekrarlanmaktadır. Eski armoni vektörleri yeni oluşturulanlarla karşılaştırılarak içlerinde en iyi olanı seçilmektedir. Tüm iterasyonlar tamamlandığında en iyi armoniye ulaşılmaktadır. Armoni arama algoritması ile optimizasyon sürecini özetleyen akış diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Armoni arama algoritması akış diyagramı.

Algoritma faktörleri, çözüm arama sürecini etkileyen ve iyi ayarlanması gereken değerlerdir. Bu değerlerin optimum seçilmesi için probleme uygun uyarlanması, optimizasyon daha verimli hale getirmektedir. HMCR ve PAR değerleri bir başlangıç değeri tanımlanması ve azaltılması ile bu değer aralıklarındaki en iyi değer bulunmasını mümkün kılmaktadır. Bu iki parametrenin uyarlanmasıyla, uyarlanabilir armoni arama (Adaptive Harmony Search, AHS)

algoritması geliştirilmiştir. HMCR ve PAR algoritma faktörlerinin uyarlanma denklemleri sırasıyla Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'te gösterilmektedir.

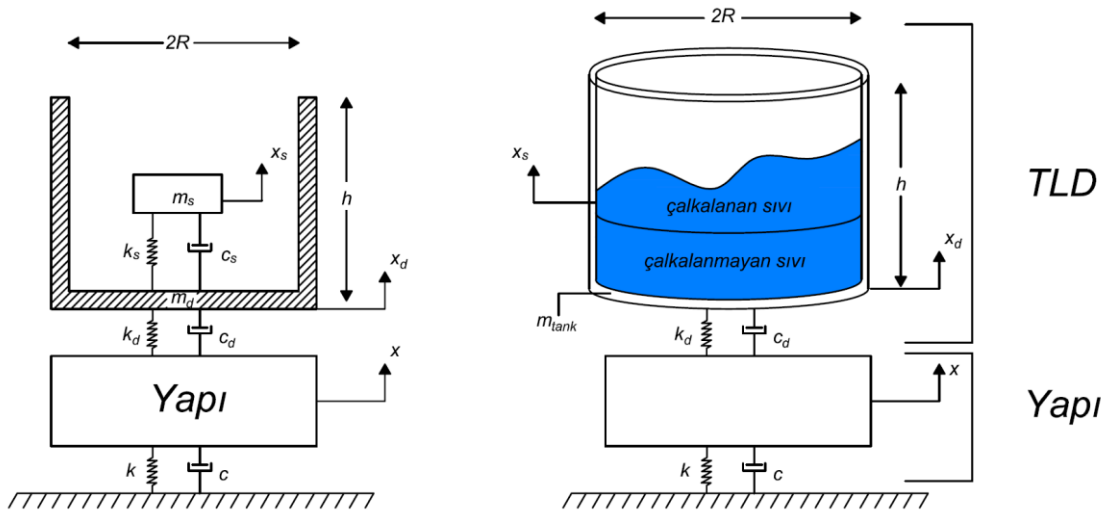
$$HMCR = HMCR_{in} \left(1 - \frac{t}{mt}\right) \quad (3.4)$$

$$PAR = PAR_{in} \left(1 - \frac{t}{mt}\right) \quad (3.5)$$

Denklemlerde $HMCR$ ve PAR değerlerinin başlangıç değerleri sırasıyla $HMCR_{in}$ ve PAR_{in} ile gösterilmiştir. Kaçınıcı iterasyonda olduğu ' t ' ve maksimum iterasyon sayısı ' mt ' ile ifade edilmiştir.

3.2. SİSMİK TABAN İZOLATÖRÜ VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLERLE SİSTEM TASARIMI VE HAREKET DENKLEMLERİ

Ayarlı sıvı sönümleyiciler (Tuned Liquid Damper, TLD), bünyesindeki sıvının çalkalanma enerjisinden faydalanan ve yapının hareketine zıt yönde salınım yaparak enerjiyi sönümleyen pasif cihazlardır. TLD'ler için iki serbestlik dereceli (2DOF) hareket söz konusudur. Bunlardan biri TLD tankın hareketi ve diğeri TLD tank içerisinde çalkalanan sıvının hareketidir. TLD'ler tank taban geometrisine göre isim almaktadır. Bu çalışmada, dairesel tabana sahip silindirik TLD kullanılmıştır. 2DOF TLD modelinin mekanik gösterimi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Silindirik tabanlı ayarlı sıvı sönümleyici örneği.

TLD içerisindeki sıvı bütünüyle salınım yapmamaktadır. Bir miktar sıvı katı bir kütle gibi görev alır ve sıvının bir kısmı çalkalanmaya katılır. Sıvının toplam kütlesi (m_{st}) silindirik

TLD'nin taban yarıçapı R , sıvı yüksekliği h , sıvı yoğunluğu ρ , parametreleri kullanılarak Denklem 3.6'da hesaplanmaktadır.

$$m_{st} = \pi R^2 h \rho \quad (3.6)$$

Çalkalanan sıvının kendine ait bir periyodu (T_s), kütlesi (m_s), rijitliği (k_s), sönüm katsayısı (c_s) ve sönümü (ζ_s) bulunmaktadır. Çalkalanan sıvının kütlesi Denklem 3.7'de gösterilmektedir.

$$m_s = m_{st} \times R \times \frac{\tanh\left(\frac{1.84h}{R}\right)}{2.2h} \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de yer alan ve çalkalanan sıvının sönüm oranı hesabında kullanılacak olan katsayıların elde edilmesinde, silindirik cisimlerde dalga yayılımında kullanılan Bessel fonksiyonu ve titreşim modu hesabından yararlanılmıştır (Bauer, 1964; İbrahim, 2005; Sharma vd., 2019; Ocak vd., 2022a).

Sıvı sönümleyici tankın toplam kütlesi m_{TLD} , TLD tankın boş kütlesi m_{tank} ve çalkalanan ve pasif kalan sıvıların toplamı olan m_{st} kullanılarak Denklem 3.8 ile elde edilmektedir.

$$m_{TLD} = m_{st} + m_{tank} \quad (3.8)$$

TLD tankı içerisinde yer alan ve çalkalanmayan sıvı, katı bir kütle görevi görerek TLD tank ile hareket etmektedir. TLD'nin hareketini tank ve çalkalanmayan sıvı kütlesi sağlamaktadır. TLD tankı ve pasif sıvı kütlelerinin toplamı olarak ifade edilen " m_d " Denklem 3.9'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$m_d = m_{TLD} - m_s \quad (3.9)$$

Sismik izolatörler, iyi derecede ivme azaltma yetenekleri olan, deplasman kontrolünde de önemli rol oynayan kontrol cihazlarıdır. Yapı ağırlığının artması ya da şiddetli depremlere maruz kalması izolatörlü sistemleri zorlayan ve sönümleyici desteğini gerektiren durumlar meydana getirmektedir. Özellikle izolatörlerin, yakın fay gibi büyük yer değiştirme talebinin karşılanmasında sönümleyici ilavesi, yapısal kontrolün sağlanmasında destekleyici bir görev görmektedir. Sismik taban izolatörleri, genellikle yapının bir katı ağırlığında tasarlanan ve yapı tabanına yerleştirilen cihazlardır. Bu cihazlarla yapılacak tasarımlarda, izolatör

rijitliğini yapının total kütlesi etkilemektedir. Sönümleyici ilave edildiği durumlarda, yapının izolator rijitliğini etkileyen total kütle ifadesine sönümleyici kütlesi de ilave edilmektedir. Denklem 3.10’da hibrit sistemin total kütle (m_{total}) hesabı gösterilmektedir.

$$m_{total} = m_b + m_{TLD} + m_{structure} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da yer alan m_b , izolator kütesini, $m_{structure}$, yapının toplam kütesini ve m_{TLD} , çalışmada kullanılan ayarlı sıvı sönümleyici kütesini ifade etmektedir.

İzolator periyodu (T_b) hesabı, Denklem 3.11’de verilmektedir. Denklemde, izolatorün doğal açısal frekansı w_b ile ifade edilmiştir.

$$T_b = \frac{2\pi}{w_b} \quad (3.11)$$

Sismik izolator ve TLD’den oluşan hibrit sistemin rijitlikleri, sönüm katsayıları ve sönüm oranları ayrı hesaplanmakta ancak bazı değerler, toplam yapısal sistemin kütlesi (m_{total}) dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu değerler, izolator rijitliği ve sönüm katsayısı değerleridir. İzolatorü ait özellikler “b”, çalkalanan sıvıya ait özellikler “s” ve TLD tankı+katı kütle gibi davranan pasif sıvıya ait özellikler “d” indisi ile gösterilmektedir. Hibrit sistemde izolator, çalkalanan sıvı ve TLD tank + pasif sıvıya ait rijitlik değerleri sırasıyla Denklem 3.12-3.14’te ve sönüm katsayıları sırasıyla Denklem 3.15-3.17’de verilmektedir.

$$k_b = m_{total} \times w_b^2 \quad (3.12)$$

$$k_s = m_{st} \times \frac{g \left\{ \tanh\left(\frac{1.84h}{R}\right) \right\}^2}{1.19h} \quad (3.13)$$

$$k_d = m_d \times \left(\frac{2\pi}{T_d}\right)^2 \quad (3.14)$$

$$c_b = 2 \times \zeta_b \times m_{total} \times w_b \quad (3.15)$$

$$c_s = \zeta_s \times 2\sqrt{m_s k_s} \quad (3.16)$$

$$c_d = 2 \times \zeta_d \times \sqrt{m_d \times k_d} \quad (3.17)$$

İzolator ve sönümleyici sistemin sönüm oranları ayrı hesaplanmaktadır. İzolatorün sönüm oranı yapısal sistemin toplam kütesine bağlı olarak Denklem 3.18’deki gibi

hesaplanmaktadır. TLD tank + pasif sıvı için sönüm oranı hesabı Denklem 3.19'da gösterilmektedir. Çalkalanan sıvının sönüm oranı hesabında sıvının kinematik viskozite özelliği denkleme katılmaktadır. Çalkalanan sıvı için sönüm oranı hesabı Denklem 3.20'de verilmektedir.

$$\zeta_b = \frac{c_b}{2 \times m_{total} \times w_b} \quad (3.18)$$

$$\zeta_d = \frac{c_d}{2m_d \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}} \quad (3.19)$$

$$\zeta_s = 4.98 v^{\frac{1}{2}} R^{-\frac{3}{4}} g^{-\frac{1}{4}} \left[1 + \frac{0.318}{\sinh\left(\frac{1.84h}{R}\right) \cosh\left(\frac{1.84h}{R}\right)} \frac{1-\frac{h}{R}}{R} \right] \quad (3.20)$$

Denklem 3.20'de kullanılan katsayılar için silindirik cisimlerde dalga yayılımında kullanılan Bessel fonksiyonu ve titreşim modu hesabından yararlanılmıştır (Bauer, 2005; İbrahim, 2005; Sharma vd., 2019). Denklemde, sıvı kinematik viskozitesi v ve yer çekimi ivmesi g ile gösterilmiştir.

Yapısal bir kontrol sisteminin en sade haliyle hareket denklemi Denklem 3.21'de gösterilmektedir.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]1\{\ddot{X}_g\} \quad (3.21)$$

Burada, kütle matrisi M , rijitlik matrisi K , sönüm katsayısı matrisi C , yapı yer değiştirmesi X , yapı hızı \dot{X} , yapı ivmesi \ddot{X} ve yer ivmesi \ddot{X}_g ile ifade edilmektedir.

Yapının taban izolatörüyle birlikte hareket ettiği ve üzerine TLD yerleştirilmiş standart bir yapı sisteminde taban izolatörü 1 serbestliğe, TLD sıvısı ve tankı 2 serbestliğe sahip olmak üzere toplamda 3 serbestlik dereceli (3DOF) bir kontrol sistemi oluşturmaktadır. Çok serbestlik dereceli izolatör ve TLD'li bir yapı sistemi için kütle rijitlik ve sönüm katsayısı matrisleri sırasıyla Denklem 3.22-3.24'te ve sistemin yer değiştirme matrisi Denklem 3.25'te gösterilmektedir.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_b & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_d & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & m_s \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_N + k_d & -k_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_d & k_d + k_s & -k_s \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_s & k_s \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_N + c_d & -c_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_d & c_d + c_s & -c_s \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -c_s & c_s \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\{X\} = \begin{bmatrix} X_b \\ X_1 \\ \vdots \\ X_N \\ X_d \\ X_s \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Denklemlerdeki “N” indeksli terimler çok katlı bir yapının en üst katının özelliklerini ifade eder. Kütle matrisinde, m_b izolatör kütleini, m_1 birinci katın kütleini, m_N en üst katın kütleini, m_d pasif sıvı ve tankın kütleini ve m_s çalkalanan sıvının kütleini belirtir. Rijitlik matrisinde, k_b izolatör rijitliğini, k_1 ve k_N sırasıyla birinci kat ve en üst kat rijitliklerini, k_d TLD tank rijitliğini ve k_s çalkalanan sıvı rijitliğini belirtir. Denklem 3.24'te, izolatör sönümlenme katsayısı c_b , TLD sönümlenme katsayısı c_d , çalkalanan sıvı sönümlenme katsayısı c_s 'dir ve birinci katın ve en üst katın sönümlenme katsayıları sırasıyla c_1 ve c_N olarak gösterilir. Denklem 3.25'te, izolatör, birinci kat, en üst kat, TLD ve çalkalanan sıvı yer değiştirmeleri sırasıyla X_b , X_1 , X_N , X_d ve X_s ile gösterilir.

3.3. SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARIN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Sismik taban izolatörleri, yapının periyodunu uzatarak izolatör seviyesinde yaptığı salınımlarla, depremin ivmesini en az düzeyde üst yapıya aktarmaya çalışan sistemlerdir. Taban izolasyon sistemlerinin optimizasyon çalışmasında, yapısal ivme ve deplasmanların minimuma indirilmesi, maliyetin düşürülmesi ve frekans yanıt fonksiyonunun azaltılması gibi amaç fonksiyonlarını kullanılmaktadır. Metasezgisel algoritmalarla tasarımlarına dair birçok çalışma

bulunmaktadır. Sismik izolatörlerle ilgili yapılan bazı optimizasyon çalışmalarının optimizasyon amacı ve kullanılan metasezgisel algoritma çeşitleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Sismik izolatör kullanılan kontrol sistemi çalışmaları.

Amaç Fonksiyonu	Algoritmalar	Referans
İzolatör yer değiştirilmesi ve yapı en üst kat yer değiştirilmesi minimizasyonu	Genetik Algoritma	Pourzeynali ve Zarif, 2008
İzolatör yer değiştirilmesi ve yapı en üst kat ivme ve yer değiştirme ve minimizasyonu	Genetik Algoritma	Fallah ve Zamiri, 2013
Yapı maliyeti ve yapı en üst kat ivme ve yer değiştirme minimizasyonu	Genetik Algoritma	Rizzian vd., 2017
Frekans yanıt fonksiyonu minimizasyonu	Ateş Böceği Algoritması	Siami vd., 2018
İvme minimizasyonu	Karga Arama Algoritması	Çerçevik vd., 2020
Maksimum yer değiştirme ve katların maksimum ivme minimizasyonu	Guguk Kuşu Arama Optimizasyonu	Etedali vd., 2020
İvme minimizasyonu	Diferansiyel Evrim Optimizasyonu	Aceto vd., 2021
İzolatör etkili rijitlik ve sönüm katsayısı maksimizasyonu ile ivme, maksimum hız ve maliyet minimizasyonu	Genetik Algoritma	Tsipianitis ve Tsompanakis, 2022
Burulma tepkisi minimizasyonu	Guguk Kuşu Arama	Tsipianitis vd., 2022
Kontrollü yapı ve kontrolsüz yapının maksimum katlar arası kayma oranı minimizasyonu	Çekirge Optimizasyon Algoritması	Mehri vd., 2023
Yapı ağırlığı minimizasyonu	Yapay Arı Kolonisi Algoritması Karga Arama Algoritması Arşimet Optimizasyon Algoritması	Taymus vd., 2024
İzolatörlü yapının temel periyot maksimizasyonu ile katlar arası kayma oranı, yatak yer değiştirilmesi ve tepe çatı ivmesi minimizasyonu	Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma-II	Ouardani ve Tbatou, 2024
İvme minimizasyonu	Genetik Algoritma	Kandemir, 2025
Giriş enerjisi minimizasyonu ve histeretik enerji maksimizasyonu	Gri Kurt Optimizasyonu	Çerçevik ve Kazak Çerçevik, 2025

İzolatörlü sistemler, yapısal tepkinin azaltılmasında oldukça etkili olan ancak maliyetleri dolayısıyla özenle tasarlanması gereken sistemlerdir. Sönümleyici ilave edildiği durumlarda, izolatörlü sistem tasarımları daha karmaşık hale gelebilmekte ve performansı etkileyen parametrelerin sayısı artmaktadır. Bu tür sistemlerin optimize edilmesi, kontrolden alınacak verimin en üst düzeyde olması için gerekli bir adımdır. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar bu yöntemi, izolatör ve sönümleyici çeşitlerinin optimizasyonunda sıklıkla tercih

etmektedir (Barakat vd., 2015; Kandemir-Mazanoğlu, 2017; Mehrkian vd., 2019; Li vd., 2021; Dona vd., 2021).

3.4. SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Sönümleyici sistemler, genellikle yapıya bir kütle ve yay yardımıyla bağlanmış kontrol cihazlarıdır. Kullandığı enerji kaynağına göre harici bir enerji gerektirdiği takdirde bir motor ya da aktüatör benzeri elemanlarla desteklenmekte ve yapıya etkiyen titreşimlerin sönümlenmesini sağlamaktadır. Titreşim sönümlemede kullandığı malzeme özelliklerine göre tasarımları şekillenmekte ve isimlendirilmektedir. Malzemenin sürtünme özelliklerinden, metallerin akma deformasyon enerjisine, sıvı çalkalanma mekanizmasından, malzeme akışkanlığına kadar birçok özellikten faydalanan çeşitleri bulunmaktadır. Bu sistemlerin optimum tasarımında, sönümlemede kullanılan özelliklere yönelik optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Metasezgisel algoritmalar, sönümleyici optimizasyonunda sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Çeşitli sönümleyicilerle ilgili yapılan farklı amaç fonksiyonu ya da optimizasyon problemlerine örnek olarak, metasezgisel optimizasyon çalışmalarına ilişkin bir özet Tablo 3.2’de gösterilmektedir. Tabloda yer alan çalışmalarda, baz alınan algoritma isimlerine yer verilmiş, bazı çalışmalarda bu algoritmaların türevleri ya da hibritleri kullanılmıştır.

Tablo 3.2: Sönümleyici kullanılan optimizasyon çalışmaları

Sönümleyici	Optimizasyon	Amaç Fonksiyonu	Algoritma	Referans
Metalik Sönümleyici	Yerleşim yeri optimizasyonu	Sismik kontrol etkisi ve maliyet minimizasyonu	- Genetik algoritma	Li ve Shu, 2019
	Şekil Optimizasyonu	Enerji dağılım kapasitesi maksimizasyonu	- Benzetilmiş tavlama algoritması	Ferrer-Fuenmayor ve Villalba-Morales, 2023
	Şekil optimizasyonu	Sönümleyici ağırlığının en aza indirilmesi	- Genetik algoritma - Parçacık sürü optimizasyonu - Guguk kuşu arama algoritması	Zabihi-Samani, 2019
Sürtünme Sönümleyici	Yerleşim yeri ve sürtünme kuvveti optimizasyonu	Yapının maksimum ivmesinin en aza indirilmesi	- Ateş böceği algoritması	Miguel vd., 2015
	Sürtünme kuvveti optimizasyonu	Yapının tepe maksimum yer değiştirmesi ve katlar arası kaymasının azaltılması	- Ateş böceği algoritması	Ontiveros-Perez vd., 2017
	Kayma yükü optimizasyonu	Maksimum sismik enerji dağılımı	- Sincap arama algoritması - Water strider algoritması	Artar ve Çarbaş, 2023

Tablo 3.2 (devam):

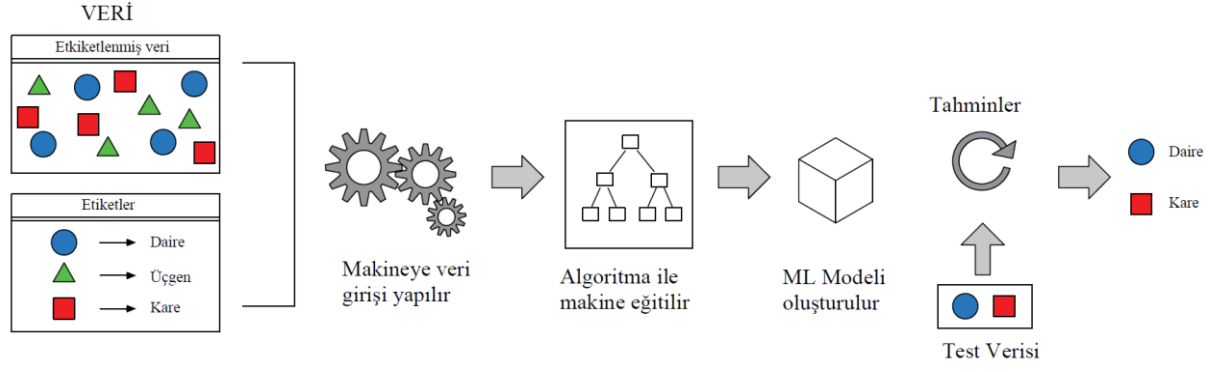
Visko-elastik Sönümleyici	Yerleşim yeri optimizasyonu	İlk titreşim modunun maksimum sönümlemesi	- Parçacık sürü optimizasyonu	Lenartowicz vd., 2021
	Optimum kauçuk kalınlığı ve kauçuk alanı	Maksimum kat yer değiştirmesi, kolonun tepesindeki maksimum ivme ve hız	- Parçacık sürü optimizasyonu	Xu vd., 2025
Viskoz Sönümleyici	Optimum sönümleyici dağılımı	En üst kat yer değiştirmesinin ortalama karesinin en aza indirilmesi	- Diferansiyel evrim algoritması	Çetin vd., 2019
	Yerleşim yeri optimizasyonu	Gerekli sönümleyici sayısının en aza indirilmesi	- Yarasa algoritması - Yusufçuk algoritması	Çerçevik vd., 2021
	Yerleşim yeri optimizasyonu	Maksimum yer değiştirme ve tepki kuvveti minimizasyonu	- Karınca kolonisi optimizasyonu - Genetik algoritma	Li ve Li, 2024
	Optimum eksenel rijitlik, sönüm katsayısı ve sönümleme üssü	Çatı maksimum mutlak yer değiştirmesinin en aza indirilmesi	- Deniz avcılar algoritması - Parçacık sürü optimizasyonu	Shemshaki vd., 2025
Ayarlı Kütle Sönümleyici	Optimum frekans ve sönümleme oranı	Maksimum yer değiştirmenin en aza indirilmesi	- Armoni arama algoritması	Bekdaş ve Nigdeli, 2013
	Optimum rijitlik ve sönüm katsayısı	Maksimum yer değiştirmenin en aza indirilmesi	- Yüklü sistem arama algoritması	Kavch vd., 2015
	Optimum kütle, rijitlik ve sönüm katsayısı	Maksimum çatı yer değiştirmesi, maksimum kayma, kaymaların ortalama karekökü ve yapı kümülatif histerik enerji minimizasyonu	- Parçacık sürü optimizasyonu	Shayesteh Bilondi vd., 2018
Ayarlı Sıvı Sönümleyici	Optimum frekans oranı, sönüm oranı,	Yatay tepe yer değiştirmesi, yer değiştirmelerin ortalama karekökü ve yatay tepe kat ivmesinin en aza indirilmesi	- Diferansiyel evrim optimizasyonu	Caicedo vd., 2021
	Optimum sönümleyici frekansı, sönüm oranı ve konumu	Burulma düzensizliğiyle yapı kenarlarında oluşan maksimum yer değiştirmenin en aza indirilme	- Jaya algoritması	Mubuli vd., 2024
	Optimum sönümleyici tank yarıçapı, sıvı yüksekliği, periyodu ve sönüm oranı	Yapı en üst kat yer değiştirmesinin en aza indirilmesi	- Armoni arama algoritması	Ocak vd., 2022b
Ayarlı Sıvı Sönümleyici	Optimum basınç kaybı katsayısı ve sıvı frekansı veya toplam uzunluk,	Kontrollü yapı tepe yer değiştirmesinin en aza indirilmesi	- Mouth brooding fish algoritması	Roobahan vd., 2025

3.5. MAKİNE ÖĞRENMESİ

Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML), insan beynine özgü problem çözme, çıkarımda bulunma gibi yeteneklerin bir miktar veri ile bilgisayar vb. makinelerin eğitilmesiyle kazandırıldığı bir yapay zekâ tekniğidir. Bu yöntemin uygulamasında, makineye verilen eğitim verisinin özelliklerine göre makine öğrenmesi yöntemi 4 kısma ayrılmaktadır. Eğitimde, girdi verileri ve çıktı verileri kullanılmaktadır. Nümerik ya da kategorik formdaki eğitim verisinin etiketlerinin bilinmesi halinde makine verileri etiketlere göre ayırmakta ve çıkarımda bulunmaktadır. Bu öğrenme türü denetimli öğrenmedir. Çıktıların bir sınıfı ya da grubu işaret ettiği durumda problem sınıflandırma olarak, nümerik olduğu durumda ise regresyon problemi olarak değerlendirilmektedir (Kotsiantis vd., 2007; Abioye vd., 2021). Veri etiketleri olmadan makinenin veri arasında benzerlikler bulmaya çalışması durumunda denetimsiz öğrenme yöntemi uygulanmaktadır. Verinin bir kısmının etiketinin verildiği diğer etiketsiz kısım için makinenin etiketsiz verilerle etiketleri ilişkilendirerek çıkarım yeteneği geliştirdiği yöntem yarı denetimli öğrenme yöntemi geliştirilmiştir. Pekiştirmeli öğrenme tekniğinde, bir öğrenci aracılığıyla, makine keşif yapmakta, eylemlerine göre ödül-ceza alarak en doğru sonuca karar vermektedir. Çalışma kapsamında, denetimli öğrenme algoritmalarıyla regresyon problemi üzerine çalışılmış, en yüksek doğruluğa sahip makine öğrenmesi modeline karar verilmiştir. Makine öğrenmesine ilişkin bilgiler alt başlıklarda sunulmaktadır.

3.5.1. Denetimli Öğrenme

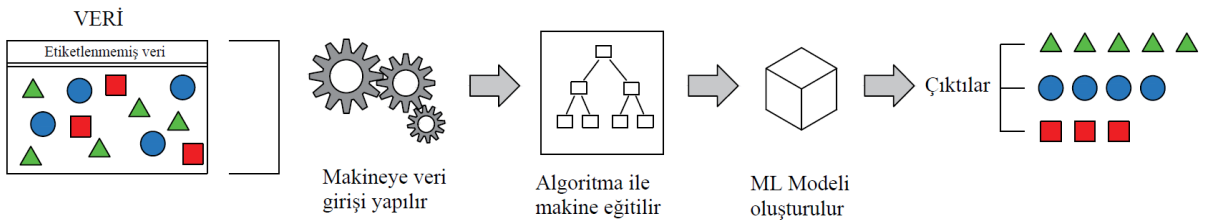
Denetimli öğrenme yönteminde, makinenin eğitimi için verideki özniteliklerin ve hedeflerin bilindiği durum söz konusudur. Veri içerisinde her bir öznitelik makine öğrenmesi için girdi olarak kullanılmakta ve bu özniteliklere karşılık gelen etiketler çıktı olarak adlandırılmaktadır. Eğitimde kullanılacak girdi-çıkıtı sayısının yeterli olması, makinenin başarılı tahminler üretmesini sağlamaktadır (Jiang, 2021). Tahmin edilmesi hedeflenen çıktı bir sınıfı ya da sayısal bir değeri ifade edebilmektedir. Denetimli öğrenmede hedef çıktı bir sınıfı belirttiğinde sınıflandırma, sayısal bir değeri belirttiğinde regresyon problemi olarak ele alınmaktadır. Temel çalışma prensibi, veri etiketlerinden yola çıkarak ayırt edici özniteliklerle tahmin modeli üretmektir (Ali ve Mashwani, 2023). Şekil 3.4'te denetimli öğrenmeyi özetleyen bir görsel gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Denetimli öğrenme akış diyagramı.

