T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BİNA TÜRÜ YAPILAR İÇİN PASİF SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ

Apaer MUBULI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 9.12.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Turgay ÇOŞGUN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Barış SEVİM
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmî Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını yöneten, başlangıçtan sonuna kadar tez konusuyla ilgili araştırmalarımın geliştirilmesi için beni yönlendiren değerli Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ'ye tez çalışmalarım dâhili ve haricinde gerçekleştirmiş olduğumuz tüm çalışmalardaki rehberliği, teşvik edici ve anlayışlı tavrı ile üzerimdeki bütün emekleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme Komitesi'ndeki saygıdeğer Hocalarım Sayın Prof. Dr. Barış SEVİM ve Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ'a ve ayrıca tez savunma sınavı jürisinde bulunan değerli Hocalarım Sayın Doç. Dr. Turgay ÇOŞGUN ile Sayın Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU'na görüş, öneri ve tavsiyeleri ile mevcut çalışmaya yapmış oldukları değerli katkıları için teşekkür ederim.

Son olarak, doktora tez sürecinde beni motive ederek destek olup yol gösteren, çalışmaya teşvik eden ve yardımlarını esirgemeyen Danışman Hocam sayın Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ ve Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ'a tekrar teşekkür ederim. Ayrıca, beni sabırla bekleyen destekleyen, bana hep ilham ve güç veren uzaktaki sevgili aileme ve eşime gösterdikleri sabırları için sonsuz minnettarım.

Aralık 2021 Apaer MUBULI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI 5
1.2. TEZİN GENEL YAPISI 5
2. GENEL KISIMLAR **7**
2.1. YAPISAL KONTROL SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI 7
2.2. PASİF KONTROL SİSTEMLERİ 8
2.2.1. Sismik Taban İzolasyon 10
2.2.2. Enerji Sönümleyici Cihazlar 13
2.2.3. Ayarlı Kütle Sönümleyici 17
2.3. AKTİF KONTROL SİSTEMİ 22
2.4. YARI AKTİF KONTROL SİSTEMLERİ 24
2.5. HİBRİT KONTROL SİSTEMİ 25
2.6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 26
3. MALZEME VE YÖNTEM **45**
3.1. OPTİMİZASYONA GİRİŞ 45
3.1.1. Optimizasyon Probleminin Matematiksel Modeli 48
3.2. METASEZGİSEL ALGORİTMALAR 49
3.2.1. Genetik Algoritma 51
3.2.2. Guguk Kuşu Arama Algoritması 52
3.2.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) 54
3.2.4. Ateşböceği Algoritması 55
3.2.5. Yarasa Algoritması 56
3.2.6. Levy Uçuşu ile Yapay Arı Kolonisi Algoritması 57

3.2.7. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması 59
3.2.8. Armoni Arama Algoritması 60
3.2.9. Jaya Algoritması 61
3.3. TMD'NİN OPTİMUM PARAMETRE DEĞERLERİNİN SEÇİMİ 64
3.3.1. TMD'nin Titreşim Azaltma Prensibi ve Parametre Tasarımı 66
3.3.2. TMD Parametrelerinin Belirlenmesi 67
3.4. JAYA ALGORİTMASIYLA TMD'NİN OPTİMUM TASARIM DEĞİŞKENLERİNİN OPTİMİZASYONU 71
3.5. ÇOK KATLI BURULMA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN YAPI MODELİ 73
3.5.1. Kütle Merkezi (CM) 74
3.5.2. Rijitlik Merkezi (CS) 74
3.5.3. Eksantriklik (Dış Merkezlik) 75
3.6. TMD'Lİ ÇOK SERBESTLİK DERECELİ YAPININ HAREKET DENKLEMLERİ 78
4. BULGULAR 81
4.1. TEK KATLI BURULMA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN ÖRNEK YAPI MODELİ 84
4.2. 10 KATLI BURULMA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN YAPININ MODELİ 96
4.3. 10 KATLI TEKLİ TMD'NİN FARKLI KONUMLARDAKİ ANALİZİ 99
4.3.1. Tekli TMD'nin Kütle Merkezine Konumlandırılması Durumu 101
4.3.2. Tekli TMD'nin Optimum Konum Yerine Konulması Durumu 114
4.4. 10 KATLI ÇİFT TMD'Lİ DURUMDAKİ ANALİZ 127
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 141
5.1. TEK KATLI BURULA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN DEZLEM ÖRNEK YAPI 141
5.2. 10 KATLI TEKLİ TMD'Lİ PERDE-ÇERÇEVELİ YAPI SİSTEMİ 142
5.2.1. Tekli TMD'nin Kütle Merkezi Konumuna Yerleştirme Durumu 142
5.2.2. Tekli TMD'nin Optimum Konumuna Yerleştirme Durumu 143
5.3. DTMD 10 KATLI PERDE-ÇERÇEVELİ YAPI SİSTEMİ 144
5.4. TEKLİ VE ÇİFT TMDLİ DURUMLARINDAKİ ETKİNLİĞİ 145
5.5. ÖNERİLER 146
KAYNAKLAR 148
EKLER 159
EK.1 Yapının en üst katındaki dört köşe düğüm noktalarının x, y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, TMD' siz, TMD' li ve DTMD' li durumundaki, ux, uy ötelemeleri ve θ yönündeki u_θ dönmesi aşağıdaki şekillerde, TMD'lerin etkinlik yüzdeleri ise tablolarda verilmiştir. 159

EK.2 Kritik olarak seçilen *x* ve *y* yönünde deprem yer hareketleri etkisi altında, yapının *x* ve *y* yönlerindeki kat yer değiştirmeleri TMD'siz, TMD'li ve DTMD'li olarak aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir. 168

ÖZGEÇMİŞ 169

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Yapısal kontrol sistemlerinin sınıflandırılması. 8

Şekil 2.2: Pasif kontrol sistemlerinin yapıdaki farklı yerleşimleri. 9

Şekil 2.3: Sarkaç ayarlı kütle sönümleyici (Taipei 101 Dünya Finans Merkezi). 10

Şekil 2.4: Normal bina ve taban izolatörlü binanın sismik davranışı (Kamrava, 2015). 11

Şekil 2.5: (a) Lamine kauçuk izolatör, (b) Kurşun çekirdekli izolatör, (c) Küresel kayıcı izolatör (Soong, 2007). 12

Şekil 2.6: X Şekilli ADAS metalik sönümleyicisi (Aldemir ve Aydın, 2005). 14

Şekil 2.7: Pall sürtünme tipi sönümleyici (Aldemir ve Aydın, 2005). 15

Şekil 2.8: (a) Visko-Elastik sönümleyici, (b) Dünya ticaret merkezi, (c) Dünya ticaret merkezinde uygulanan visko-elastik sönümleyicinin yerleşim detayı (Aldemir ve Aydın, 2005). 16

Şekil 2.9: (a) Akışkan viskoz sönümleyicin şematik diyagramı, (b) Akışkan viskoz sönümleyicin matematiksel modeli (Mevada ve Jagid, 2012). 17

Şekil 2.10: Tek katlı yapı üzerindeki ayarlanmış kütle sönümleyici (Bekdaş ve Nigdeli, 2018). 18

Şekil 2.11: Pasif ayarlı kütle sönümleyicileri ile yapımı tamamlan dünyadaki 10 yüksek bina. 19

Şekil 2.12: Aktif kontrol sistemlerinin şematik gösterimi(Anwar ve Aung, 2016). 23

Şekil 2.13: Yarı aktif kontrol sistemi şematik görünüm (Pourzeynali ve Bahar, 2017). 24

Şekil 2.14: Mark Tower ve Hibrit kontrol sistemi (Septimiu ve Cristian, 2007) 25

Şekil 2.15: Hibrit kontrol sistemi şematik görünüm(Saaed, 2015). 26

Şekil 3.1: Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması. 47

Şekil 3.2: Genetik algoritma akış diyagramı (Demirtaş ve Zengin, 2016). 53

Şekil 3.3: Jaya algoritmasının genel akış şeması (Rao, 2016). 63

Şekil 3.4: Tek serbestlik dereceli TMD'li yapı (Bekdaş ve Nigdeli, 2018). 65

Şekil 3.5: TMD'li MDOF yapı sistemi (Bekdaş ve Niğdeli, 2013). 73

Şekil 3.6: Çok katlı burulma düzensizliği oluşan yapının 3D ve plan görünümü. 76

Şekil 4.1: (a) Tek katlı yapının 3D görünümü, (b) Tek katlı yapının plan görünümü. 84

Şekil 4.2: 22 adet deprem kaydı etkisi altındaki yapının *x* yönündeki deplasmanı. 88

Şekil 4.3: 22 adet deprem kaydı etkisi altındaki yapının *y* yönündeki deplasmanı. 89

Şekil 4.4: 22 adet deprem kaydı etkisi altındaki yapının θ yönündeki u_θ dönmesi. 90

Şekil 4.5: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_x deplasmanı. 90

Şekil 4.6: 3'nolu kritik deprem kayıdına göre çift TMD'li yapının u_x deplasmanı. 91

Şekil 4.7: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_y deplasmanı. 91

Şekil 4.8: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_y deplasmanı. 92

Şekil 4.9: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre tek TMD'li yapının u_θ dönmesi. 92

Şekil 4.10: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_θ dönmesi. 93

Şekil 4.11: 13'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_x deplasmanı. 93

Şekil 4.12: 13'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_x deplasmanı. 94

Şekil 4.13: 13'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_y deplasmanı. 94

Şekil 4.14: Seçilen 13'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_y deplasmanı. 95

Şekil 4.15: Kritik olarak seçilen 13'nolu deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_θ dönmesi.....95

Şekil 4.16:13'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_θ dönmesi. 96

Şekil 4.17: 10 katlı asimetrik yapının plan görünümü. 97

Şekil 4.18: Çift yönlü ayarlı kütle sönümleyicinin konum plan görünümü (Taha ve diğ. 2019).....100

Şekil 4.19: Tekli TMD'nin kütle merkezi konumuna konulan yapının 3D görünümü. 101

Şekil 4.20: 1773 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 102

Şekil 4.21: 1773 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi. 102

Şekil 4.22: 1773 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi. 103

Şekil 4.23: 1773 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı. 103

Şekil 4.24: 1773 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivemsi.....104

Şekil 4.25: 1773 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.....104

Şekil 4.26: 1799 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 105

Şekil 4.27: 1799 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi. 106

Şekil 4.28: 1799 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı 106

Şekil 4.29: 1799 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.....107

Şekil 4.30: 1919 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 107

Şekil 4.31: 1919 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....108

Şekil 4.32: 1919 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı. 108

Şekil 4.33: 1919 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.....109

Şekil 4.34: 1923 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 109

Şekil 4.35: 1923 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....110

Şekil 4.36: 1923 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı. 110

Şekil 4.37: 1923 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi. 111

Şekil 4.38: katlara göre x yönündeki deprem etkisi altındaki kat yerdeğiştirmesi. 111

Şekil 4.39: katlara göre y yönündeki deprem etkisi altındaki kat yerdeğiştirmesi. 112

Şekil 4.40: *x* yönündeki deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fx. 112

Şekil 4.41: *x* yönündeki deprem etkisi altındaki taban momenti M_θ. 113

Şekil 4.42: *y* yönündeki deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fy. 113

Şekil 4.43: y yönündeki deprem etkisi altındaki taban momenti M_θ. 114

Şekil 4.44: Tekli TMD'nin optimum konum yerine konulan yapının 3D görünümü. 114

Şekil 4.45: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x yerdeğiştirmesi.....115

Şekil 4.46: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....115

Şekil 4.47: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında u_θ dönmesi.....116

Şekil 4.48: 1773 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.....116

Şekil 4.49: 1773 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi. 117

Şekil 4.50: 1773 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_θ dönmesi.....117

Şekil 4.51: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında u_x yerdeğiştirmesi.....118

Şekil 4.52: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında a_x ivmesi.....118

Şekil 4.53: 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.....119

Şekil 4.54: 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.....119

Şekil 4.55: 1919 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında u_x yerdeğiştirmesi.....120

Şekil 4.56: 1919 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....120

Şekil 4.57: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.....121

Şekil 4.58: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.....121

Şekil 4.59: 1923 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında u_x yerdeğiştirmesi.....122

Şekil 4.60: 1923 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında a_x ivmesi.....122

Şekil 4.61: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.....123

Şekil 4.62: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.....123

Şekil 4.63: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *x* yönündeki kat yer değiştirmesi.....124

Şekil 4.64: y yönündeki kritik deprem etkisi altındaki y yönündeki kat yer değiştirmesi.....124

Şekil 4.65: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fx. 125

Şekil 4.66: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ. 126

Şekil 4.67: *y* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fy. 126

Şekil 4.68: *y* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ. 126

Şekil 4.69: 10 katlı DTMD'li assimetrik yapının 3D görünümü. 127

Şekil 4.70: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 128

Şekil 4.71: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....129

Şekil 4.72: 1773 ve 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.....129

Şekil 4.73: 1773 ve 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.....130

Şekil 4.74: 1773 ve 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.....130

Şekil 4.75: 1773 ve 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.....131

Şekil 4.76: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 131

Şekil 4.77: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....132

Şekil 4.78: 1919 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 133

Şekil 4.79: 1919 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....133

Şekil 4.80: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı. 134

Şekil 4.81: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.....134

Şekil 4.82: 1923 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı. 135

Şekil 4.83: 1923 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.....135

Şekil 4.84: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı. 136

Şekil 4.85: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.....136

Şekil 4.86: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *x* yönündeki kat yer değiştirmesi.....137

Şekil 4.87: *y* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *y* yönündeki kat yer değiştirmesi.....137

Şekil 4.88: *x* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fx. 138

Şekil 4.89: *x* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ. 139

Şekil 4.90: *y* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fy. 139

Şekil 4.91: *y* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ. 140

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Genetik algoritmanın sözde kodu (Demirtaş ve Zengin, 2016). 52

Tablo 3.2: Jaya algoritması uygulama prosedürü. 63

Tablo 3.3: Parametre hesaplama formülleri. 67

Tablo 3.4: TMD'nin optimum ayar parametrelerini bulmak için kullanılan denklemler (Soto, 2012). 70

Tablo 4.1: Optimizasyonda kullanılan FEMA deprem kayıtları (FEMA, 2009). 83

Tablo 4.2: Tek katlı burulma düzensizliği bulunan yapının özellikleri (Lin ve diğ. 2010). 86

Tablo 4.3: Tek katlı tekli TMD'nin optimum parametre değerleri. 86

Tablo 4.4: Tek katlı çift TMD'nin optimum parametre değerleri. 86

Tablo 4.5: 22 adet deprem etkisi altındaki yapının *x* yöndeki deplasmanı. 87

Tablo 4.6: 22 adet deprem etksi altındaki yapının y yönündeki deplasmanı 88

Tablo 4.7: 22 adet deprem etksi altındaki yapının θ yönündeki dönmesi. 89

Tablo 4.8: Ana yapının malzeme ve kesit özellikleri. 97

Tablo 4.9: 10 katlı binanın baskın periyotu , MPMR ve MDF değerleri. 98

Tablo 4.10: Optimizasyonda gerekli ana yapının parameterleri. 99

Tablo 4.11: Ana yapının katlara göre *x*, *y* ve θ yönlerindeki rijitlikleri. 99

Tablo 4.12: 10 katlı tekli TMD'nin optimum parametre değerleri. 100

Tablo 4.13: Kritik deprem etksi altında 1773 noktasının TMD etkinliği. 105

Tablo 4.14: Kritik deprem etksi altında 1799 noktasının TMD etkinliği. 105

Tablo 4.15: Kritik deprem etksi altında 1919 noktasının TMD etkinliği. 107

Tablo 4.16: Kritik deprem etksi altında 1923 noktasının TMD etkinliği. 109

Tablo 4.17: Kritik olarak seçilen depren etkisi altındaki taban kesme kuvvetleri. 112

Tablo 4.18: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1773 noktasının TMD etkinliği. 115

Tablo 4.19: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1799 noktasının TMD etkinliği. 118

Tablo 4.20: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1919 noktasının TMD etkinliği. 120

Tablo 4.21: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1923 noktasının TMD etkinliği. 122

Tablo 4.22: TMD'nin optimum konumuna konulması durumundaki taban kesme kuvvetleri. 125

Tablo 4.23: 10 katlı yapı çift TMD'nin optimum parametre değerleri. 128

Tablo 4.24: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1773 noktasının DTMD etkinliği. 128

Tablo 4.25: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1799 noktasının DTMD etkinliği. 131

Tablo 4.26: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1919 noktasının DTMD etkinliği. 132

Tablo 4.27: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1923 noktasının DTMD etkinliği. 135

Tablo 4.28: Çift TMD'li durumdaki taban kesme kuvvet etkinliği. 138

Tablo 5.1: Kritik 22 adet deprem etkisi altındaki TMD'nin etkinlikleri. 141

Tablo 5.2: Kritik olarak seçilen 3 ve 13 no'lu deprem etkisi altındaki TMD'nin etkinlikleri. 142

Tablo 5.3: TMD'nin kütle merkezi konumunda en üst katın dört köşe noktasının TMD etkinliği. 143

Tablo 5.4: TMD'nin optimum konumunda en üst katın dört köşe noktasının TMD etkinliği. 143

Tablo 5.5: DTMD'nin optimum konumunda en üst katın dört köşe noktasının DTMD etkinliği. 144

Tablo 5.6: Tekli ve çift TMD etkinliğinin karşılaştırılması. 145

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

$\boldsymbol{\alpha_{opt}}$: Optimum frekansı
$\boldsymbol{\beta_1}$: Dinamik büyütme katsayısı
$\boldsymbol{\beta_2}$: Dinamik büyütme katsayısı
c : Ana yapının sönümü
C : Sönüm matrisi
$\boldsymbol{c_d}$: Ayarlı kütle sönümleyici sönümü
$\boldsymbol{C_{opt}}$: Optimum sönümü
$\boldsymbol{E}$: Dış etki konum matrisi
$\boldsymbol{e_x}$: *x* yönündeki eksantriklik
$\boldsymbol{e_y}$: *y* yönündeki eksantriklik
$\boldsymbol{f_i(x)}$: Amaç fonksiyonu
$\boldsymbol{g_i(x)}$: Eşitsizlikler
$\boldsymbol{h_j(x)}$: Tasarım kısıtlamaları
$\boldsymbol{J_0}$: Kütlesel dönel atalet momenti
k : Ana yapının rijitliği
K : Rijitlik matrisi
$\boldsymbol{k_d}$: Ayarlı kütle sönümleyici rijitliği
$\boldsymbol{k_x}$: *x* yönündeki rijitliği
$\boldsymbol{k_y}$: *y* yönündeki rijitliği
$\boldsymbol{k_\vartheta}$: θ yönündeki rijitliği
$\boldsymbol{k_{opt}}$: Optimum rijitlik
$\boldsymbol{l_x}$: Yapının *x* yönündeki boyutu
$\boldsymbol{l_y}$: Yapının *y* yönündeki boyutu
M : Kütle matrisi
m : Ana yapının kütlesi
$\boldsymbol{m_d}$: Ayarlı kütle sönümleyici kütlesi
$\boldsymbol{n}$: Kat sayısı
$\mathbf{n_p}$: Popülasyon büyüklüğü
$\boldsymbol{r}$: Kat kütlesel atalet yarıçapı

T_d : TMD'nin periyodu

x_{cm} : *x* yönündeki kütle merkezinin koordinatları

x_{cs} : *x* yönündeki rijitlik merkezinin koordinatları

$x(t)$: Yerdeğiştirme

$\dot{x}(t)$: Hız

$\ddot{x}(t)$: İvme

$\ddot{x}_g(t)$: *x* yönündeki deprem yer ivmesi

x_p : Popülasyon sayısı

y_{cm} : *y* yönündeki kütle merkezinin koordinatları

y_{cs} : *y* yönündeki rijitlik merkezinin koordinatları

$\ddot{y}_g(t)$: *y* yönündeki deprem yer ivmesi

u_x : *x* yönündeki öteleme

u_y : *y* yönündeki öteleme

u_θ : θ yönündeki dönme

μ : kütle oranı

ω : Ana yapının frekansı

ω_d : Ayarlı kütle sönümleyici açısal frekansı

ξ : Ana yapının sönüm oranı

ξ_d : Ayarlı kütle sönümleyici sönüm oranı

ξ_{opt} : Optimum sönüm oranı

$\Delta\xi_{eq}$: Tasarım sönüm oranı

$f_i(x)$: Amaç fonksiyonu

f : frekans

Kısaltmalar **Açıklama**

ACO : Ant Colony Optimization
ABC : Artificial Bee Colony
AIA : Artificial Immunity Algorithm
BA : Bat Algorithm
BBO : Biogeography-Based Optimization
BFO : Bacteria Foraging Optimization
BTMD : Bidirectional Tuned Viscous Mass Damper
CMD : Compound Mass Damper
CM : Center of Mass
CS : Center of Rigidity
CSA : Crow Search Algorithm
DE : Differential Evolution
DTMD : Double Tuned Mass Damper
EA : Evolutionary Algorithms
ES : Evolution Strategy
EVOP : Evolutionary Operations Methodology
EP : Evolution Programming
FEMA : Federal Emergency Management Agency
FF : Firefly Algorithm
GA : Genetic Algorithm
GEM : Generalized Expectation Maximization
GSA : Gravitational Search Algorithm
HS : Harmony Search
IDA : Incremental Dynamic Analysis
FPS : Friction Pendulum Systems
HDNRB : High Damping Natural Rubber Bearings
LDRB : Low Damping Rubber Bearings
LRB : Lead Rubber Bearing
LQR : Linear Quadratic Regulator
MDOF : Multi Degree of Freedom System
MTMD : Multi Tuned Mass Damper
NER : Normalized Eccentricity Ratio
PSO : Particle Swarm Optimization

R-FBI : Resilient Friction Base Isolation

SAVFD : Semi-Active Variable Friction Damper

SDOF : Single Degree of Freedom Systems

SFL : Shuffled Frog Leaping Algorithm

SSI : Soil-Structure Interaction

TLD : Tuned Liquid Damper

TLBO : Teaching Learning Based Optimization Algorithm

TTFR : Torsional-Translation Frequency Ratio

TMD : Tuned Mass Damper

TVMD : Tuned Viscous Mass Damper

TMCS : Tuned Mass Control Systems

VE : Viscoelastic Damper

VF : Viscous Liquid Damper

ÖZET

BİNA TÜRÜ YAPILAR İÇİN PASİF SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Apaer MUBULI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ

Geçtiğimiz otuz yıl boyunca, kentsel inşaat yapılarının hızlı gelişimiyle birlikte, yüksek binalar, büyük açıklıklı köprüler ve açık deniz platformları gibi birçok büyük yapılar hayata geçirilmiştir. Bu yapılar, şiddetli deprem, rüzgâr ve dalga yükleri gibi dinamik çevresel tehlikelerin etkisinde büyük titreşimlere yatkındır. İnşaat mühendislik yapılarının deprem ve rüzgâr gibi sürekli değişken dinamik etkilerin karşısında en iyi dinamik performansı sağlamasındaki önemli kriterlerden biri, istenmeyen dış etkilerin (rüzgâr, deprem vb.) oluşturduğu titreşim tepkilerinin söndürülmesidir. Yapısal kontrol sistemleri, bu tür doğal dinamik yüklerin etkilerinden kaynaklanan istenmeyen titreşim etkilerini karşılamak için günümüz bina tasarımında çok önemli bir yere sahiptir. Pasif kontrol sistemleri, dinamik kuvvetlerden meydana gelen titreşimleri, kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri güvenlik sınırları içerisinde tutarak yapının ve yapı içindeki donanımın korunmasını sağlayabilen etkili, ekonomik, sade, güvenilir ve kolay uygulanır olmaları gibi doğal avantajları nedeniyle yaygın olarak benimsenmiştir. Pasif enerji sönümleme kontrol teknolojisi, bina yapılarının afet etkilerinin önlenmesi ve azaltılması ve insan yerleşimlerinin rahatlığının arttırılması için kullanılmaktadır. Önemli bir akademik değeri ve geniş uygulama alanlara sahiptir.

Son zamanlarda yapılan yoğun analitik ve deneysel araştırmalar sonucunda, binalarda kullanılan pasif kontrol sistemlerinden ayarlanmış kütle sönümleyicilerinin (TMD) titreşim

kontrolleri yalnızca yeni yapıların tasarımı ve bileşenlerinde değil, mevcut yapıların rüzgâr, deprem ve insan faaliyetleri gibi dinamik etkilere karşı dayanaklığının güçlendirilmesinde daha fazla kabul görmektedir. Ayarlanmış kütle sönümleyicileri (TMD), yapının spesifik rezonans frekanslarını kontrol etmek için cihazın özelliklerini ayarlayarak deprem veya rüzgâr uyarımı altındaki bir yapının titreşimlerini hafifletmeyi amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, pasif sönümleyici sistemlerinden pratikte yaygın olarak kullanılan ayarlanmış kütle sönümleyicisinin (TMD) bina türü yapılardaki kullanımı, özellikle burulma düzensizliği bulunan asimetrik binaların yer hareketi uyarım yükleri altındaki titreşim kontrolü için tekli ve çift ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimal konumu ve sistem parametrelerinin sistematik olarak belirlenmesi ve titreşim kontrolü araştırılmıştır. İlk olarak, hedef bina yapısının modal parametreleri onun ETABS sonlu eleman modelinden çıkarılmıştır. Tekli ve çift ayarlı kütle sönümleyici sisteminin optimum konumu, kontrollü mod şekillerine ve hem modal katılımcı kütle oranı hem de modal yön faktörüne dayalı olarak belirlenmiştir. Daha sonra, kütle sönümleyicisinin fiziksel özellikleri olan kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin yanında konumu da burulma düzensizliğinden oluşan açısal titreşimin azaltılması için optimum olarak belirlenecektir. Optimizasyonda meta-sezgisel yöntemlerden Jaya algoritması kullanılarak sayısal iterasyon süreci kullanılacaktır. Tekli ve çift ayarlı kütle sönümleyici sistemi olan ve olmayan hedef bina için deprem etkileri altında yer değiştirme değerleri minimize edilerek tekli ve çift ayarlı kütle sönümleyici sistemlerinin optimal parametreleri hesaplanmıştır. Kontrol etkinliğini değerlendirmek için, tekli ve çift ayarlı kütle sönümleyici sistemleri olan ve olmayan binanın tepkileri karşılaştırılmıştır. Tek katlı örnek model bir bina ile 10 katlı gerçek bir binadan elde edilen analiz sonuçları, önerilen çift ayarlı kütle sönümleyici sisteminin hem yapısal güvenliği hem de konut konforunu artırmak için kat titreşimini, taban kesme kuvvetini ve deprem uyarıları nedeniyle geçen titreşim süresini azaltmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çift ayarlı kütle sönümleme sisteminin kütle artışına eşdeğer olan ve böylece asimetrik yapılar için kontrol etkinliğini artıran çift ayarlı kütle sönümleme sisteminin optimum düzlemsel konumunun belirlenmesinde burulma etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Aralık 2021, 191 sayfa.

Anahtar kelimeler: Pasif kontrol, ayarlanmış kütle sönümleyici, asimetrik yapılar, dinamik analiz, zaman tanım alanında analiz, ETABS, MATLAB

SUMMARY

OPTIMIZATION AND ANALYSIS OF PASSIVE DAMPER SYSTEMS FOR BUILDING TYPE STRUCTURES

Ph.D. THESIS

Apaer MUBULI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sinan Melih NİGDELİ

Over the past three decades, with the rapid development of urban construction structures, many large structures such as tall buildings, large span bridges and offshore platforms have been implemented. These structures are prone to large vibrations under the influence of dynamic environmental hazards such as strong earthquakes, wind and wave loads. One of the most important criteria for civil engineering structures to provide the best dynamic performance against constantly changing dynamic effects such as earthquakes and winds is the damping of vibration responses caused by undesired external effects (wind, earthquake, etc.). Structural control systems have a very important place in today's building design to meet the unwanted vibration effects caused by the effects of such natural dynamic loads. Passive control systems have been widely adopted due to their natural advantages such as being effective, economical, simple, reliable and easy to apply, which can ensure the protection of the structure and the equipment inside the structure by keeping the vibrations caused by dynamic forces, internal forces and displacements within safety limits. Passive energy dissipation control technology is used to prevent and mitigate the disaster effects of building structures and to increase the comfort of human settlements. It has an important academic value and wide application areas.

As a result of recent intensive analytical and experimental research, vibration controls of tuned mass damping system (TMD) from passive control systems used in buildings are gaining more acceptance not only in the design and components of new structures, but also in strengthening the resilience of existing structures against dynamic effects such as wind, earthquake and human activities. Tuned mass damping system (TMD) aim to attenuate the vibrations of a structure under earthquake or wind excitation by tuning the device's properties to control the structure's specific resonance frequencies.

In this thesis, the use of tuned mass damping system (TMD), which is one of the passive damping systems that is widely used in practice for building type structures was investigated with the optimal location of single and double tuned mass damping system for vibration control under ground motion excitation, including asymmetrical buildings with torsional irregularity. The systematic determination of motion direction and system parameters and vibration control were investigated. First, the modal parameters of the target building structure are extracted from its ETABS finite element model. The optimum position of the single and double tuned mass damping system was determined based on the controlled mode shapes and both the modal participant mass ratio and the modal direction factor. Then, the physical properties of the mass dampers, which are mass, stiffness and damping parameters, as well as its position will be determined as optimum for reducing angular vibration caused by torsional irregularity. In the optimization, numerical iteration process will be used by using the Jaya algorithm, one of the meta-heuristic methods. The optimal parameters of the single and double tuned mass damping systems are calculated by minimizing the displacement values under earthquake effects for the target building with and without a single and double tuned mass damping system. To evaluate the control effectiveness, the response of the building with and without single and double tuned mass damping systems was compared. Analysis results obtained from a single-storey exemplary building model and a 10-storey real building show that the proposed double tuned mass damper system is highly effective in reducing floor vibration, floor shear force and elapsed vibration time due to earthquake warnings to increase both structural safety and residential comfort. In addition, it was concluded that the torsional effect should be considered in determining the optimum planar position of the double tuned mass damping system, which is equivalent to the mass increase of the double tuned mass damping system, thus increasing the control efficiency for asymmetrical structures.

December 2021, 191pages.

Keywords: Passive control, tuned mass damping system, asymmetrical structures, dynamic analysis, time history analysis, ETABS, MATLAB

1. GİRİŞ

Yapısal tasarımda, yapının yıkılmasını önlemek için binaların yerçekimi yüklerinin yanı sıra deprem ve rüzgâr uyarılarından kaynaklanan yanal yüklere dayanması gerekmektedir. Depremler en zararlı doğal afet türlerinden biridir. Yakın zamanda büyük kayıplara neden olan son büyük depremler, binaları ve apartman sakinlerini deprem uyarılarının felaket doğasından korumanın muazzam öneminin altını çizmiştir. Örneğin, 1976'da Çin'in Tangshan kentinde 7.8 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir ve 400.000'den fazla kişi yaşamını yitirmiştir; 1993'te Hindistan'ın Deccan Yaylası Kailari kasabasında 6.4 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş ve yaklaşık 30.000 kişi yaşamını yitirmiş veya kaybolmuştur; 1994'da ABD'nin Kaliforniya eyaletindeki Los Angeles şehrini etkileyen 6.7 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş ve 57 kişi yaşamını yitirmiş, 8700'den fazla kişi yaralanmıştır; 1995'da Japonya'nın batısındaki Kansai bölgesinin Kobe kentinde 7.2 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş ve 6200 kişi yaşamını yitirmiştir; 1999'da Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nin Kocaeli/Gölcük İzmit'te 7.4 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş, 15.000'den fazla kişi yaşamını yitirmiş ve 20.000'den fazla kişi yaralanmıştır. 1999'da Tayvan'da 7.6 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş, 2100'den fazla kişi yaşamını yitirmiştir. 2004'te Endonezya'da 9.0 büyüklüğünde deprem meydana gelmiş. Tsunami adı verilen dev dalgalar bölgedeki tüm sahil şeridini etkilemiş, 250.000'den fazla kişi yaşamını yitirmiştir. 2006'da Endonezya'nın Java Adası yakınlarında 7.7 büyüklüğünde deprem meydana gelmiş. Sahil şeridindeki evler dev dalgalardan ağır hasara uğramış. Yaklaşık iki saat sonra da 6.1 büyüklüğünde bir artçı sarsıntı meydana gelmiş ve 650'den fazla kişi yaşamını yitirmiştir.

Ayrıca, belirli durumlarda insan konforu veya yüksek hassasiyetli ekipmanların korunması için düşük seviyeli titreşim gereklidir. Bu gibi durumlarda ya yer değiştirme tepkileri ya da mutlak ivme tepkileri küçük tutulmalıdır. Güvenlik amacıyla, genel olarak, yapıların toplam yer değiştirmesi ve katlar arası ötelemeler sınırlandırılmalı, buna karşın insan konforu için mutlak ivme küçük tutulmalıdır.

Çok sayıdaki deprem hasarı araştırması, burulma tepkisinin yapının deprem hasarının önemli nedenlerinden biri olduğunu göstermektedir. Örneğin, 1985'teki Michoacan depreminde,

yapıların kütle ve rijitliğinin eşit olmayan dağılımından dolayı Mexico City'deki binaların yaklaşık %15'i ciddi şekilde hasar görmüş veya yıkılmıştır. Buna ek olarak, Tayvan'daki Eylül 1999 Chichi depreminde, birçok asimetrik tuğla ev ve betonarme çerçeve yapısı da belirgin burulma düzensizliği nedenliye hasar görmüştür.

Günümüzde sosyal ekonomi ve ileri teknolojilerin hızlı gelişmeleriyle birlikte, şehirlerdeki artan nüfus yoğunluğu ve kısıtlı arsa alan kullanımı, düşük sönümleme değerine sahip yüksek binalar ve kuleler gibi esnek yapıların büyük bir hızla çoğalmasına yol açmaktadır. Oldukça esnek olan bu yapıların tasarımı, dış tahriklere karışı duyarlılığı arttırmaktadır. Bu nedenle, esnek yapılar kuvvetli rüzgâr veya deprem yer hareketleri altında aşırı titreşime maruz kalmaya elverişlidir. Bu tür esnek yapıları şiddetli depremler ve kuvvetli rüzgâr gibi dinamik yükler altında önemli hasarlardan korumak, dinamik tepkilerin neden olduğu titreşimleri azaltmak ve yapıların yer değiştirme ve hızlanma tepkilerini kontrol etmek için birçok titreşim kontrol sistemi geliştirilmiştir. Dünya çapında, bu titreşim kontrol sistemleri inşaat mühendislik alanında önemli bir konu haline gelmiştir.

Yapısal titreşim kontrol sistemleri, deprem yer hareketi sürecinde fay hatlarının kırılmasıyla oluşan enerjinin yapı elemanları tarafından sönümlemesi fikrinden yola çıkarak geliştirilmiş yöntemlerdir. Deprem veya rüzgâr tarafından üretilen yapısal titreşimlerin kontrolü, rijitlik, kütle, sönümleme veya şekil değiştirme gibi çeşitli yollarla pasif veya aktif karşı kuvvetler sağlayarak yapılabilir. Bugüne kadar, bazı yapısal kontrol yöntemleri başarıyla kullanılmıştır ve yeni önerilen yöntemler, uygulamaların genişletilmesi ve verimliliğin arttırılması imkânı sunmaktadır.