3.5.2. Denetimsiz Öğrenme

Denetimsiz öğrenme, denetimli öğrenmeden farklı olarak veri etiketleri olmadan veri öznitelikleri arasında bağlantı kurarak ayırım yapan bir makine öğrenmesi tekniğidir. Temel amacı, öznitelikler arasındaki benzerlikleri belirleyerek benzer verileri bir araya toplamaktır (Chander ve Vijaya, 2021). Denetimsiz öğrenme yöntemi, veri benzerliklerine göre kümelenecek, kümeleme, tahmin etmede etki düzeyi az olan özelliklerin veriden çıkarılmasıyla boyut azaltma ve verideki ortak özelliklerin belirlenmesiyle, birliktelik analizi gibi çeşitlere ayrılmaktadır. Denetimsiz öğrenmede veri etiketsizdir. Veri etiketleri olmadan kümeleme işlemiyle veri benzerliklerine göre gruplanarak ayrılabilir. Boyut azaltma yönteminde, makinenin tahmin performansına etkilemeyeceği varsayılan veriler veriden çıkarılmaktadır. Birliktelik analizinde, etiketsiz verilerin yalnızca öznitelikleri incelenerek aradaki benzerlikler tespit edilmekte ve ortak benzerliğe sahip olan veriler gruplandırılmaktadır. Denetimsiz öğrenmeyi gösteren akış diyagramı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

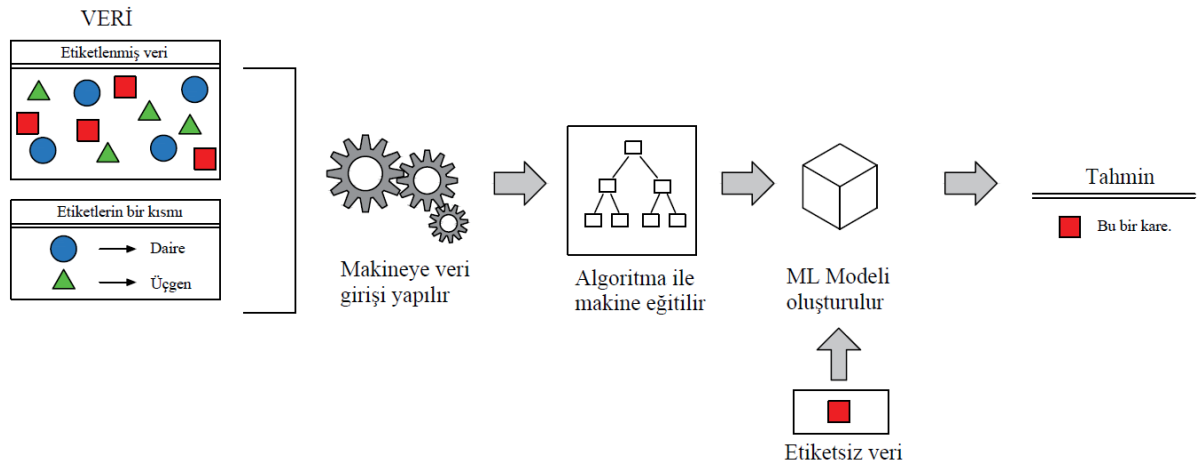


Şekil 3.5: Denetimsiz öğrenme akış diyagramı.

3.5.3. Yarı Denetimli Öğrenme

Yarı denetimli öğrenme, verinin yalnızca bir kısmının etiketli verilerden oluşturduğu ve kalanının etiketsiz olduğu durumda tercih edilen öğrenme yöntemidir. Makine, etiketli verilere bakarak çıkarımlar yapmakta ve veri öznitelikleri arasında benzerlik kurmaktadır. Bu ilişki incelemesi sonucunda, etiketsiz verileri özelliklerine göre ayırarak tahmin edebilmektedir.

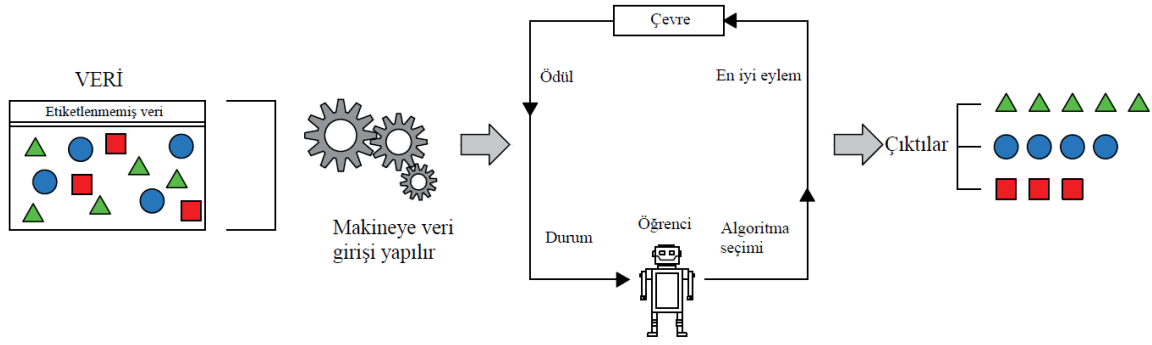
Büyük veri gruplarında etkili bir yöntemdir. Etiketlenmemiş verinin büyük, etiketlenmiş verinin daha az seçilmesi önerilmektedir (Shobha ve Rangaswamy, 2018). Sınıflandırma ve kümeleme çalışmalarında kullanılabilir. Bu öğrenmede yapılan kümelemede etiketsiz verilerin yanı sıra etiketli veriler de kullanılabilir. Şekil 3.6’de yarı denetimli öğrenme yöntemini anlatan bir görsel diyagram verilmektedir.



Şekil 3.6: Yarı denetimli öğrenme akış diyagramı.

3.5.4. Pekiştirmeli Öğrenme

Pekiştirmeli öğrenme, çevreyle etkileşimli bir şekilde deneyimden yola çıkarak öğrenmenin yapıldığı bir makine öğrenmesi tekniğidir. Bu öğrenme yönteminde bir öğrenci kullanılarak yaptıkları tahminlere göre ödül-ceza ile sonuç almakta ve eski deneyimlerine göre çıkarım yeteneklerini geliştirmektedir. Öğrenci doğru yaptığı tahminler için ödül ve yanlış yaptığı tahminler için ceza kavramları kullanılarak eğitilmektedir. Pekiştirmeli öğrenmede öğrenci makineye insan müdahalesi olmadan ödül kavramını en üst düzeye çıkarmak için gerekli stratejileri öğrenmektedir (El Bouchefry ve De Souza, 2020). Kümeleme ve kontrol problemlerinde kullanılmaktadır. Öğrencinin deneyimlerinden faydalandığı durumda model tabanlı ya da modelden bağımsız şekilde nitelendirilmektedir (Weerasekara vd., 2024). Pekiştirmeli öğrenme yöntemini anlatan görsel bir şema Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Pekiştirmeli öğrenme akış diyagramı.

3.6. MAKİNE ÖĞRENMESİNDE ÖZELLİK ÇIKARIMI

Makine öğrenmesinde, özellik çıkarımı, veriden tahmin modeli üretilmesi aşaması için önemli bir adımdır. Verideki etkin özelliklerin belirlenmesinde bazı makine öğrenmesi algoritmaları, girdi olarak nitelendirilen bağımsız değişkenlerin etki düzeyine göre ağırlıklandırma yapmaktadır. Ayrıca boyut azaltma yöntemi olarak bilinen yöntem ile verinin indirgenerek modelde etkin özelliklerin ayırt edilmesi işlemleri yapılabilmektedir. Model oluşturmada kullanılan öznitelikler kendi aralarındaki ilişkiye göre indirgenebilmektedir. Bu işleme temel bileşen analizi (principle component analysis, PCA) adı verilmektedir. Temel bileşen analizinde amaç, verideki özniteliklerin aralarındaki ilişkiye göre boyut azaltmadır. Regresyon performansını etkileyen verideki bağımsız değişkenlerden alakasız olanlar için boyut azaltmayla özellik çıkarımı yapmaktadır (Xiong ve Shi, 2018). Regresyon problemlerinde temel bileşen regresyonu (principle component regression, PCR), PCA yöntemine dayalı girdi özelliklerinin indirgenmesini baz alan bir regresyon analizidir. Regresyon analizinde, veri öznitelikleri arasında çoklu doğrusallığın olması, bir nitelikten tahmin edilebilecek bir çıktı için girdi fazlalığı anlamına gelmektedir. Bu durumu önlemeye yönelik, birbirleriyle bağlantılı özniteliklerin belirlenmesi önemlidir. PCA uygulandığında, yeni girdi bileşenleri üretildiği için bileşenler arasındaki doğrusallığın da önüne geçilmektedir. Model eğitiminde kullanılacak veri için regresyon analizinde, varyans enflasyon faktörü (Variance Inflation Factor, VIF) adı verilen bir değer ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki kontrol edilebilmektedir. VIF değerinin “1” olması, veri öznitelikleri arasında çoklu bir doğrusallığın olmadığını göstermektedir. VIF değerinin hesaplanması Denklem 3.26’da gösterilmektedir.

$$VIF_j = \frac{1}{1-R_j^2} \quad (3.26)$$

Denkleimde yer alan VIF_j , bir X_j girdi değişkeni için VIF değerini, R_j^2 , X_j değişkeninin diğer girdilere göre regresyonundan elde edilen R^2 değerini ifade etmektedir.

PCA işlemi sonrası VIF değerinin 1 olması beklenmektedir. Bunun başlıca sebepleri arasında, PCA'nın bağımsız değişkenleri tamamen yeni ve birbiriyle ilişkisiz bir değişken kümesine dönüştürmesi gösterilebilir. Yeni bileşenlerin birbirleriyle ilişkisiz olması, ortogonalite olarak ifade edilmekte ve ortogonal değişken kümesi içerisindeki bileşenlerin doğrusal bir ilişkide olmadığı anlamına gelmektedir. Buna göre bir temel bileşene, diğer bileşenlere göre regresyon işlemi uygulandığında, R^2 değeri "0" ve VIF değeri "1" çıkmaktadır.

3.7. REGRESYON ALGORİTMALARI

Regresyon, denetimli makine öğrenmesi yöntemi olarak kullanılan, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında nümerik bir ilişki kurmaya yarayan bir tekniktir. Bu yöntemle değişkenler arasında kurulan bağlantıya dayalı bir tahmin modeli geliştirilir ve verideki bağımlı değişkenler (çıktılar) nümerik olarak tahmin edilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan regresyon algoritmaları ve bu algoritmaların temel mantığı aşağıda kısaca sunulmaktadır.

Lasso regresyonu: Lasso regresörü, Tibshirani (1996) tarafından önerilen, düzenleme ve özellik seçimi görevlerini yerine getiren bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Shafiee vd., 2021). Verilerdeki karmaşıklığı azaltmayı hedeflemekte ve tahmin hatasını minimum düzeye getirmeye çalışmaktadır. Aşırı uyumdan doğan sorunların önüne geçmek için bazı özellikleri veriden çıkartmaktadır (Rodrigues vd., 2022).

Ridge regresyonu: Ridge regresörü, Hoerl ve Kennard tarafından önerilmiş (Hoerl ve Kennard, 1970) verideki öz niteliklerin etkilerine göre ağırlıklarını belirlemeye yarayan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Verideki etkisi az niteliklerin tespiti ve katsayı azaltımı yapmada kullanılmaktadır (Rodrigues vd., 2022). Hatayı minimize etme ve nitelik katsayı düzenlemesi başlıca görevleridir.

ElasticNet algoritması: Lasso ve Ridge yöntemlerini harmanlayan ve verideki karmaşıklığı azaltmayı amaçlayan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Lasso algoritmasının, veride etkisi az olan nitelikleri çıkartma ve Ridge algoritmasının verideki önemsiz nitelik katsayılarını azaltma tekniklerini birleştiren bir yöntemdir (Rodrigues vd., 2022). Amaç fonksiyonu, Lasso ve Ridge düzenlemeleri ve mean squared error (MSE) terimlerini içerir (Kumar vd., 2023).

Doğrusal Regresyon: Verideki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi anlamlandırmaya çalışan ve değişkenler arasındaki doğrusallığı araştıran makine öğrenmesi algoritmasıdır. Temel varsayımında, bağımlı değişken ve bağımsız değişken arasında doğrusal bir ilişki olduğu, artıkların normal dağılımlı, eşit varyanslı ve birbirinden bağımsız olmaları bulunmaktadır (Murphy, 2024). Bağımlı değişkenlerin sürekli ve bağımsız değişkenlerin sürekli ya da ayırık olması beklenmektedir (Khan vd., 2022; Kumar vd., 2023).

K-en yakın komşu algoritması: Bir veriden alınan örneklemin, uzaklığına göre seçilen k adet gözlem verisinin ortalama veya frekansını kullanarak bağımlı değişkenleri tahmin etmeyi hedefleyen makine öğrenmesi algoritmasıdır. Gözlem biriminin sayısı algoritmanın başarısında etkilidir. K gözlem örneklerinin fazla olması, oylamaya katılan veri sayısını arttırmakta ve daha doğru bir tahmin modeli geliştirilmesini sağlayabilmektedir (Rezaei ve Jabbari, 2022). Optimum k değerinin belirlenmesinde aşırı ya da yetersiz uyuma dikkat edilerek bir denge kurulması tavsiye edilmektedir (Zhang, 2014; Zhang, 2016).

Karar ağacı algoritması: Verinin parçalara ayrılmasıyla karar ve yaprak düğümlerinden oluşan ağaç benzeri bir yapının oluşturduğu makine öğrenmesi algoritmasıdır. Ağaç durdurma kriteri karşılanıncaya kadar büyür ve en iyi tahmin sonucuna ulaşılır. Anlaşılır yapısıyla, kritik değişkenin diğer değişkenlerle ilişkisini bulmayı kolaylaştırmaktadır (Zhao ve Zhang, 2008; Nyirandayisabye vd., 2022).

Bagging algoritması: Bagging regresörü, veri kümesinden alınan rastgele alt kümelere regresyon uygulanması sonucu her bir alt kümenin tahmin değerinin oylama ya da ortalama alınmasıyla topluluk tahmininin elde edildiği makine öğrenmesi algoritmasıdır (<https://scikit-learn.org>). Veriden alınan rastgele alt kümelere uyguladığı aynı algoritmayla regresyon analizi sayesinde sunduğu çeşitlilikle, aşırı uyum ihtimalini azaltmaktadır (Khan vd., 2024).

Rastgele orman algoritması: Breiman tarafından önerilen (Breiman, 2001), eğitim örneklerinden zayıf öğrenenleri belirleyerek bunların tahminlerini toplayan ve son tahminleri elde etmede kullanan makine öğrenmesi algoritmasıdır. Veriden alınan alt örneklerin tahmin doğruluğunu artırma ve aşırı uyumunu önlemede ortalama olarak kontrol sağlamaktadır (scikit-learn.org).

AdaBoost algoritması: Eğitimdeki zayıf öğrencileri daha güçlü bir model üretmede kullanan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Eğitim verisi içerisinde alınan örneklere eşit ağırlıklar verilerek bu ağırlıkların tahminlere göre güncellenmesiyle son halini almaktadır.

Ağırlıklar yanlış tahminlerin hata değerine göre değiştirilmekte ve model performansı iyileştirilmektedir (Kumar vd., 2023).

LightGBM algoritması: Ağaç tabanlı, gradyan arttırmaya yönelik makine öğrenmesi algoritmasıdır. Yeni geliştirilmiş veri örnekleme ve sınıflandırma yöntemlerinin birleştirilmesiyle elde edilmektedir (Ke vd., 2017). Eksik veri durumunda etkisi, paralellik katkısı ve dağıtılmış bilgi işlem desteğiyle ön plana çıkmaktadır (Panda ve Mohanty, 2023).

XgBoost algoritması: Gelişmiş bir gradyan arttırma yöntemi olarak aşırı gradyan arttırma adıyla bilinen makine öğrenmesi algoritmasıdır (xgboost.readthedocs.io; Chen ve Guestrin, 2016). Zayıf karar ağaçlarını güçlendirme prensibini benimsemiştir. Karar ağaçlarındaki modellerden zayıf olanları belirleyerek öğrenme topluluğuna sırayla eklemektedir. Her öğrenen bireysel modelin hatalarını düzeltmeye çalışmaktadır. Kayıp fonksiyonu ile karar ağaçlarının karmaşıklığını cezalandırır (Abbasimehr vd., 2023).

CatBoost algoritması: Gradyan arttırmaya yönelik bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Dorogush vd., 2018; Developers, 2021). Modelin aşırı uyumu konusunda oldukça etkilidir. Sınıflandırma ve regresyon problemleri için uygun görülen bu algoritma, özellikle veriyi kategorize etmedeki başarısıyla, sınıflandırma çalışmalarında üstün bir tahmin performansı göstermektedir.

3.8. MODEL METRİKLERİ

Makine öğrenmesiyle geliştirilen tahmin modelleri, problemin türüne, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin ilişkisine göre farklı düzeyde performans gösterebilmektedir. En doğru tahmin modelinin geliştirilmesi için olabildiğince fazla sayıda algoritmanın denenmesi en doğru algoritmanın belirlenmesi için gereklidir. Nümerik bir veri seti ile makine öğrenmesi modeli oluşturulduğunda bu model, regresyon problemi olarak adlandırılmaktadır. Regresyon modellerinin değerlendirilmesinde, R kare adlı regresyonun değişkenlik oranını simgeleyen bir değer hesaplanmaktadır. Bu değer, regresyon analizi ile modelin toplam varyasyonunu ne düzeyde açıklayabildiğini ifade etmektedir. Ayrıca modelin performans değerlendirmesinde R kare (R-squared, R^2) değerinin yanı sıra ortalama mutlak hata (mean absolute error, MAE), ortalama karesel hata (mean squared error, MSE), ortalama karesel kök hata (root mean squared error, RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (mean absolute percentage error, MAPE) değerleri de kullanılabilir. R^2 değerinin hesaplama denklemi Denklem 3.27'de ve MAE hesabı

Denklem 3.28’de gösterilmektedir. MSE, RMSE ve MAPE değerlerinin hesap denklemleri sırasıyla Denklem 3.29, Denklem 3.30 ve Denklem 3.31’de gösterilmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.27)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (3.28)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (3.29)$$

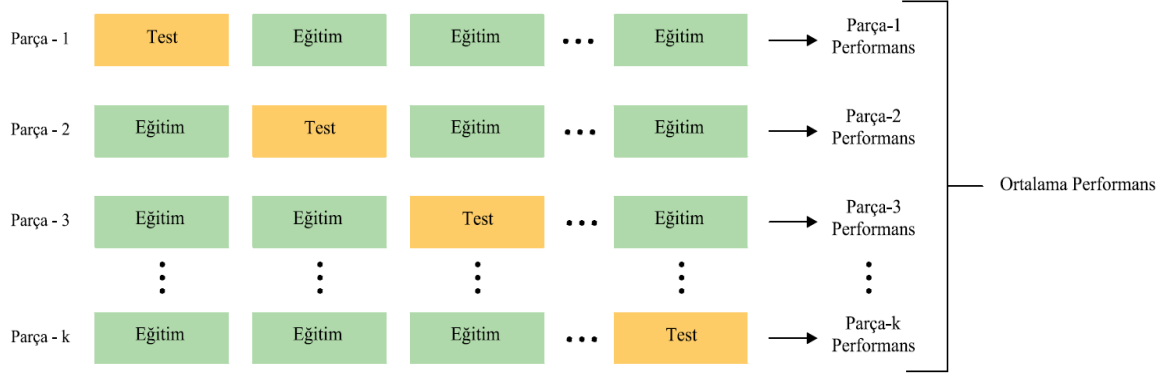
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3.30)$$

$$MAPE = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (3.31)$$

Denklemlerde yer alan N , örnek sayısını, y_i , gözlem değerini, \bar{y} gözlem değerlerinin ortalamasını ve \hat{y}_i , tahmin edilen değeri göstermektedir.

3.9. MODEL DEĞERLENDİRMESİ

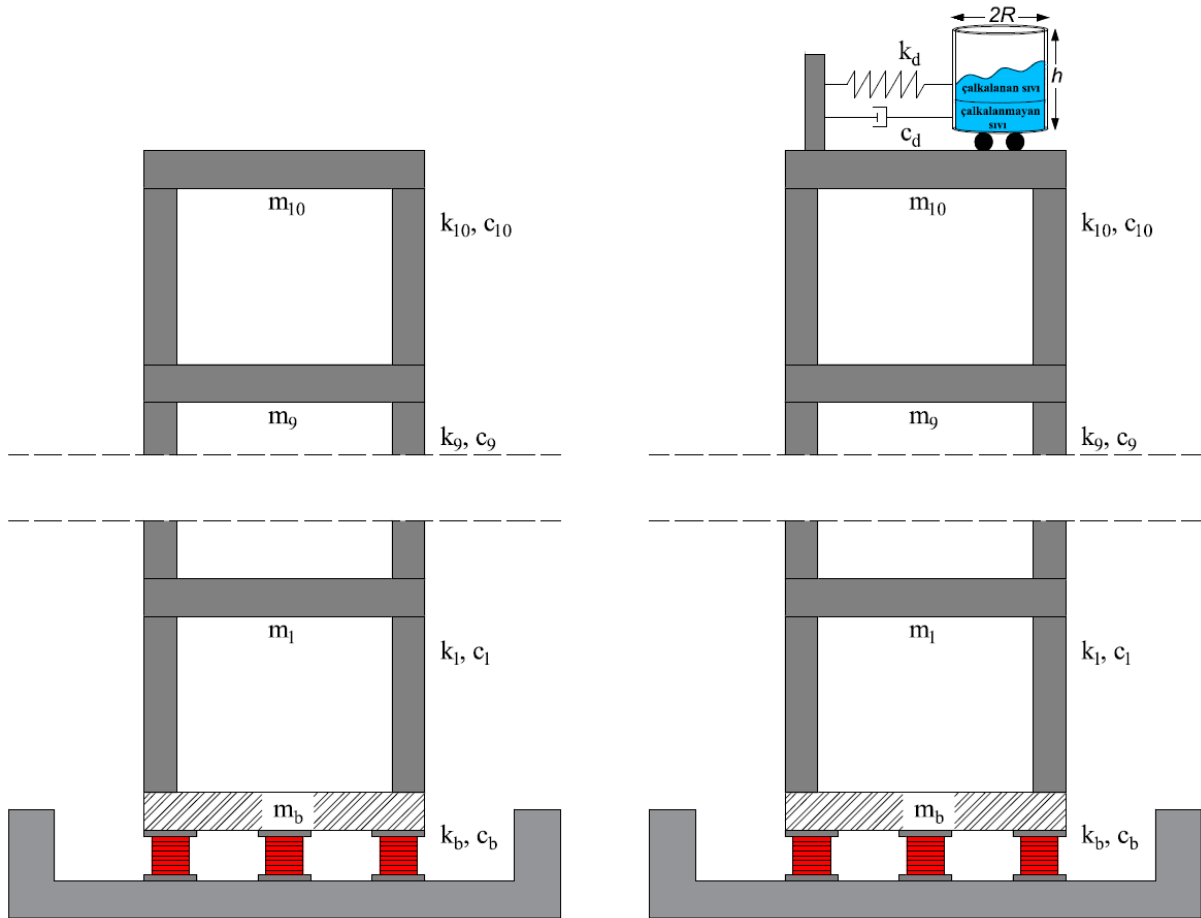
Makine öğrenmesi yöntemiyle elde edilen tahmin modelleri için birden fazla doğrulama yöntemi bulunmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında model doğrulaması için k-katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmış ve veri 10 parçaya bölünmüştür. Bu yöntem, Geisser ve Eddy tarafından önerilmiş (Geisser ve Eddy, 1979), bir verinin k adet parçaya bölünerek bir parçasının test için ve kalanının makine eğitimi için kullanıldığı doğrulama tekniğidir. On parçaya bölünmüş bir veri seti düşünüldüğünde, model eğitimi için rastgele 10 parçaya bölünmüş verinin bir parçası doğrulama için kullanılmakta ve bir R^2 skoru hesaplanmaktadır. Bu şekilde rastgele 10 kısım oluşturulmakta ve her 10 kısım için elde edilen R^2 skorlarının ortalaması alınarak modelin nihai R^2 değeri hesaplanmaktadır. K-katlı çapraz doğrulama tekniğinin örnek gösterimi Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8: K-katlı çapraz doğrulama yöntemi.

4. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında iki farklı uygulama yapılmıştır. İlk uygulamada, 10 katlı bir yapı tabanına izolatör yerleştirilerek yakın fay depremleri altında sönümleyici ilaveli ve sönümleyicisiz hali değerlendirilmiş, yapı kontrolünde izolatörlü sisteme sönümleyicinin katkısı araştırılmıştır (Ocak vd., 2024a). Oluşturulan yalnızca izolatörlü ve izolatöre sönümleyici ilave edilmiş yapı modelleri, armoni arama algoritması ile optimize edilerek, yakın fay depremleri altında optimum tasarımı araştırılmıştır. Yakın fay depremleri altındaki yapı için optimum kontrol sistemi parametreleri elde edilerek, darbeli ve darbesiz yakın fay kayıtlarına göre ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) ilavesinin sisteme katkısı incelenmiştir. Optimizasyon sonrası elde edilen optimum tasarım özellikleriyle kritik deprem analizleri yapılmış, iki modelin performansları karşılaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında ilk uygulama için 10 katlı yapıda kullanılan izolatörlü ve sönümleyici ilave edilmiş hibrit sistem modelleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



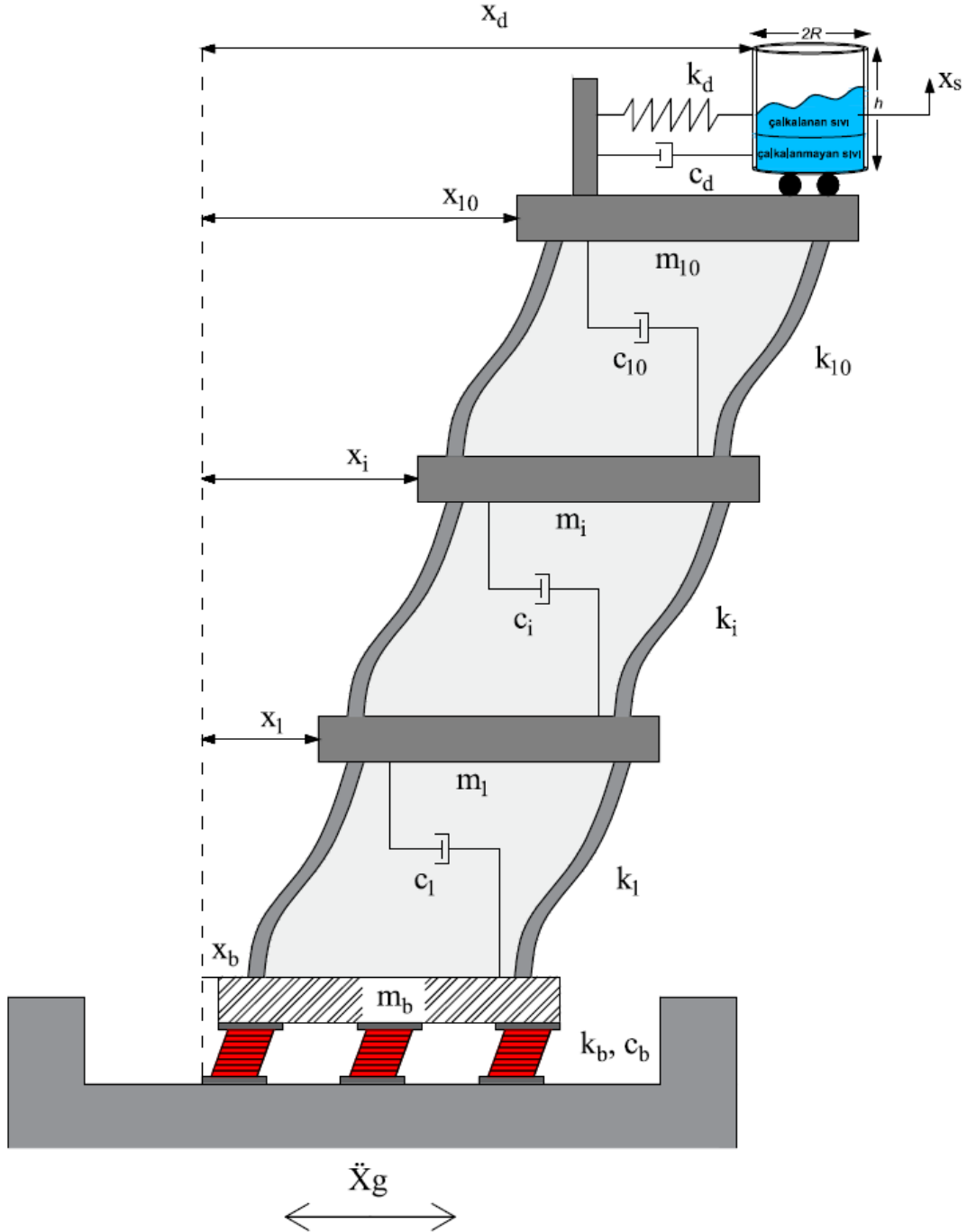
Şekil 4.1: a) İzolatörlü yapı modeli, b) Sönümleyici ilave edilmiş hibrit sistem modeli.

Uygulamada kullanılan, yapı modellerine ait özellikler, tasarım limitleri ve optimizasyon parametrelerine dair detaylar 4.1 No'lu başlıkta sunulmaktadır. Tez kapsamında yapılan tüm optimizasyon işlemleri için geçerli olan tasarım kısıtları ve amaç fonksiyonunu açıklayan bilgiler 4.1.1 No'lu başlıkta detaylarıyla anlatılmaktadır. Yalnızca izolatör kullanılan sistem ve ayarlı sıvı sönümleyici ilaveli hibrit sisteme dair optimum tasarım özellikleri ve kritik deprem analizleri, sırasıyla 4.1.2 No'lu başlık ve 4.1.3 No'lu başlıklarda verilmektedir. Tez çalışmasında yapılan ikinci uygulamada, makine öğrenmesi ile kontrol sistemi özelliklerini tahmin eden bir model geliştirilmesi hedeflenmiştir. Öncelikle TLD'lerin yerleştirileceği alan boyutlarını sınırlayan bir optimizasyon problemi üzerine odaklanılmıştır. TLD yerleştirilecek alanın boyutlarına yönelik TLD tank yarıçapı ve yüksekliği için farklı tasarım limitleri denenerek optimum özellikler aranmıştır. Yapı modelinde kullanılacak izolatör özelliği olarak farklı izolatör hareket limitlerine göre optimizasyon yapılmıştır. Tabandan izole edilmiş bir yapı örneğinin en üst katına TLD eklenerek Jaya algoritması ile optimize edilmiş, farklı tasarım limitleri için optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen optimum özelliklerden bir veri seti oluşturulmuştur. Veri seti, makine öğrenmesi modelinin eğitiminde kullanılmıştır. TLD yerleştirilecek alanın boyut limitlerini ve izolatör hareket kabiliyetini dikkate alarak optimum izolatör ve TLD tasarım parametrelerini tahmin eden makine öğrenmesi modelleri üretilmiştir. Regresyon problemi olarak ele alınan tahmin modellerinin performansı karşılaştırılarak, en yüksek doğruluğa sahip öğrenme modeli belirlenmiştir. Bu başlık altındaki bölümlerde, tez çalışmasında uygulanan sismik taban izolasyonlu ve ayarlı sıvı sönümleyicili sistemlerin optimum tasarımı ve makine öğrenmesi ile tahmin modeli geliştirilmesi konuları aktarılmıştır.

4.1. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ SİSTEMLERİN YAKIN FAY ALTINDA OPTİMUM TASARIMI

Yapılan uygulamada, yakın fay depremlerinin yapıdaki yıkıcı etkilerini azaltmak için yapı tabanına sismik bir izolatör yerleştirilerek ve taban izolatörü ile ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) kullanılarak iki farklı model kullanılmıştır. Sismik taban izolatörlerinin, yakın fay uyarımları altında, sönümleyici ilaveli ve sönümleyici olmadan gösterdiği kontrol performansı araştırılmıştır. Bu amaçla 10 serbestlik dereceli (10 degree of freedom, 10DOF), her bir kat ağırlığı 360-ton ve her bir kat rijitlik ve sönüm katsayıları 650 MN/m ve 6.2MN/m olan bir

yapı örneği kullanılmıştır (Liu vd., 2008). İzolatör ve TLD'nin hibrit kullanıldığı sistem örneği Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2: İzolatör ve TLD'li 10 katlı yapısal sistem modeli.

İzolatörlü ve sönümleyicili yapı modeli ve sönümleyici ilavesiz izolatörlü yapı modeli, Fema yakın fay deprem uyarımları altında uyarlanabilir armoni arama algoritmasıyla (AHS) optimize edilmiştir. Çalışmada kullanılan yakın fay kayıtlarından darbeleri olanlar ve darbesiz olanlar sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir (Fema, 2009).

Tablo 4.1: Darbeli yakın fay kayıtları alt kümesi (Fema, 2009).

Deprem Numarası	Tarih	Büyüklik	Deprem Adı	Kayıt İstasyonu
1	1979	6.5	Imperial Valley-06	El Centro Array #6
2	1979	6.5	Imperial Valley-06	El Centro Array #7
3	1980	6.9	Irpinia, Italy-01	Sturno
4	1987	6.5	Superstition Hills-02	Parachute Test Site
5	1989	6.9	Loma Prieta	Saratoga - Aloha
6	1992	6.7	Erzican, Türkiye	Erzican
7	1992	7.0	Cape Mendocino	Petrolia
8	1992	7.3	Landers	Lucerne
9	1994	6.7	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta
10	1994	6.7	Northridge-01	Sylmar - Olive View
11	1999	7.5	Kocaeli, Türkiye	İzmit
12	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
13	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan	TCU102
14	1999	7.1	Düzce, Türkiye	Düzce

Tablo 4.2: Darbesiz yakın fay kayıtları alt kümesi (Fema, 2009).

Deprem Numarası	Tarih	Büyüklik	Deprem Adı	Kayıt İstasyonu
1	1976	6.8	Gazli, USSR	Karakyr
2	1979	6.5	Imperial Valley-06	Bonds Corner
3	1979	6.5	Imperial Valley-06	Chihuahua
4	1985	6.8	Nahanni, Canada	Site 1
5	1985	6.8	Nahanni, Canada	Site 2
6	1989	6.9	Loma Prieta	Bran
7	1989	6.9	Loma Prieta	Corralitos
8	1992	7.0	Cape Mendocino	Cape Mendocino
9	1994	6.7	Northridge-01	LA - Sepulveda VA
10	1994	6.7	Northridge-01	Northridge - Saticoy
11	1999	7.5	Kocaeli, Türkiye	Yarımca
12	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan	TCU067
13	1999	7.6	Chi-Chi, Taiwan	TCU084
14	2002	7.9	Denali, Alaska	TAPS Pump Sta. #10

İzolatörlü ve sönümleyicili yapı modeli, %20, %30, %40 ve %50 izolatör sönüm kapasitesi limitlerinde ve 50cm ve 60 cm hareket kabiliyeti kısıtlarında optimize edilmiştir. Sistemin izolatör periyodu, sönümleyici periyodu, izolatör sönüm oranı, sönümleyici sönüm oranı, TLD tank yarıçapı ve yüksekliği, yakın fay uyarımları altındaki yapının maksimum mutlak ivmesini minimize edecek şekilde Matlab üzerinde optimize edilmiştir (Matlab, 2018a). Optimizasyonda kullanılan sabitler ve tasarım limitleri ve algoritma parametreleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Optimizasyon parametreleri.

Sembol	Açıklama	Değer
HMCR	Armoni hafıza dikkate alma oranı	0-0.5
HMCR_{in}	Armoni hafıza dikkate alma oranı başlangıç değeri	0.5
PAR	Ton ayarlama oranı	0-0.05

Tablo 4.3 (devam):

PAR_{in}	Ton ayarlama oranı başlangıç değeri	0.05
mt	Maksimum iterasyon sayısı	2000
t	İterasyon numarası	1-2000
pn	Popülasyon sayısı	10
T_b	İzolator periyodu	1-5s
ζ_b	İzolator sönüm oranı	%1-50
μ	TLD-Yapı kütle oranı	%5
h	TLD sıvı yüksekliği	0.1-10 m
R	TLD tank yarıçapı	0.1-10 m
ζ_d	TLD sönüm oranı	%1-50
T_d	TLD periyodu	1-5s
ρ	Sıvı yoğunluğu	998 kg/m ³
ν	Sıvı kinematik viskozitesi	8.96 (10 ⁻⁷) m ² /s

4.1.1. Optimizasyon Tasarım Kısıtları ve Amaç Fonksiyonu

Çalışmada, sismik izolasyonlu ve ayarlı sıvı sönümleyicili (TLD) hibrit sistemin optimum tasarımı ve optimum tasarım verileriyle kontrol sistemine ait tasarım özelliklerini tahmin eden makine öğrenmesi model oluşturulması üzerine çalışma yapılmıştır. Her iki uygulamada ortak tasarım kısıtları ve aynı amaç fonksiyonu hedeflenerek optimizasyon süreci tamamlanmıştır. Sismik izolator ve TLD kullanılan sistemde, optimum tasarım süreci için üç tasarım kısıtı belirlenmiştir. Optimizasyonda, izolatorün hareket limitini aşmaması, TLD özelliklerinin önerilen boyutlara uyması ve TLD deplasman kısıtı koşullarını sağlayarak yapının en üst katında biriken maksimum toplam ivmenin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Yapıda, izolator için deplasman sınırı 50 cm alınmıştır. Kontrol sistemine TLD eklendiği durum için TLD'nin deplasmanı 2 m ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca Fujino vd. (1992) tarafından önerilen, TLD tankı sıvı yükseliğinin, tankın tabanındaki etkili sıvı uzunluğuna oranını veren formül ($\frac{h}{2R} > 0.15$), optimum sıvı yüksekliği ve tankın taban yarıçapı çözümleri için kullanılmıştır. Denklem 4.1'de sismik izolator için optimizasyon kısıtı, Denklem 4.2'de TLD için deplasman kısıtı ve Denklem 4.3'te Fujino vd. (1992) tarafından önerilen boyut kısıtı gösterilmektedir. Optimum tasarımı için yapının maksimum ivmesinin minimize edilmesini hedefleyen amaç fonksiyonu Denklem 4.4'te verilmektedir.

$$g_1(x) = X_b > deplasman \quad (4.1)$$

$$g_2(x) = X_d > stmax \quad (4.2)$$

$$g_3(x) = \frac{h}{2R} > 0.15 \quad (4.3)$$

$$f(x) = Minimize(\max(|\ddot{X}|)) \quad (4.4)$$

Tablo 4.4: Yakın fay darbe kayıtları altında AHS ile optimize edilmiş 11DOF sistemi için optimum izolatör parametreleri.

Değişken	Optimum Sonuçlar							
	%20		%30		%40		%50	
	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm
ζ_b	0.2000	0.2000	0.2888	0.2558	0.2881	0.2549	0.2946	0.5000
T_b (s)	2.1477	2.8201	2.8743	3.1091	2.8732	3.1075	2.8834	3.9488

Optimum izolatör parametreleri kullanılarak izolatör eklenmiş yapı için kritik olan maksimum ivme kaydında, kritik deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. İzolatör tanımlanan 50 ve 60 cm hareket kısıtlamasını aşan analizler olmuştur. Bu durum izolatör katının yakın fay kayıtların çok fazla yer değiştirme yaparak zarar görmesinden ya da kırılmasından meydana gelmektedir. İzolatörlü yapının deplasman açısından kritik olan yakın fay kaydında izolatör katında meydana gelen deplasmanlar Tablo 4.5'te verilmiştir. Kritik deprem analizlerinde elde edilen sonuçlar Tablo 4.6'da gösterilmektedir. İzolatör katının fazla hareketi sonucu hasarı ile sonuçlanan değerler, Tablo 4.6'dan kaldırılmıştır.

Tablo 4.5: 11DOF sistem için kritik deplasmana göre yakın fay darbe kaydında izolatör seviyesi deplasmanları.

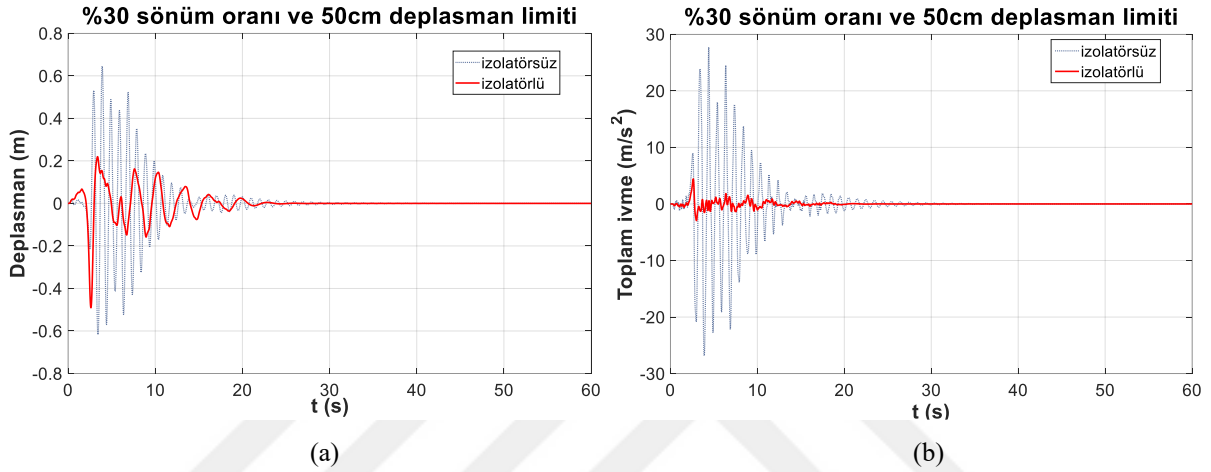
Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	İzolatör Seviyesi Deplasmanı (m)	Deprem numarası	Deprem Adı	Kayıt istasyonu
50 cm	20 %	0.500002	7	Superstition Hills-02	Parachute Test Site
	30 %	0.499974	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
	40 %	0.500004	2	Imperial Valley-06	El Centro Array #6
	50 %	0.499981	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
60 cm	20 %	0.599998	2	Imperial Valley-06	El Centro Array #6
	30 %	0.600021	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
	40 %	0.600006	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
	50 %	0.600001	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065

Tablo 4.6: Darbeli yakın fay uyarımı altında 11DOF izolatörlü sisteminin kritik deprem analiz sonuçları.

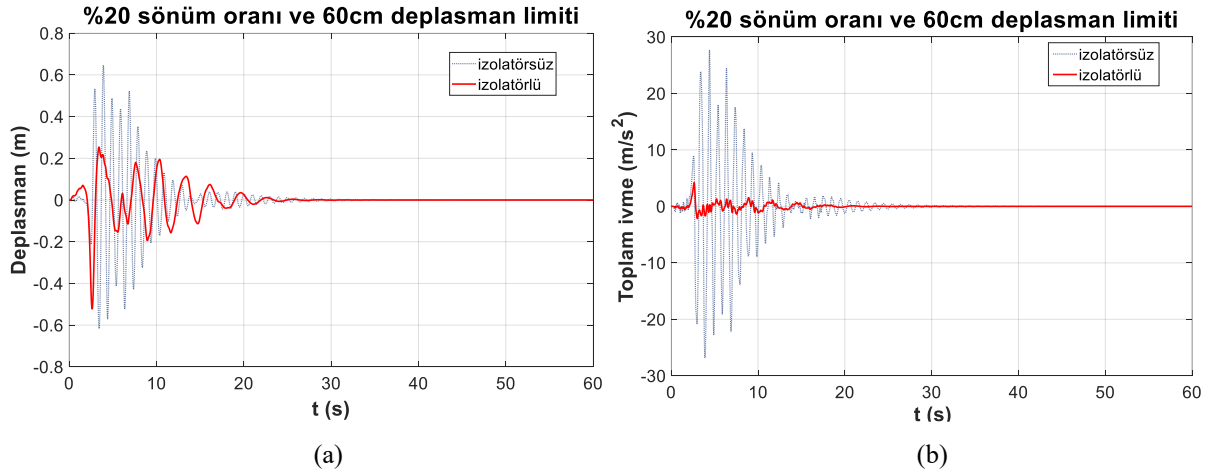
Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	Deplasman (m)	Toplam İvme (m/s ²)	Deprem Numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	%30	0.4905842	4.4179166	17	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta
	%50	0.4889330	4.4242574			
60 cm	%20	0.5222628	4.2000137			
Kontrolsüz yapı		0.6456785	27.7298775			

Kritik deprem analizi sonuçları incelendiğinde, en etkili ivme düşüşleri, 50 cm hareket kabiliyeti için %30 sönümlü sistemde görülmüştür. 60 cm hareket kabiliyetinin tanımlandığı

sistemde, darbeleri yakın fay kayıtları izolatörü fazla hareket ettirip zarar görmesine sebep olduğu için verilen sınırlarda yalnızca tek bir durum için sonuçlanmıştır. Kritik ivme kaydı 17 numaralı depremde görülmüştür. Her deprem kaydı iki bileşenden oluşmaktadır. 17.deprem kaydı. Darbeleri yakın fay kayıtları içerisinde 9. deprem olan Northridge-01 depreminin birinci bileşenini ifade etmektedir. 50 cm deplasman limitli ve %30 sönüm kapasiteli izolatörlü sistemin deplasman-zaman ve toplam ivme-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: %30 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde, yakın fay darbe kayıtları altında 11DOF sistemi için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.



Şekil 4.5: %20 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde, yakın fay darbe kayıtları altında 11DOF sistemi için kritik deprem analizinin grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.

11DOF izolatörlü sistemin darbesiz yakın fay kayıtları altında optimum izolatör parametreleri Tablo 4.7'de verilmiştir. AHS algoritması ile aynı sönüm ve deplasman kısıtları için elde edilmiştir.

Tablo 4.7: AHS ile optimize edilmiş 11DOF sistem için darbesiz yakın fay kayıtları altında optimum izolatör parametreleri.

Değişken	Optimum sonuçlar							
	%20		%30		%40		%50	
	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm
ζ_b	0.2000	0.2000	0.3000	0.3000	0.3932	0.3007	0.3944	0.3124
T_b (s)	2.7966	3.6625	3.5603	5	5	5	5	5

Optimum izolatör parametreleri ile yapılan kritik deprem analizlerinde, izolatörlü sistem için kritik olan deplasmanında, izolatör seviyesi deplasman değerleri kaydedilmiştir. Hareket kısıtını aşan değerler ile Tablo 4.8’de hareket sınırını aşan izolatör deplasmanları verilmiştir.

Tablo 4.8: 11DOF sistem için kritik deplasmana göre darbesiz yakın fay kayıtlarında izolatör seviyesi deplasmanları.

Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	İzolatör Seviyesi Deplasmanı (m)	Deprem numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	20 %	0.500000	27	Denali, Alaska	TAPS Pump Sta. #10
	30 %	0.500002			
	40 %	0.499913			
	50 %	0.499120			
60 cm	20 %	0.599983	25	Chi-Chi, Taiwan	TCU084
	30 %	0.597093			
	40 %	0.596056			
	50 %	0.579145			

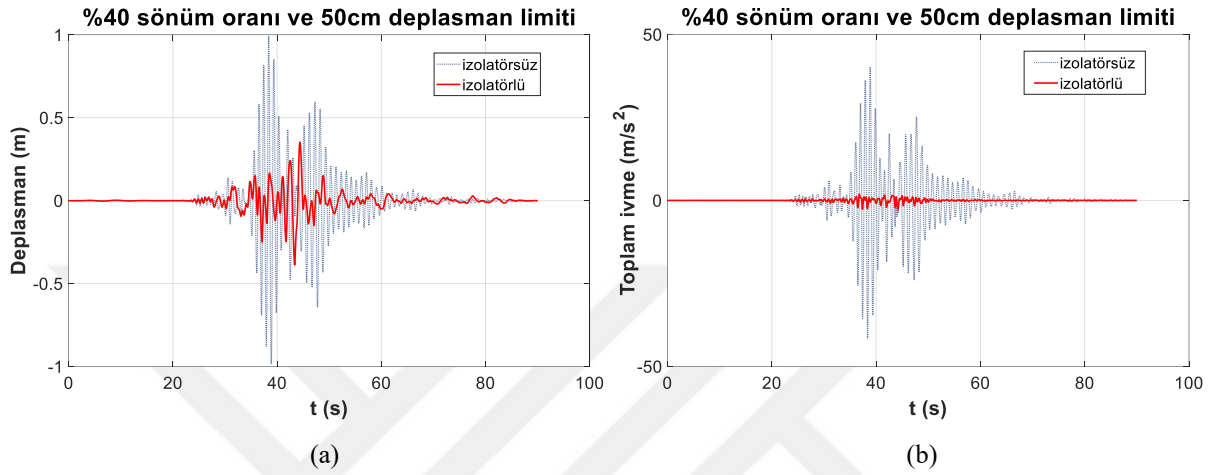
İzolatörlü yapı için ivmeye göre kritik olan deprem kaydında elde edilen kritik deprem analizleri Tablo 4.9’da gösterilmektedir. Tablo 4.9’ dan, izolatör seviyesinde deplasman sınırını aşan sonuçlar çıkarılmıştır.

Tablo 4.9: Darbesiz yakın fay uyarım altında 11DOF izolatörlü sistemin kritik deprem analiz sonuçları.

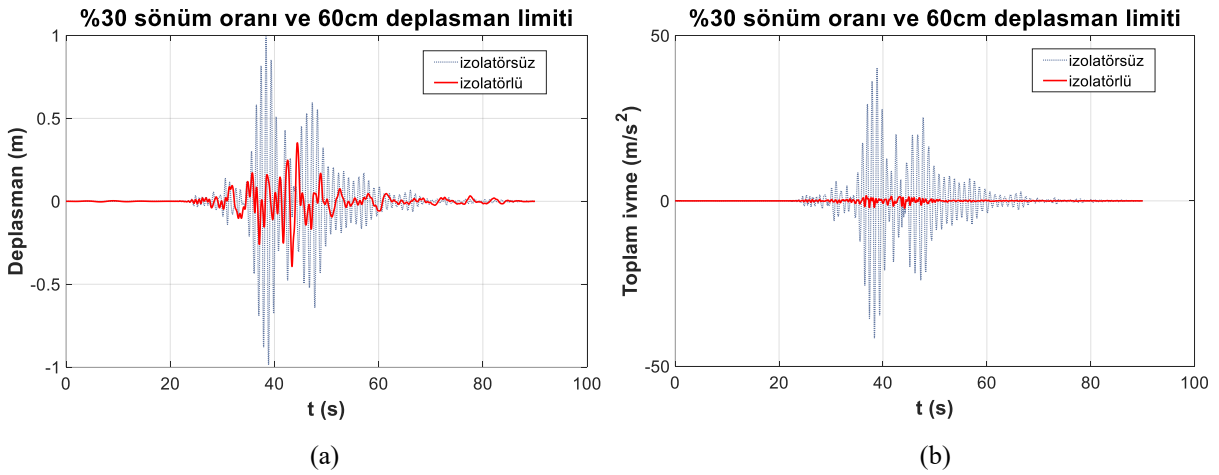
Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	Deplasman (m)	Toplam İvme (m/s ²)	Deprem Numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	%20	0.5846781	4.2355119	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU067
	%40	0.3877427	2.6380409			
	%50	0.3876665	2.6459725			
60 cm	%20	0.4707177	2.5718557			
	%30	0.3932075	2.2019906			
	%40	0.3931653	2.2052577			
	%50	0.3924823	2.2591073			
Kontrolsüz Yapı		0.9918873	41.4735455			

Yapılan kritik deprem analizlerinden elde edilen darbesiz yakın fay kayıtları altındaki izolatörlü sistem davranışında, en iyi ivme düşüşü 50 cm deplasman limiti için %40 sönümlü

sistemde, 60 cm deplasman limiti için %30 sönümlü sistemde görülmüştür. Kritik ivme kaydı 23. depremde görülmüştür. Bu deprem Tablo 2’de yer alan 12. deprem olan Chi-Chi, Taiwan depreminin birinci bileşenidir. 50 cm ve 60 cm deplasman limitli sistem için kritik deprem analizinden elde edilen deplasman zaman ve toplam ivme zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.6: %40 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde, darbesiz yakın fay kayıtları altında 11DOF sistem için kritik deprem analizinin grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.



Şekil 4.7: %30 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde, darbesiz yakın fay kayıtları altında 11DOF sistem için kritik deprem analizinin grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.

4.1.3. Sismik İzolasyonlu ve Ayarlı Sıvı Sönümleyicili Yapı Tasarımı

Yakın fay depremleri, izolotörlü yapıda büyük yer değiştirmelere sebep olan kritik etkilere sahiptir. Bu gibi durumlarda, izolotör seviyesindeki yer değiştirmelerin kısıtlanması amacıyla sönümleyici ile kullanımı tavsiye edilmektedir. 2.örnekte, Şekil 4.1’de gösterilen tabandan izole edilmiş ve üzerine ayarlı sıvı sönümleyici yerleştirilmiş sistemin yakın fay

kayıtları altındaki davranışı incelenmiştir. Oluşturulan sistem izolatör serbestliği, 10 katlı yapının serbestliği ve 2 serbestlikle ayarlı sıvı sönümleyicinin serbestliği olmak üzere 13 serbestlik dereceli (13 degree of freedom, 13DOF) sistemden oluşmaktadır. 13DOF izolatör ve sıvı sönümleyicili sistem özellikleri, 1.örnekteki sönüm ve deplasman kısıtlamalarının olduğu durumlar için AHS algoritmasıyla optimize edilmiştir. Yakın fay kayıtlarında, darbeli depremlere maruz bırakılan izolatörlü ve sönümleyicili sistemin optimum parametre sonuçları Tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10: Yakın fay darbe kayıtları altında AHS ile optimize edilmiş 13DOF sistem için optimum sistem parametreleri.