Yapısal titreşim kontrol sistemlerinin temel prensibi, yapıya zarar vermeden yapıya katı veya sıvı sönümleyiciler ekleyerek deprem kuvvetlerini karşılamaktır. Binanın tabanına veya içine yerleştirilen ek elemanlar ile yapıyı deprem etkilerine karşı korumaktır.

Belirli bir titreşim kontrol cihazının seçimi, verimlilik, sıklık ve ağırlık, sermaye maliyeti, işletme maliyeti, bakım gereksinimleri ve güvenlik gibi bir dizi faktör tarafından yönetilir.

Dinamik tehlikeleri azaltmak için kullanılan yapısal kontrolün, inşaat mühendisliğinde uzun ve başarılı bir geçmişi vardır. Deprem ve şiddetli rüzgâr yüklerinden kaynaklanan titreşimleri azaltma konusundaki geleneksel yaklaşım, yeterli dayanım ve deformasyon kapasitesine sahip süneklik düzeyi yüksek yapılar inşa etmektir. Dayanıklılık-Süneklik kombinasyonunun

sağlanmasına dayanan bu yaklaşım, belli sayıda yapısal veya yapısal olmayan bozulmaları kabul ederek, kuvvetli rüzgâr veya sismik hareket yüklerini nihai yükler olarak kabul eder. Deprem veya rüzgârların neden olduğu yapısal titreşimlerin kontrolü, rijitlik, kütle, sönüm veya şekil değiştirmelerin pasif veya aktif kuvvetler sağlanmasıyla yapılabilir. Gönümüzde, pek çok yöntem başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kabul edilen gerçek, yeni yapıların tasarlanmasında ve mevcut yapıların deprem ve rüzgâr etkilerine karşı güçlendirilmesinde yapısal kontrolün çok önemli olmasıdır.

Yapısal kontrol, mekanik ve havacılık mühendisliğinde uzun ve başarılı bir geçmişe sahiptir. Ancak, inşaat mühendisliği alanında, farklı bir geçmişe sahiptir. Bina ve sivil yapılar genellikle şiddetli deprem yer ivme hareketlerine ve büyük belirsizlikleri olan rüzgâr yük etkilerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yapısal kontrol teorisinde ve gerçek yapılara uygulanmasında bu belirsizliklerin dikkate alınması gerekmektedir (Izuru, 2009). Deprem uyarılarına maruz kalan inşaat mühendisliği yapılarının dinamik tepkisi, enerji dağıtım cihazları gibi pasif kontrol sistemleri kullanılarak azaltılabilir. Bu sistemlerin aktif ve yarı aktif kontrol sistemlerine göre avantajı, herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymamalarıdır, bu nedenle oldukça güvenilir olmaları ve en az bakım gerektirmeleri gerçeğidir.

Pasif yapısal kontrolün geliştirilmesinin erken tarihlerinde, sıradan binalara ek sönümleyicilerin yerleştirilmesi temel amaçtı. Ancak, çeşitli sönümleyici sistemlerinin kapsamlı gelişmelerinden sonra, başka bir hedefin ek pasif sönümleyicilerin akıllı ve etkili kurulumunun geliştirilmesine yönelik olduğu doğal görünmektedir. İlave pasif sönümleyicilerin akıllı ve etkili kurulumuna yönlendirilmiş olması ilham verici motivasyon olsa da optimal pasif sönümleyici yerleşimi üzerindeki araştırmalar çok sınırlı olmuştur. Ancak ilave sönümleyicilerin optimum yerleşimi üzerine birçok araştırmalar yapılmıştır. Constantinou ve Tadjbakhsh (1983), yatay rastgele deprem hareketlerine maruz kalan bir kesme binasının ilk katına yerleştirilen bir sönümleyici için optimum sönümleme katsayısını elde etmişlerdir. Gurgoze ve Muller (1992), öngörülen doğrusal çok serbestlik dereceli (MDOF) sistemde tek bir viskoz sönümleyici için en uygun yerleşimi ve optimal sönümleme katsayısını bulmak için sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Zhang ve Soong (1992), belirli kat rijitliklerine sahip olan bir bina için viskoz sönümleyicilerin uygun değer konumunu bulmak için sismik bir tasarım yöntemi önermişlerdir.

Büyük inşaat mühendislik yapıları için, deprem nedeniyle yapısal tepkinin azaltılması için yeterli sayıda sönümleyici yerleştirilmesi gerekmektedir ve bu sönümleyicilerin performansı yapılardaki konumlarına bağlıdır. Pasif sönümleyicilerin yerleştirilmesi için çok sayıdaki konum yerlerinden az sayıdaki konum yerinin seçimi tipik olarak doğrusal olmayan kısıtlı bir optimizasyon problemidir. Bu problem ya basit sezgisel arama yaklaşımları ya da entegral optimizasyonu ile çözülebilir.

Deprem uyarılarına maruz kalan yapıların sismik tepkisi, mevcut çeşitli pasif enerji dağıtım cihazlarından herhangi biri dâhil edilerek etkili bir şekilde azaltılabilir (Soong ve Dargush, 1997). Doğrusal çok katlı binalar için sönümleme katsayısının optimal parametre değerleri ve kapasitesi ile ilgili çalışmalar çoktur. Tsuji ve Nakamura (1996), bir dizi spektrum uyumlu depreme maruz kalan bir kesme yapı modeli için en uygun kat rijitlik dağılımını ve en uygun sönümleyici dağılımını bulan bir algoritma önermişlerdir, ancak dinamik hesaplama yapmak ve sönümleme katsayılarının üst sınırı gibi yapay kısıtlamaları dâhil etmek gerektiğinden daha detaylı hesaplama yöntemleri gerektirdiğini önermişlerdir. Gluck, Reinhorn ve diğ. (1996), performans maliyet fonksiyonunu en aza indiren Lineer kuadratik regülatör (LQR) kullanarak en uygun kontrol teorisine dayanan tamamlayıcı sönümleyicilerin ve rijitliğin tasarımı için bir yöntem önermişlerdir. Ancak algoritma beyaz gürültü girişi varsayımı altında geçerli ve yalnızca ilk mod etkilerinin baskın olduğu sistemler için etkili olduğunu öngörmüşlerdir. Takewaki (1997), sabit rastgele uyarılara verilen ortalama kare tepkilerinin toplamının, toplam rijitlik ve sönümleme kapasitesi üzerindeki kısıtlamalara maruz bırakılarak en aza indirildiği bir rijitlik-sönümleyici eşzamanlı optimizasyon prosedürü önermiştir.

Yukarıda belirtilen tüm yöntemler, en uygun bir sönümleyici konfigürasyonuna yol açsalar bile pratik değildir, çünkü pratik çalışmalar mühendisler tarafından rutin olarak kullanılacak kadar basit değildirler. İdeal bir yöntem pratik olmalı ve kullanılacak farklı sönümleyici boyutlarının sayısını kontrol edebilmelidir. Yöntem, aynı zamanda, çalışma sonucunda meydana gelen sönümleyici konfigürasyonunun (yani ilave sönümleyicilerin boyutu ve yeri), belirli bir performans hedefine ulaşmak için gereken toplam ilave sönümleme miktarını en aza indirgemesi açısından da verimli olmalıdır.

Tarihsel açıdan bakıldığında, birçok araştırmacı taban izolasyon, enerji dağıtma cihazları (Örneğin viskoz sönümleyiciler, sürtünme sönümleyicileri vb.) ve ayarlı kütle sönümleyici gibi pasif sönümleyicileri kullanarak, kabul edilebilir genliğine sahip yapıların titreşim

hareketlerini kontrol etmek için pratik uygulamalar gerçekleştirmiştir (Soong ve Dargush, 1999; Chang, 1999). Tipik olarak, yüksek binalar, hastaneler ve uzun açıklıklı köprüler gibi kritik sivil altyapılarda rüzgâr ve deprem etkilerinden oluşan titreşim tepkilerini azaltmak için bu tür geleneksel olmayan sönümleyici sistemler uygulanmıştır. Ayrıca, bu tür pasif sönümleyici cihazların kullanımı, çağdaş güvenlik kriterlerini karşılamak için mevcut tarihi yapıları güçlendirmek ve şiddetli deprem etkilerinin ardından hasarlı yapıları güçlendirmek için yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu pratik uygulamalar, yeni ve mevcut hasarlı yapılar için pasif titreşim kontrolünün önemli ve aktif araştırma alanını sürdürmüştür. Bu sistemler harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymadığından, diğer gelişmiş kontrollerle kıyasla uygulanması ve tasarımı daha kolay olmaktadır.

1.1.ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın temel amacı, tekli ve çift ayarlı kütle sönümleyicilerinin sismik uyarım etkisi altındaki yapıların dinamik tepkisi üzerindeki etkisini tespit etmek ve binanın yer değiştirmesini azaltmak için sönümleyicinin kütle dağılımı ve sönüm oranı, ayarlı kütle sönümleyicisi (TMD) sayısı gibi uygun değer parametreleri belirleyerek çok katlı bina için etkili birçok ayarlı kütle sönümleyici önermektir.

Bu çalışmada, deprem yer hareketi altındaki tek ve çok katlı burulma düzensizliği bulunan kesme veya perde-çerçeveli binalar için optimum kütle sönümleyicisi değerleri elde edilmiştir. Kütle sönümleyicisinin fiziksel özellikleri olan kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin yanında konumu da burulma düzensizliğinden oluşan açısal titreşimin azaltılması için optimum olarak belirlenmiştir. Bu tasarım değişkenleri, Jaya algoritması kullanılarak optimize edilmiştir, amaç fonksiyonu olarak tanımlanan yapının yer değiştirme değerlerini en aza indirebilen optimum tasarımı parametreleri incelenmiştir.

1.2.TEZİN GENEL YAPISI

Mevcut tez çalışması, esas olarak Genel Kısımlar, Malzeme ve Yöntemler, Bulgular ve Sonuç bölümünden ibaret olup: Tezin 2. Bölümünün Genel Kısımlarında, öncelikle kontrol sistemlerin sınıflandırması sonra ise bu çeşitli pasif kontrol sistemleriyle ilgili genel açıklamalar ve özellikleri kısaca bayan edilmiştir. Ayrıca pasif kontrol sistemleriyle ilgili geniş literatür araştırması yapılmıştır.

Tezin 3. Bölümün Malzeme ve Yöntemler kısmında, tekli ve çoklu serbestlik dereceli sistemlerin kontrolünde kullanılan pasif kontrol yöntemleri, meta-sezgisel algoritmalar ve planda düzensizlik bulunan çok katlı binalarda uygulanacak tekli TMD ve çift TMD'lerin optimizasyon yöntemleri araştırılmıştır.

Tezin 4. Bölümünde, düzensiz olarak seçilen tek katlı burulma düzensizliği bulunan örnek yapının ve 10 katlı perde-çerçeveli yapının ETABS analiz programı ile modeli oluşturularak, tekli TMD ve çift TMD sönümleyicileri yapının en uygun konumlarına yerleştirilerek optimum olarak seçilen kritik deprem yükleri altında zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır ve yapılan analiz sonuçlarından elde edilen bulgular grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

Tezin 5. Bölümünde, yapılan analizler üzerindeki sonuçlardan yola çıkarak, tekli ve çift TMD'lerin etkinlikleri incelenerek, planda burulma düzensizliği oluşan yapılarda uygulanan TMD sonuçlardan ileri yönelik araştırmalar hakkında öneriler ortaya konulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde sivil yapılarda kullanılan kontrol sistemlerinin çeşitleri, her bir cihaz tipinin temel prensibi ve özellikleri, pasif kontrol sistemlerinden ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanımı ve optimizasyonu kısaca açıklanmış ve konularla ilgili geniş literatür taraması aktarılmıştır. Ayarlı kütle sönümleyici parametrelerinin optimizasyonuyla ilgili çalışmalar hakkında sonraki bölümlerde ayrıntılı bilgi verilecektir.

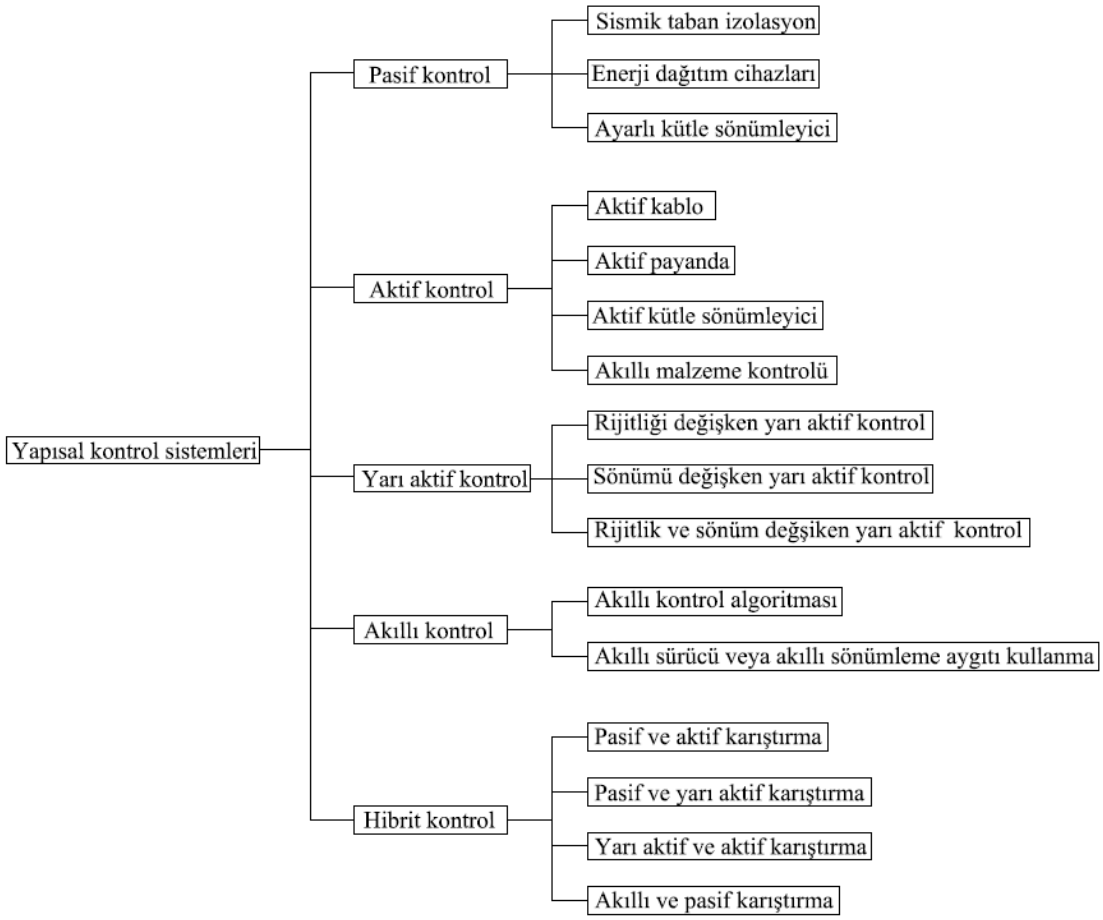
2.1.YAPISAL KONTROL SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Yapısal kontrol sistemleri, inşaat mühendisliği yapılarının çeşitli dinamik yüklemelere verdikleri tepkileri hafifletmek için yaygın olarak kullanılmakta ve gelecekte kullanımlarının artması beklenmektedir. Literatürde Hareket Kontrol Sistemleri olarak da adlandırılan yapısal kontrol sistemleri, yapıların deprem, rüzgâr, trafik ve diğer servis yükleri gibi farklı dinamik yüklere karşı tepkilerini azaltmak için kullanılabilir.

Deprem veya rüzgâr yükleri, yapısal sistemlerde geçici titreşimlerin oluşmasına neden olabiliyor. Büyük hasarlara neden olabilen bu titreşimlerin etkisini en aza indirmek için yapının maruz kalabileceği olası darbe yükleri dikkate alınarak gerekli kontrol sistemleri tasarlanmalıdır. Bu titreşimlerin kontrolü rijitlik, kütle, sönüm gibi parametrelerin düzeltilmesi aktif veya pasif kuvvet gibi çeşitli temel yollarla yapılabilir. Bugüne kadar, bazı yapısal kontrol yöntemleri başarıyla kullanılmıştır ve yeni önerilen yöntem ve uygulamaların genişletilmesi, titreşim kontrol verimliliğin arttırılması imkânı sunmaktadır (Housner ve diğ. 1997).

Depremlerin neden olduğu titreşimlerin kontrolü rijitlik, sönüm ve kütlenin düzenlenmesi şeklinde yapılmaktadır. Kontrol sistemlerinin temel ilkesi, yapıya katı veya sıvı sönümleyiciler yerleştirerek deprem kuvvetlerinin karşılanmasını yapıda hasar oluşturmadan gerçekleştirmektir. Yapının tabanına veya içine yerleştirilen ilave elemanlar ile deprem etkilerine karşı yapıyı korumak amaçlanmıştır. Yapısal kontrol sistemleri, herhangi bir harici kontrol merkezi tarafından karşı kuvvetin sağlanıp sağlanmadığı gibi kriterlere göre pasif, aktif, yarı aktif, akıllı kontrol ve hibrit kontrol olarak beş sınıfta tanımlanabilir. Tarihsel bakış açısına göre, taban izolasyon, pasif enerji dağıtım cihazları ve ayarlanmış kütle

sönümleyicileri olarak bilinen pasif kontrol teknikleri ilk uygulayanlardandır. Birçok araştırmacılar, bu pasif tekniklerle donatılmış yapıları incelemiş ve birçok ülkede hali hazırda birçok pratik uygulamaları gerçekleştirilmiştir (Soong ve Spencer 2002; Spencer ve Michael 1997). Taban izolasyon cihazları ve pasif enerji dağıtım cihazları harici uyarımlar ve yapısal tepkilere uyum sağlayamadıkları için sınırlı zekaya sahip olmalarına rağmen, aktif, yarı aktif ve hibrit kontrol cihazlarının geliştirilmesi için bir temel oluşturmuşlardır (**Şekil 2.1**).