Değişken	Optimum sonuçlar							
	%20		%30		%40		%50	
	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm
R (m)	1.1085	1.0244	3.5185	5.0499	2.3852	3.0059	4.3451	2.9074
h (m)	3.8973	6.7224	3.3476	1.7398	8.1176	4.0608	1.6944	4.3593
ζ_b	0.2000	0.2000	0.2935	0.2954	0.2885	0.3944	0.5000	0.5000
ζ_d	0.1670	0.2267	0.0752	0.5000	0.0433	0.0237	0.4490	0.0922
T_b (s)	2.4670	3.0321	3.0359	3.3375	3.0340	3.7840	3.5973	4.3450
T_d (s)	2.7111	5	4.9893	3.1662	5	4.5159	5	5

İzolatör ve sönümleyicili sistem için deplasman açısından kritik olan deprem kaydında, izolatör seviyesine ait Yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Yakın fay darbe kayıtlarının uyarım olarak yapıya iletilmesi sonucu bazı durumlarda, izolatör katı tanımlanan hareket sınırını aşarak izolatörün hasarına yol açmıştır. Fema yakın fay darbe kayıtları altında elde edilen izolatör seviyesi deplasmanları Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11: 13DOF sistem için kritik deplasmana göre yakın fay darbe kayıtlarında izolatör seviyesi deplasmanları.

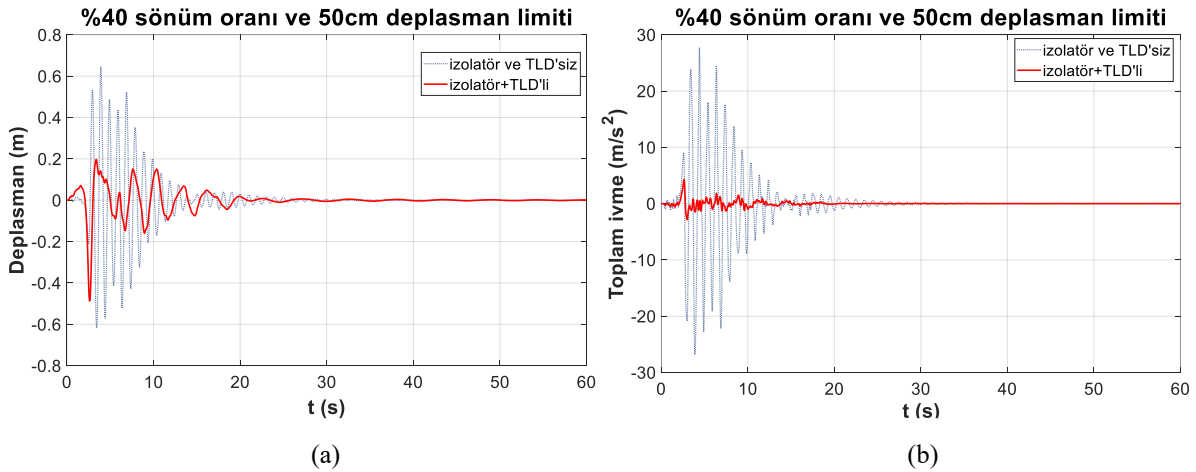
Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	İzolatör Seviyesi Deplasmanı (m)	Deprem numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	%20	0.500000	7	Superstition Hills-02	Parachute Test Site
	%30	0.499969	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
	%40	0.499981			
	%50	0.500002			
60 cm	%20	0.600003	2	Imperial Valley-06	El Centro Array #6
	%30	0.599961	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU065
	%40	0.600008			
	%50	0.599991			

İzolatör ve sönümleyici kullanılmış sistemin, ivme açısından kritik depremine göre yapılmış kritik deprem analizi sonuçları Tablo 4.12’de gösterilmektedir. Bu değerler arasında, Tablo 4.11’de verilmiş izolatör hasarı ile sonuçlanan analizler tablodan kaldırılmıştır.

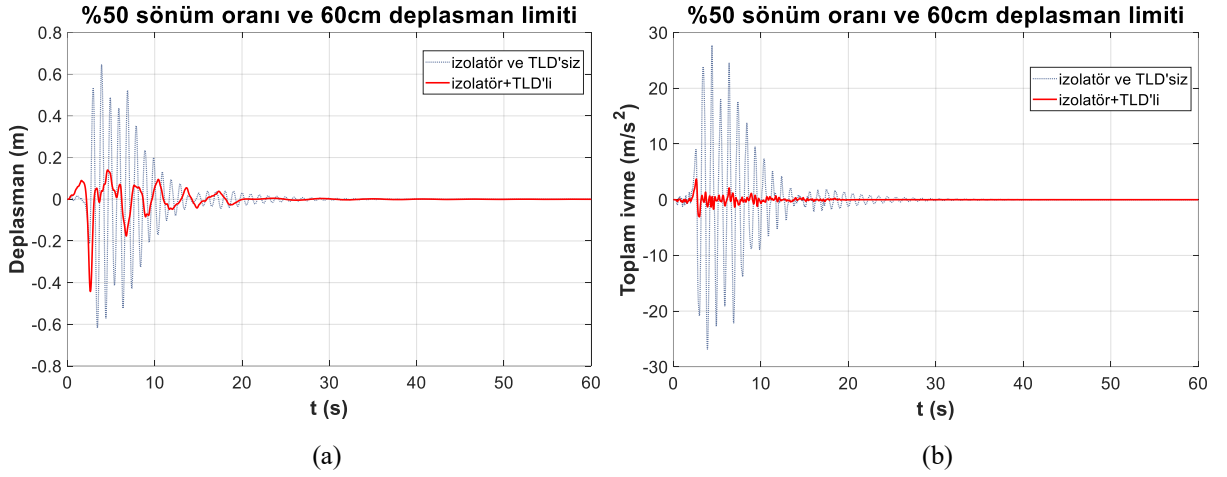
Tablo 4.12: Yakın fay darbe uyarımları altında 13DOF sisteminin kritik deprem analiz sonuçları.

Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	Deplasman (m)	Toplam İvme (m/s ²)	Deprem Numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	%20	0.4971028	4.8414551	17	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta
	%30	0.4864564	4.2996597			
	%40	0.4873110	4.2803554			
60 cm	%30	0.4918984	3.8997024			
	%50	0.4425001	3.7006098			
Kontrolsüz Yapı		0.6456785	27.7298775			

İzolatör ve sönümleyicili sistemde, darbeli yakın fay depremleri altında, kritik ivme yaratan deprem yalnızca izolatörlü yapı örneğinde olduğu gibi 17 numaralı 9. deprem olan Northridge-01 depreminin birinci bileşeninde görülmüştür. 50cm ve 60 cm deplasman limitli sistemler için en iyi ivme düşüşleri sırasıyla %40 ve %50 sönüm limitli durumda gözlenmiştir. 50 cm hareket kısıt ve %40 sönüm limiti için kritik deprem analizinden elde edilen deplasman-zaman ve toplam ivme-zaman grafikleri Şekil 4.8’de 60 cm hareket kısıtı ve %50 sönüm limiti için olan grafikler Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.8: %40 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde ve yakın fay darbe kayıtları altında 13DOF sistem için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.



Şekil 4.9: %50 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde ve yakın fay darbe kayıtları altında 13DOF sistem için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.

13DOF izolatör ve sönümleyicili sistem, darbesiz yakın fay kayıtları altında AHS ile optimize edilmiştir. Optimum izolatör ve TLD parametreleri Tablo 4.13'te verilmiştir.

Tablo 4.13: AHS ile optimize edilmiş 13DOF sistem için, darbesiz yakın fay kayıtları altında optimum sistem parametreleri.

Değişken	Optimum sonuçlar							
	%20		%30		%40		%50	
	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm	50 cm	60 cm
R (m)	2.8566	2.9948	1.9858	1.0463	4.6941	1.9518	3.4121	1.2323
h (m)	5.6714	5.7830	5.1863	5.4785	1.4313	7.2763	4.3834	5.1015
ζ_b	0.2000	0.2000	0.3000	0.2473	0.3650	0.2550	0.3710	0.2577
ζ_d	0.0488	0.1960	0.1393	0.0636	0.1366	0.0733	0.3187	0.0563
T_b (s)	2.9772	4.0186	3.8688	5	5	5	5	5
T_d (s)	2.7549	4.1023	3.0824	4.6991	4.1780	4.8316	4.8353	4.7113

Optimum izolatör ve sönümleyici parametreleri kullanılarak darbesiz yakın fay kayıtları altında kritik deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol sistemli yapı için deplasmanın kritik olduğu kayıtlar incelenerek izolatör seviyesindeki yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Elde edilen izolatör seviyesi deplasmanları Tablo 4.14'te gösterilmektedir.

Tablo 4.14: 13DOF sistem için kritik deplasmana göre darbesiz yakın fay kayıtlarında izolatör seviyesi deplasmanları.

Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	İzolatör Seviyesi Deplasmanı (m)	Deprem Numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	20 %	0.499996	27	Denali, Alaska	TAPS Pump Sta. #10
	30 %	0.499997			
	40 %	0.498876			

Tablo 4.14 (devam):

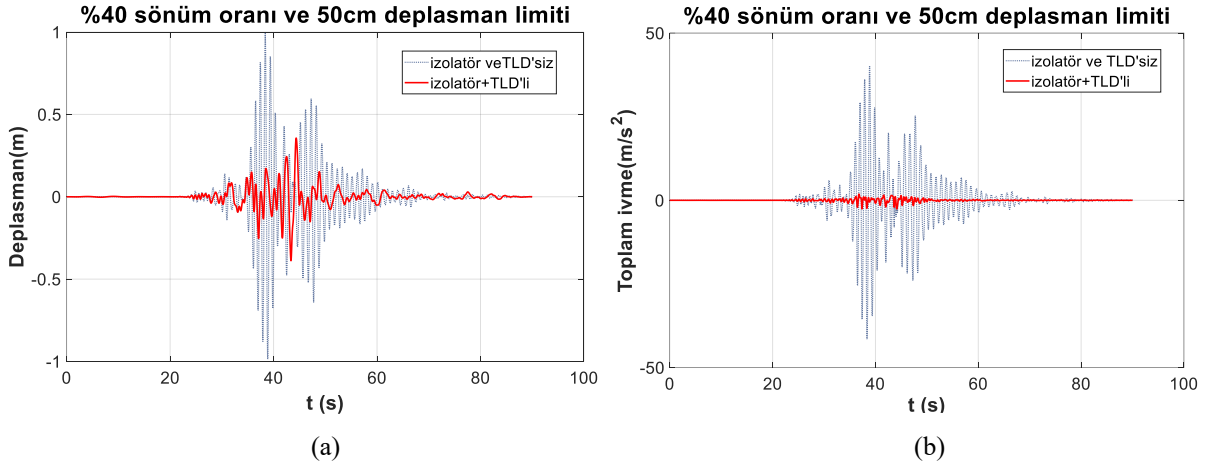
50 cm	50 %	0.495374	27	Denali, Alaska	TAPS Pump Sta. #10
60 cm	20 %	0.599998			
	30 %	0.599579	25	Chi-Chi, Taiwan	TCU084
	40 %	0.591563			
	50 %	0.585056			

Sönümleyici ilaveli izolatörlü sistemde, izolatör hareket kısıtını aşan bir sonuç olmamıştır. Control sistemi eklenmiş yapı için ivmenin kritik olduğu darbesiz yakın fay kayıtları altındaki yer değiştirme ve toplam ivme değerleri Tablo 4.15'te verilmiştir.

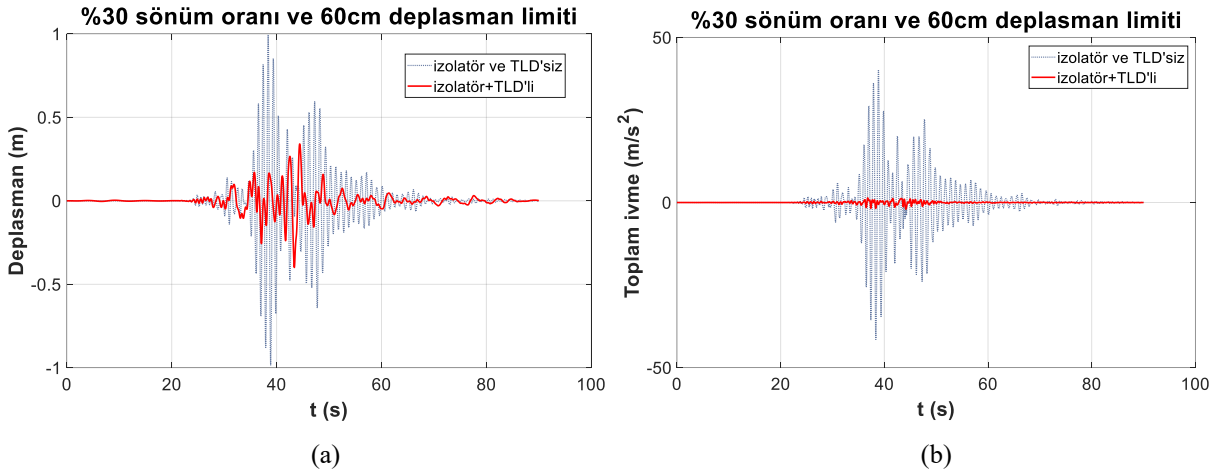
Tablo 4.15: Darbesiz yakın fay uyarımları altında 13DOF sistemin kritik deprem analiz sonuçları.

Deplasman Limiti	Sönüm Oranı Limiti	Deplasman (m)	Toplam İvme (m/s ²)	Deprem Numarası	Deprem adı	Kayıt istasyonu
50 cm	%20	0.4924326	3.7413675	23	Chi-Chi, Taiwan	TCU067
	%30	0.4136077	3.0019318			
	%40	0.3880541	2.5645109			
	%50	0.3882754	2.6060207			
60 cm	%20	0.4448235	2.3305146			
	%30	0.3993222	1.9981515			
	%40	0.3922426	2.0485631			
	%50	0.3980643	2.0536293			
Kontrolsüz Yapı		0.9918873	41.4735455			

Yapılan kritik deprem analizlerinde, kontrollü yapı için ivmenin kritik olduğu deprem kaydı 23 numaralı 12. deprem olan Chi-Chi, Taiwan depreminin birinci bileşeni olmuştur. 50 cm ve 60 cm hareket limiti olan izolatörlü ve sönümleyicili sistem için en iyi ivme azaltma miktarı, 50 cm için %40 sönümlü sistemde ve 60 cm için %30 sönümlü sistemde görülmüştür. Kritik deprem analizlerinden elde edilen deplasman-zaman ve toplam ivme-zaman grafikleri 50cm limitli sistem için Şekil 4.10'da ve 60 cm limitli sistem için Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.10: %40 sönüm oranı ve 50 cm yer değiştirme limitlerinde ve darbesiz yakın fay kayıtları altında 13DOF sistemi için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.

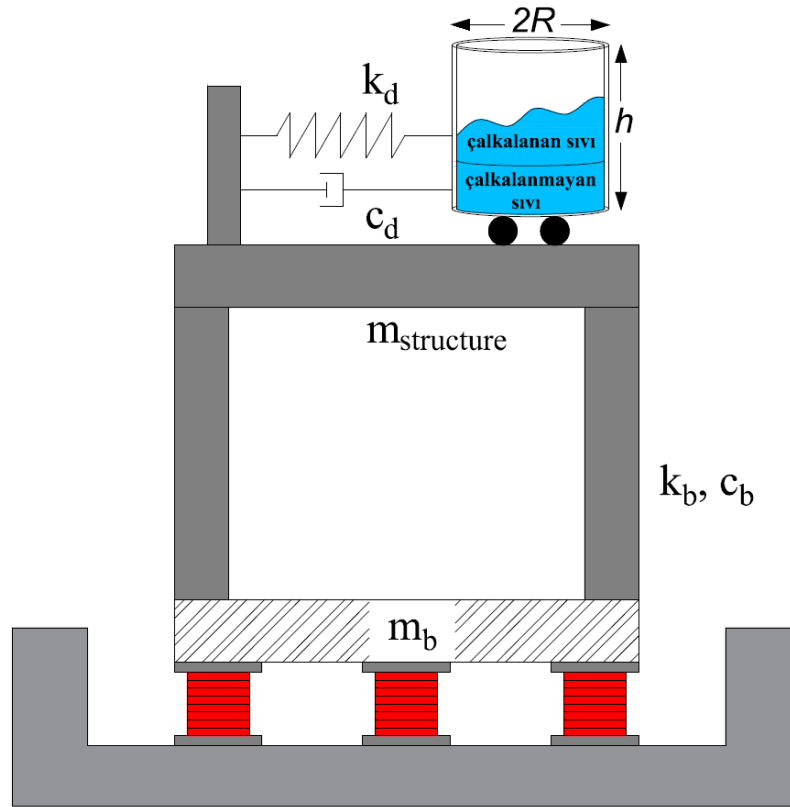


Şekil 4.11: %30 sönüm oranı ve 60 cm yer değiştirme limitlerinde ve darbesiz yakın fay kayıtları altında 13DOF sistemi için kritik deprem analizi grafikleri: (a) Yapının yer değiştirmesi, (b) Yapının toplam ivmesi.

4.2. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ BİR SİSTEMİN TASARIM ÖZELLİKLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ

Bu uygulamada, tabandan izole edilmiş standart bir yapı üzerine, 2 serbestlik dereceli (2 degree of freedom, 2DOF) bir ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) cihaz yerleştirilmiştir. İzolatör ve yapı birlikte hareket eden ortak bir serbestliğe sahiptir. Toplamda izolatör + yapı serbestliği ve 2DOF TLD'li sistem serbestliği olmak üzere 3 serbestlik dereceli (3 degree of freedom, 3DOF) bir sistem oluşturulmuştur. Çeşitli yakın fay depremlerine maruz bırakılan izolatör ve TLD'li yapının, yapısal ivmesini azaltmaya yönelik optimizasyon işlemi uygulanmış ve kütlede bağımsız olarak 100 tonluk izolatörlü standart bir yapı için optimum izolatör ve TLD tasarım parametreleri elde edilmiştir. Fema darbeleri yakın fay depremleri (Fema, 2009) altında

Jaya optimizasyon algoritmasıyla (Rao, 2016) çeşitli TLD yerleştirilecek alan kısıtı ve izolatör hareket kabiliyeti limitleri için izolatörlü yapının periyodu, izolatör sönüm oranı ve TLD tank yarıçapı, sıvı yüksekliği, sönümleyici periyodu ve sönüm oranı parametreleri optimize edilmiş ve yapı davranışı kaydedilmiştir. Optimizasyonda kullanılan izolatör ve TLD’li sistem örneğinin şematik gösterimi Şekil 4.12’de verilmektedir. Jaya algoritması ile yapılan optimizasyon işlemi için kullanılan tasarım parametrelerinin limit değerleri Tablo 4.16’da gösterilmektedir.



Şekil 4.12: İzolatör + TLD sistem modeli.

Tablo 4.16: Tasarım parametreleri ve limitler.

Sembol	Açıklama	Değer
T_b	İzolatörlü sistem periyodu	1-5s
ζ_b	İzolatörlü sistemin sönüm oranı	%1-50
μ	TLD-Yapı kütle oranı	%5
h	TLD sıvı yüksekliği	0.1-5 m
R	TLD tank yarıçapı	0.1-10 m
ζ_d	TLD sönüm oranı	%1-50
T_d	TLD periyodu	1-5s
ρ	Sıvı yoğunluğu	998 kg/m ³
ν	Sıvı kinematik viskozitesi	8.96 x (10 ⁻⁷) m ² /s
g	Yer çekimi ivmesi	9.80665 m/s ²
m_{ps}	İzolatörlü yapı kütlesi	100 ton

Elde edilen optimum sonuçlar, makine öğrenmesi modeli geliştirmek üzere düzenlenerek 1539 satırdan oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti kullanılarak, yakın fay bölgelerinde tasarlanacak bir yapının sismik kontrolü için gerekli kontrol sistemlerinin tasarım özelliklerini tahmin eden yapay zekâ modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, izolatör hareket kabiliyeti, sönümleyici yerleştirilecek alan limitleri, TLD’de kullanılacak toplam sıvı kütlesi, periyodu ve sıvı sönüm oranı gibi sıvı özelliklerini kullanarak, yapısal sistemin yakın faydaki optimum kontrolü için gerekli izolatör ve TLD özelliklerini tahmin etmesi hedeflenmiştir. Makine öğrenmesi için kullanılacak veriye ait 10 satır Tablo 4.17’de sunulmaktadır.

Tablo 4.17: Veri kümesine ait 10 satır.

Rmax (m)	Hmax (m)	D (m)	mst (kg)	Ts (s)	Crs	R (m)	h (m)	Db	Cr	Tb (s)	Td (s)
1.0	1.5	0.30	4701.4	4.2409	0.00266	1.0000	1.4995	0.500000	0.25019	2.3702	2.0051
2.0	1.0	0.25	3162.1	3.7205	0.00244	1.1272	0.7937	0.499998	0.01014	1.8907	1.0245
3.5	2.5	0.50	3948.9	3.8313	0.00242	1.1353	0.9772	0.28392	0.11632	2.9365	1.0000
4.0	3.0	0.35	4731.8	3.8299	0.00238	1.1647	1.1126	0.43394	0.01054	2.6512	1.0000
5.5	4.5	0.55	3584.1	5.9977	0.00445	0.5040	4.5000	0.49993	0.44666	3.9290	4.9985
6	5.0	0.25	2254.7	3.5796	0.00250	1.0901	0.6051	0.49994	0.20499	1.8271	1.0000
7	1.0	0.55	2144.8	4.6276	0.00307	0.8271	1.0000	0.49700	0.50000	3.9275	4.9915
8.5	4.5	0.25	3148.9	3.7211	0.00244	1.1262	0.7919	0.49999	0.01004	1.8905	1.0239
9	4.5	0.25	146.61	12.518	0.01343	0.1157	3.4934	0.49998	0.30471	1.8261	2.0434
10	4.5	0.5	4642.7	4.6938	0.00308	0.8228	2.1872	0.26610	0.16031	2.8891	1.6271

Tabloda, optimizasyon için girilmiş tasarım limitlerinden hmax, Rmax değerleri ve bu değerler için darbeli yakın fay depremleri altında elde edilmiş optimum h ve R değerleri gösterilmektedir. Ayrıca optimum izolatörlü yapı periyodu (Tb) ve sönüm oranı (Db) ile ayarlı sıvı sönümleyici periyodu (Td) ve sönüm oranı (Cr), TLD sıvı periyodu (Ts), TLD sıvısı sönüm oranı (Crs) ve TLD tank içerisindeki toplam sıvı kütlesi (mst) tabloda sunulmaktadır. Tabloda, izolatörün hareket kısıtı D ile gösterilmiştir.

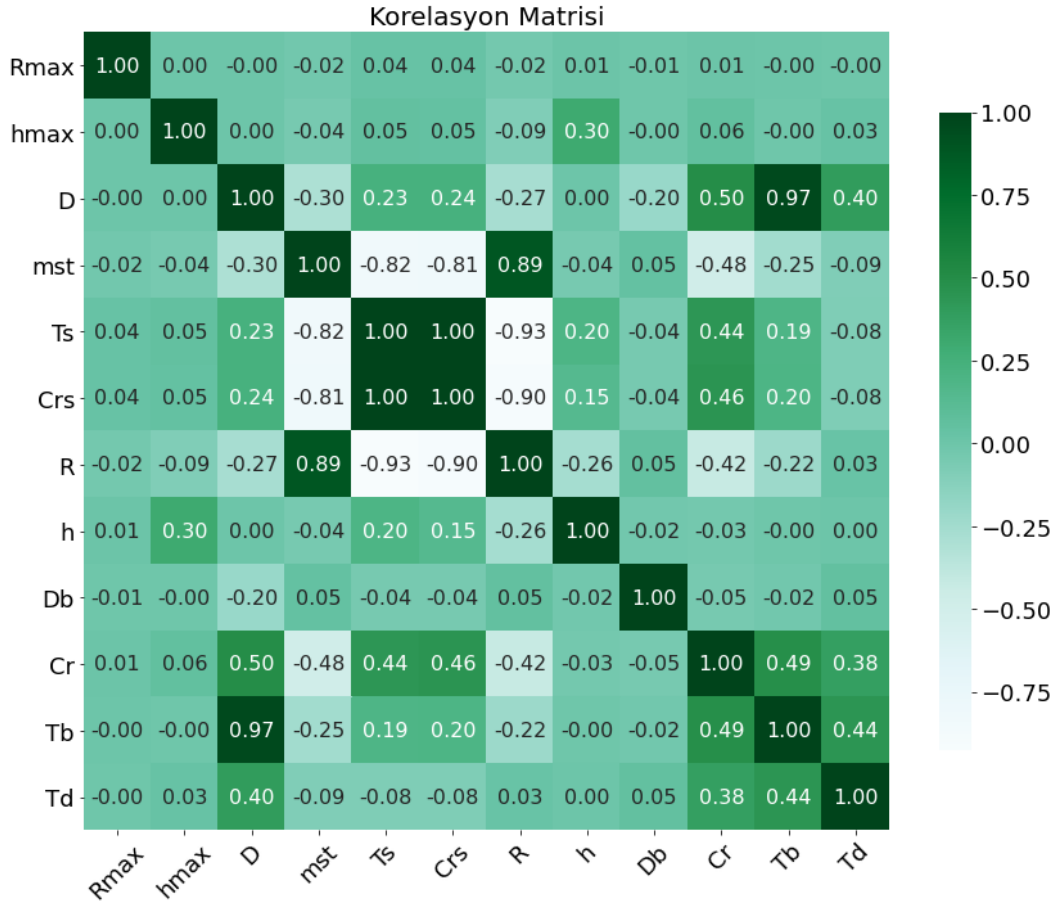
Oluşturulan veri setinin istatistiksel özellikleri Tablo 4.18’de sunulmaktadır. Verideki değişkenlerin birbiriyle ilişkisini açıklayan korelasyon matrisi Şekil 4.13’te gösterilmektedir.

Tablo 4.18: Veri seti istatistiksel özellikleri.

	Minimum değer	Maksimum değer	Ortalama	Standart Sapma	%25	%50	%75
Maksimum TLD tank yarıçapı limiti (m)	1.000	10.000	5.500	2.740	3.000	5.500	8.000
Maksimum sıvı yüksekliği limiti (m)	1.000	5.000	3.000	1.291	2.000	3.000	4.000

Tablo 4.18 (devam):

İzolator hareket limiti (m)	0.200	0.600	0.400	0.129	0.300	0.400	0.500
TLD tank sıvısı toplam kütlesi (kg)	3.135	4750	1533	1674	47.03	908.7	2708
TLD sıvı periyodu (s)	2.735	13.460	8.117	4.389	3.823	6.225	13.130
TLD sıvı sönüm oranı	0.002	0.015	0.008	0.006	0.003	0.005	0.015
Optimum TLD tank yarıçapı (m)	0.100	1.505	0.572	0.482	0.100	0.456	1.000
Optimum sıvı yüksekliği (m)	0.100	5.000	1.306	1.235	0.503	0.832	1.828
İzolatorlu sistem sönüm oranı	0.211	0.500	0.489	0.050	0.500	0.500	0.500
TLD sönüm oranı	0.010	0.500	0.289	0.221	0.011	0.398	0.500
İzolatorlu sistem periyodu	1.000	4.288	2.870	0.879	2.357	2.968	3.561
TLD periyodu	1.000	5.000	1.794	1.419	1.000	1.00	1.956

**Şekil 4.13:** Korelasyon matrisi grafiği.

4.2.1. Makine Öğrenmesi Modeli

Çalışmada, izolatör ve ayarlı sıvı sönümleyici sistem barındıran bir yapının yakın fay darbe etkili depremler altındaki davranışı için optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen optimum parametreler bir veri seti haline getirilerek, en uygun kontrol sistemi parametrelerini tahmin eden makine öğrenmesi modelleri geliştirilmesi için kullanılmıştır. Tahmin modellerinin, yapıda sönümleyici yerleştirilecek alanın boyut limitleri, sıvı özellikleri ve izolatör hareket kabiliyeti gibi sınırlayıcı özelliklerini dikkate alarak tahmin yapması planlanmıştır. Optimum özelliklerden oluşan veride, sönümleyici yerleştirilmesi planlanan yatayda ve düşeyde maksimum alan boyutları (R_{max} , h_{max}), izolatör hareket kabiliyeti (D), TLD'deki toplam sıvı kütlesi (m_{st}), sıvı periyodu (T_s), sıvı sönüm oranı (C_{rs}) özellikleri girdi olarak alınmıştır. Bu girdiler temel bileşen analizi (principle component analysis, PCA) yöntemine dayalı olan temel bileşen regresyonu (principle component regression, PCR) ile yeni bileşenlerin üretiminde kullanılmıştır. Girdiler arasındaki ilişkiye göre türetilen yeni bileşenler ile regresyon modeli kurulmakta ve tahmin üretilmektedir. Bu tez çalışmasının konusu olan hibrit kontrol sistemi özelliklerinin tahmini için TLD tank yarıçapı (R), TLD sıvı yüksekliği (h), TLD periyodu (T_d) ve sönüm oranı (C_r) ile izolatör periyodu (T_b) ve sönüm oranı (D_b) çıktı olarak alınmış ve her biri için PCR yöntemiyle temel bileşenler üretilerek bu bileşenlere göre ayrı regresyon modelleriyle tahminler yapılmıştır. Girdi olarak alınan özniteliklerden toplamda 6 yeni bileşen türetilmiştir. Model doğrulama yöntemi olarak 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Tahmin edilmesi istenen çıktıların her biri ayrı olarak farklı algoritmalarla denenmiş, en yüksek doğruluğa sahip tahmin modeli aranmıştır. R ve h çıktıları için geliştirilen regresyon modellerinin performans metrikleri sırasıyla Tablo 4.19 ve Tablo 4.20'de ve T_d ve T_b çıktıları için geliştirilen modellerin model metrikleri sırasıyla Tablo 4.21 ve Tablo 4.22'de sunulmaktadır. C_r ve D_b çıktıları için model değerlendirme sonuçları sırasıyla Tablo 4.23 ve Tablo 4.24'te gösterilmektedir.