Şekil 2.1: Yapısal kontrol sistemlerinin sınıflandırılması.

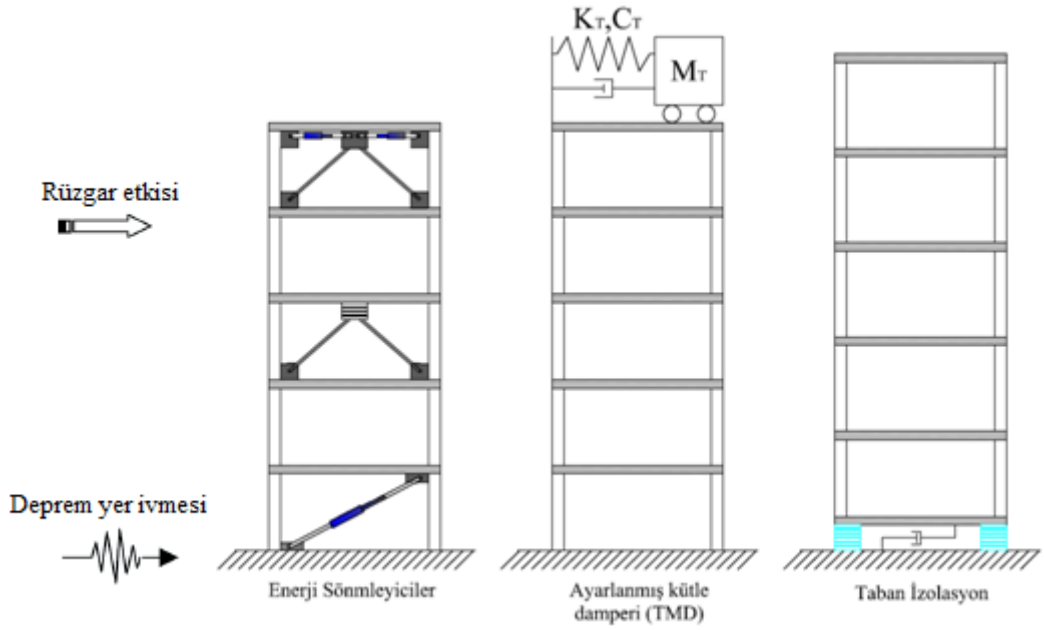
2.2.PASİF KONTROL SİSTEMLERİ

Pasif enerji sönümleyicileri, yapıya ek olarak yerleştirilen özel elemanlar sayesinde, şiddetli rüzgâr ve deprem gibi dinamik dış etkilerin yapıya verdiği enerjiden dolayı oluşan kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri istenilen düzeyde kontrol etmek için geliştirilen mekanik cihazlardır. Pasif kontrol sistemlerinin hesabı kolay ve maliyeti düşüktür, harici bir güç kaynağına ihtiyacı yoktur. Dolayısıyla deprem esnasında oluşabilecek güç kesintisinden etkilenmedikleri gibi, dışarıdan enerji verilmediği için yapıda stabilite sorununa neden

olmazlar. Düşük maliyet, yüksek güvenirlik ve kolay uygulamaları ile iyi kontrol performans sağlayan pasif titreşim kontrolü, çeşitli mühendislik uygulamalarında her zaman çok önemli olmuştur.

Pasif kontrol sistemleri, sönüm, rijitlik ve dayanıklılığı arttıran sismik tehlike azaltma ve eski veya dayanaksız yapıların iyileştirilmesi için kullanabilen çeşitli malzemeler ve cihazları kapsamaktadır (Soong and Dargush, 1997; Constantinou ve diğ., 1998; Hanson and Soong, 2001). Genel olarak, bu sistemler yerleştirilen yapı sistemlerinde enerji dağılımını arttırma kapasiteleri ile karakterize edilirler.

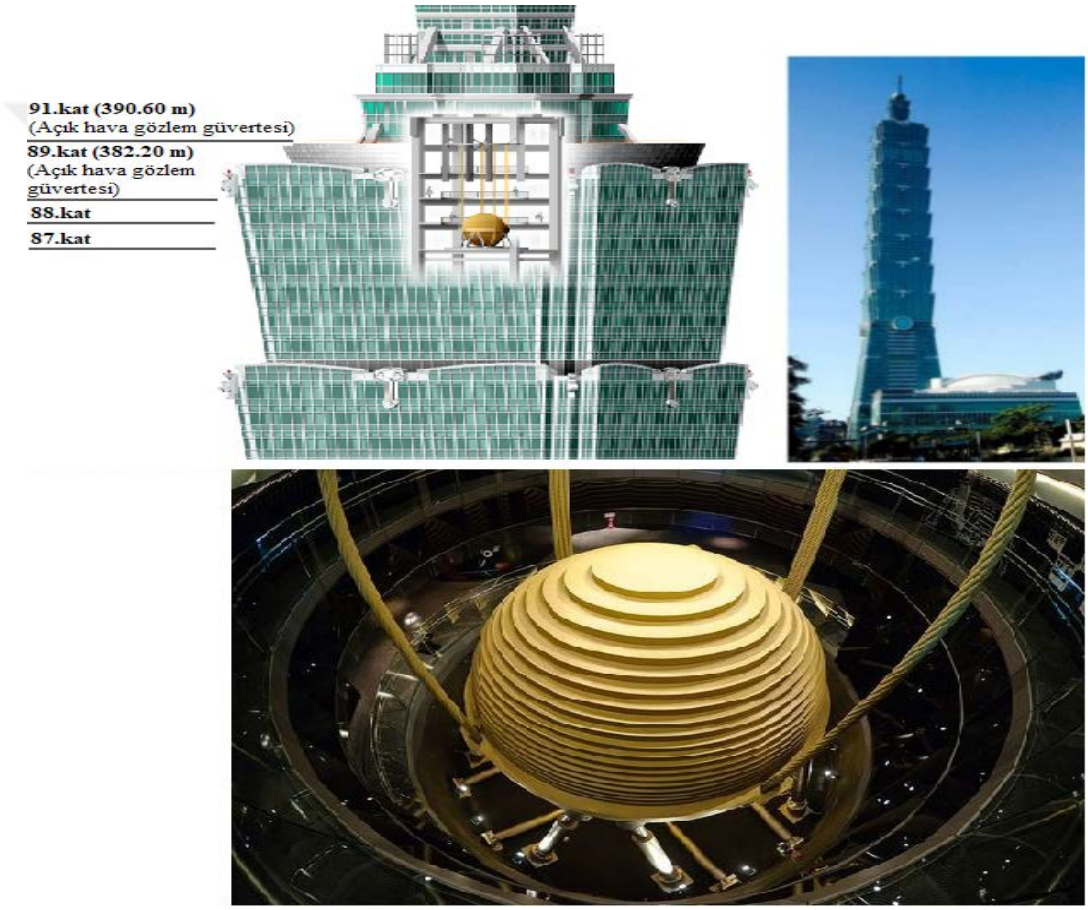
Pasif kontrol, yapının ilk tasarımında dikkate alınan viskoz-elastik malzemelerden yapılmış kütle sönümleyicileri eklenerek oluşturulur. Bina tasarımında pasif kontrol, alt katlara yapılan rijitlik ve kütle değişiminin azalması ya da taban izolasyon tekniği kullanılarak alt katın yatay rijitliğinin üst katlara göre daha fazla tasarlanması ve böylece üst katlara aktarılan kuvvetlerin azaltılması şeklinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.2: Pasif kontrol sistemlerinin yapıdaki farklı yerleşimleri.

Pasif kontrol sistemleri, sismik taban izolasyon, pasif enerji sönümleyicileri ve ayarlanmış kütle sönümleyici (TMD) sistemleri olarak üç başlık altında toplanabilir (**Şekil 2.2**). Pasif enerji sönümleyiciler, sisteme eklenen cihazlar sayesinde sistemin enerji yutma kapasitesini arttırır. Öte yandan sismik izolasyon sistemleri, yapıyı zemin titreşiminden izole etmek için genellikle temel ile zemin arasına yerleştirilen cihazlardır. Ayarlı kütle sönümleyiciler,

yapının dinamik davranışını istenildiği gibi değiştirerek deprem etkilerinin azaltılmasını sağlarlar. Bu sönümleyiciler, yay ve sürtünme elemanları ile uyumlu, frekansa bağlı bir hareket oluşturan ve yapının sürtünmesini artıran ikincil bir ağırlık içermektedir. **Şekil 2.3** 'te görüldüğü gibi, Taipei 101 Dünya Finans Merkezi binası gibi birçok gerçek yapılara uygulanan ayarlı kütle sönümleyicilerinin rüzgar etkisindeki yüksek yapılarda başarılı olduğu kanıtlanmıştır.

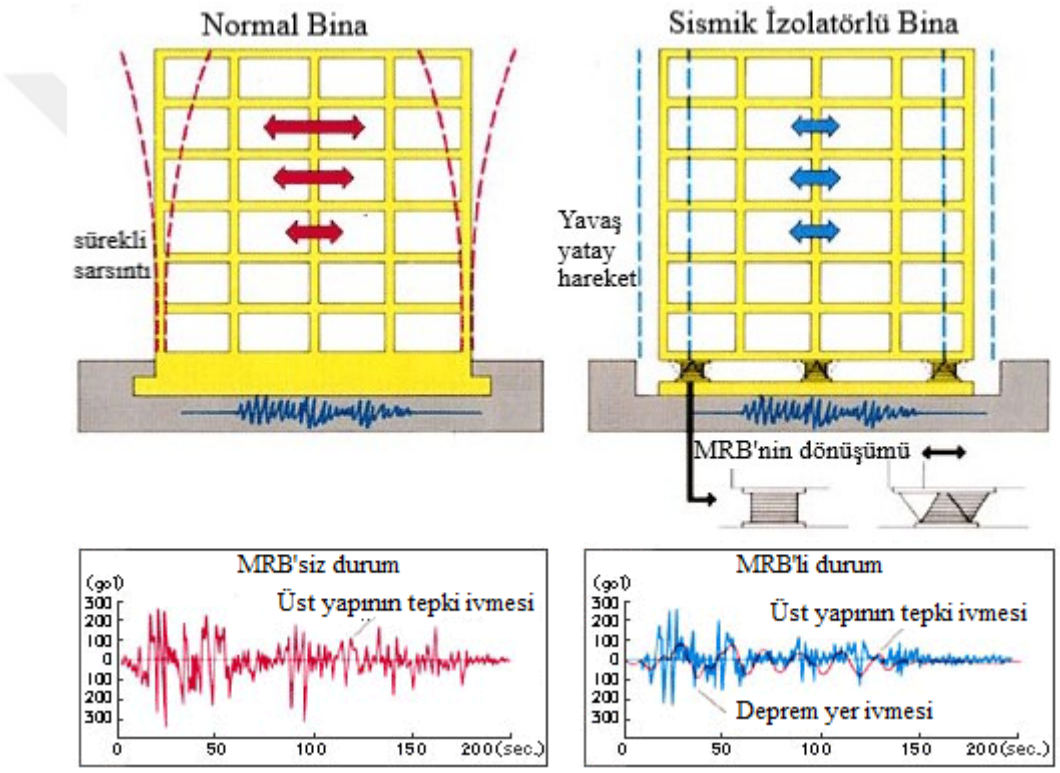


Şekil 2.3: Sarkaç ayarlı kütle sönümleyici (Taipei 101 Dünya Finans Merkezi).

2.2.1. Sismik Taban İzolasyon

Deprem hareketinin yatay bileşeni yapıya en büyük zararı vermektedir. Bina içerisine taban izolasyon sistemleri yerleştirilerek, yatay ivmeyi azaltmak için üst yapıyı temelden ayırarak zeminin hareketine izin verirler. Sismik izolasyon sistemleri kullanıldığında yapının frekansı azalır, başka bir deyişle periyodu artar. Periyodun artması yatay yer değiştirmelerin büyümesine neden olur. Bu yer değiştirmelerin büyük bir bölümü izolatörlere iletilir. Bir

başka deyişle yapıda küçük yatay yer değiştirmelerin, sismik izolasyonda ise büyük yatay deplasmanlar oluşturur. Sistemde izolatörlerin bulunduğu kısımda meydana gelen büyük yer değiştirmeler aracılığı ile enerjinin sönümü sağlanır (**Şekil 2.4**). Katlar arasındaki yer değiştirmeler küçük kaldığı için yapı deprem sırasında rijit bir davranış gösterir. Taban izolasyon sistemleri, göreceli kat ötelemelerini ve kat ivmelerini aynı anda azaltmak için en uygun seçenektir. Ancak binanın depreme dayanıklılığını artırmak için binayı daha rijit hale getirdiğimizde, yer hareketindeki artıştan dolayı kat ivmeleri artarken bağıl kat ötelemeleri azalmış olur.



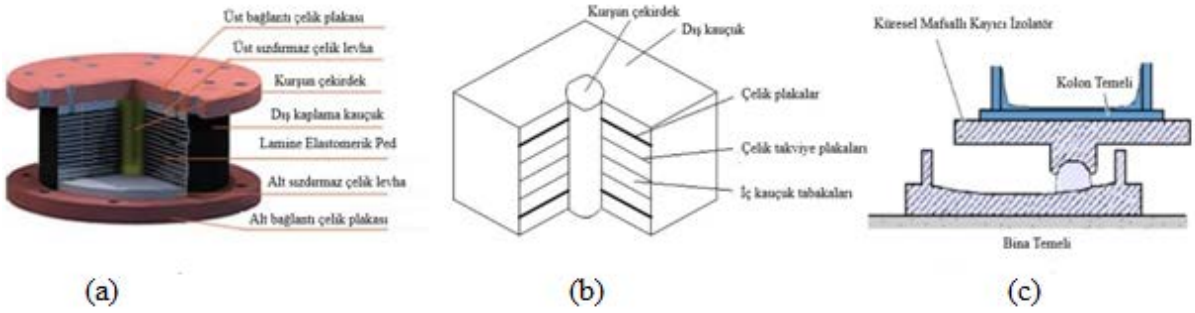
Şekil 2.4: Normal bina ve taban izolatörlü binanın sismik davranışı (Kamrava, 2015).

Taban izolasyon sistemi, potansiyel olarak tehlikeli yer ivme hareketinden gelen yüksek frekanslı enerjiyi filtreleyen düşük yanal rijitliğe sahip belirli bir malzemeden oluşan esnek bir taban oluşturarak depremin etkilerini hafifleten bir tekniktir. Taban izolasyonu uygulaması yapılmış yapının birinci dinamik modu sırasında yer değiştirme sadece izolasyon sisteminde ortaya çıkmaktadır. Üstyapı neredeyse tamamen rijit davranış göstermektedir. Yapıda yer değiştirme üreten üst modlar, birinci moda dolayısıyla yer hareketine ortogonaldır. Bu üst modların harekete katılımı düşüktür. Böylelikle yüksek frekanslardaki yer hareketinin büyük enerjisi yapıya aktarılmamaktadır. Düşük ve orta katlı bina yapıları nispeten yüksek frekanslarda olduğundan, taban izolasyon cihazları bu tür binalar için etkili bir şekilde sismik

koruma sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu tür cihazların temel amacı, üst yapının deprem enerjisini sönümlemesini önlemektir, böylece ivmeler ve göreceli kat ötelemeleri dâhil yapısal tepkiler önemli ölçüde azaltır. Temel izolasyon tekniği kullanılarak yapıların depremden korunması, aşağıdaki koşulların yerine getirilmesiyle genel olarak uygun bulunmaktadır (Deb, 2004):

- Zemin, uzun periyodu yer hareketi baskınlığı oluşturmamalıdır.
- Yapı, yeterince yüksek kolon yükü ile oldukça alçak olmalıdır.
- Saha, 200 mm veya daha fazla mertebede yatay yer değiştirmelere izin verilmelidir.
- Rüzgâr nedeniyle yanal yükler yapının ağırlığının yaklaşık %10'undan az olmalıdır.

Modern sismik taban izolasyon kavramı 1970'lerin başında ortaya çıkmıştır, ancak taban izolasyon binaların tasarımı ve inşası 1980'lerin sonuna kadar katlanarak artmıştır. Taban izolasyon sistemlerinde kullanılan izolatör tipleri, şekilleri, kullanıldıkları yer, büyüklükleri ve yapıldıkları malzeme bakımından birbirlerinden farklıdırlar (**Şekil 2.5**).



Şekil 2.5: (a) Lamine kauçuk izolatör, (b) Kurşun çekirdekli izolatör, (c) Küresel kayıcı izolatör (Soong, 2007).

Sismik izolasyon sistemlerini tümü ile kategorize etmek gerekirse aşağıdaki gibi bir sınıflandırma yapılabilir (Özpalanlar, 2004):

a) Kauçuk Esaslı Sistemler
   - ❖ Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk İzolatörler (LDRB)
   - ❖ Kurşun Çekirdekli İzolatörler (LRB)
   - ❖ Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDNR)

b) Kayma Esaslı Sistemler
   - ❖ Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS)
   - ❖ Esnek Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi (R-FBI)

- ❖ Fransız Elektrik Sistemi (EDF)
- ❖ EERC Birleşik Sistemi
- ❖ TASS Sistemi

2.2.2. Enerji Sönümleyici Cihazlar

Tüm titreşimli yapılar, iç gerilme, sürtünme, çatlama, plastik deformasyonlar ve benzeri nedenlerinden dolayı enerjiyi dağıtırlar. Enerji yayma kapasitesi ne kadar büyük olursa, titreşim genliği o kadar küçük olur. Bazı yapılar kritik sönümlemenin %1'i kadar çok düşük sönümlemeye sahiptir ve sonuç olarak orta şiddetli güçlü depremler için bile büyük titreşim genliklerine yol açarlar. Enerji dağıtım kapasitesini artırma yöntemleri, titreşim genliklerinin azaltılmasında çok etkilidir. Sönümlemeyi arttırmak için birçok farklı yöntem kullanılmış ve önerilmiştir. Sönüm ve rijitliği arttırmak için bir dizi malzemeyi kapsayan pasif enerji dağıtma cihazları, yapısal titreşimi azaltmak için kullanılabilir. Birkaç on yıldır bu tür pasif cihazların geliştirilmesi için araştırmacılar ciddi çabalar sarf etmişlerdir (Housner ve diğ., 1997; Soong ve Dargush, 1997; Soong ve Spencer, 2002; Cheng ve diğ., 2008). Bu tür pasif cihazlar için harici güç veya yapısal tepki ölçümlerine gerek olmamasına rağmen, titreşim yükseldiğinde sönümleme kuvvetleri oluşturabilirler. Bununla birlikte, sönümleyicin kendi özellikleri nedeniyle, pasif cihazlar sadece sınırlı bir kontrol kapasitesine sahip olurlar (Xu ve He, 2017).

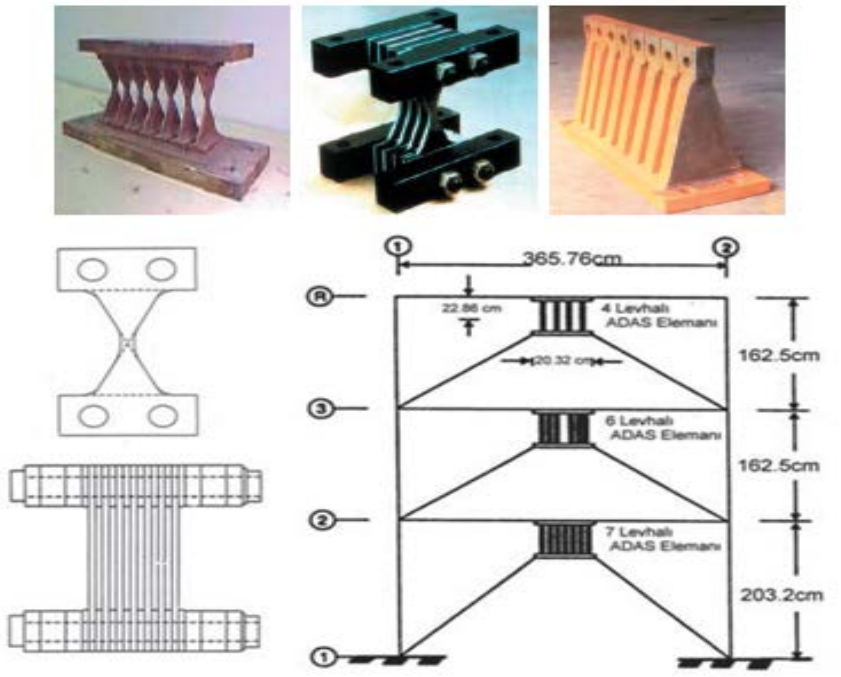
Pasif enerji sönümleyicileri, deprem ve şiddetli rüzgâr gibi dış etkilerin yapıya verdiği enerjiden dolayı oluşan kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri istenilen düzeyde tutmak için geliştirilmiş mekanik aletlerdir. Enerji sönümleyici sistemleri, Metalik sönümleyici, Sürtünmeli sönümleyici, Viskoz-Elastik (VE) katı sönümleyici, Viskoz sıvı (VF) sönümleyici, Ayarlı kütle sönümleyici (TMD) ve Ayarlı sıvı sönümleyicileri (TLD) kapsamaktadır.

a) Metalik sönümleyici

Bu tip sönümleyici, yumuşak çelik veya kurşun gibi metalik maddelerin elastik olmayan deformasyonu yoluyla yapıya etki eden deprem enerjisini dağıtırlar. Bu tip sönümleyiciler tasarlanırken iki önemli faktör göz önünde bulundurulmalıdır: akma sonrası deformasyon aralığı, sönümleyicinin erken dayanıklılığını yitirmeden çok sayıdaki yükleme döngüsüne dayanmasına izin vermek için yeterli olmalıdır ve sönümleyici tekrarlanan elastik olmayan deformasyon altında stabil histeriktik davranış sergilemelidir. Bu sistemlerin temel avantajları, uzun vadeli güvenilirlik, sıcaklık değişikliklerine bağlı duyarsızlık ve zaman

içinde çok fazla değişiklik göstermeyen özelliklere sahip olması ve ekonomik olmasıdır. Dezavantajları sınırlı sayıdaki çalışma döngüsü ve yüklemeye doğrusal olmayan tepki göstermesidir.

Bu cihazların birçoğunda üçgen veya X şekilli yumuşak çelik plakalar kullanılır, böylece verimin malzeme boyunca neredeyse eşit bir şekilde yayılmasını sağlarlar. Tipik bir X şeklindeki ve üçgen plaka sönümleyici veya ADAS (ilave sönüm ve rijitlik) cihazı, **Şekil 2.6**'da gösterilmiştir (Soong ve Spencer, 2002). Metalik sönümleyicilerin yapısal sistemlerde ilk uygulamaları Yeni Zelanda ve Japonya'da gerçekleşmiştir. Daha yeni uygulamalar arasında Meksika (Martinez-Romero, 1993) ve ABD'deki (Perry ve diğ., 1993) mevcut binaların sismik iyileştirilmesinde ADAS sönümleyicilerinin kullanılması yer almaktadır. Metalik enerji sönümleyicilerinin davranışını tam olarak anlamak için, öncelikle zamana bağlı döngüsel yükleme altında metallerin elastik olmayan tepkisini dikkate almak gerekir.

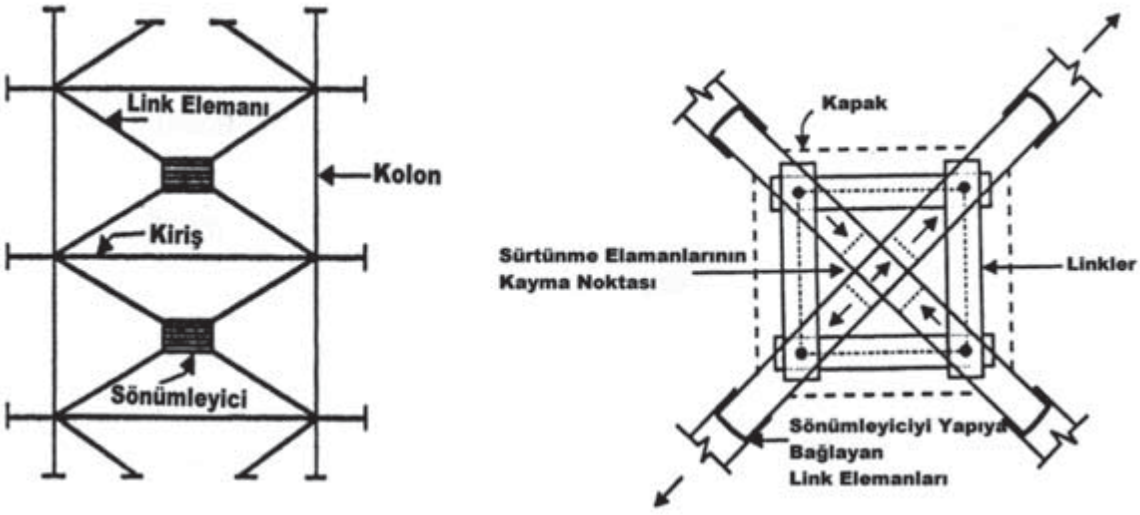


Şekil 2.6: X Şekilli ADAS metalik sönümleyicisi (Aldemir ve Aydın, 2005).

b) Sürtünmeli sönümleyiciler

Bu cihazlar, birbirlerine göre kayan iki katı cisim, yani katı kayar bir sürtünme mekanizması vasıtasıyla sürtünme üreterek enerji dağıtırlar. Kinetik enerjiyi ısıya dönüştürerek enerji dağıtmak için etkili, güvenilir ve ekonomik bir mekanizmadır. Sürtünme sönümleyicileri iyi

performans özelliklerine sahiptir ve büyük miktarda enerji yayabilir. Sönümleyicinin tahmini sürtünme tepkisinin kullanım ömrü boyunca korunmasını sağlamak çok önemlidir. Bu tepki büyük ölçüde iki katı cismin yüzeylerindeki çevresel koşullardan etkilenen koşullara bağlıdır (Marko, 2006). Sürtünmeli sönümleyicilerinin tasarımında, arzu edilen sürtünme kuvvetinin üretilmesi için birbirine göre kayabilen iki katı gövde gerekmektedir (**Şekil 2.7**). Bu sönümleyiciler, rüzgâr yükleri ve orta şiddetteki depremler altında kaymayacak şekilde tasarlanmıştır. Şiddetli sismik yükler altında, sönümleyici, birincil yapısal elemanlarda verim vermeden, daha önce tanımlanmış optimum bir yükte kaymaya başlar. Ara yüzün bileşimi, bu cihazların uzun ömürlülüğünü ve dayanıklılığını sağlamak için büyük önem taşıdığından, cihazların hizmet ömrü boyunca tutarlı bir sürtünme katsayısı sağlaması için uyumlu malzemeler kullanılmalıdır. Ayrıca, normal çalışma için, yapısal sistemlere yüksek frekanslı uyarım etkilerinin oluşmaması için çubuk kaymalarını en aza indirmek önemlidir.

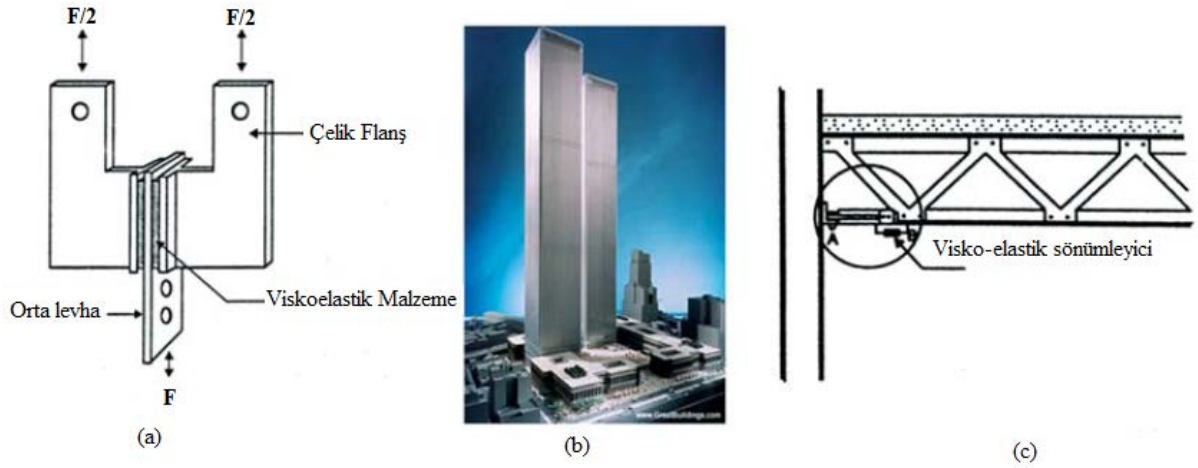


Şekil 2.7: Pall sürtünme tipi sönümleyici (Aldemir ve Aydın, 2005).

c) Viskoz-Elastik (VE) katı sönümleyici

Bu cihazlar, enerjiyi hıza bağlı bir şekilde yayan geniş bir mekanizma yelpazesini içerir, yani yer değiştirme karakteristikleri hareketin frekansına ve sönümleyicin farklı uçlarının nispi hızlarına bağlıdır. Bu cihazlardaki sönümleme kuvveti hız ile orantılıdır ve davranışları viskozdur. Yapısal uygulamalarda kullanılan viskoz-elastik malzemeler genellikle kopma deformasyonu yoluyla enerjiyi dağıtan kopolimerler veya camsı maddelerdir. Deformasyon sırasında VE malzemesi hem elastik katıların hem de viskoz sıvıların özelliklerini sergiler, ancak her tam deformasyon döngüsünden sonra orijinal şekline geri döner ve enerjiyi ısı

şeklinde dağıtır. Viskoz-Elastik sönümleyicilerinin sivil yapılarda uygulanması, rüzgâr kaynaklı titreşimi azaltmak için 1969 yılında New York'taki Dünya Ticaret Merkezi'nin ikiz kulelerinin her birine yaklaşık 10000 adet viskoz-elastik sönümleyicilerinin monte edilmesiyle başlanmıştır (Mahmoodi, 1969). Tipik bir VE sönümleyici (**Şekil 2.8**'e bkz.), çelik plakalarla bağlanmış birkaç VE tabakasından oluşmuştur.

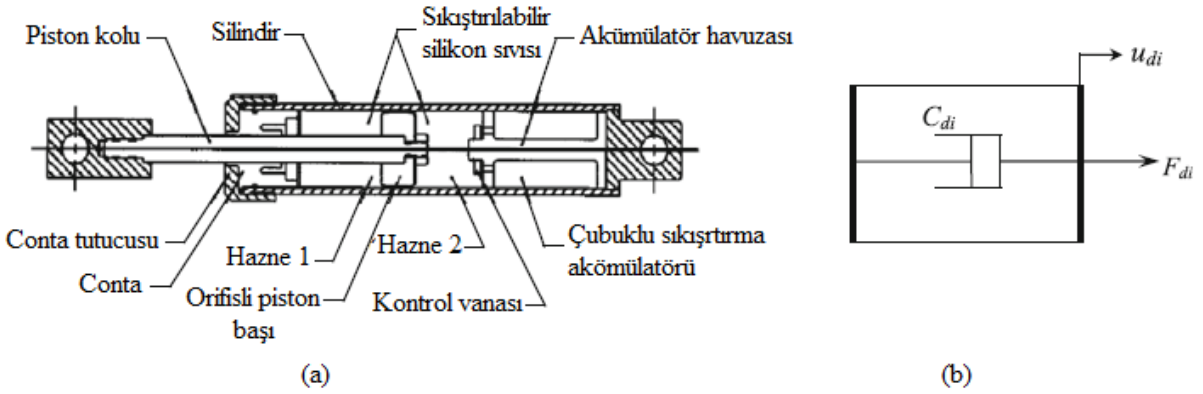


Şekil 2.8: (a) Visko-Elastik sönümleyici, (b) Dünya ticaret merkezi, (c) Dünya ticaret merkezinde uygulanan visko-elastik sönümleyicinin yerleşim detayı (Aldemir ve Aydın, 2005).

d) Viskoz sıvı (VF) sönümleyici

Bu tür sönümleyici, enerjiyi dağıtmak için sıvıların etkisini kullanmış olup, genellikle sönümleyici kutusunda bulunan silikon veya yağ bileşiği ile doldurulmuş bir dizi küçük delik içeren bir pistondan oluşur. Piston sadece sıvıyı yerel olarak deforme etmekle kalmayıp sıvıyı küçük deliklerden geçmeye zorlar (**Şekil 2.9**'a bkz.). Sonuç olarak, yüksek VF'de pistonun hareketi yoluyla enerji dağıtılır. Sıvı tamamen viskozsa, sönümleyicin çıkış kuvveti pistonun hızı ile doğru orantılı ve geniş bir frekans aralığında sönümleyici viskoz-elastik sıvı davranışı sergiler. Bu cihazların dezavantajı, enerjinin yayılmasını en üst düzeye çıkarmak için çok yüksek viskozite malzemelerin kullanılması gerektiğidir. Bu tür malzemeler hem frekansa hem de sıcaklığa bağlı davranış sergiler. Sıvı viskoz sönümleyicileri, açık bir yerine kapalı bir kap içindeki sıvıların akışı yoluyla enerji dağıtarak bu sorunu önleyen alternatif bir viskoz-elastik sıvı sönümleyicileri sınıfıdır. Pistonun hareketi sıvıyı, yerel deformasyonları indüklemek yerine küçük deliklerden geçmeye zorlayarak verimli enerji kaybına yol açar. Bu sönümleyici rijit yapılar için uygun değildir, çünkü sadece uygulanan kuvvet yüksek olduğunda etkilidirler. Viskoz-elastik sıvı sönümleyicilerin ana avantajı, sönümleyicinin

uyguladığı kuvvet yapının esnemesinden kaynaklanan gerilimlerle tamamen faz dışı olduğu için aynı anda sapma ve gerilme azaltma kabiliyetleridir (Tarek, 2015).