Tablo 4.19: R tahmin modelleri performans metrikleri.

Algoritma	MAE		MAPE (%)		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
Lasso	0.1682	0.1684	52.35	52.43	0.0469	0.0470	0.2165	0.2165	0.7978	0.7933
ElasticNet	0.1681	0.1683	52.25	52.32	0.0469	0.0470	0.2165	0.2165	0.7978	0.7933
K-en yakın komşu	0.0925	0.1147	14.33	18.08	0.0231	0.0344	0.1519	0.1850	0.9005	0.8487
Ridge	0.1052	0.1056	29.26	29.32	0.0199	0.0201	0.1409	0.1414	0.9143	0.9120
Doğrusal Regresyon	0.0618	0.0622	27.80	27.94	0.0074	0.0075	0.0860	0.0858	0.9681	0.9669
Adaboost	0.0587	0.0609	32.85	33.23	0.0044	0.0048	0.0662	0.0688	0.9810	0.9789

Tablo 4.19 (devam):

Karar Ağacı	0	0.0125	0	2.34	0	0.0010	0	0.0318	1	0.9954
Catboost	0.0063	0.0130	1.84	3.32	0.0001	0.0005	0.0092	0.0229	0.9996	0.9977
Bagging	0.0041	0.0095	0.76	1.80	0.0001	0.0004	0.0102	0.0207	0.9996	0.9981
Xgboost	0.0008	0.0094	0.21	1.84	0	0.0004	0.0012	0.0201	1	0.9981
Rastgele Orman	0.0033	0.0087	0.61	1.66	0.0001	0.0004	0.0073	0.0192	0.9998	0.9983
LightGBM	0.0036	0.0088	0.83	1.75	0.0001	0.0003	0.0073	0.0177	0.9998	0.9985

Tablo 4.20: h tahmin modelleri performans metrikleri.

Algoritma	MAE		MAPE (%)		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
Lasso	0.9606	0.9623	277.95	278.39	1.5219	1.5255	1.2336	1.2305	0.0017	-0.005
ElasticNet	0.9229	0.9249	282.84	283.40	1.4428	1.4474	1.2011	1.1982	0.0535	0.0479
Ridge	0.8857	0.8899	296.25	297.37	1.2664	1.2757	1.1253	1.1253	0.1692	0.1589
Doğrusal Regresyon	0.7173	0.7213	218.60	219.86	0.8471	0.8556	0.9204	0.9232	0.4442	0.4298
K-en yakın komşu	0.3854	0.4807	40.52	51.42	0.4761	0.7276	0.6898	0.8425	0.6877	0.5268
Adaboost	0.4141	0.4361	82.08	83.82	0.2268	0.2590	0.4758	0.5084	0.8512	0.8228
Karar Ağacı	0	0.1095	0	8.59	0	0.0803	0	0.2752	1	0.9449
Bagging	0.0382	0.0941	3.03	7.68	0.0093	0.0478	0.0963	0.2154	0.9939	0.9674
Rastgele Orman	0.0333	0.0895	2.63	7.13	0.0062	0.0445	0.0786	0.2067	0.9959	0.9696
Xgboost	0.0060	0.0870	0.94	7.86	0.0001	0.0294	0.0090	0.1700	0.9999	0.9800
LightGBM	0.0314	0.0804	3.78	8.01	0.0034	0.0269	0.0586	0.1613	0.9977	0.9815
Catboost	0.0410	0.0828	6.05	10.42	0.0035	0.0237	0.0594	0.1509	0.9977	0.9843

Tablo 4.21: Db tahmin modelleri performans metrikleri.

Algoritma	MAE		MAPE (%)		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
Karar Ağacı	0	0.0160	0	4.6404	0	0.0034	0	0.0581	1	-0.478
K-en yakın komşu	0.0175	0.0213	4.9730	6.1071	0.0019	0.0029	0.0439	0.0531	0.2156	-0.184
Adaboost	0.0246	0.0268	6.1243	6.7615	0.0022	0.0027	0.0469	0.0516	0.1069	-0.139
Xgboost	0.0013	0.0203	0.2926	5.5330	0	0.0027	0.0022	0.0512	0.9980	-0.137
Bagging	0.0063	0.0176	1.8108	5.0017	0.0004	0.0024	0.0199	0.0491	0.8387	-0.039
Lasso	0.0216	0.0216	6.1880	6.1961	0.0025	0.0025	0.0496	0.0491	0.0023	-0.005
ElasticNet	0.0216	0.0216	6.1874	6.1954	0.0025	0.0025	0.0495	0.0491	0.0025	-0.005
Rastgele Orman	0.0064	0.0177	1.8078	5.0114	0.0003	0.0023	0.0175	0.0477	0.8751	0.0212
Ridge	0.0217	0.0218	6.1374	6.1617	0.0024	0.0024	0.0486	0.0483	0.0415	0.0268
Doğrusal Regresyon	0.0218	0.0220	6.1605	6.2032	0.0024	0.0024	0.0485	0.0483	0.0446	0.0269
LightGBM	0.0097	0.021	2.4931	5.5868	0.0004	0.0022	0.0199	0.0471	0.8383	0.0379
Catboost	0.0093	0.020	2.4477	5.4432	0.0004	0.0022	0.0205	0.0469	0.8283	0.0627

Tablo 4.22: Cr tahmin modelleri performans metrikleri.

Algoritma	MAE		MAPE (%)		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
ElasticNet	0.1726	0.1728	578.95	579.53	0.0377	0.0378	0.1941	0.1941	0.2274	0.2214
Lasso	0.1727	0.1729	579.58	580.16	0.0377	0.0378	0.1941	0.1941	0.2274	0.2214
K-en yakın komşu	0.1174	0.1460	387.07	480.19	0.0251	0.0374	0.1583	0.1933	0.4858	0.2274
Karar Ağacı	0	0.0916	0	334.99	0	0.0362	0	0.1895	1	0.2532
Ridge	0.1398	0.1405	564.04	566.92	0.0302	0.0305	0.1738	0.1742	0.3801	0.3717
Doğrusal Regresyon	0.1355	0.1363	541.56	545.15	0.0286	0.0289	0.1690	0.1694	0.4139	0.4056
Adaboost	0.1352	0.1389	507.89	515.98	0.0253	0.0270	0.1590	0.1638	0.4812	0.4453
Xgboost	0.0099	0.0900	34.91	346.40	0.0002	0.0212	0.0154	0.1448	0.9951	0.5636
Bagging	0.0314	0.0857	120.33	336.18	0.0035	0.0203	0.0588	0.1422	0.9290	0.5817
Catboost	0.0520	0.0909	205.34	359.68	0.0065	0.0195	0.0804	0.1393	0.8672	0.5989
LightGBM	0.0433	0.0883	166.72	344.62	0.0046	0.0191	0.0675	0.1379	0.9066	0.6058
Rastgele Orman	0.0308	0.0839	124.34	336.65	0.0026	0.0184	0.0508	0.1353	0.9471	0.6209

Tablo 4.23: Tb tahmin modelleri performans metrikleri.

Algoritma	MAE		MAPE (%)		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
Lasso	0.6743	0.6753	30.568	30.611	0.7249	0.7268	0.8514	0.8517	0.0613	0.0550
ElasticNet	0.6743	0.6752	30.566	30.610	0.7249	0.7268	0.8514	0.8517	0.0613	0.0550
K-en yakın komşu	0.5193	0.6387	23.246	28.689	0.4688	0.7076	0.6847	0.8405	0.3929	0.0789
Adaboost	0.1803	0.1872	6.5061	6.780	0.0496	0.0537	0.2227	0.2314	0.9358	0.9297
Ridge	0.1615	0.1620	7.1593	7.1869	0.0467	0.0470	0.2160	0.2163	0.9396	0.9387
Doğrusal Regresyon	0.1520	0.1526	6.4627	6.4907	0.0446	0.0450	0.2111	0.2114	0.9423	0.9414
Karar Ağacı	0	0.0696	0	2.268	0	0.0414	0	0.2010	1	0.9457
Xgboost	0.0065	0.0779	0.2322	2.566	0.0001	0.0280	0.0103	0.1666	0.9999	0.9632
Bagging	0.0273	0.0726	0.9123	2.400	0.0045	0.0267	0.0668	0.1624	0.9942	0.9651
Catboost	0.0484	0.0858	1.7460	2.983	0.0066	0.0264	0.0810	0.1621	0.9915	0.9654
Rastgele Orman	0.0256	0.0705	0.8477	2.3353	0.0034	0.0256	0.0583	0.1590	0.9956	0.9665
LightGBM	0.0357	0.0769	1.2165	2.576	0.0046	0.0255	0.0679	0.1586	0.9940	0.9666

Tablo 4.24: Td tahmin modelleri performans metrikleri.

Algoritma	MAE		MAPE (%)		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
Lasso	1.0797	1.0816	64.865	65.004	1.9968	2.0034	1.4130	1.4119	0.0075	-0.004
ElasticNet	1.0568	1.0595	63.296	63.462	1.9029	1.9141	1.3794	1.3805	0.0541	0.0389
K-en yakın komşu	0.7100	0.8804	41.892	51.896	1.1992	1.7823	1.0950	1.3318	0.4039	0.1007
Doğrusal Regresyon	0.9749	0.9791	61.059	61.332	1.5443	1.5576	1.2427	1.2466	0.2324	0.2111
Ridge	0.9741	0.9778	60.774	61.015	1.5450	1.5567	1.2430	1.2462	0.2320	0.2119
Karar Ağacı	0	0.4988	0	30.204	0	1.4937	0	1.2190	1	0.2388
Adaboost	0.8326	0.8719	57.798	60.357	1.1746	1.3144	1.0832	1.1430	0.4163	0.3345
Bagging	0.1936	0.5288	12.047	32.632	0.1582	0.9526	0.3975	0.9728	0.9214	0.5202
Xgboost	0.0531	0.5319	3.7782	33.770	0.0074	0.9312	0.0853	0.9543	0.9963	0.5341
LightGBM	0.2573	0.5449	17.022	34.364	0.1750	0.8743	0.4183	0.9282	0.9130	0.5633
Catboost	0.3002	0.5478	19.460	34.735	0.2323	0.8455	0.4819	0.9140	0.8845	0.5760
Rastgele Orman	0.1875	0.5076	11.603	31.148	0.1162	0.8377	0.3408	0.9088	0.9422	0.5818

5. TARTIŞMA

Bu bölümde, yakın fay etkisi altında yalnızca izolatörlü ve izolatör ve ayarlı sıvı sönümleyicinin (TLD) birlikte kullanıldığı kontrol sistemlerinin optimum tasarımı ile sismik izolasyonlu ve TLD'li hibrit sistemin makine öğrenmesi ile tasarım parametrelerinin tahmin edilmesi üzerine yapılan uygulamaların bulguları değerlendirilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan iki uygulama örneği alt başlıklarda tartışılmakta, tasarım optimizasyonu ve makine öğrenmesi modelinin performansları karşılaştırılmaktadır.

5.1. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ SİSTEMİN OPTİMUM TASARIM DEĞERLENDİRMESİ

Bu çalışmada, yakın fay hareketlerine maruz bir yapının sismik taban izolatörüyle kontrolü ve kontrol performansını iyileştirmede ayarlı sıvı sönümleyici ilavesinin etkileri araştırılmıştır. İzolatörler zeminden gelen titreşimleri, taban seviyesinde tutmaya yönelik hareket ederek, üst yapıya enerji aktarımını kırmayı hedefleyen cihazlardır. Ancak yakın fay hareketlerine maruz kaldıklarında, büyük yer değiştirmelerine sebep olup, izolatörün kırılması, hendek duvarlara çarpması ve benzeri durumlardan ötürü işlevsiz hale getirebilecek hasarlara sebep olabilmektedir. Bunu önlemeye yönelik literatürde birçok sönümleyici çeşidi ile kullanımına dair örnekler bulunmaktadır. Ancak ayarlı sıvı sönümleyici ile yakın fay hareketleri altındaki kontrol performansı araştırılmaya açık, yeteri kadar çalışmanın olmadığı bir alandır. Çalışmada, ayarlı sıvı sönümleyici cihaz ilavesinin izolatörlü sisteme etkileri incelenmiştir. Ayrıca izolatör ve sönümleyici parametreleri, yapının mutlak ivmesini düşürmeye yönelik metasezgisel bir algoritma olan uyarlanabilir armoni arama algoritması (AHS) ile optimize edilerek, sistem performansı optimum düzeydeki haliyle değerlendirilmiştir. 10 serbestlik dereceli bir yapı, tabanına izolatör yerleştirilerek ve sönümleyici ilave edilerek, sönümleyici ilaveli ve sönümleyici ilavesiz durumlar için yapısal kontrole etkileri karşılaştırılmıştır. İzolatörün 50 cm ve 60 cm hareket kısıtları ve %20, %30, %40 ve %50 sönüm limitlerindeki durumlar için 11 ve 13 serbestlik dereceli modeller oluşturulmuştur. İki durum için verilen tasarım limitlerinde darbeli yakın fay depremleri ve darbesiz yakın fay depremleri altındaki sistemin yapısal deplasman ve toplam ivmeyi azaltma yüzdeleri sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de gösterilmiştir. İzolatör seviyesinde aşırı deplasmanlar sonucu hasarın oluştuğu durumlara ait sonuçlar tablolardan çıkarılmıştır.

Tablo 5.1: Darbeli yakın fay depremleri için kritik deprem analizi sonuçlarına göre yer değiştirme ve toplam ivme azalma yüzdeleri.

Deplasman Limiti (cm)	Sönüm Limiti	Deplasman azaltma yüzdesi (%)		Toplam ivme azaltma yüzdesi (%)	
		İZOLATÖR + YAPI	İZOLATÖR + YAPI + TLD	İZOLATÖR + YAPI	İZOLATÖR + YAPI + TLD
50	%20	-	23.01	-	82.54
	%30	24.02	24.66	84.07	84.49
	%40	-	24.53	-	84.56
	%50	24.28	-	84.06	-
60	%20	19.11	-	84.85	-
	%30	-	23.82	-	85.94
	%40	-	-	-	-
	%50	-	31.47	-	86.65

Tablo 5.2: Darbesiz yakın fay depremleri için kritik deprem analizi sonuçlarına göre yer değiştirme ve toplam ivme azalma yüzdeleri.

Deplasman Limiti (cm)	Sönüm Limiti	Deplasman azaltma yüzdesi (%)		Toplam ivme azaltma yüzdesi (%)	
		İZOLATÖR + YAPI	İZOLATÖR + YAPI + TLD	İZOLATÖR + YAPI	İZOLATÖR + YAPI + TLD
50	%20	41.05	50.35	89.79	90.98
	%30	-	58.30	-	92.76
	%40	60.91	60.88	93.64	93.82
	%50	60.92	60.85	93.62	93.72
60	%20	52.54	55.15	93.80	94.38
	%30	60.36	59.74	94.69	95.18
	%40	60.36	60.45	94.68	95.06
	%50	60.43	59.87	94.55	95.04

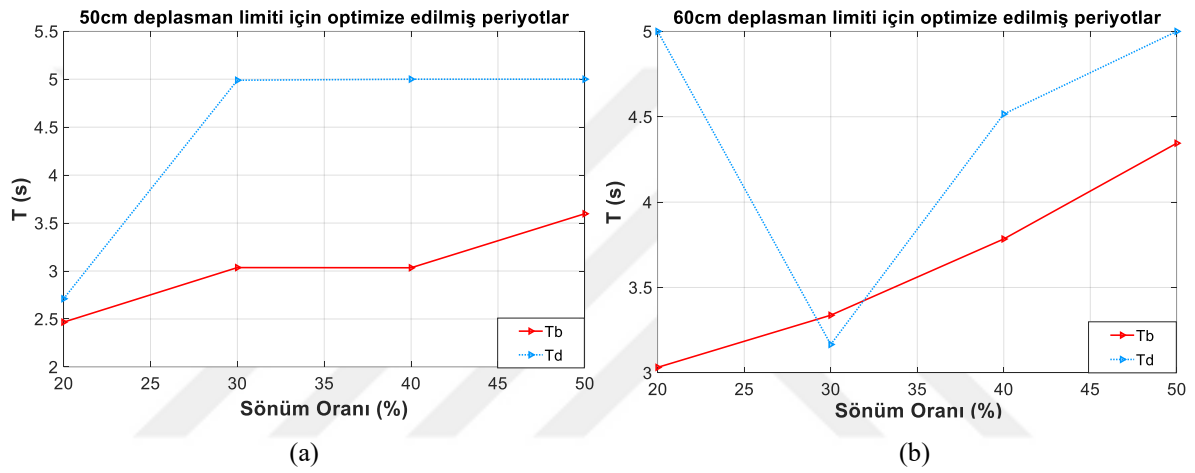
Tablo 5.1 incelendiğinde darbeli yakın fay kayıtlarında, yalnızca izolatörün kullanıldığı sistemde, 8 durumun 5'inde izolatör yetersiz kalmış, fazla yer değiştirme yaparak kırılmasına sebep olmuştur. İzolatörün hasar alması ile sonuçlanan izolatör sönüm kapasitelerinde, 50 cm hareket kabiliyetli sistem için her sönüm artışında izolatörün hasar almadığını ancak 60 cm kapasiteli sistemde, %20 sönümden itibaren izolatör dayanıklılığını yitirdiği anlaşılmaktadır. Aynı durum darbesiz yakın fay deprem analizi sonuçlarında da görülmüş, izolatör %30 sönüm kapasiteli kullanıldığında hasar almış, daha düşük sönümlü sistemde ve daha yüksek sönümlü sistemde ise hareket sınırları içinde çalışmıştır. Bundan yola çıkarak izolatörlerin yakın fay depremleri altında, farklı izolatör hareketlilik limitleri için sönüm kapasitesini arttırmanın, izolatörün hasar almasını kesin olarak engelleyemeyeceği söylenebilir. Yapıya sıvı sönümleyici ilavesi, darbeli yakın fayın depremleri altında izolatörlü sisteme nazaran daha az hasarla kırılma olmadan çalışmasını sağlamıştır. Sönümleyicili sistemin de yalnızca izolatörlü sistem gibi darbeli deprem kayıtlarında zorlandığı ve sönüm kapasitesi arttırmanın tek başına yeterli olmadığı görülmektedir. Sönümleyicili sistemin darbesiz deprem kayıtlarında, izolatör zorlanmasını ortadan kaldırarak çalışmaya devam ettiği anlaşılmaktadır.

Yalnızca izolatörlü ve sönümleyici ilaveli iki sistemin deprem analiz sonuçlarına bakıldığında, yakın kontrol performansı gösterdiği, izolatörün hasarı ile sonuçlanan durumlar ve elde edilen veriler neticesinde en üst kat deplasmanlarını azaltma açısından birbirlerine göre kesin bir farkla daha verimli şekilde bir ayırım yapmanın zor olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, sönümleyici ilavesinin maksimum izolatör hareketliliği ve sönüm limitinin olduğu durum hariç tüm durumlarda ivme azaltma açısından %0.1 ile %1.2 arasında olumlu bir artış sağladığı görülmektedir.

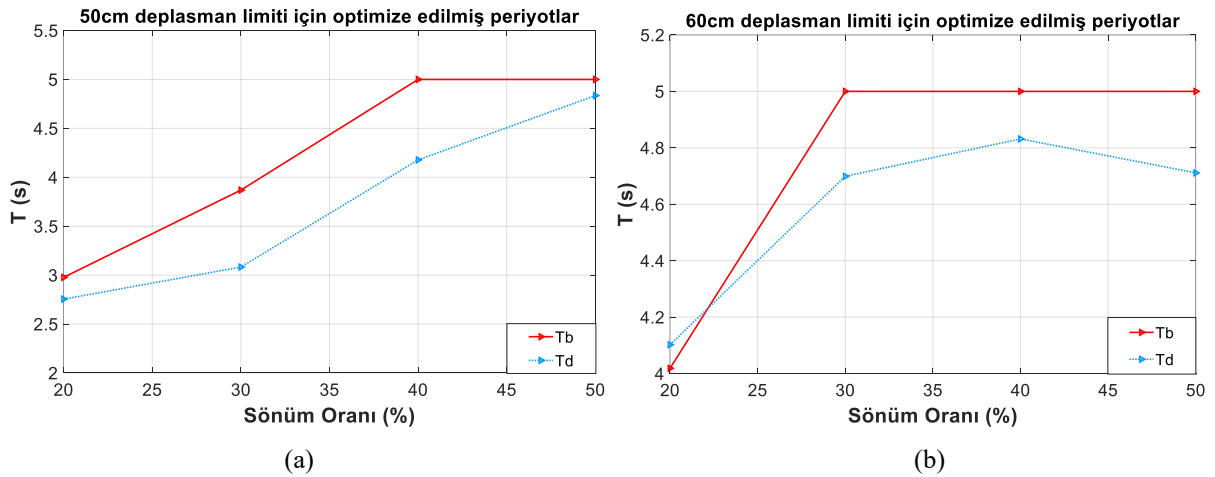
4 Katlı iki boyutlu bir kesme çerçevesinin çeşitli uzak fay ve yakın fay depremleri altında kontrol sistemi tasarımı için izolatör rijitliği ve sönüm katsayısı değerlerini optimize edilerek izolatör için tanımlanmış, yer değiştirme ve sönüm limitleri altında, çatı ivmesini en aza indirmeye yönelik optimizasyon uygulanmış, en kötü sismik yanıt yakın fay depremlerinde elde edilmiştir (Çerçevik vd., 2020). Tez çalışmasında, yakın fay depremlerinin tabandan izoleli 10 katlı yapı üzerindeki etkisi araştırılmış, TLD ilavesiyle hasarın azaltılma durumu değerlendirilmiştir. Yakın fayın bahsi geçen çalışmada olduğu gibi çok katlı yapıda olumsuz bir etki yaratabileceği beklenen bir durumdur. Çalışmada kullanılan yakın fay depremlerinde, yalnızca izolatörün kullanıldığı sistem yanıtlarına göre darbe etkili depremlerde izolatör 8 durumun 5'inde, darbesiz yakın fay depremleri için ise 1 durumda tanımlanan hareket limitini aşarak hasar almıştır. Optimum tasarım özelliklerine rağmen izolatörün hasar alması, yapı kat sayısının fazlalığı ve yakın fay depremleriyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Deprem etkisi, izolatörü daha fazla hareket etmeye zorlamış ancak hareket sınırlarını aşmasına sebep olarak hasar almasına ve işlevini yitirmesine sebep olmuştur. Yapılan bir başka çalışmada, çeşitli yakın fay depremlerinin de olduğu bir dizi deprem altında izolatörlü yapının temel periyodunu arttırmak, katlar arası kayma oranını, yatak yer değiştirmesini ve tepe çatı ivmesini en aza indirmeye yönelik 2 adet 8 katlı çerçeve yapıya 3 tip izolatörü farklı düzenlerde yerleştirilmiş, tepe çatı ivmelenmesinde %70'i aşan bir azalma tespit edilmiştir (Ourdani ve Tbatou, 2024). Tez çalışmasında yapılan izolatörlü ya da izolatör ve TLD ilave edilmiş modellerde, minimum %82, maksimum %95'in üzerinde en üst kat maksimum toplam ivme azaltılması sağlanmıştır. Ancak yalnızca izolatör kullanıldığı durumda darbeli yakın fay depremleri için 8 durumun 5'i ve darbesiz yakın fay depremleri için 1 durumda izolatör hareket sınırını aşarak hasar almış, TLD ilave edildiğinde darbe etkili depremlerdeki hasar alan durum sayısı 3'e düşmüş ve darbesiz depremlerde hasar almadan başarıyla çalışmıştır. Tüm sonuçlar, yakın fay

depremlerindeki darbe etkisinin, hasarı artırıcı özelliğine işaret etmekte ve TLD ilavesinin hasar azaltmada yardımcı görev üstlendiğini göstermektedir.

İzolotörlü yapılarda sistemin periyodunun uzaması ve enerjinin üst katmana geçmeden izolotör seviyesinde olabildiğince sönmülenmesi istenmektedir. Yapılan analizlerde, sönmüleyici eklenmiş izolotörlü bir sistemin, yakın fay kayıtları altında optimum periyotları grafik halinde verilmiştir. Şekil 5.1’de yakın fay darbeleri ve Şekil 5.2’de yakın fay darbesiz deprem kayıtları altında optimize edilen izolotör ve sönmüleyici periyotlarının, izolotör sönmü kapasitesine göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Darbeli yakın fay kayıtları altında optimize edilmiş periyotlar: (a) 50 cm yer değiştirme sınırı için, (b) 60 cm yer değiştirme sınırı için.



Şekil 5.2: Darbesiz yakın fay kayıtları altında optimize edilmiş periyotlar: (a) 50 cm yer değiştirme sınırı için, (b) 60 cm yer değiştirme sınırı için.

Şekil 5.1’deki darbeleri yakın fay depremleri altındaki optimum periyot değişimi incelendiğinde, hem 50 cm hem de 60 cm hareket kabiliyetli sistem için optimum izolotör periyodu genel olarak artma eğilimi göstermiştir. Hareket kabiliyeti daha az olan izolotörlü

sistem, daha yüksek sönümlü limitlerde düzenli bir periyot artışı ihtiyacı doğurmamış ancak verilen durumlardan daha yüksek hareketlilik limiti olan izolatörün sönüm kapasitesi arttıkça periyot artışına ihtiyacı da düzenli olarak artmıştır. Darbesiz yakın fay kayıtlarında ise periyot artırma ihtiyacı izolatörler için hareketlilik arttıkça azalmıştır. Ayrıca maksimum izolatör periyotları, yakın fay darbesiz deprem kayıtlarında görülmüştür. Diğer bir deyişle, izolatörlü ve sönümleyicili bir sistemde, darbeli yakın fay depremleri, darbesiz yakın fay depremlerine kıyasla daha düşük izolatör periyot ihtiyacı gerektirdiği anlaşılmaktadır. Sönümleyici periyodunda, düzenli bir artış ya da azalış görülmemiştir.

Yapılan bir çalışmada, farklı tip zeminlerdeki 6 katlı bir yapının çeşitli deprem kayıtları altında sismik izolasyonu için ivme tepkisi ve izolatör yer değiştirme koşulları altında, yapı ivmesini minimize etmeye yönelik optimum izolatör periyodu ve sönüm oranını araştırılmıştır (Kandemir, 2025). Yapılan çalışmada, tez çalışmasıyla benzer olarak 2-4s periyot ve %20-50 sönüm oranı aralıkları için optimizasyon yapılmış, tez çalışmasından farklı olarak izolatör hareket limiti tek bir değer (maksimum 10 cm hareket) ve birkaç zemin türü için incelenmiştir. Araştırmada, aynı deprem için farklı zemin türlerinde optimum izolatör periyodu ve sönüm oranının, depreme bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Tez çalışmasında sabit bir zemin türü ve 2 farklı izolatör hareket kısıtı için optimizasyon yapılmıştır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü üzere aynı depremin farklı sönüm oranı kapasiteleri için oluşturulan grafiklerde, izolatör hareket kısıtı artışına bağlı olarak periyodun değişim hızının etkilendiği görülmektedir. Buna göre izolatörlü sistemlerde izolatör hareket kabiliyetinin periyotta önemli bir etken olduğu söylenebilir.

5.2. SİSMİK İZOLASYONLU VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ SİSTEMİN TAHMİN MODELİ DEĞERLENDİRMESİ

Tez çalışmasında, darbe etkili yakın fay depremleri altındaki bir yapının sismik izolatör ve TLD’den oluşan hibrit sistem kullanılarak optimum tasarlanması ve elde edilen optimum tasarım özellikleriyle kontrol sistemi parametrelerini tahmin eden bir yapay zekâ modeli geliştirilmesi planlanmıştır. Bu amaçla, verideki öznitelikler arasındaki doğrusallık varyasyon enflasyon faktörü (VIF) ile başlangıçta hesaplanmış, temel bileşen analizi (PCA) sonrası, bu doğrusallık ortadan kaldırılarak, en iyi tahminleri üreten yeni girdi bileşenleri oluşturulmuştur. Verinin başlangıçtaki bağımsız 6 değişkeni olan maksimum TLD tank yarıçapı (R_{max}), maksimum sıvı yüksekliği (h_{max}), izolatör hareket limiti (D), sıvı periyodu (T_s), toplam sıvı

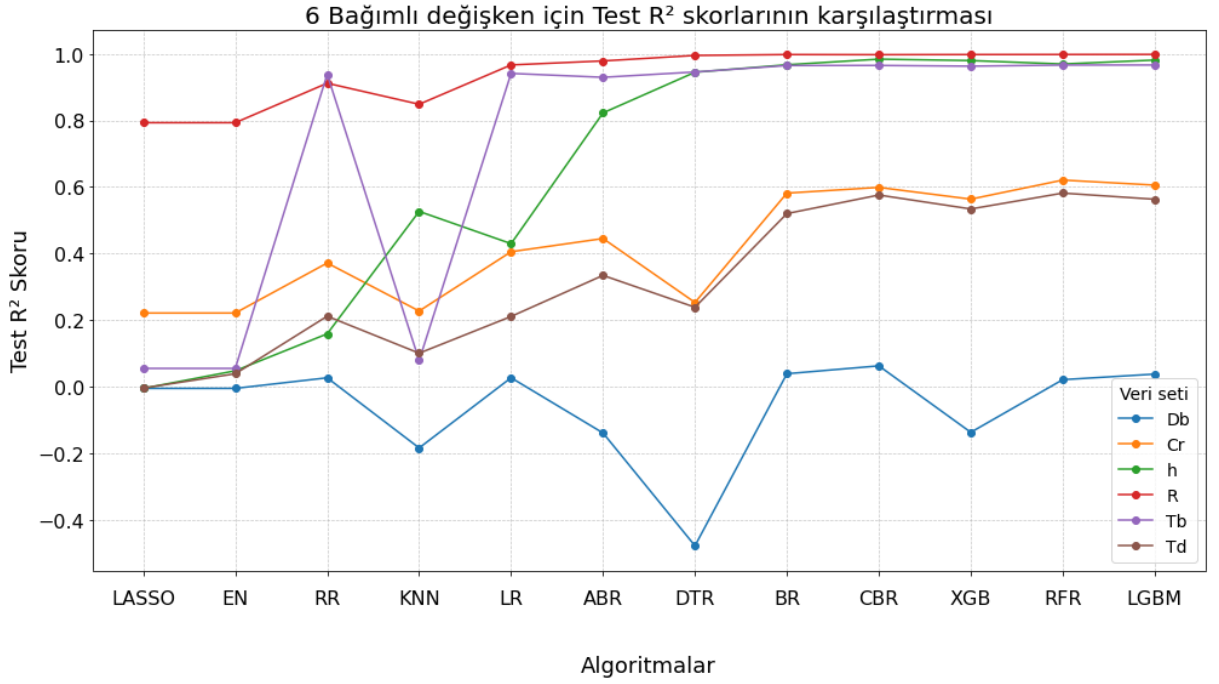
kütlesi (mst) ve sıvı sönüm katsayısı (Crs) parametreleri için VIF değerleri ve PCA işlemi sonrası VIF değerleri Tablo 5.3'te verilmektedir.

Tablo 5.3: VIF değerleri.

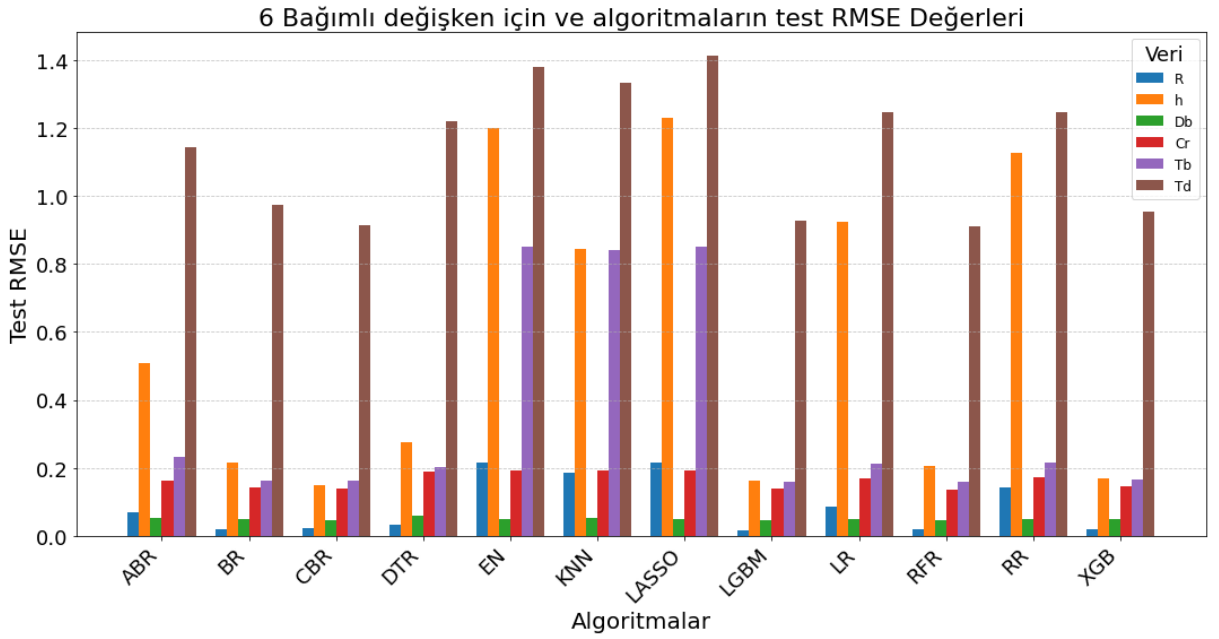
Parametre	VIF	PCA özellik	VIF
Rmax	4.773	PCA1	1
hmax	6.026	PCA2	1
D	8.993	PCA3	1
Ts	276.100	PCA4	1
mst	3.625	PCA5	1
Crs	214.100	PCA6	1

Temel bileşen analizi öncesi (PCA) veri özellikleri arasındaki doğrusallık 1'in üzerindedir. Bu durum verideki özelliklerin tamamen bağımsız olmadığını ve birbirleriyle ilişkili olduğunu gösterir. Özellikle Ts ve Crs özellikleri, sıvıya ait olan ve sönümleyici performansı için önemli olan parametrelerdir. Bu özelliklerin VIF değerleri 1'den oldukça uzak bir değerdedir. Buna göre, bu iki özelliğin modeldeki diğer özelliklerle bağımlı olduğu ve fazladan olduğu anlamına gelir. Ancak bahsi geçen özellikler, sönümleyici tasarım tahmini için önemlidir. Bu doğrusallıktan kurtulmak için PCA tercih edilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi 6 parametreden oluşturulan yeni PCA bileşenlerinin VIF değeri 1 olmuştur. Elde edilen bileşenlerin, çoklu doğrusallıktan kurtulduğu ve tamamen bağımsız yeni bileşenler olduğu anlaşılmaktadır.

Temel bileşen analizi sonrası yeni PCA özellikleriyle oluşturulan modellerde, 12 farklı algoritma denenmiştir. Tez çalışmasında denenmiş regresyon algoritmalarına ait tüm çıktılar için test R^2 skorlarının grafiksel gösterimi Şekil 5.3'te sunulmaktadır. Regresyon modellerinin her çıktı için kök ortalama karesel hata (RMSE) değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Kontrol sistemi tahmin modellerinin test R² değerleri grafiği.



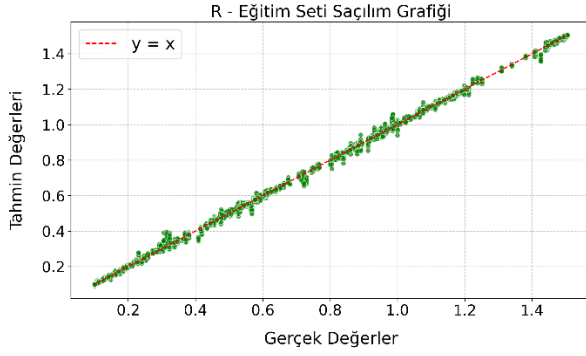
Şekil 5.4: Kontrol sistemi tahmin modellerinin test RMSE değerleri grafiği.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te algoritmalar için kısaltmalar kullanılmıştır. Adaboost regresörü ABR, bagging regresörü BR, catboost regresörü CBR, karar ağacı regresörü DTR, elasticnet algoritması EN, k-en yakın komşu algoritması KNN, lasso algoritması LASSO, lightgbm algoritması LGBM, doğrusal regresyon LR, rastgele orman regresörü RFR, ridge regresörü RR ve xgboost algoritması XGB ile gösterilmiştir. Şekil 5.3'teki R² skorları, R, h ve Tb

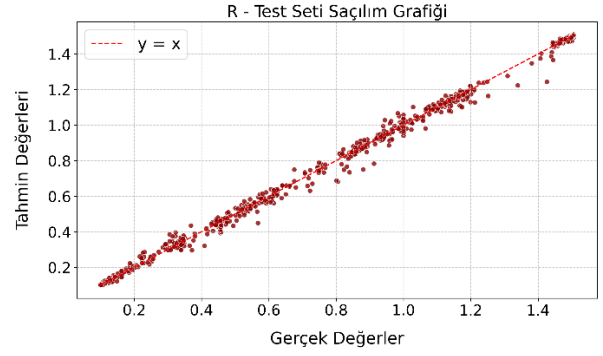
modellerinin çok iyi düzeyde verideki varyansı açıklayan bir yüksek tahmin gücü olduğunu göstermektedir. R^2 skorlarına göre Cr ve Tb orta düzeyde ve Db düşük bir seviyede varyans açıklama gücüne sahip modelleri olduğuna işaret etmektedir. Şekil 5.4'teki RMSE değerleri, en düşük hataların R, Db ve Cr değişkenleri için oluşturulan modellerde olduğunu göstermektedir.

Literatürde, TLD ve türevleriyle yapılmış yapay zekâ çalışmalarının sayısı yok denecek kadar azdır. Yapılan çalışmalarda farklı tahmin problemleri üzerinde durulmuştur. Tez çalışmasında oluşturulan modellerde, sönümleyici ve izolatör özellikleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen özellikler, yapının tepkisiyle doğrudan ilişkisi olan parametreleri ifade etmektedir. Bir çalışmada, yükseltilmiş bir su tankı TLD olarak değerlendirilmiş, sismik titreşimler altındaki yapının, dinamik tepkisi yapay sinir ağı (ANN) ve çoklu uyarlanabilir regresyon eğrileriyle (MARS) tahmin edilmiştir. Çalışmada oluşturulan modelin tahmin performansı, ANN ile eğitimde yaklaşık $0.68 R^2$ ve testte $0.60 R^2$ değerleridir. Orta düzeyde bir tahmin olarak nitelendirilen yapay zekâ çalışmasında, eğitim için 1.06 ve test için 1.15 RMSE değerleri elde edilmiştir (Tahera vd., 2025). Tez çalışmasında TLD ve izolatör özelliklerini tahmin eden modeller geliştirilmiştir. Tezde oluşturulan tahmin modelleri, yapısal tepki tahmini için de önem arz etmektedir. Literatürdeki çalışmanın amacıyla benzer bir hedef olarak tez çalışmasında, tahmin edilen 6 bağımlı değişken arasında, Cr ve Td sırasıyla yaklaşık %62 ve %58 değerlerinde, R, h ve Tb değerleri, minimum %96'nın üzerinde R^2 skoru vermiştir. Ayrıca bu R^2 skorlarına sahip değişkenlerin, 0.02 ile 0.91 arasında değişen RMSE değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Tez çalışmasında tahmin edilmesi hedeflenen R ve h değerlerinde en iyi performanslar sırasıyla Lightgbm ve catboost modellerinde elde edilmiştir. R ve h tahmin modellerinde, eğitim ve test seti için gerçek ve tahmin değerlerinin saçılım grafikleri sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Db için en iyi sonuç veren catboost modeliyle elde edilen gerçek ve tahmin değerleri için saçılım grafikleri Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Cr ve Td çıktılarında rastgele orman algoritması ve Tb çıktısında lightgbm algoritması en iyi sonucu vermiştir. Cr, Tb ve Td için en iyi tahmin performansının elde edildiği algoritmaların tahmin modellerine göre gerçek ve tahmin değerlerine ait saçılım grafikleri sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmektedir.

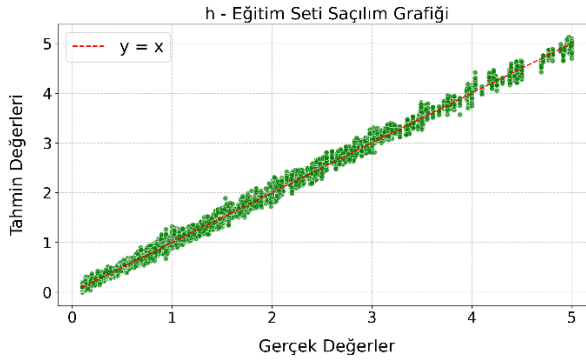


a)

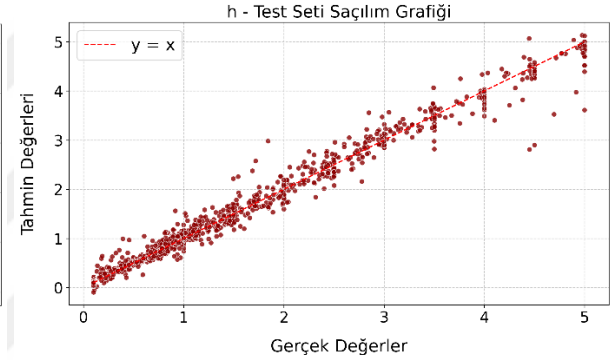


b)

Şekil 5.5: R için Lightgbm modelinden elde edilen gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.

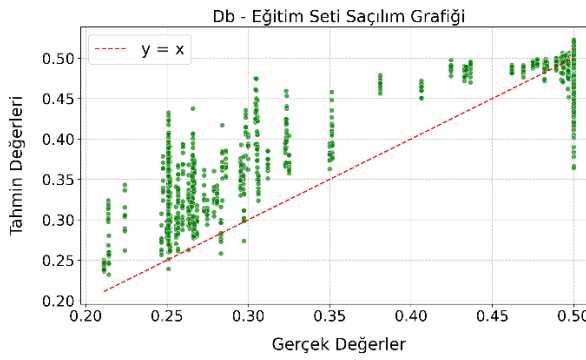


a)

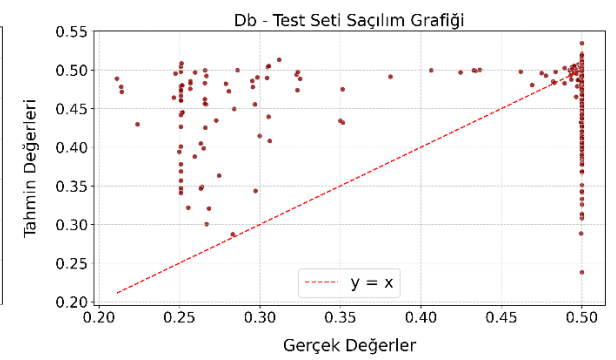


b)

Şekil 5.6: h için Catboost modelinden elde edilen gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.

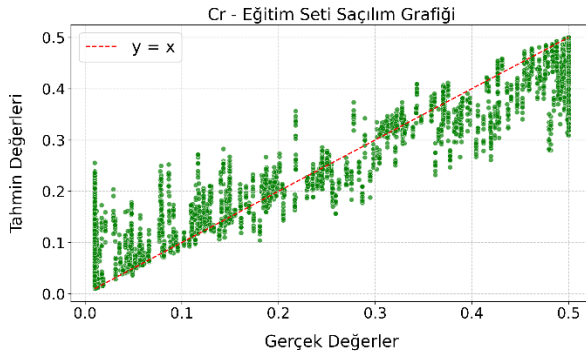


a)

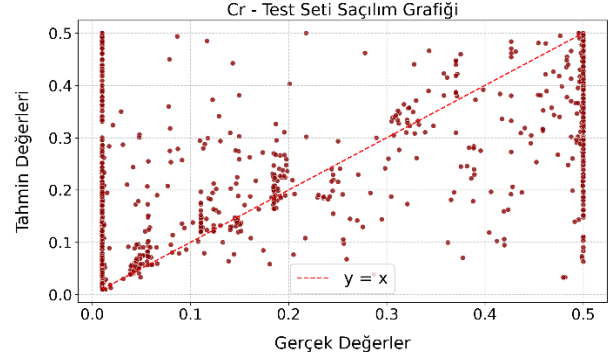


b)

Şekil 5.7: Db için Catboost modelinden elde edilen gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.

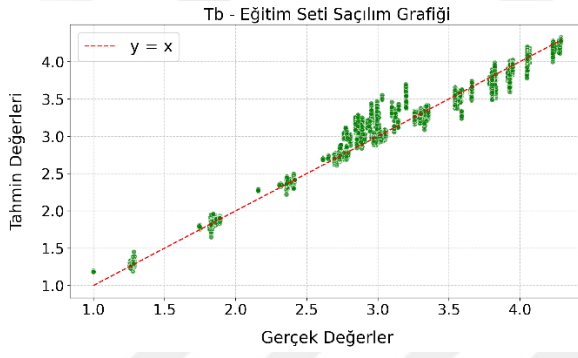


a)

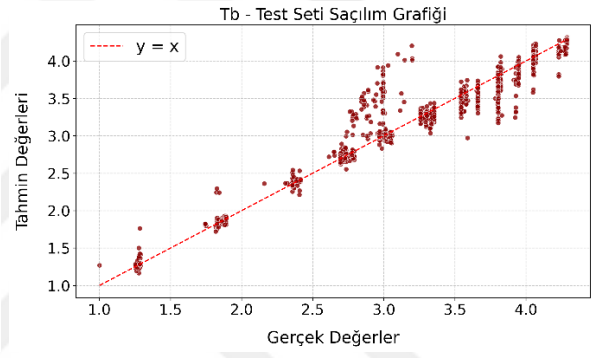


b)

Şekil 5.8: Cr için Rastgele Orman algoritması modelinden elde edilen gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.

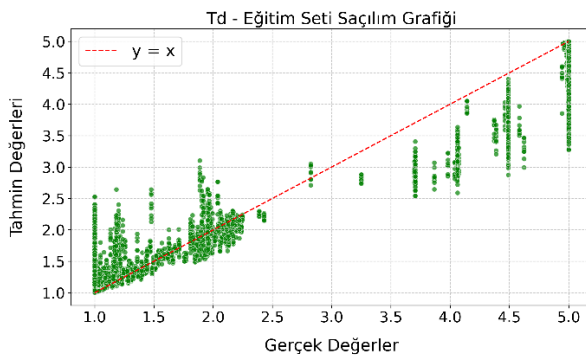


a)

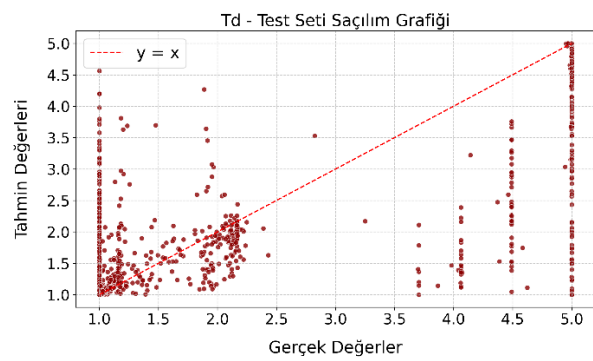


b)

Şekil 5.9: Tb için Lightgbm modelinden elde edilen gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.



a)



b)

Şekil 5.10: Td için Rastgele Orman algoritması modelinden elde edilen gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiği, a) eğitim seti, b) test seti.

Tüm tahmin modelleri ayrı değerlendirilmelidir. TLD tank yarıçapı olan R bağımlı değişkeni için denenen makine öğrenmesi algoritmalarında en düşük RMSE değeri ve R^2 skoru Lightgbm modelinde elde edilmiştir. Bu model ile Test sonuçlarına göre yaklaşık 0.009

ortalama mutlak hata (MAE), 1,75 ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), 0.0003 ortalama karesel hata (MSE), 0.0177 RMSE ve 0.99'u aşan düzeyde R^2 skoru elde edilmiştir. R değerleri Tablo 4.18'e göre 1 m ile 10 m arasında değer almaktadır ve R değerleri için 0.009 metrelik bir hata, küçük bir hatadır. Bu hata MAPE'ye göre %1-2 arasında bir hatayı göstermektedir. Modelin R^2 skoru, verideki varyansı çok iyi derecede açıkladığını göstermektedir. 0.0177'lik RMSE değeri diğer metrikler ve aldığı değer aralıklarına göre çok düşük bir hatayla isabetli tahminler yapan, başarılı bir model olduğunu göstermektedir. Şekil 5.5'te gösterilen tahmin modelinden elde edilmiş tahmin ve gerçek değerlerin grafiğine göre tahminler gerçek değerlerle çok yakın sonuç vermiştir. Bu durum, modelin tahmin başarısının iyi olduğunun bir göstergesidir.

TLD tankı içerisinde yer alan sıvı yüksekliği h , 1-5 m aralığında değer almaktadır. En iyi performansı Catboost modeli göstermiştir. h için geliştirilen tahmin modeli metrikleri şöyledir: 0.0828 MAE, 10.42 MAPE, 0.0237 MSE, 0.1509 RMSE ve 0.9843 R^2 test skorlarıdır. R^2 değeri, modelin verideki varyansı çok iyi açıkladığını göstermektedir. 0.0828'lik MAE değeri, 5m'yi, 5.08m gibi MAPE'ye göre yaklaşık %10'luk oranda düşük bir farkla tahmin edebileceğini ifade etmektedir. RMSE değerinin 0.1509 olması 1-5m olan h değerleri için düşük bir tahmin sapmasını gösterir. Modelin h değerlerini tahmin etmede güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.6'da catboost modelinden elde edilen tahmin değerleri ve gerçek değerlerin saçılım grafiği verilmiştir. Bu değerler, doğrusal bir çizgi boyunca görülmektedir. Diğer bir tabirle, modelle üretilen değerler gerçek değerlere oldukça yakın tahmin edilmiştir.

İzolatörlü sistemin sönüm oranı Db için denenmiş algoritmalar arasında en iyi performans Catboost algoritmasında görülmüştür. Bu modele ait metrikler şöyledir: 0.02 MAE, 5.44 MAPE, 0.0022 MSE, 0.0469 RMSE ve 0.0627 R^2 test skorlarıdır. Db değişkeni tahmin etmede R^2 skoruyla düşük bir performans göstermiştir. Performansın değerlendirilmesinde R^2 tek başına yeterli bir skor değildir. Bu değer, modelin verideki yalnızca yaklaşık %6'luk bir varyansı açıkladığını göstermektedir. Modelin öğrenmesinin yeterli olmadığı, bu yüzden açıklama gücünün yetersizliği anlaşılmaktadır. Modelin MAE ve RMSE değerleri düşük gözükmektedir. Bu değerler ortalama tahmin hatalarını ifade etmektedir. Db değişkeni, Tablo 4.18'deki istatistik özelliklerine göre minimum 0.21 ve maksimum 0.50 aralığındadır. Bu aralık R^2 skoruyla birlikte değerlendirildiğinde, düşük bir hata gibi görünen RMSE değeri için modelin zayıf bir tahmin performansı gösterdiğine işaret etmektedir. Şekil 5.7'deki gerçek ve tahmin değerleri saçılım grafiğine göre test verisinin Db 'nin 0.5 gibi yüksek değerlerinde

gerçeğe daha yakın tahminler ürettiği ancak genel anlamda, tahmin değerleriyle gerçeğin çok örtüşmediği anlaşılmaktadır.

TLD sönüm oranı Cr için denenmiş algoritmalar arasında en iyi performansı rastgele orman algoritması vermiştir. Bu modelde, 0.62'lik bir R^2 skoruyla verideki varyansı açıklama gücü orta düzeydedir. MAE değeri 0.08 civarındadır. Cr değerleri, 0.01 ve 0.5 aralığında değişmektedir. Minimum değerdeki Cr değerleri için hata yüksektir. Tablo 4.18'de yer alan istatistik bilgilerine göre 0.1 civarında olan düşük değerler verinin %25'i kadardır. Verideki diğer değerler, yaklaşık 0.4 ile 0.5 arasında değişmektedir. Bu durum yüksek olan hata değerinin verinin çoğunluğu için tolere edilebilir bir hata olduğunu göstermektedir. R^2 skorunda olduğu gibi orta düzeydeki tahmin başarısını destekler niteliktedir. 0.1353 olan RMSE değeri düşük bir sapmayı işaret etmekte ve bu duruma uygun bir sonuç göstermektedir. Şekil 5.8'deki gerçek ve tahmin değerleri grafiği, modelin tahmin değerleriyle gerçek değerlerinin birçok noktada örtüşmediğini göstermektedir.

İzolotörlü sistem periyodu Tb için en iyi performans Lightgbm algoritmasında görülmüştür. Bu modele ait metrikler şöyledir: 0.0769 MAE, 2.576 MAPE, 0.0255 MSE, 0.1586 RMSE ve 0.9666 R^2 skoru elde edilmiştir. R^2 değeri, modelin verideki varyansı çok iyi derecede açıklayıcı bir tahmin gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Tb değerleri 1-4.3 arasında değişmektedir. Yaklaşık 0.08'lik ortalama mutlak hata, periyot için oldukça küçük salise düzeyinde bir hatadır. MAPE değeri yaklaşık %2.6 ile çok düşük bir hata yüzdesidir. 0.1586 olan RMSE değeri, Td değerleri aralığı için düşük bir sapma verir. Tb için geliştirilen lightgbm modeli, genel olarak tahmin gücü yüksek başarılı bir modeldir. Şekil 5.9'daki gerçek ve tahmin değerlerine ait saçılım grafiğinde, test değerleri, doğrusal bir çizgidedir. Bu durum Tb'nin oldukça iyi bir performansa sahip olduğunu desteklemektedir.