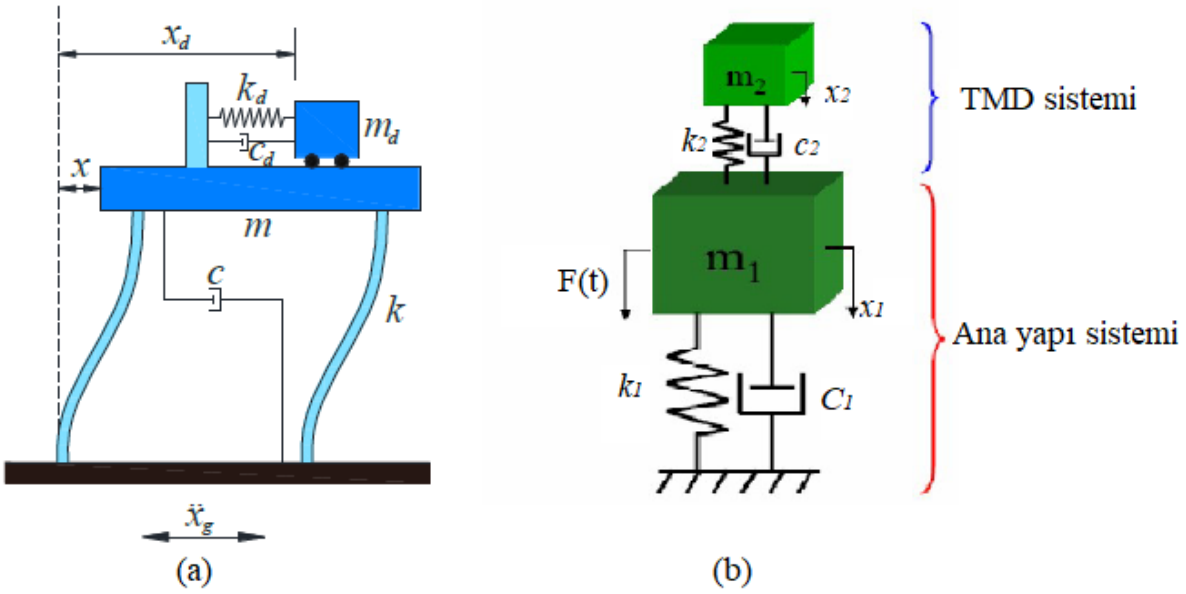


Şekil 2.9: (a) Akışkan viskoz sönümleyicin şematik diyagramı, (b) Akışkan viskoz sönümleyicin matematiksel modeli (Mevada ve Jagid, 2012).

2.2.3. Ayarlı Kütle Sönümleyici

Ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD), bir kütle, bir yay ve viskoz (yapışkan) sönümleyiciye sahip olan ve genelde yapının üstüne yerleştirilen pasif kontrol sistemidir. Yapı tek serbestlik dereceli sistemine basitleştirilmişse, titreşimi azaltmak için TMD sistemini kullanan yapının hesaplama modeli **Şekil 2.10**'daki gibi gösterebilinir. Lin ve dig. (1999) tarafından yapılan araştırma sonuçlarından: TMD sisteminin sönümleme oranı ζ ne kadar büyükse, sönümleme etkisi o kadar iyi olduğunu, TMD frekansının yapı frekansına oranı λ ve TMD kütlesinin yapı kütlesine oranı μ, TMD'li sisteminin titreşim sönümleme üzerinde bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmışlardır. Bu nedenle, TMD'li sistemi tasarlarken, en iyi sönümleme etkisini elde etmek için TMD'nin sönüm katsayısı, kütle (veya kütle oranı) ve rijitlik (veya frekans oranı) gibi tasarım değişken parametreleri kapsamlı bir şekilde düşünülmelidir.

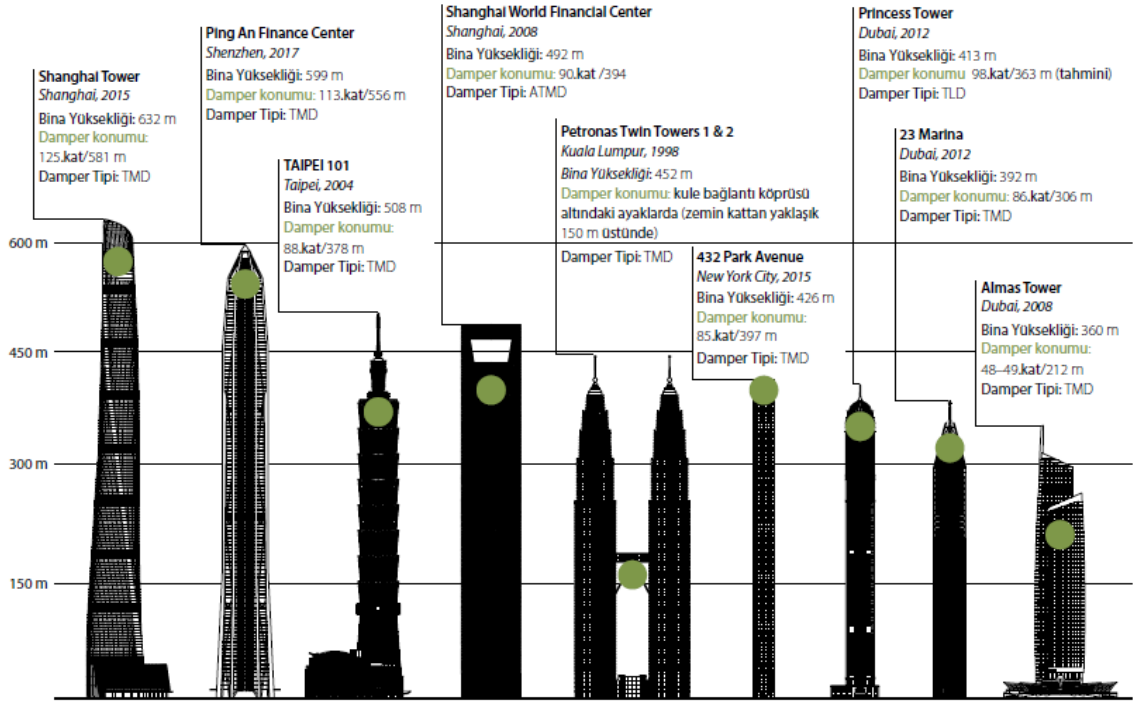
Genel olarak, deprem etkisi altındaki, kesme bina yapısının sismik tepkisine genellikle birinci mod bileşeni hâkimdir, yani yapının zemine göre maksimum yer değiştirme tepkisi yapının en üst katında meydana gelir. Bu nedenle, kurulu TMD sistemi yapının ilk mod şekline göre ayarlanmalı ve yapının sismik tepkisini kontrol etme etkisinin daha önemli bir şekilde arttırılması için TMD sistemi yapının en üst katına kurulmalıdır.



Şekil 2.10: Tek katlı yapı üzerindeki ayarlanmış kütle sönümleyici (Bekdaş ve Nigdeli, 2018).

Çalışma prensibi, şiddetli deprem ve rüzgâr etkileri altında yapı titremeye başladığında, sönümleyicinin frekansı belirli bir yapısal frekansa (genellikle ilk doğal frekansa) ayarlanır, böylece bu frekans uyarıldığında, sönümleyici yapısal hareketle faz dışı rezonansa girer ve enerji dağılımı bu yapıya etkiyen sönümleyici kuvvetleri ile sağlanabilir. TMD'nin en verimli enerji sönümleme kapasitesini elde etmek için, TMD'nin doğal periyodunun kendi yapının doğal periyoduna göre belirlenmesidir. Bir TMD'nin etkisi, yapının kendisinin sönüm oranını daha büyük bir değere yükseltmek için eşdeğer olarak da görülebilir (Cheng ve diğ,. 2008).

TMD çalışma sürecinde herhangi bir harici enerji kaynağına ihtiyaç duymayan, mekanik olarak basit bir sistemdir. Ayarlı kütle sönümleyicinin kolay bakım ve yüksek güvenilirlik özellikleriyle dünyada birçok uygulaması mevcuttur. Örneğin, 1975'de inşa edilen John Hancock Tower, 1978'de yapılan Newyork'daki Citicorp Center binası, 1976'da yapılan Kanada Toronto'daki Canadian National Tower, 1988'de yapılan Japonya'daki Chiba Port Tower, yine Japonya'da 1990'da inşa edilen Crystal Tower, 2004 yılında inşaa edilen 101 katlı Taipei gökdeleni, Katar Doha'daki 2007 yılında inşa edilen Aspire Tower, Çin Shang Hai'daki 2008'de yapılan World Financial Center binası ve Japonya Tokyo'daki 2012'de inşa edilen Tokyo Sky Tree gökdeleni TMD kullanılan yapılara örnek olarak verilebilir. TMD birçok esnek ve hafif sönümlü kule ve çok katlı gökdelen binalarda yaygın olarak kullanılmıştır (**Şekil 2.11**).



Şekil 2.11: Pasif ayarlı kütle sönümleyicileri ile yapımı tamamlan dünyadaki 10 yüksek bina.

Ayarlı kütle sönümleyicisi (TMD) en eski yapısal kontrol cihazlarından biridir. Titreşim kontrolü için ayarlanmış kütle sönümleyicileri kullanma kavramı ilk olarak, 1909 yılında Frahm tarafından gemilerin yürütücü makine ve pervanelerinin gemi güvertesinde oluşturduğu titreşim hareketlerini azaltmak için icat ettiği “dinamik titreşim sönümleyici” adı verilen bir titreşim cihazına kadar uzayabilir (Frahm, 1911). Teori daha sonra Profesör Emeritus ve M.I.T. makine mühendisliği bölümünün eski başkanı Jacob Den Hartog’un “Mekanik Titreşim” (1940) adlı kitabında tanıtılmıştır. İlk teorisi, sinüs eğrisi şeklinde kuvvet uyarısına maruz kalan sönümsüz bir tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemler için uygulanmıştır. Rüzgârın kuvvet-zaman ilişkisi harmonik titreşim olmadığından, Den Hartog tarafından geliştirilen temel fikirler bina uygulamalarına değiştirilmiştir. Ancak uygulanan cihazın sönümleme mekanizması içermemesi, cihaz etkinliğinin dış tahrik (uyarım) ile kendi doğal frekansının çok yakın olduğu durumlarda ortaya çıkmasına neden olmuştur (Bekdaş ve Niğdeli, 2011). Farklı frekanslar aralığında etkili olabilmesi amacıyla Ormondroyd ve Den Hartog 1928 yılında, Frahm tarafından önerilen bu sisteme rüzgâr ve deprem etkisinden kaynaklanan titreşimleri sönümleyebilecek sönümleme elemanları eklemiştir (Niğdeli ve Bekdaş, 2011; Bekdaş ve diğ. 2018). Son yıllarda, yapısal kontrol cihazlarının araştırılması ve geliştirilmesine büyük önem verilmiştir. Ayrıca, son yirmi yılda yapısal kontrol kavramını uygulanabilir bir teknolojiye dönüştürmek için ciddi çabalar sarf edilmiştir. Artık yapısal

kontrolün, hastaneler gibi önemli yeni yapıların tasarlanmasında ve bazı durumlarda deprem ve rüzgâr için mevcut yapıların güçlendirilmesinde önemli bir parçası olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bugüne kadar var olan ve planlanan stratejilerin çoğu pasif ayarlı kütle sönümleyici veya izolasyon yaklaşımlarıdır (Chey, 2007). Ayrıca yapısal kontrol sistemlerinde, deprem ve rüzgâr kaynaklı titreşimleri azaltmak için TMD'ler köprüler (Moon ve diğ, 2003) ve binalar (Chen ve Wu, 2001; Said ve Vasant, 2014) gibi farklı yapılarda başarıyla uygulanmıştır.

Bir TMD'nin bina yapısına başarılı bir şekilde tasarlanması ve uygulanması karmaşık bir prosedürdür, çünkü TMD'nin seçilmesi ve ayarlanması için birçok faktör aynı anda düşünülmelidir. Örneğin, TMD'nin enerji sönümleme kapasitesi TMD'nin kütle oranı, rijitlik oranı, frekans (ayarlama) oranı ve ana yapının sönüm oranı ile ilişkilidir. Kayan bir kütle düzenlemesi durumunda, ilave edilen kütlenin bina hareketine düşük uyarma seviyelerinde tepki verebilmesi için düşük sürtünmeli bir yatak yüzeyi gerekmektedir. Bununla birlikte, TMD'nin gerçek yaşamda pratik uygulaması hala üç faktörle sınırlıdır. İlk olarak, TMD'ler yalnızca bir mod için etkilidir, yani sismik titreşim kontrolü için verimli bir şekilde kullanılamazlar. İkincisi, ayarsızlığa karşı hassastır, bu da dikkatli ayarlama için önemli çaba harcanması gerektiği anlamına gelir. Üçüncüsü, TMD'lerin kütlesi ve TMD'lerin kurulum konum yerlerinin inşaat zorluklarını arttıracak şekilde göreceli olarak büyük olmasıdır (Xu ve He, 2017). Birçok araştırmacı bu sınırlamaları ele almaya kendini adamış ve çok ilerleme kaydedilmiştir. Örneğin, çoklu ayarlanmış kütle sönümleyicileri (MTMD'ler) ve ilgili optimizasyon prosedürleri aşağıdaki araştırmacılar tarafından araştırılmış ve önerilmiştir (Clark, 1998; Li, 2000; Kown ve Park, 2004; Guo ve Chen, 2007).

Gerçek bir TMD tasarımında, ana yapının yapısal özelliklerinden kaynaklanan birçok tasarım kısıtlaması vardır. Aşağıda genel olarak esnek ve hafif sönümlü yapılar için TMD'nin temel ve esas bir tasarım prosedürü yer almaktadır (Soong ve Costantinou, 1994).

- Ana yapının dinamik yapısal özelliklerinin tanımlanması. TMD tarafından kontrol edilecek yapının doğal frekansını, titreşim kütlesini, sönüm oranını ve özgül titreşim mod'unun belirlenmesi.
- TMD tarafından oluşturulacak tasarım sönüm oranını $\Delta\xi_{eq}$ belirlenmesi.
- Uygun kütle oranını μ nın varsayımı (TMD'nın m_T kütlesinin belirlenmesi).

- ❖ Kütle oranını μ'dan α_{opt} ve $\xi_{T_{opt}}$ hesaplanması (TMD'nın K_T rijitlik ve C_T sönüm değerlerinin belirlenmesi).
- ❖ TMD'nin maksimum yer değiştirmesi hesaplanır. Eğer değeri çok büyükse, sıra 3'e geri dönülür.
- ❖ ω_T ve ξ_T'nin ayarlanması için yöntemler de dahil olmak üzere TMD'nın mekanik sistemi tasarlanır.
- ❖ Sallama masası veya diğer yöntemlerle TMD'nın doğrulama testleri yapılır.
- ❖ TMD'nın ana yapı'ya yerleştirmesi.
- ❖ Sahada TMD'nın davranışları gözlenerek ω_T ve ξ_T değerlerinin ayarlanması.

Gerekirse aşağıdaki hususlar incelenecektir:

- TMD tarafından kontrol edilecek yapının titreşim modunun buna yakın başka bir titreşim modu varsa, ana yapının 3 veya daha yüksek serbestlik modellemesi durumunda, TMD uygun değer değerleri belirlenmelidir.
- ω_T yapının titreşim süresi boyunca dağıtılan MTMD'nin ayarlama etkisinde kuvvet vardır.
- TMD'nin yer değiştirmesi çok büyükse, daha büyük kütle veya daha yüksek sönümleme kullanımı kaçınılmaz hale gelir, bu da her zaman optimum TMD'yi vermeyebilir.

Tekli TMD sistemlerin en büyük sınırlaması, beli bir ayarlı frekans bandının dışındaki etkinliğin eksikliğidir. Bu ayarlanmış frekans aralığındaki çok küçük bir sapma sönümleyicin etkinliğinde azalmaya neden olabiliyor. Bu nedenle çözüm olarak, çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri (MTMD) ilk olarak 1990 yılında Igusa ve Xu tarafından tanıtılmıştır (Xu ve diğ. 2005). Çoklu ayarlanmış kütle sönümleyicileri, kontrol ayarlama frekansı etrafındaki dağıtılmış doğal frekanslara paralel olarak yerleştirilen birkaç TMD'den oluşur. Tekli TMD'ye kıyasla daha iyi tepki kontrolü sağlar ve çoklu yönlerde ve çoklu modlar için titreşimleri azaltabilir. Çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri daha sonra birçok araştırmacılar tarafında incelenmiştir (Lei ve diğ. 2005; Nam ve Pennung, 2005; Alka ve Jangid, 2014). Li ve diğ. (2006), birden fazla TMD bağlandığında yapıyı tek serbestlik dereceli (SDOF) sistem olarak kabul etmiş ve bu TMD'ler için optimum tasarım parametrelerini incelemişlerdir. MTMD

sistemlerinin çok katlı binalarda kullanımı ile ilgili olarak, Chen ve diğ. (2001) altı katlı bir binada sismik tepkileri azaltmada birden fazla TMD kullanmanın etkinliğini incelemişlerdir.

2.3.AKTİF KONTROL SİSTEMİ

Pasif ve yarı aktif cihazların maliyet verimliliğine ve güvenirliğine rağmen, bu sistemler yapısal sismik tepki kontrolü için sınırlı bir kapasiteye ve "zekâ" için sadece sınırlı bir kapsama sahiptir. Örneğin, pasif sistemler basit mekanizmalara sahiptir ve üretimi kolaydır, ancak uyarılma ve yanıtları hissetmedikleri ya da harici güç kullanmadıkları için sürekli değişen uyarılara uyum sağlayamazlar. Ayrıca, bazıları baskın bir titreşim modunu kontrol etmede etkilidir, ancak diğer modlar veya yükleme tipleri için etkisizdir. Yarı aktif cihazlar, daha önce de belirtildiği gibi, bir şekilde uyarlanabilir, ancak verimlilikleri dayandıkları pasif cihazların maksimum kapasitesi ile sınırlıdır (Tarek, 2015). Bu sorunlar aktif kontrol sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır (Franklin ve diğ., 2008). Yao (1972) tarafından önerildiği gibi hatalı bir kontrol sistemi, farklı dinamik yüklemeler nedeniyle öngörülemeyen titreşimlere karşı koyacak ve böylece farklı titreşim modları için dinamik tepkiyi azaltacak yapıya otomatik olarak bir kuvvet uygulayabilmektir.

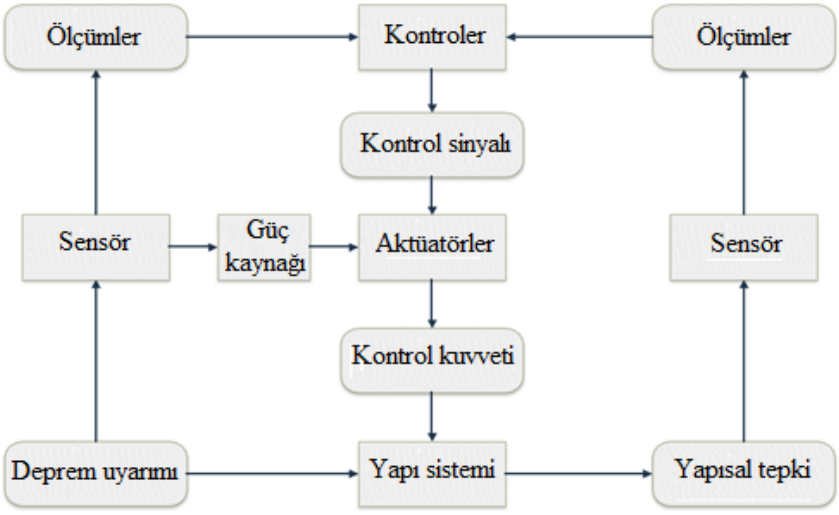
Aktif Kontrol Sistemleri, bu tür olaylar sırasında enerji kaynaklarının eksikliği nedeniyle ciddi doğal tehlikeler sırasında sağlanamayan dinamik yüklere karşı koymak için önemli miktarda enerji gerektirir. Dahası, Aktif Kontrol Sistemleri karmaşıktır: sensörler ve denetleyici ekipmanı gerektirirler ve bunlara enerji ekleyerek veya çıkararak yapının dinamik davranışını değiştirirler.

Aktif kontrol sistemlerinin avantajları (Franklin ve diğ., 2008):

1) Verimlilik üzerinde teorik bir sınır olmaksızın kontrol etkinliğinin arttırılması;
2) Uyarıları algılama ve telafi etmek için otomatik olarak ayarlama yeteneği ile yer hareketine uyarlanabilirliği;
3) Kontrol hedeflerinin seçiciliği- aktif sistemler yapısal güvenlik veya insan konforu gibi farklı hedeflere ulaşmak için tasarlanabilirliği;
4) Farklı uyarma mekanizmalarına uygulanabilirlik- aktif sistemler, geniş bir frekans aralığındaki yüklerle başa çıkmak için ayarlanabilirliği.

Akıllı yapılarda kullanılan aktif kontrol sistemleri, kontrol kuvvetini üretmek için harici güç kullanır ve bu da yapının titreşim tepkilerini azaltmak için yapıya doğrudan uygulanır. Bina yapıları genellikle büyük olduğundan, aktif sismik tepki kontrolü için büyük kuvvet üreten donanım ve büyük harici güç kaynakları gereklidir.

Aktif kontrol sistemleri, modern kontrol teknolojisi uygulayarak, harici giriş uyarıları ve yapısal tepkileri çevrimiçi bağlantılı monitörlerle gerçek zamanlı izleyerek, tepkilerin analiz ve hesaplama sonuçlarına göre, yapıya özel güç verici donanım yardımıyla kontrol kuvveti uygular ve optimum ayarlama gerçekleştirerek, yapının deprem ve diğer dinamik kuvvetlere karşı izin verilen aralıkta yanıt vermesini sağlayarak, yapı ve ekipmanları hasarlardan koruma amacına ulaşırlar. Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla kontrol kuvveti sağlarlar, kontrol süreci yapısal tepkilere ve dış girişim bilgilerine dayanır. Aktif kontrol sistemi üç bölümden oluşur: sensörler, hesap makineleri ve kuvvet aktüerleridir. Bunların çalışma prensibi: yapının ve dış uyarıların dinamik tepkilerini algılamak için sensör kullanarak, izleme bilgileri bilgisayara gönderilir ve bilgisayara gönderilen bilgilere göre önceden tanımlanan hesaplama algoritmalarına göre uygulanacak kontrol kuvveti miktarını hesaplar ve son olarak, gerekli kontrol kuvveti dış enerji kaynağı tarafından sağlanır. Aktif kontrol sistemlerin tüm kontrol süreci şematik olarak **Şekil 2.12**'de gösterilmiştir.



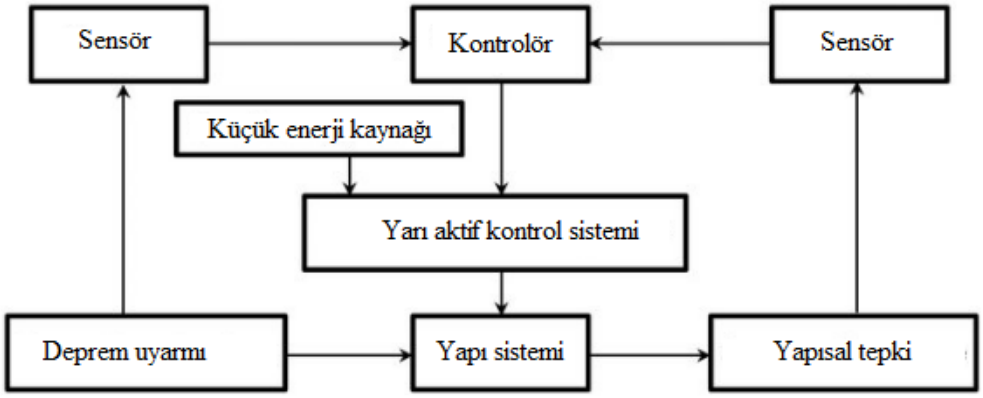
Şekil 2.12: Aktif kontrol sistemlerinin şematik gösterimi(Anwar ve Aung, 2016).

Mevcut araştırmalarda yaygın olarak kullanılan aktif kontrol sistemleri şunlardır: aktif kütle sönümleyici, yerçekimli-harekete geçirici sistem, aktif kiriş (destek) sistemi, aktif rijitlik değiştirici sistemidir.

2.4.YARI AKTİF KONTROL SİSTEMLERİ

Yarı aktif kontrol sistemleri pasif kontrole dayanır ve kontrol mekanizmaları kullanarak, sistemin dâhili parametrelerini aktif olarak ayarlar, pasif kontrol sistemlerinin çalışma durumlarına göre değişiklikler yaparak, yapı kontrolünü en iyi duruma getirir. Yarı aktif kontrol sistemleri, kontrol kuvveti sağlamak için az miktardaki dış enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Kontrol süreci, yapısal tepkilerin kontrol yöntemlerine ve ilave girişim bilgilerine bağlıdır. Aktif kontrol ile karşılaştırıldığında, yarı aktif kontrol pasif kontrol sisteminin güvenilirliğine ve aktif kontrol sisteminin güçlü adaptasyonuna sahiptir. Aktif kontrol sisteminin kontrol etkisi belirli bir kontrol prensibi ile elde edilebilir, bu nedenle yarı aktif kontrol iyi bir mühendislik uygulama potansiyeline sahiptir. Yarı aktif kontrol genellikle kontrolörün çalışma durumunu anahtar aracılığıyla değiştiren anahtar kontrolü veya "0-1" kontrolünü benimser.

Bu sistemlerin mekanik özellikleri, uyarım veya ölçülen yanıttan gelen geri bildirimlere dayanarak ayarlanabilir. Bir aktif kontrol sisteminde olduğu gibi, kontrolör geri bildirim ölçümlerini izler ve yarı aktif cihazlar için uygun bir komut sinyali üretir. Ancak pasif bir kontrol sisteminde olduğu gibi, kontrol kuvvetleri yapının kendi hareketinin bir sonucu olarak geliştirilir. Kontrol kuvvetleri, yarı aktif kontrol sisteminin mekanik özelliklerinin uygun (önceden belirlenmiş bir kontrol algoritmasına dayalı olarak) ayarlanmasıyla geliştirilir. Yarı aktif kontrol sistemlerinin şematik kontrolü **Şekil 2.13**'te gösterilmiştir.



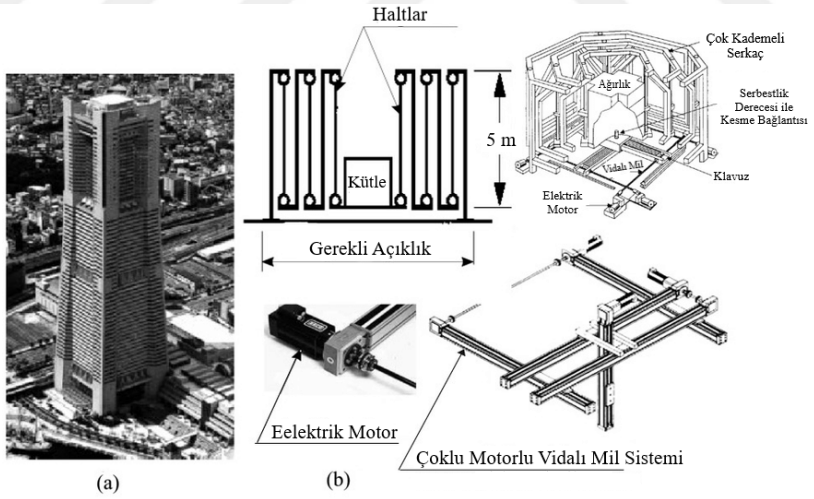
Şekil 2.13: Yarı aktif kontrol sistemi şematik görünüm (Pourzeynali ve Bahar, 2017).

Ayrıca, birçok yarı aktif kontrol sistemindeki kontrol kuvvetleri öncelikle yapısal sistemin hareketine karşı çıkmak ve dolayısıyla yapının küresel kararlığını desteklemek için hareket

eder. Yarı aktif kontrol sistemleri işletim için genellikle sadece az miktarda harici güç gerektirir.

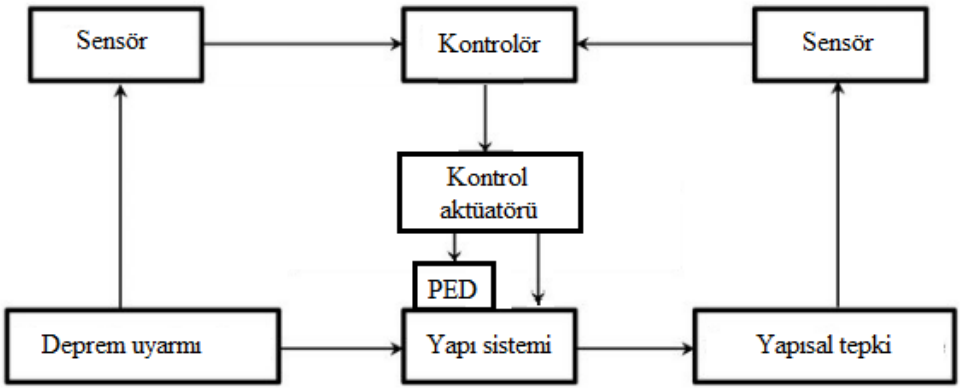
2.5.HİBRİT KONTROL SİSTEMİ

Hibrit kontrol sistemleri, aktif kontrol ve pasif kontrolün ortak uygulaması olup birlikte çalışmalarını sağlar. Bu kontrol sistemleri pasif ve aktif kontrolün avantajlarından tam olarak yararlanır, hem pasif kontrol sistemi yoluyla çok fazla titreşim enerjisi dağıtabilir, hem aktif kontrol sistemi kullanarak kontrol etkisini sağlayabilir, sadece aktif kontrol sistemi kullanımına göre, daha çok enerji tasarruf eder, dolayısıyla mühendislik uygulamalarda daha çok avantaj sağlarlar. Dünyada hibrit kütle sönümleyici kontrol sistemi ile inşa edilen ilk bina, Tokyo Shimizu Corporation Teknoloji Araştırma Enstitüsü'nün yedi katlı binasıdır (1991). Şu anda Japonya'da inşa edilen 20'den fazla aktif kontrol binanın çoğu hibrit kontrol teknolojisini kullanmıştır. Bunların içinde 1993 yılında inşa edilen 296 m yüksekliğindeki 70 katlı Yokohama Üçgen Sanayi (Land Mark Tower) çelik yapılı binası en yüksektir (**Şekil 2.14**).



Şekil 2.14: Mark Tower ve Hibrit kontrol sistemi (Septimiu ve Cristian, 2007).

Hibrit kontrol sistemleri esas olarak (**Şekil 2.15**), aktif kütle sönümleyici ve ayarlı kütle sönümleme sistemini veya ayarlı sıvı sönümleme sistemini birleştiren hibrit kontrolü, aktif kontrol ve enerji sönümleme sistemini birleştiren hibrit kontrolü ve aktif kontrolü ve sismik taban izolasyonunu birleştiren hibrit kontrol sistemlerini içerir.



Şekil 2.15: Hibrit kontrol sistemi şematik görünüm(Saaed, 2015).

2.6.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda, inşaat mühendisliği alanında özellikle deprem ve rüzgâr gibi doğal tehlikelerin azaltılması konusu üzerinde, yapısal kontrol cihazlarının araştırılması ve geliştirilmesine büyük önem verilmektedir. Ayrıca, son yirmi yılda teorik yapısal kontrol kavramını gerçek yapılara uygulanabilir bir teknolojiye dönüştürmek için ciddi çabalar sarf edilmiştir. Artık yapısal kontrolün, deprem ve rüzgâr etkisi altındaki yapıların güçlendirilmesi, yüksek katlı binalar ve hastaneler gibi yeni yapıların tasarlanmasının önemli bir parçası olduğu belirlenmiştir.

Bina türü yapılar, deprem ve rüzgâr gibi sürekli değişen dinamik tepkilere maruz kaldığında ciddi bir titreşime açıktırlar. Tipik bir bina tasarımı, deprem durumunda yapısal bileşenlerde beklenen deformasyon talepleri nedeniyle çökmeyi önlemektir. Mühendislik uygulamalar, binaların, deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkilere verdiği yapısal tepkinin çoğu zaman elastik olmayan davranışlarla sonuçlandığını göstermektedir. Bununla birlikte, bu kadar önemli dinamik enerjinin dağılmasını sağlamak için geleneksel yapı malzemelerinin ve yapısal bileşenlerin çok sınırlı ve küçük içsel olarak sönümlemesi gerekmektedir. Depremlerin neden olduğu titreşimleri pasif kütle sönümleyicileri ile sönümlemek mümkündür.

Depreme karşı yapıya en iyi faydayı sağlamak için kütle sönümleyicinin özellikleri en uygun şekilde ayarlanmalıdır. Önemli araştırmalar pasif kontrol sistemlerine odaklanmıştır ve birçok ülkede hâlihazırda kullanılmaktadır.

Pasif kontrol sistemlerinden ayarlı kütle sönümleyici (TMD) konsepti ilk olarak Frahm tarafından 1909'da (Frahm, 1909) gemilerin sallantı hareketini ve gemi gövdesi titreşimlerini

azaltmak için uygulanmıştır. Daha sonra Ormondroyd ve Den Hartog (1928) tarafından TMD teorisi makalede sunulmuş, ardından Den Hartog'un mekanik titreşimler (1940) kitabında en uygun ayarlama ve sönümleme parametrelerinin ayrıntılı bir tartışması yapılmıştır. Başlangıç teorisi, sinüzoidal kuvvet uyarısına maruz kalan sönümsüz bir tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemi için uygulanmıştır. Teorinin çok sönümlü SDOF sistemlerinin genişletilmesi çok sayıda araştırmacı tarafından araştırılmıştır.

Hartog (1928) ilk sisteme sönümleyiciler eklenmesiyle rüzgâr ve deprem gibi değişken frekanslı dış etkiler altında başarılı bir alet geliştirmiştir. Böylelikle kütle sönümleyicilerinin yapılarda kullanımı mümkün hale gelmiştir.

Warburton ve Ayorinde (1980) kiriş ve plaklara bağlanan sönümleyicilerin en iyi optimum parametreleri basit ve doğru şekilde modellenen tek serbestlik dereceli eşdeğer bir ana sistem üzerinde uygulayarak hafif sönümleyicilerin optimum koşullar etkisini incelemişlerdir.

Hsiang ve Guan (1993) çalışmalarında, sabit yer değiştirme genliği ve sabit ivme genliğinin hareketini destekleyen iki farklı harmonik titreşime uygulanan sayısal bir arama prosedürü geliştirerek, sönümleyicin ana sistemdeki titreşim tepkisini asgari düzeye indirgeyebilen ayarlanmış kütle sönümleyicisinin optimum frekansını ve sönümleme oranını bulmuşlardır. Sayısal sonuçlar, ayarlanmış kütle sönümleyicisinin sisteme dâhil edilmiş yüksek düzeydeki bir sönümle olduğunda, sistemin tepkisini azaltmada daha az etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca optimum ayarlama frekansının, özellikle sabit ivme hareketi ile ilgili olarak, sistemin sönümleme seviyesinden kuvvetli bir şekilde etkilendiği, ancak ayarlanmış kütle sönümleyicisinin optimum sönümle oranının sönümleme seviyesine duyarlı olmadığını da tespit etmişlerdir.

Constantinou ve Tadjbakhsh (1983) yatay rastgele deprem hareketlerine maruz kalan bir kesme binanın ilk katına yerleştirilen bir sönümleyici için optimum sönümleme katsayısını elde etmişlerdir.

Hahn ve Sathiavageeswaran (1992) sönümleyici dağılımının kayma binalarının deprem tepkisi üzerindeki etkileri üzerine birkaç parametrik çalışma yapmışlar ve düzgün kat rijitliğine sahip olan kesme binalar için, binanın alt yarı katlarına sönümleyiciler eklenmesi gerektiğini öngörmüşlerdir.