TLD periyodu için geliştirilen modellerde en iyi performans rastgele orman algoritmasında elde edilmiştir. Model metrikleri şöyledir: 0.5076 MAE, 31.15 MAPE, 0.84 MSE, 0.9088 RMSE ve 0.58 R^2 skoru elde edilmiştir. Modelin R^2 skoru, orta düzeyde bir varyans açıklama gücü olduğunu göstermektedir. Td değerleri 1-5s arasında değişmektedir. 0.5s'lik ortalama mutlak hata, sönümleyici periyodu için riskli bir hata oranıdır. İzolotörlü sistemlere yerleştirilen TLD'lerin temel amacı izolatör hasarını önlemeye yönelik deplasman kontrolüdür. Td değerindeki 0.5s'lik (MAE) bir fark, sistemin kontrol performansı için riskli bir değerdir. RMSE değeri, gerçek değerden uzaklaştığına işaret etmektedir. Ayrıca %31'lik

MAPE değeri, tahmin hatasının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Genel olarak Td için rastgele orman algoritması modelinin yüksek sapmaları olduğu ve yeterli tahmin performansı gösteremediğini ifade etmektedir. Şekil 5.10, gerçek ve tahmin değerlerinin az bir miktar için örtüştüğü ve doğrusal bir çizgide olmadıklarına işaret etmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan tez çalışması kapsamında iki uygulamaya yer verilmiştir. Bu uygulamalarda, yakın fay depremleri altında, sismik taban izolatörlü bir yapıya sönümleyici ilavesinin katkıları araştırılmış, yakın fay depremleri altında tasarım optimizasyonu uygulanmış ve ayarlı sıvı sönümleyici (TLD) ilavesinin faydasallığı araştırılmıştır. Çalışmada yapılan diğer uygulamada, darbeli yakın fay depremleri altında tasarlanacak sismik taban izolatörlü ve TLD'li bir hibrit kontrol sisteminin, sönümleyici yerleştirilecek alan boyutları ve izolatör hareket kabiliyetini baz alarak, izolatör ve TLD parametrelerini tahmin eden bir makine öğrenmesi modeli geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

Yakın fay depremleri altındaki bir yapının izole edilmesinde, sismik taban izolatörleri ve bu izolatörlerin TLD ile desteklendiğindeki performansı dikkat çekmektedir. Yapılan optimizasyon uygulamasında, yalnızca izolatörlü ve izolatörün yanında en üst katına TLD yerleştirilmiş bir yapı modeli oluşturulmuş, optimum izolatör ve sönümleyici parametreleri uyarlanabilir armoni arama algoritmasıyla optimize edilmiştir. Optimum tasarım özellikleriyle, kritik deprem analizleri yapılmıştır. Yakın fay depremleri altında izolatörlü yapıya sönümleyici ilavesi ve optimum tasarımı ile ilgili yapılan çalışmadan elde edilen sonuçların özeti şöyledir:

- İzolatörlü sistemlere TLD eklenmesi, maksimum izolatör hareketliliği ve maksimum izolatör sönüm limitinin olduğu durum haricinde, sistemin ivme azaltma performansını %0.1 ile %1.2 aralığında arttırmıştır.
- İzolatörlü sistemde, darbeli depremler için 8 durumun 5'inde izolatör hasar alırken TLD ilavesiyle 3'e düşmüş, darbesiz depremlerdeki 1 izolatör hasarlı durum, TLD ilave edildiği durumda çalışmıştır. TLD ilaveli izolatörlü sistemin, sönümleyicisiz sisteme nazaran maksimum izolatör hareket sınırının aşılması ile sonuçlanan hasar durumunu azalttığı görülmüştür.
- Darbe etkili depremler altında izolatörlü sistem %20 sönüm limitine sahipken çalışır durumda olmasına rağmen aynı hareket limiti için sönüm kapasitesi arttırıldığında hareket sınırını aşarak hasar almıştır. İzolatörlü sistemlerde sönüm kapasitesini arttırmanın, yakın fay depremleri karşısında izolatör hasarını engellemede yeterli olmayabileceği tespit edilmiştir.
- İzolatörlü sistemlerde, darbe etkili yakın fay depremlerinde hareketlilik limiti 50cm olduğu durumlar için 2.5s ile 3.6s ve darbesiz depremlerde 3s ile 5s aralığında optimum

periyot sönüm kapasitesine bağı olarak artmış 5s'lik periyot, darbesiz depremlerde %40 sönüm limiti ve sonrasında görülmüştür. 60cm izolatör hareket limiti için optimum izolatör periyodu, darbe etkili depremlerde 3s ile 4.4s aralığında ve darbesiz depremlerde 4s ile 5s aralığında değer almış, 5s'lik periyot, %30 sönüm kapasitesi ve sonraki sönüm limitlerinde görülmüştür. Bu sonuçlar göz önüne alınarak, 50cm hareket limiti olan durumlara göre, 60cm limitli durumlarda izolatör periyodu daha fazla periyot gerektirmiş ve daha düşük sönüm kapasitesinde sınır değere yaklaşmıştır. İzolatör hareket kabiliyetinin gerekli izolatör periyodunda etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir.

Darbesiz yakın fay depremlerinin, darbe etkili yakın fay depremlerine kıyasla 50cm hareket limiti için tüm sönüm kapasitelerinde yaklaşık %19 ile %65 arasında ve 60cm hareket limiti için yaklaşık %15 ile %50 arasında değişen oranlarda daha yüksek izolatör periyodu gerektirmiştir. Bu durum, depremin darbe etkisinin gerekli izolatör periyodu ihtiyacını düşürdüğüne işaret etmektedir. Elde edilen tüm sonuçlar neticesinde, ayarlı sıvı sönümleyici ilavesinin, ivme azaltma ve yakın fayın yarattığı büyük yer değiştirmelerin izolatöre hasar verme ihtimalini düşürebilecek etkileri olduğu ve izolatörlü sistem kontrolünde dahil edilmesinin olumlu olabileceği söylenebilir.

Tez çalışmasında yapılan ikinci uygulamada, yakın fay bölgelerindeki yapılar için sismik izolatör ve ayarlı sıvı sönümleyicilerin birlikte kullanıldığı kontrol sistemi tasarım parametrelerini tahmin eden yapay zekâ modelleri geliştirilmesi amaç edinilmiştir. Kontrol sistemi için sönümleyici yerleştirilecek alan boyutları, izolatör hareket kabiliyeti ve TLD sıvısına ait özellikleri dikkate alan tahmin modelleri üretilmiştir. Makine öğrenmesi tahmin modeli geliştirilmesi için eğitimde kullanılmak üzere, Jaya algoritması ile optimize edilmiş kontrol sistem parametrelerinden oluşan bir veri seti hazırlanmıştır. Darbeli yakın fay özellikli deprem kayıtları altında yapı tepkisini en iyi absorbe eden kontrol sistemi tasarım özellikleri optimizasyonla belirlenmiştir. Elde edilen optimum sonuçlar, tasarım limitleri kullanılarak 6 tahmin çıktısı için model üretiminde kullanılmıştır. Hedeflenen çıktılar, TLD tank yarıçapı (R), TLD sıvı yüksekliği (h), TLD sönüm oranı (Cr), İzolatörlü sistemin sönüm oranı (Db), izolatörlü sistem periyodu (Tb) ve TLD periyodu (Td) alınmıştır. Bu çıktılar için ayrı ayrı 12 farklı algoritma denenerek regresyon modelleri üretilmiştir. Modellerin eğitiminde, TLD yerleştirilecek alanın maksimum alan boyutları, izolatör hareketlilik limiti, TLD sıvısı sönüm oranı, sıvı periyodu ve TLD tankındaki toplam sıvı kütlesi girdi olarak kullanılmıştır. Daha

sonra bu girdiler arasında temel bileşen analizi yapılarak temel bileşen regresyonuyla farklı bileşenler üretilmiştir. Bu bileşenlerin farklı sayıda kullanıldığı her bir çıktı için 12 farklı makine öğrenmesi algoritması denenmiştir. Bunlar arasında, R ve h çıktıları için Lightgbm modeli, Db için catboost modeli ve Cr, Tb ve Td çıktıları için rastgele orman algoritması modelleri en iyi performansı göstermiştir. Modellerin doğrulanmasında, 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen modellerde, R, h ve Tb çıktıları için sırasıyla yaklaşık %99, %98 ve %97'lik R^2 skorları elde edilmiş ve küçük tahmin hatalarıyla tahmin edebilme yeteneğinde oldukları belirlenmiştir. Cr ve Td çıktıları için sırasıyla 0.62 ve 0.58 R^2 skorları hesaplanmıştır. Db, çıktısı 0.6'lık R^2 skoruyla en düşük performansı göstermiş, gerçek ve tahmin değerleri arasında oldukça fark olduğu gözlemlenmiştir.

Makine öğrenmesi modellerinden elde edilen bulgulara göre sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Geliştirilen makine öğrenmesi tahmin modellerinin, optimum TLD tank yarıçapı ve sıvı yüksekliği gibi özellikleri sırasıyla yaklaşık %99 R^2 ve 0.009m'lik bir hata payı ve %98'lik R^2 skoru ve 0.08m'lik hata payıyla çok iyi derecede tahmin ettiği tespit edilmiştir.
- İzolatörlü sistem periyodu ve TLD'nin periyodunu tahmin etmede geliştirilen modellerde, izolatörlü sistem periyodu yaklaşık %97 R^2 skoru ve 0.08s'lik bir hata payıyla iyi derecede tahmin edilebilirken, TLD periyodu tahmin modeli, %58 R^2 skoru ve 0.5s'lik bir hata oranıyla kontrol sistem tasarım tahmini için riskli bir tahmin performansı göstermiştir. TLD'nin periyodundaki %31'lik sapma yüksek bir sapmayı belirtmektedir. Orta düzeyde bir tahmin başarısına sahip olan model, 1-5s aralığı gibi düşük değerler aldığı için TLD periyodunu tahmin etmede yeteri kadar etkili olamamıştır.
- TLD sönüm oranı ve izolatörlü sistemin sönüm oranları için geliştirilen modellerde, TLD sönüm oranı tahmin modeli, %62 R^2 skoru ve yaklaşık %8'lik sönüm oranı hata payıyla orta düzeyde bir tahmin başarısı göstermiş, ancak çoğunlukla gerçek değerlerden uzak tahminler üretmiştir. İzolatörlü sistem sönüm oranı için geliştirilen model yaklaşık %2 gibi düşük bir ortalama mutlak hata vermiş olmasına rağmen %6'lık R^2 skoruyla model, verideki varyasyonu yeteri kadar açıklayamamış ve gerçek değerler

ve tahmin değerlerinden oluşan saçılım grafiği göz önüne alındığında, zayıf bir tahmin gücü gösterdiği görülmüştür.

Tahmin edilecek çıktılarının aldığı değerler, modelin genelleme başarısını etkilemektedir. Sönüm oranı gibi kontrol performansına etkisi yüksek özellikler, modelin hata yapmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle düşük ya da yüksek limitler için aykırı değer analiziyle ayrıştırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, veri sayısı modelin performansında önemli bir etkidir. Makine eğitiminde benzer değerlerin veride fazlaca bulunması, aradaki değerlerin tahminini zorlaştırmaktadır. Yukarıdaki sonuçlarda diğerlerine nazaran daha düşük performans gösteren TLD ve izolatörlü sistem sönüm oranları genellikle sınır değere yaklaştığı için ara değerlerde daha az veriye sahiptir. Bu durum makinenin tahmin gücünün zayıflığının sebeplerinin başındadır. Veri sayısının artırılarak modelin tahmin gücünün yükseltilebileceği düşünülmektedir.

Elde edilen tüm bilgilere dayanarak, kontrol sistem tasarımları için tahmin modeli geliştirilmesinde, sönümü etkileyen ana parametrelerin alt ve üst limitlerinin dikkatle tasarlanmasının, tahmin performansını arttırmaya yönelik aykırı değerlerin ayrıştırılmasının, veride az bulunan değerlerin belirlenerek arttırılmasının gerekliliği anlaşılmaktadır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen modellere göre 6 değişkenin 3'ünün çok yüksek bir performansla tahmin edilebildiği, 2 değişkenin tahmininde orta düzeyde bir başarı elde edildiği ve bir değişken tahmini için modelin zayıf bir performans gösterdiği görülmektedir. Tez çalışması için geliştirilen yapay zekâ modelleri genel anlamda başarılı sonuçlar üretmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan optimum tasarım ve tasarım özelliklerinin tahmin edilmesi süreci, taban izolasyon sistemlerinde TLD'lerin izolatör hasarlarını önleyici etkileri olduğunu, yakın fay depremleri altında önemli düzeyde bir kontrol avantajı sağladıklarını göstermiştir. Çalışmada geliştirilen makine öğrenmesi tahmin modeli, literatürde oldukça sınırlı sayıda olan izolatör ve TLD'li sistemlerin tasarımı için yenilikçi bir bakış açısı sunmaktadır. Ayrıca, kullanılacak izolatörün hareket limiti, TLD sıvı özellikleri ve sönümleyici yerleştirilecek alanın boyutları açısından sınırlı yere sahip yapılar için alternatif tasarımları kısa sürede hesaplayarak optimum tasarım özellikleri tahmin etmesi tez çalışmasının özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Abbasimehr, H., Paki, R. and Bahrini, A., 2023, A novel XGBoost-based featurization approach to forecast renewable energy consumption with deep learning models, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, 100863.
- Abioye, S.O., Oyedele, L.O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J.M.D., Bilal, M., ... and Ahmed, A., 2021, Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges, *Journal of Building Engineering*, 44, 103299.
- Abramson, H.N., 1966, *The dynamic behavior of liquids in moving containers*, NASA Special Publication, Washington, USA, 106.
- Aceto, L., Quaranta, G., Camata, G., Briseghella, B. and Spacone, E., 2021, Optimum design of a hybrid isolation device for server racks using constrained differential evolution algorithm, In *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 1767-1777.
- Agrawal, A.K. and Amjadian, M., 2022, *Seismic component devices*, In Innovative bridge design handbook, In: Pipinato, A. (ed.), Chapter 22, Butterworth-Heinemann, 637-662.
- Akbari, M., Seifi, M., Falborski, T. and Jankowski, R., 2024, Comparative analysis of seismic response reduction in multi-storey buildings equipped with base isolation and passive/active friction-tuned mass dampers, *Advances in Engineering Software*, 198, 103765.
- Aldemir, Ü. and Aydın, E., 2005, Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 435-2005/1, 81.
- Ali, A. and Mashwani, W.K., 2023, A supervised machine learning algorithm: applications, challenges, and recommendations, *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: A. Physical and Computational Sciences*, 60(4), 1-12.
- Alkhadashi, A., Mohammad, F., Zubayr, R.O., Aoun Klalib, H. and Balik, P., 2022, Multi-objective design optimization of steel framed structures using three different methods, *International Journal of Structural Integrity*, 13(1), 92-111.
- Al-Rawashdeh, M., Yousef, I. and Al-Nawaiseh, M., 2022, Predicting the inelastic response of base isolated structures utilizing regression analysis and artificial neural network, *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1178-1193.
- Artar, M. ve Carbas, S., 2023, Optimizing the seismic resilience performance of steel truss bridges by maximum energy dissipation via friction dampers, In *Structures*, 58, p. 105508, Elsevier.
- Arya, A.S., Chandra, B. and Qamaruddin, M., 1978, A new building system for improved earthquake performance, In *Proceedings of the Sixth Symposium on Earthquake Engineering, IIT Roorkee*, October 1978 Formerly, University of Roorkee, 1, 499-504.

- Avinash, A.R., Krishnamoorthy, A., Kamath, K. and Chaithra, M., 2022, Sliding isolation systems: Historical review, modeling techniques, and the contemporary trends, *Buildings*, 12(11), 1997.
- Bae, J., Lee, C.H., Park, M., Alemayehu, R.W., Ryu, J. and Ju, Y.K., 2020, Modified low-cycle fatigue estimation using machine learning for radius-cut coke-shaped metallic damper subjected to cyclic loading, *International Journal of Steel Structures*, 20, 1849-1858.
- Bahiuddin, I., Imaduddin, F., Mazlan, S.A., Ariff, M.H., Mohmad, K.B. and Choi, S.B., 2021, Accurate and fast estimation for field-dependent nonlinear damping force of meandering valve-based magnetorheological damper using extreme learning machine method, *Sensors and Actuators A: Physical*, 318, 112479.
- Bao, Y. and Becker, T.C., 2018, Inelastic response of base-isolated structures subjected to impact, *Engineering Structures*, 171, 86-93.
- Barakat, S., 2020, Design of the base isolation system with artificial neural network models, In *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Compute and Data Analysis*, 9-12 March 2020 Silicon Valley CA, USA, 79-83.
- Barakat, S., AlHamaydeh, M. and Nassif, O., 2015, Optimization of seismic isolation systems with viscous fluid dampers using genetic algorithms, In *The 5th international conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering (COMPdyn2015)*, May 2015 Crete Island, Greece, 4086-4095.
- Barrera-Vargas, C.A., Díaz, I.M., Soria, J.M. and García-Palacios, J.H., 2020, Enhancing friction pendulum isolation systems using passive and semi-active dampers, *Applied Sciences*, 10(16), 5621.
- Bauer, H.F., 1964, Tables of zeros of cross product Bessel functions, *Journal Mathematics of Computation.*, 18, 128-135.
- Banerjee, S. and Matsagar, V., 2023, Hybrid vibration control of hospital buildings against earthquake excitations using unbonded fiber-reinforced elastomeric isolator and tuned mass damper, *Buildings*, 13(7), 1724.
- Bekdaş, G., Kayabekir, A.E., Nigdeli, S.M. and Toklu, Y.C., 2019, Transfer function amplitude minimization for structures with tuned mass dampers considering soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 552-562.
- Bekdaş, G. ve Nigdeli, S.M., 2013, Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies, *International Journal of Mechanical Sciences*, 71, 68-84.
- Breiman, L., 2001, Random forests, *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Caicedo, D., Lara-Valencia, L., Blandon, J. and Graciano, C., 2021, Seismic response of high-rise buildings through metaheuristic-based optimization using tuned mass dampers and tuned mass dampers inerter, *Journal of Building Engineering*, 34, 101927.

- Cavalagli, N., Agresta, A., Biscarini, C., Ubertini, F. and Ubertini, S., 2021, Enhanced energy dissipation through 3D printed bottom geometry in Tuned Sloshing Dampers, *Journal of Fluids and Structures*, 106, 103377.
- Chander, S. and Vijaya, P., 2021, Unsupervised learning methods for data clustering, *Artificial Intelligence in Data Mining*, 3, 41-64.
- Chen, B., Dai, J., Song, T. and Guan, Q., 2022, Research and development of high-performance high-damping rubber materials for high-damping rubber isolation bearings: A review, *Polymers*, 14(12), 2427.
- Chen, P.C., Tsai, K.C. and Lin, P.Y., 2014, Real-time hybrid testing of a smart base isolation system, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(1), 139-158.
- Chen, T. and Guestrin, C., 2016, Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, 13-17 August San Francisco California, USA, 785-794.
- Cheng, F.Y., Jiang, H. and Lou, K., 2008, *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press.
- Cheng, C.W., Lee, H.H. and Luo, Y.T., 2015, Experimental study of controllable MR-TLCD applied to the mitigation of structure vibration, *Smart Structures and Systems*, 15(6), 1481-1501.
- Chong, J.W., Kim, Y. and Chon, K.H., 2014, Nonlinear multiclass support vector machine-based health monitoring system for buildings employing magnetorheological dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(12), 1456-1468.
- Christenson, R.E., 2002, *Semiactive control of civil structures for natural hazard mitigation: analytical and experimental studies*, University of Notre Dame.
- Constantinou, M.C. and Symans, M.D., 1992, Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers, In *National Center for Earthquake Engineering Research*, 21 December Technical Report, State University of New York at Buffalo, 160.
- Çerçevik, A.E., Avşar, Ö. and Hasançebi, O., 2020, Optimum design of seismic isolation systems using metaheuristic search methods, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106012.
- Çerçevik, A. E., Avşar, Ö. and Dilsiz, A., 2021, Optimal placement of viscous wall dampers in RC moment resisting frames using metaheuristic search methods, *Engineering Structures*, 249, 113108.
- Çerçevik, A.E. and Kazak Çerçevik, N., 2025, Energy-Based Optimization of Seismic Isolation Parameters in RC Buildings Under Earthquake Action Using GWO, *Applied Sciences*, 15(5), 2870.

- Çetin, H., Aydin, E. and Ozturk, B., 2019, Optimal design and distribution of viscous dampers for shear building structures under seismic excitations, *Frontiers in Built Environment*, 5, 90.
- Çoşut, M., Nigdeli, S.M. and Bekdaş, G., 2023, *Structural control systems and tuned mass damper optimization by using Jaya and hybrid algorithms*, Hybrid Metaheuristics in Structural Engineering: Including Machine Learning Applications, In: Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M. (eds), Cham: Springer Nature Switzerland, 87-110.
- Das, S. and Choudhury, S., 2017, Seismic response control by tuned liquid dampers for low-rise RC frame buildings. *Australian journal of structural engineering*, 18(2), 135-145.
- Datta, T.K., 2010, *Seismic analysis of structures*, John Wiley & Sons.
- De Almeida and F.S., 2019, Optimization of laminated composite structures using harmony search algorithm, *Composite Structures*, 221, 110852.
- De Domenico, D., Impollonia, N. and Ricciardi, G., 2018, Soil-dependent optimum design of a new passive vibration control system combining seismic base isolation with tuned inerter damper, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 105, 37-53.
- Debbarma, R., Chakraborty, S. and Ghosh, S.K., 2010, Optimum design of tuned liquid column dampers under stochastic earthquake load considering uncertain bounded system parameters, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(10), 1385-1393.
- Deringöl, A.H. and Güneyisi, E.M., 2020, Single and combined use of friction-damped and base-isolated systems in ordinary buildings, *Journal of Constructional Steel Research*, 174, 106308.
- Developers, C., 2021, CatBoost: High performance gradient boosting on decision trees library, *Astrophysics Source Code Library*, ascl-2108.
- Donà, M., Bernardi, E., Zonta, A., Tan, P. and Zhou, F., 2021, Evaluation of optimal FVDs for inter-storey isolation systems based on surrogate performance models, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(11), 4587-4621.
- Dorigo M., Maniezzo V. and Colorni A., 1996, The ant system: an autocatalytic optimizing process, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 26:29–41.
- Dorogush, A.V., Ershov, V. and Gulin, A., 2018, CatBoost: gradient boosting with categorical features support, *arXiv preprint arXiv:1810.11363*.
- El Bouchefry, K. and de Souza, R.S., 2020, *Learning in big data: Introduction to machine learning*, Knowledge discovery in big data from astronomy and earth observation, In: Skoda, P. and Adam, F. (eds), Elsevier, 225-249.
- Eltahawy, W., Ryan, K.L., Cesmeci, S. and Gordaninejad, F., 2021, Parameters affecting dynamics of three-dimensional seismic isolation, *Journal of Earthquake Engineering*, 25(4), 730-755.

- Etedali, S., Hasankhoie, K. and Sohrabi, M.R., 2020. Optimal design of pure-friction isolators with and without restoring device: A multi-objective cuckoo search-based approach for seismic-excited structures, In *Structures*, 25, 708-719.
- Etedali, S., Sohrabi, M.R. and Tavakoli, S., 2013, Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12, 39-54.
- Fallah, N. and Zamiri, G., 2013, Multi-objective optimal design of sliding base isolation using genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 20(1), 87-96.
- Farrokhi, F. and Rahimi, S., 2020, Supervised probabilistic failure prediction of tuned mass damper-equipped high steel frames using machine learning methods, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(3), 179-190.
- FEMA P-695, *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2009.
- Ferrer-Fuenmayor, S. and Villalba Morales, J.D., 2023, Shape Optimization of Slotted Steel Plate Dampers using the Simulated Annealing Algorithm, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 9(3), 870-883.
- Frahm, H., 1911, *U.S. Patent No. 989,958*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Fu, W., Zhang, C., Li, M. and Duan, C., 2019, Experimental investigation on semi-active control of base isolation system using magnetorheological dampers for concrete frame structure, *Applied Sciences*, 9(18), 3866.
- Fujino, Y., Sun, L., Pacheco, B.M. and Chaiseri, P., 1992, Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 118(10), 2017-2030.
- Furtmüller, T., Di Matteo, A., Adam, C. and Pirrotta, A., 2019, Base-isolated structure equipped with tuned liquid column damper: An experimental study, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 816-831.
- Furukawa, S., Sato, E., Shi, Y., Becker, T. and Nakashima, M., 2013, Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(13), 1931-1949.
- Garrido Kogan, B.I., 2016, *Amortiguadores de masa sintonizada en edificios sometidos a registros sísmicos en Chile*, Master's Thesis, University of Chile.
- Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G.V., 2001, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation*, 76(2), 60-68.
- Geisser, S. and Eddy, W.F., 1979, A predictive approach to model selection, *Journal of the American Statistical Association*, 74(365), 153-160.
- Gutierrez Soto, M. and Adeli, H., 2013, Tuned mass dampers, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20, 419-431.

- Habib, A. and Yildirim, U., 2022, Developing a physics-informed and physics-penalized neural network model for preliminary design of multi-stage friction pendulum bearings, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 113, 104953.
- Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J., 1995, Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, *Earthquake Spectra*, 11(4), 569-605.
- Heaton, T.H., Hall, J.F., Wald, D.J. and Halling, M.W., 1995, Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, *Science*, 267(5195), 206-211.
- Hoerl, A.E. and Kennard, R.W., 1970, Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems, *Technometrics*, 12(1), 55-67.
- Hu, X., Zhao, Z., Yang, K., Liao, W. and Chen, Q., 2023, Novel triple friction pendulum-tuned liquid damper for the wind-induced vibration control of airport control towers, *Thin-Walled Structures*, 182, 110337.
- Ibrahim, R.A., 2005, *Liquid sloshing dynamics: theory and applications*. Cambridge University Press.
- Irwin, P.A. and Breukelman, B., 2001, Recent applications of damping systems for wind response, In *Proceedings of the Council on Tall Buildings and Urban Habitat World Congress*, 2001 Melbourne, Australia, 645-655.
- Iskhakov, I. and Ribakov, Y., 2007, Modern trends in base isolation applications for seismic protection of historic buildings, *WIT Transactions on The Built Environment*, 95.
- Islam, N.U. and Jangid, R.S., 2024, Negative stiffness and inerter-based dampers: Novel seismic response control approach for base isolated liquid storage tanks, In *Structures*, 60, 105860.
- Jaballah, M.S., Harzallah, S. and Nail, B., 2022, A Comparative study on hybrid vibration control of base-isolated buildings equipped with ATMD, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(3), 8652-8657.
- Jangid, R.S. and Kelly, J.M., 2001, Base isolation for near-fault motions, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(5), 691-707.
- Javanmardi, A., Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Huang, F., Kuczma, M., Tabrizikahou, A. and Mohammad-Sedighi, H., 2022, Pounding mitigation of a short-span cable-stayed bridge using a new hybrid passive control system, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 134, 625-636.
- Jiang, H., 2021, *Machine learning fundamentals: A concise introduction*. Cambridge University Press.
- Jin, S., Yang, J., Sun, S., Deng, L., Chen, Z., Gong, L., ... and Li, W., 2023, Magnetorheological elastomer base isolation in civil engineering: a review, *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(2), 100039.

- Jouneghani, K.T., Hosseini, M., Rohanmanesh, M.S. and Raissi, M., 2023, Building's Controlled Seismic Isolation by Using Upper Horizontal Dampers and Stiff Core, *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(3), 1-42.
- Kaleybar, R.S. and Tehrani, P., 2021, Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers, In *Structures*, 33, 3382-3396.
- Kandemir, E.C., 2025, The effect of frequency-filtered earthquakes for optimum base isolation parameters across varied soil conditions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 193, 109330.
- Kandemir-Mazanoglu, E.C., 2017, Effects of isolator properties on viscous damper capacity of base isolated adjacent buildings, *Journal of Vibroengineering*, 19(4), 2739-2748.
- Karaboğa, D., 2005, *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department, 1-10.
- Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y., 1999, Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, *Wind and structures*, 2(3), 201-251.
- Kataria, N.P. and Jangid, R.S., 2016, Seismic protection of the horizontally curved bridge with semi-active variable stiffness damper and isolation system, *Advances in Structural Engineering*, 19(7), 1103-1117.
- Kaveh, A., Mohammadi, S., Hosseini, O.K., Keyhani, A. and Kalatjari, V.R., 2015, Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search, *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 39(C1), 21.
- Kazuto, K. and Kimura, K., 2020, *High damping rubber bearing composition*, Patent No. WO2020230393A1, Google Patents, <https://patents.google.com/patent/WO2020230393A1/en>
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... and Liu, T.Y., 2017, Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- Kelly, J.M., 1999, The role of damping in seismic isolation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28(1), 3-20.
- Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J., 1972, Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5(3), 63-88.
- Kennedy, J. and Eberhart, R., 1995, Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 4, 1942-1948.

- Keshtegar, B. and Etedali, S., 2018, Nonlinear mathematical modeling and optimum design of tuned mass dampers using adaptive dynamic harmony search algorithm, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(7), e2163.
- Khan, M., Anwar, W., Rasheed, M., Najeh, T., Gamil, Y. and Farooq, F., 2024, Forecasting the strength of graphene nanoparticles-reinforced cementitious composites using ensemble learning algorithms, *Results in Engineering*, 21, 101837.
- Khan, M.S.I., Islam, N., Uddin, J., Islam, S. and Nasir, M.K., 2022, Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach, *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(8), 4773-4781.
- Kitazawa, M., Nishimori, K., Noguchi, J. and Shimoda, I., 1992, Earthquake resistant design of a long-period cable-stayed bridge, In *10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain*, 4797-4802.
- Klemencic, R., Hooper, J. and Johansson, O., 2008, One Rincon Hill: Raising the Bar, In *Structures Congress 2008: Crossing Borders*, 1-11.
- Komodromos, P., 2008, Simulation of the earthquake-induced pounding of seismically isolated buildings, *Computers & Structures*, 86(7-8), 618-626.
- Konar, T., Ghosh, A.D. and Basu, B., 2024, Real-world installations of tuned liquid column dampers for wind-induced vibration control of tall buildings, *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-15.
- Kotsiantis, S.B., Zaharakis, I. and Pintelas, P., 2007, *Supervised machine learning: A review of classification techniques*, Emerging artificial intelligence applications in computer engineering, IOS Press, 160(1), 3-24.
- Kumar, S., Goyal, M.K., Deshpande, V. and Agarwal, M., 2023, Estimation of time dependent scour depth around circular bridge piers: Application of ensemble machine learning methods, *Ocean Engineering*, 270, 113611.
- Kumar, V., Kedam, N., Sharma, K.V., Mehta, D.J. and Caloiero, T., 2023, Advanced machine learning techniques to improve hydrological prediction: A comparative analysis of streamflow prediction models, *Water*, 15(14), 2572.
- Lenartowicz, A., Przychodzki, M., Guminiak, M. and Garbowski, T., 2021, Optimal placement of viscoelastic vibration dampers for Kirchhoff plates based on PSO method, *Materials*, 14(21), 6616.
- Li, C., Chang, K., Cao, L. and Huang, Y., 2021, Performance of a nonlinear hybrid base isolation system under the ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106589.
- Li, H., and Li, L., 2024, A comparative analysis of ant colony and genetic algorithm optimization to select optimal arrangement of viscous damper in steel frame, *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 90(1), 75-81.

- Li, Z. and Shu, G., 2019, Optimal placement of metallic dampers for seismic upgrading of multistory buildings based on a cost-effectiveness criterion using genetic algorithm, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(6), e1595.
- Li, L. and Zhao, X., 2019, Application of machine learning in optimized distribution of dampers for structural vibration control, *Earthquakes and Structures*, 16(6), 679-690.
- Li, Y., Li, J., Li, W. and Samali, B., 2013, Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator, *Smart Materials and Structures*, 22(3), 035005.
- Liu, M.Y., Chiang, W.L., Hwang, J.H. and Chu, C.R., 2008, Wind-induced vibration of high-rise building with tuned mass damper including soil–structure interaction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6-7), 1092-1102.
- Love, J.S., Tait, M.J. and Toopchi-Nezhad, H., 2011, A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure, *Engineering Structures*, 33(3), 738-746.
- Lu, L.Y., Lin, C.C. and Lin, G.L., 2013, Experimental evaluation of supplemental viscous damping for a sliding isolation system under pulse-like base excitations, *Journal of Sound and Vibration*, 332(8), 1982-1999.
- Lu, L. Y., Shih, M.H., Yeh, S.W., Lin, G. L. and Tzeng, S.W., 2008, Experimental verification of using viscous damper for response mitigation of isolation systems subjected to nearfault earthquakes, In *11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC-11*.
- Luca, S.G., Chira, F. and Rosca, V.O., 2005, Passive, active and semi-active control systems in civil engineering, *Constructil Arhitectura*, 3(4).
- Mahmoodi, P., 1969, Structural dampers, *Journal of the Structural division*, 95(8), 1661-1672.
- Masnata, C., Di Matteo, A., Adam, C. and Pirrotta, A., 2023, Nontraditional configuration of tuned liquid column damper inerter for base-isolated structures, *Mechanics Research Communications*, 129, 104101.
- Masnata, C. and Pirrotta, A., 2024, Optimal control of base-isolated systems with sliding TLCD under stochastic process, *Engineering Structures*, 318, 118754.
- Masroor, A. and Mosqueda, G., 2012, Experimental simulation of base-isolated buildings pounding against moat wall and effects on superstructure response, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(14), 2093-2109.
- Masroor, A. and Mosqueda, G., 2015, Assessing the collapse probability of base-isolated buildings considering pounding to moat walls using the FEMA P695 methodology, *Earthquake Spectra*, 31(4), 2069-2086.
- Matel, E., Vahdatikhaki, F., Hosseinyalamdary, S., Evers, T. and Voordijk, H., 2022, An artificial neural network approach for cost estimation of engineering services, *International Journal of Construction Management*, 22(7), 1274-1287.

- MathWorks Inc., 2018, MATLAB R2018a. Natick, MA, USA.
- Matsagar, V.A. and Jangid, R.S., 2008, Base isolation for seismic retrofitting of structures, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(4), 175-185.
- Mazloun, A.A., Afshar, M.A. and Aghaeipour, S., 2023, Seismic assessment of Isolator-Damper hybrid structural system based on analysis of MDOF and modal 2DOF models, In *Structures*, 58, 105571.
- Mehri, F., Mollaei, S., Farsangi, E.N., Babaei, M.H. and Ghahramani, F., 2023, Application of a novel optimization algorithm in design of lead rubber bearing isolation systems for seismic rehabilitation of building structures, *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*, 594-603.
- Mehrkian, B., Bahar, A. and Chaibakhsh, A., 2019, Semiactive conceptual fuzzy control of magnetorheological dampers in an irregular base-isolated benchmark building optimized by multi-objective genetic algorithm, *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2302.
- Miguel, L.F.F., Fadel Miguel, L.F. and Lopez, R.H., 2015, A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibrations in footbridges, *Optimization and Engineering*, 16(3), 633-661.
- Mirjalili, S., Mirjalili S.M. and Lewis A., 2014, Grey wolf optimizer, *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61 (2014).
- Mirjalili, S. and Lewis, A., 2016, The whale optimization algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
- Modhej, A. and Zahrai, S.M., 2021, Numerical study of visco-hyperelastic damper with high axial damping rubber subjected to harmonic loading, In *Structures*, 29, 1550-1561.
- Moeindarbari, H. and Taghikhany, T., 2018, Seismic reliability assessment of base-isolated structures using artificial neural network: operation failure of sensitive equipment, *Earthquakes and Structures*, 14(5), 425-436.
- Mubuli, A., Nigdeli, S.M. and Bekdaş, G., 2024, Optimum design of tuned mass dampers for structures with torsional irregularity via jaya algorithm, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(2), 2279-2293.
- Murphy, S., 2024, *Regression*, In *Translational Orthopedics*, Academic Press, 137-140.
- Naeim, F. and Kelly, J.M., 1999, *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*, John Wiley & Sons.
- Naimi, S. and Waheb, M.H., 2019, Deprem Etkisindeki Yapıların Sismik Taban İzolasyonu ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri ile Karma Korunması, *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(1), 499-516.
- Nakabayash, T., Wada, K. and Utsumi, Y., 2020, Automatic detection of air bubbles with deep learning, In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, IAARC Publications, 37, 1168-1175.

- Nguyen, H.D., Dao, N.D. and Shin, M., 2022, Machine learning-based prediction for maximum displacement of seismic isolation systems, *Journal of Building Engineering*, 51, 104251.
- Nyirandayisabye, R., Li, H., Dong, Q., Hakuzweyezu, T. and Nkinahamira, F., 2022, Automatic pavement damage predictions using various machine learning algorithms: Evaluation and comparison, *Results in Engineering*, 16, 100657.
- Ocak, A., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Kim, S. and Geem, Z.W., 2022a, Optimization of tuned liquid damper including different liquids for lateral displacement control of single and multi-story structures, *Buildings*, 12(3), 377.
- Ocak, A., Nigdeli, S.M., Bekdaş, G., Kim, S. and Geem, Z.W., 2022b, Adaptive harmony search for tuned liquid damper optimization under seismic excitation, *Applied Sciences*, 12(5), 2645.
- Ocak, A., Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M., 2024a, Optimum Design of Hybrid Base Isolation and Tuned Liquid Damper Systems for Structures under Near-Fault Ground Motions, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 10(4), 04024061.
- Ocak, A., Işıkdag, Ü., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Kim, S. and Geem, Z., 2024b, Prediction of damping capacity demand in seismic base isolators via machine learning, *CMES-Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 138(3).
- Okut, O., 2006, *Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Sismik Etkiler Altındaki Betonarme Yapılarda Performansının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ontiveros-Pérez, S.P., Miguel, L.F.F. and Miguel, L.F.F., 2017, A new assessment in the simultaneous optimization of friction dampers in plane and spatial civil structures, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017(1), 6040986.
- El Ouardani, A. and Tbatou, T., 2024, Seismic Isolators Layout Optimization Using Genetic Algorithm Within the Pymoo Framework, *Civil Engineering Journal*, 10(8), 2517-2535.
- Özbulut, O.E., Bitaraf, M. and Hurlebaus, S., 2011, Adaptive control of base-isolated structures against near-field earthquakes using variable friction dampers, *Engineering Structures*, 33(12), 3143-3154.
- Özsağır, M., Erden, C., Bol, E., Sert, S. and Özocak, A., 2022, Machine learning approaches for prediction of fine-grained soils liquefaction, *Computers and Geotechnics*, 152, 105014.
- Pall, A., Vezina, S., Proulx, P. and Pall, R., 1993, Friction-dampers for seismic control of Canadian space agency headquarters, *Earthquake Spectra*, 9(3), 547-557.
- Panda, S.K. and Mohanty, S.N., 2023, Time series forecasting and modeling of food demand supply chain based on regressors analysis, *IEEE Access*, 11, 42679-42700.

- Pourzeynali, S. and Zarif, M., 2008, Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms, *Journal of sound and vibration*, 311(3-5), 1141-1160.
- Pöschl, M., Vašina, M., Zádrapa, P., Měřínská, D. and Žaludek, M., 2020, Study of carbon black types in SBR rubber: mechanical and vibration damping properties, *Materials*, 13(10), 2394.
- Prakash, S., Ul Islam, N. and Jangid, R.S., 2022, Unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators coupled with negative stiffness-based dampers, In *Symposium in Earthquake Engineering*, Singapore: Springer Nature Singapore, 691-702.
- Providakis, C.P., 2009, Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), 80-90.
- Qamaruddin, M., 1978, *Development of brick building systems for improved earthquake performance*, Doctoral Thesis, University of Roorkee.
- Rakicevic, Z.T., Bogdanovic, A., Jurukovski, D. and Nawrotzki, P., 2012, Effectiveness of tune mass damper in the reduction of the seismic response of the structure, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 1049-1073.
- Rao, R., 2016, Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34.
- Rao, R.V., Savsani, V.J. and Vakharia, D.P., 2011, Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems, *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315.
- Rezaei, N. and Jabbari, P., 2022, *K-nearest neighbors in R*, Immunoinformatics of Cancers: Practical Machine Learning Approaches Using R, Academic Press, 181-190.
- Rizzian, L., Léger, N. and Marchi, M., 2017, Multiobjective sizing optimization of seismic-isolated reinforced concrete structures, *Procedia Engineering*, 199, 372-377.
- Rodrigues, A.P., Fernandes, R. and Vijaya, P., 2022, A study on the evaluation of different regressors in weather prediction, In *2022 International Conference on Artificial Intelligence and Data Engineering (AIDE)*, 13-18.
- Rozebahan, M., Masnata, C., Turan, G. and Pirrotta, A., 2025, Efficiency evaluation of optimal TLCD and TMD for the seismic response reduction of buildings considering soil-structure interaction effect, *Meccanica*, 1-22.
- Ryan, K.L., Soroushian, S., Maragakis, E.M., Sato, E., Sasaki, T. and Okazaki, T., 2016, Seismic simulation of an integrated ceiling-partition wall-piping system at E-Defense. I: Three-dimensional structural response and base isolation, *Journal of Structural Engineering*, 142(2), 04015130.

- Saaed, T.E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.E. and Hedlund, H., 2013, A state-of-the-art review of structural control systems, *Journal of Vibration and Control*, 21(5), 919-937.
- Sağiroğlu, M., Maali, M. and Aydın, A.C., 2018, Installation and maintenance principles of seismic isolators: Erzurum health campus, *The Open Civil Engineering Journal*, 12(1).
- Saha, A., Saha, P. and Patro, S.K., 2018, Seismic protection of the benchmark highway bridge with passive hybrid control system, *Earthquakes and Structures*, 15(3), 227-241.
- Salaas, B., Bekdaş, G., Ibrahim, Y.E., Nigdeli, S.M., Ezzat, M., Nawar, M. and Kayabekir, A.E., 2023, Design optimization of a hybrid vibration control system for buildings, *Buildings*, 13(4), 934.
- Sayed-Ahmed, M., 2012, Building with base isolation techniques, *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector (JAUES)*, 7(1), 147-159.
- Shafiee, S., Lied, L.M., Burud, I., Dieseth, J.A., Alsheikh, M. and Lillemo, M., 2021, Sequential forward selection and support vector regression in comparison to LASSO regression for spring wheat yield prediction based on UAV imagery, *Computers and Electronics in Agriculture*, 183, 106036.
- Sharma, V., Arun, C.O. and Krishna, I.P., 2019, Development and validation of a simple two degree of freedom model for predicting maximum fundamental sloshing mode wave height in a cylindrical tank, *Journal of Sound and Vibration*, 461, 114906.
- Shayesteh Bilondi, M.R., Yazdani, H. and Khatibinia, M., 2018, Seismic energy dissipation-based optimum design of tuned mass dampers, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(6), 2517-2531.
- Shemshaki, E., Haddad, M.H., Mashayekhi, M., Aghajanzadeh, S.M., Majdi, A. and Noroozinejad Farsangi, E., 2025, A Novel Hybrid Metaheuristic MPA-PSO to Optimize the Properties of Viscous Dampers, *Buildings*, 15(8), 1330.
- Shoaei, P. and Oromi, H.T., 2019, A combined control strategy using tuned liquid dampers to reduce displacement demands of base-isolated structures: a probabilistic approach, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 890-903.
- Shobha, G. and Rangaswamy, S., 2018, *Machine learning*, Handbook of Statistics, In: Gudivada, V. and Rao, C.R. (eds), Chapter 8, Elsevier, 197-228.
- Siami, A., Karimi, H.R., Cigada, A., Zappa, E. and Sabbioni, E., 2018, Parameter optimization of an inerter-based isolator for passive vibration control of Michelangelo's Rondanini Pietà, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 667-683.
- Siddique, N. and Adeli, H., 2015, Applications of harmony search algorithms in engineering, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 24(06), 1530002.
- Soong, T.T. and Constantinou, M.C., 2014, *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, No. 345, Springer, Udine.

- Stanikzai, M.H., Elias, S., Matsagar, V.A. and Jain, A.K., 2019, Seismic response control of base-isolated buildings using multiple tuned mass dampers, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(3), e1576.
- Sun, H., Wang, X. and Chen, Z., 2010, Magnetorheological tuned liquid column damper (MR-TLCD) for semi-active control of structures under earthquake, *Dizhen Gongcheng yu Gongcheng Zhendong*, 30(5), 22-28.
- Sun, Z., Feng, D.C., Mangalathu, S., Wang, W.J. and Su, D., 2022, Effectiveness assessment of TMDs in bridges under strong winds incorporating machine-learning techniques, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 36(5), 04022036.
- Şengel, H.S., Erol, H. and Yavuz, E., 2009, Sismik izolasyon tekniği ve kullanımına ilişkin örnek uygulama, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 165-178.
- Tahera, Urs, N., Raj, K.S., Kumar, R., Soundalgekar, H., Deepa, T. and Shah, M.A., 2025, Comparative analysis of sloshing effects on elevated water tanks' dynamic response using ANN and MARS, *Discover Materials*, 5(1), 9.
- Talyan, N., Elias, S. and Matsagar, V., 2021, Earthquake response control of isolated bridges using supplementary passive dampers, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 26(2), 04021002.
- Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T. and Kohsaka, R., 1995, Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation, *Engineering Structures*, 17(9), 609-621.
- Taymus, R.B., Aydogdu, I., Carbas, S. and Ormecioglu, T.O., 2024, Seismic design optimization of space steel frame buildings equipped with triple friction pendulum base isolators, *Journal of Building Engineering*, 92, 109748.
- Tharehallimata, G. and Narasimhamu, K.L., 2023, Geometric optimisation of double ended magnetorheological fluid damper, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(3), 1339-1349.
- Tibshirani, R., 1996, Regression shrinkage and selection via the lasso, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 58(1), 267-288.
- Toklu, Y.C., Bekdaş, G., Yücel, M., Nigdeli, S.M., Kayabekir, A.E., Kim, S. and Geem, Z.W., 2021, Total potential optimization using metaheuristic algorithms for solving nonlinear plane sEğitimsystems, *Applied Sciences*, 11(7), 3220.
- Toufigh, V. and Palizi, S., 2022, Performance evaluation of slag-based concrete at elevated temperatures by a novel machine learning approach, *Construction and Building Materials*, 358, 129357.
- Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F., 1993, Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction, *Earthquake Spectra*, 9(3), 505-528.
- Tsipianitis, A., Spachis, A. and Tsompanakis, Y., 2022, Combined Optimization of Friction-Based Isolators in Liquid Storage Tanks, *Applied Sciences*, 12(19), 9879.

- Tsipianitis, A. and Tsompanakis, Y., 2022, Multi-objective optimization of base-isolated tanks with supplemental linear viscous dampers, *Infrastructures*, 7(11), 157.
- Ulusoy, S., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Kim, S. and Geem, Z.W., 2021, Performance of optimum tuned PID controller with different feedback strategies on active-controlled structures, *Applied Sciences*, 11(4), 1682.
- Ur Rehman, Z., Khalid, U., Ijaz, N., Mujtaba, H., Haider, A., Farooq, K. and Ijaz, Z., 2022, Machine learning-based intelligent modeling of hydraulic conductivity of sandy soils considering a wide range of grain sizes, *Engineering Geology*, 311, 106899.
- Walsh, K.K., Sallar, G. and Steinberg, E.P., 2019, Hybrid base-isolation of a nonlinear building using a passive resettable stiffness damper, *Engineering Structures*, 178, 206-211.
- Wang, L., Nagarajaiah, S., Shi, W. and Zhou, Y., 2022, Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper, *Engineering Structures*, 271, 114963.
- Wang, Z., Ubertini, F. and Laflamme, S., 2022, Ensemble of long short-term memory recurrent neural network for semi-active control of tuned liquid wall damper, *Engineering Structures*, 270, 114771.
- Weerasekara, S., Li, W., Isaacs, J. and Kamarthi, S., 2024, Reinforcement learning for disassembly task control, *Computers & Industrial Engineering*, 190, 110044.
- Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Thompson, C.L. and Alonso, L.J., 1991, Seismic testing of steel plate energy dissipation devices, *Earthquake Spectra*, 7(4), 563-604.
- Wu, B., Zhang, J., Williams, M.S. and Ou, J., 2005, Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers, *Engineering Structures*, 27(8), 1258-1267.
- Xin, Y., Chen, G. and Lou, M., 2009, Seismic response control with density-variable tuned liquid dampers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(4), 537-546.
- Xiong, W. and Shi, X., 2018, Soft sensor modeling with a selective updating strategy for Gaussian process regression based on probabilistic principle component analysis, *Journal of the Franklin Institute*, 355(12), 5336-5349.
- Xu, J., Sun, D., Liu, E., Guo, T. and Li, A., 2025, Optimal design of right-angle viscoelastic dampers for seismic performance of ancient timber structure via improved multi-objective particle swarm algorithm, In *Structures*, 77, p. 109123, Elsevier.
- Yang, F., Sedaghati, R. and Esmailzadeh, E., 2022, Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review, *Journal of Vibration and Control*, 28(7-8), 812-836.
- Yang, X.S., 2010, *A new metaheuristic bat-inspired algorithm*, In Nature inspired cooperative strategies for optimization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 65-74.
- Yang, X.S., 2012, Flower pollination algorithm for global optimization. In *International conference on unconventional computing and natural computation*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 240-249.

- Yavas, M.S., Gao, Z., Mekaoui, N. and Saito, T., 2023, A machine learning-based hybrid seismic analysis of a lead rubber bearing isolated building specimen, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 174, 108217.
- Yu, Q. Q., Wu, J.Y., Gu, X.L. and Zhou, F.Y., 2022, Experimental study on effects of U-shape dampers on earthquake responses of a base-isolated LNG inner tank, *Engineering Structures*, 269, 114841.
- Yu, T., Wang, B., Chen, P., Xie, Y. and Zhang, Z., 2025, Adaptive seismic isolation system combining gap dampers for pounding mitigation in base-isolated structures, *Engineering Structures*, 322, 119079.
- Yucel, M., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M. and Sevgen, S., 2019, Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning, *Journal of Building Engineering*, 26, 100847.
- Yücesoy, A., 2005, *Sismik İzolatörler ile Depreme Dayanıklı Tasarım*, Yüksek Öğretim ve Araştırma Vakfı Yayınları.
- Zabihi-Samani, M., 2019, Design of optimal slit steel damper under cyclic loading for special moment frame by cuckoo search, *International Journal of Steel Structures*, 19(4), 1260-1271.
- Zelleke, D.H., Elias, S., Matsagar, V.A. and Jain, A.K., 2015, Supplemental dampers in base-isolated buildings to mitigate large isolator displacement under earthquake excitations, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 48(2), 100-117.
- Zeng, Y., Chen, T., Xiong, F., Deng, K. and Xu, Y., 2024, Combination of active sensing method and data-driven approach for rubber aging detection, *Structural Health Monitoring*, 23(4), 2310-2322.
- Zhang, J., Sun, Y., Li, G., Wang, Y., Sun, J. and Li, J., 2020, Machine-learning-assisted shear strength prediction of reinforced concrete beams with and without stirrups, *Engineering with Computers*, 1-15.
- Zhang, R., He, H., Weng, D., Zhou, H. and Ding, S., 2012, Theoretical analysis and experimental research on toggle-brace-damper system considering different installation modes, *Scientia Iranica*, 19(6), 1379-1390.
- Zhang, Z., 2014, Too much covariates in a multivariable model may cause the problem of overfitting, *Journal of thoracic disease*, 6(9), E196.
- Zhang, Z., 2016, Introduction to machine learning: k-nearest neighbors, *Annals of translational medicine*, 4(11), 218.
- Zhang, Z., 2020, Numerical and experimental investigations of the sloshing modal properties of sloped-bottom tuned liquid dampers for structural vibration control, *Engineering Structures*, 204, 110042.

Zhang, Y., Hu, Y., Li, N., Xie, L., Wang, Z. and Liu, D., 2024, Isolation performance evaluation of base-isolated system with active nonlinear negative stiffness devices, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 179, 108565.

Zhao, Y. and Zhang, Y., 2008, Comparison of decision tree methods for finding active objects, *Advances in Space Research*, 41(12), 1955-1959.

Zhao, Z., Hu, X., Chen, Q., Wang, Y., Hong, N. and Zhang, R., 2023, Friction pendulum-strengthened tuned liquid damper (FPTLD) for earthquake resilience of isolated structures, *International Journal of Mechanical Sciences*, 244, 108084.

<https://www.bauder.co.uk/projects/british-airways-i360-observation-tower>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<http://www.bridgeofweek.com/2009/06/osaka-bay-bridges-higashi-kobe-bridge-2.html>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<https://www.laibin.com.tr/EN/products/hdr-high-damping-rubber-bearing>, [Ziyaret Tarihi: 18 Kasım, 2024].

<https://megaconstrucciones.net/?construccion=aeropuerto-nagasaki>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<https://www.motioneering.ca/comcast-center>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<https://www.onewallcentre.ca/>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<https://scikit-learn.org/dev/modules/generated/sklearn.ensemble.BaggingRegressor.html>, [Ziyaret Tarihi: 18 Kasım, 2024].

<https://scikit-learn.org/dev/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html>, [Ziyaret Tarihi: 18 Kasım, 2024].

<https://www.sfgate.com/bayarea/article/One-Rincon-tower-features-water-tank-on-top-to-3299035.php>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<https://www.skyscrapercenter.com/building/one-rincon-hill-south-tower/2161>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

<https://sygm.saglik.gov.tr/TR-85807/hastanelerde-depreme-karsi-sismik-izolator-kalkani.html> [Ziyaret Tarihi:05/01/2023].

<https://www.techeblog.com/tuned-mass-damper/>, [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran, 2025].

https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/python/python_intro.html, [Ziyaret Tarihi: 18 Kasım, 2024].

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

SİSMİK İZOLASYON VE AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİLİ HİBRİT KONTROL SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ

ORJİNALLIK RAPORU

%**8**

BENZERLİK ENDEKSİ

%**7**

İNTERNET KAYNAKLARI

%**6**

YAYINLAR

%**3**

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1

Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

%**2**

2

acikbilim.yok.gov.tr

İnternet Kaynağı

%**1**

3

nek.istanbul.edu.tr:4444

İnternet Kaynağı

<%**1**

4

hdl.handle.net

İnternet Kaynağı

<%**1**

5

Submitted to CSU, Long Beach

Öğrenci Ödevi

<%**1**

6

polen.itu.edu.tr

İnternet Kaynağı

<%**1**

7

Germen, Zehra. "Yapısal kontrol sistemleri", Dokuz Eylul Universitesi (Turkey), 2024

Yayın

<%**1**

8

dergipark.org.tr

İnternet Kaynağı

KURUM İZİNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- Kurum izni gerekmektedir.
- Kurum izni gerekmemektedir.

Ayla OCAK
(İmza)