Yapının temel frekansına ayarlanmış TMD'li bir yapının ilk mod tepkisi önemli ölçüde azaltılabilir, ancak genel olarak daha yüksek modal tepkiler sadece marjinal olarak bastırılabilir veya hatta amplifiye edilebilir. TMD'lerin frekansla ilgili sınırlamalarının üstesinden gelmek için, her biri farklı bir baskın frekansa ayarlanmış belirli bir yapıda birden fazla TMD kullanılabilir. Optimizasyon prosedürü ile çoklu ayarlanmış kütle sönümleyicileri (MTMD) konsepti Clark (1988) tarafından önerilmiştir. O zamandan beri, MTMD'lerin davranışları üzerine, yapıya seri olarak bağlanan çift ayarlı kütleden (DTMD) oluşan iki kat ayarlı bir kütle sönümleyicinin davranışı üzerine bir dizi çalışma önerilmiştir (Setareh 1994). Bu durumda, iki farklı yükleme koşulu göz önünde bulundurulmuştur: harmonik uyarma ve sıfır ortalama beyaz gürültü rastgele uyarma ve DTMD'lerin yanıt azaltmadaki etkinliği değerlendirilmiştir. Analitik sonuçlar, DTMD'lerin tüm toplam kütle oranları aralığında geleneksel tek kütleli TMD'den daha verimli olduğunu, ancak pratik kütle oranları 0.01-0.05 aralığında olduğunda, TMD'lerden sadece biraz daha verimli olduğunu göstermektedir.

Gurgoze ve Muller (1992) öngörülen doğrusal çok serbestlik dereceli (MDOF) bir sistemde tek bir viskoz sönümleyici için en uygun yerleşimi ve en uygun sönümleme katsayısını bulmak için sayısal bir yöntemi önermişlerdir.

Zhang ve Soong (1992) bir bina için viskoz sönümleyicilerin uygun değer konfigürasyonunu bulmak için sismik bir tasarım yöntemi önermişlerdir.

Tsuji ve Nakamura (1996) hem spektrum uyumlu depremlere maruz kalan bir kesme bina modeli için hem en uygun katlı rijitlik dağılımını hem de uygun değer sönümleyici dağılımını bulmak için bir algoritma önermişlerdir.

Frahm ve diğ. (1997) farklı deprem uyarılarında çeşitli tek serbestlik dereceleri ve çok serbestlik dereceli yapıların TMD ile tepkisini hesaplamak için kullanılan optimum parametreleri elde etmek için kütle oranı, frekans oranı, sönümleme oranı vb. gibi farklı parametreleri dikkate almışlardır. Elde edilen optimum parametreleri, yer değiştirme ve ivme tepkisini önemli ölçüde azaltmada yardımcı olduğunu göstermişlerdir.

Sadek ve diğ. (1998) tarafından öne sürülen çalışmalarda, on katlı bir binada ve bir köprü tasarımında kullanılan tekli ve çoklu ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerinin tasarım parametrelerinin uygun şekilde seçilmesiyle, yapıların farklı sismik uyarı tepkilerini %45'e kadar azaltabildiğini incelemişlerdir.

Agrawal ve Yang (1999) deprem ve rüzgâr hareketi etkisindeki binalarda kullanılan pasif sönümleyicilerin optimum yerleştirilmesi üzerindeki çalışmalarında, enerji sönümleyici sistemlerin optimal yerleştirilmesi, birleşik optimizasyonuna dayalı tamsayılı meta-sezgisel algoritma tekniklerini kullanılarak incelemişlerdir. Farklı amaç fonksiyonları için en uygun yerleştirme konumları belirlemek için, en kötü çıkış en iyi giriş (WOBI) ve ayrıntılı tek nokta yerine konma (ESPS) arama yöntemleri olmak üzere üç akıllı arama algoritması kullanmışlardır. Katlar arası ötelemelerin en aza indirilmesiyle elde edilen optimum konumların özel tasarım depremine bağlı olduğunu bulmuşlardır. WOBI ve ESPS yöntemlerinin ardışık arama yöntemleriyle elde edilen konumların iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğunu bulmuşlardır.

Wei ve diğ. (1999) çok katlı çerçeve yapılarının doğrusal olmayan deprem tepkilerini kontrol eden viskoz-elastik sönümleyicinin optimum hesaplama yöntemini incelemişlerdir. Viskoz-elastik sönümleyiciler, enerjiyi dağıtmak ve titreşimleri azaltmak için etkili bir pasif sönümleyicidir. Viskoz-elastik sönümleyici ve çelik gergilerin birleşiminden oluşan elemanların rijitlik matrisini oluşturarak, seyrek şiddetli depremler altında viskoz-elastik sönümleyicilere sahip çok katlı çerçeve yapılarının doğrusal olmayan tepkilerini hesaplamak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir.

Aldemir ve Bakioğlu (2001) çalışmalarında, sismik kuvvetler altında yapı davranışını azaltan optimal kontrol yöntemleri geliştirmek için büyük bir kuvvet tanımlamışlardır. Depreme karşı uyarılan yapıların kontrolünde uygulanan lineer düzenleyici probleminin analitik çözümü, yapısal kontrolün önceden tanımlanmış tüm optimal kontrolleri olağan optimum koşullarına bağlı olmakla birlikte yeterli optimum koşulları kullanılarak elde edilmişlerdir. Deprem kuvvetlerinin etkisi altındaki sivil yapılar için optimal kapalı-açık çevrim kontrolünün uygulanmayacağını öne sürmüşlerdir. Optimum kapalı-açık döngü kontrolünün yaklaşık olarak sismik ivme değerlerinin tahminine dayanarak yapıldığını savunmuşlardır.

Chen ve Wu (2001) Öncelikle, ayarlanmış kütle sönümleyicileri (TMD) altı katlı bina yapısına uygulayarak, yapının modal tepkileri üzerindeki etkilerini incelemiş ve sismik uygulamalarda sönümleyicilerin etkisizliğini ispat etmişlerdir. Ardından, çok kademeli ve çok modlu ayarlanmış kütle sönümleyicileri tanıtmışlardır. Meta-sezgisel akıl yürütmeye dayalı olarak çeşitli optimal konum indeksleri tanımlamış ve sismik yükler altındaki yapılarda sönümleyicilerin pratik tasarımı ve yerleştirilmesi için sıralı bir prosedür önermişlerdir.

Önerilen prosedürü, rastgele bir sismik yük ve 13 adet farklı deprem kaydı altındaki ivmelerin maksimum oranda azaltılması için sönümleyicileri altı katlı binanın katlarına yerleştirerek uygulama yapmışlardır. Uygulama sonuçları, çoklu sönümleyicilerin kontrolsüz yapının ivmesini tek bir sönümleyiciden %10-25 daha fazla azaltabileceğini gösterirken, zaman tanım analizleri, toplam yapısal ağırlığın %3'ünü oluşturan çoklu sönümleyicilerin yer ivmesini %40'a kadar azaltabileceğini bulmuşlardır.

Li ve Liu (2002), duyarlılık problemini, TMD'lerin frekansının yapının kontrollü frekansına ve / veya TMD'nin sönümleme hızına ayarlanmasındaki dalgalanma nedeniyle TMD'nin bir dezavantajı olarak bildirmişlerdir.

Bishay-Girges (2004) pasif kontrol sistemi kullanarak yapıların sismik tehlikelerden korunması başlıklı doktora tez çalışmasında, yapılarda ilave sönümle kullanmanın avantajlarını araştırmak için dört katlı iki açıklıklı bir çelik çerçeve yapı modeli kullanmışlardır. Yapının zemin katına yerleştirilen tendon (halkalı yaylı sönümleyiciler) adı verilen pasif sönümleyici kontrol sistemi kullanarak, titreşim etkilerinin azaltma konusu üzerinde incelme yapmışlardır. Kontrol sisteminin etkinliğini araştırmak için deneysel çalışma olarak Canterbury Üniversitesi inşaat mühendisliği bölümü yapısal Laboratuvarı'ndaki sarsma masasında bir dizi deprem simülasyonuna tabi tutmuşlardır. Daha sonra on iki katlı bir çerçeve yapı üzerinde, tendon düzenlemelerin gerçek bir binanın tepkisini kontrol etmek için gereken sönümleyicilerin boyutu ve tipini araştırmışlardır.

Lee ve diğ. (2006) çalışmalarında, pasif kütle sönümleyici binaların performans endeksi değerini düşürmek için sayısal bir optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir.

Li ve Qu (2006) yer ivmelenmesine maruz kalan yapıların doğrusal ve burulma tepkilerini azaltmak için çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum özelliklerini incelemişlerdir.

Marano et al. (2010) daha önceki çalışmalarda ele alınmayan kütle oranı optimizasyonunu da gerçekleştirmiştir. Pasif kütle sönümleyicilerin optimizasyonu için çeşitli meta-sezgisel yöntemler de kullanılmıştır. Genetik algoritma, pasif kütle sönümleyicilerin ayarlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Niğdeli ve Bekdaş (2011) çalışmalarında, Yapının üstüne yerleştirilen pasif kütle sönümleyicinin optimum özelliklerini bulmak için bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemi

olan armoni aramayı kullanmışlardır. Sayısal optimizasyon işleminde dış etki olarak sinüs yükleri kullanılmış ve yapının yer değiştirmesi ve transfer fonksiyonu değerlerine göre kütle sönümleyici için optimum parametreler elde etmişlerdir. Teorik olarak elde edilen yapı parametreleri için bulunan kütle sönümleyici özellikleri aynı kalmak kaydıyla teorik değerlerden biraz sapan yapısal parametreler için analizler yapmış ve sonuçları incelemişlerdir.

Bekdaş ve Niğdeli (2011) çalışmalarında, yapının tek bir serbestlik derecesi gibi davrandığını varsayarak, yapılar için çeşitli periyotlarda optimum pasif kütle sönümleme özelliklerini belirlemişlerdir. Optimizasyon yöntemi olarak meta-sezgisel yöntemlerden biri olan armoni araştırma (HS) yöntemi kullanmışlardır. Optimizasyonda dış tahrik olarak yakın ve uzak fay yer hareketlerinin altı adet deprem kaydı kullanmıştır. Seçilen altı adet deprem kaydı altında yapılan analizler sonunda elde edilen sonuçların sayısal olarak karşılaştırabilir olması için tüm kayıtların ivmeleri 1g değerine göre normalleştirmişlerdir. Analizlerde yapılan periyot artırımları 0.5-5 saniye periyodu yapılarda 0.5 saniye farklarla tekrarlamış. Kütle sönümleyicisi özellikleri için çeşitli bağıntılar elde etmişler. Elde edilen bağıntıları çok serbestlik yapı sistemlerinde kontrol etmişler. Sonuçlara göre, bağıntıların kütle sönümleyicilerinin optimum özelliklerinin belirlenmesinde başarılı olduğunu öngörmüşlerdir.

Islam ve Ahsan (2012) çalışmalarında, çok katlı bina yapılarının dinamik tepkisini asgariye indirmek için ayarlanmış kütle sönümleyicinin (TMD) optimum parametrelerini belirlemişlerdir. Yapı sisteminin tepkisini, yanal uyarma altında simule ederek, TMD sisteminin dinamik parametrelerini yapının minimum üst sapmasını optimize etmek için, küresel minimum seviyesini verimli bir şekilde bulma olasılığına sahip evrimsel işlem (EVOP) adı verilen sayısal bir küresel optimizasyon algoritması kullanmışlardır. EVOP algoritmasına dayanan TMD sisteminin tasarım metodolojisini önermişler. Ayrıca diğer iki optimizasyon yaklaşımıyla da bir karşılaştırma yapmışlar ve mevcut yaklaşımın etkinliğini, daha uygulanabilir bir TMD parametreleri seçimine götüren optimizasyonda gösterdiğini bulmuşlardır.

Ikago ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmalarda, bina yapı sistemleri için yeni bir sismik kontrol cihazı ayarlanmış viskoz kütle sönümleyici (TVMD) önermişlerdir. Bu yeni cihazda uygulanan en önemli bileşenlerden biri olan bilyeli vida mekanizması kullanılan kütle yükselticisinin ayrıntılarını açıklamışlardır. Ayrıca harmonik uyarmalara maruz bırakılan tek

serbestlik dereceli yapı için optimum sismik kontrol tasarımının kapalı formlu bir çözümünü elde etmişlerdir. Yeni cihazın performansını, geleneksel viskoz sönümleyici ve viskoz kütle sönümleyici sistemleri ile karşılaştırmışlardır. TVMD kullanan titreşim kontrol sisteminin, aynı ilave sönümleme katsayısına sahip sönümleyicisinin lineer yapısal sistemler için en etkili olduğunu bulmuşlardır. TVMD'nin sismik tepkilere karşı etkinliği, küçük ölçekli bir TVMD ile yapılan analizler ve sarsma masası testleri ile doğrulamışlardır.

T. Rakicevic ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmalarda, Makedonya Üsküp'teki Deprem Mühendisliği ve Mühendislik Sismolojisi Enstitüsü dinamik test laboratuvarında, ayarlanmış kütle kontrol sisteminin (TMCS) etkinliğinin tahmini için tepesine yerleştirilen ayarlanmış kütle kontrol sistemi (TMCS) olarak adlandırılan ayarlanmış kütle sönümleyiciye (TMD) sahip16.6 tonluk beş katlı çelik çerçeve yapısına sarsma masası test deneyi yapmışlardır. TMCS olan ve olmayan model yapıdaki farklı deprem zaman tarihlerinin benzetimi sismik girişin frekans içeriğine ve yapının buna karşılık gelen hassasiyetine bağlı olarak, TMCS sistemin tepkileri %10'dan %50'ye kadar azaltabildiği gösterilmiştir. Bir yapının veya dinamik bir sönümleyicinin yüksek kaliteli analitik modeli belirtmek, bireysel parametrelerin etkisini araştırmak ve dinamik sönümleyicinin verimliliğini değerlendirmek için çalışma içinde bir dizi değişken analizi yapılmışlardır. Analizlerde, sönümleyici konumunun, ayrıca sönümleyicinin yapının farklı seviyesine (katlı) monte edilmesi yapının dinamik davranışı üzerine etkisini tanımlamak için yapılmışlardır.

Curadelli ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, sismik tepkiler altındaki binalarda beklenen performans seviyesini karşılamak için ilave lineer viskoz sönümleyicilerin sönümleme katsayılarının optimum şekilde tanımlanması için bir prosedür önermişlerdir. Performans kriteri, sismik tasarım kodlarının sağladığı en önemli sınırlamalardan bir olan maksimum katlar arası kayma noktası sapması olarak ifade etmişlerdir. Belirli bir performans seviyesi için, sönümleyicinin etkinliği farklı amaç fonksiyonlarıyla elde edilen dağılımı da değerlendirmişlerdir. Esas katkının toplam belirsizliği uyarma ve sağlam sonuçlar elde etmek amacıyla kaynaklandığını bilmek, uyarımı modellemek için en uygun yaklaşımın, sismik tasarım kodu tarafından tanımlanan tepki spektrumuyla uyumlu bir güç spektral yoğunluğu ile karakterize edilen sabit bir rastgele süreç olduğunu önermişlerdir. Yapısal tepkinin frekans alanında elde edilebilirliğine dayanarak, sayısal çalışmalarında bitişik yanal ve burulma

titreşimleri olan düzlemsel ve üç boyutlu çelik yapılar üzerinde önerilen prosedürleri doğrulamışlardır.

Hejazi ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, genetik algoritmaya dayalı yapısal kontrol sistemleri için çok amaçlı bir optimizasyon prosedürünü geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, yapısal elemanlardaki plastik menteşe oluşumu ve tüm yapısal düğümlerde üç yönlü yer değiştirmeyi dikkate alarak, deprem etkilerini en aza indirecek gerçekçi yapısal tepkilere dayanan sistemlere odaklanmışlardır. Model üç boyutlu betonarme çerçeveli bina örneğine uygulanmış ve yapısal sismik tepkileri incelemişler ve analiz sonuçlarından optimize edilmiş kontrol sisteminin yapıların sismik tepkisini etkili bir şekilde azalttığını, böylece deprem sırasında bina güvenliğinin arttırıldığını önermişlerdir.

Gutierrez Soto ve Adeli (2014) çalışmalarında, yeni geliştirilen ayarlanmış kütle sönümleyicisinden (TMD), çift yönlü (BTMD) sönümleyici kullanarak düzensiz yüksek katlı bina yapılarının titreşim kontrolünü incelemişlerdir. Ayarlanmış kütle sönümleyicisinin (TMD) ayarlama parametrelerini en uygun şekilde belirlemek için, sekiz farklı denklem kümesi, planda ve yüksekliği boyunca düzensiz olan beş katlı bir bina ve sismik yüklere maruz kalan 15 katlı ve 20 katlı bina planı kullanarak incelemişler ve temel periyot titreşimlerin bir saniyeden uzun olan yapılar için uygun denklemler önermişlerdir.

Tuan ve Shang (2014) çalışmalarında, ayarlanmış kütle sönümleyicinin (TMD) Taipei 101 kulesinin rüzgâr etkileri ve uzak fay deprem yer hareketi altındaki yapısal dinamik tepkileri üzerindeki azaltıcı etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, ilk olarak Taipei 101 kulesindeki TMD'nin optimum parametrelerini belirlemişlerdir. Ardından, TMD sistemi ile donatılmış yüksek katlı binanın sonlu elemanları modelini kurmuşlar ve YAPI-TMD sisteminin davranışını değerlendirmek için yönetmenliğe dayalı detaylı dinamik analiz yapmışlardır. Elde edilen simülasyon sonuçları rüzgâr test verileri ve kaydedilen saha ölçüleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmanın bulguları, TMD'nin bu binada kullanılmasının rüzgâr kaynaklı titreşimlerin azaltılmasında maddi olarak etkili olduğunu, ancak uzak fay deprem yer hareketlerinin azaltılmasında etkili olamadığını ileri sürmüşlerdir.

Asai ve diğ. (2015) çalışmalarında, yüksek enerji tüketimlerini elde etmek için yüksek binaların payanda ve dış kolonları arasına dikey olarak yerleştirilen payanda ayarlı viskoz kütle sönümleme (TVMD) sistemlerini önermişlerdir. TVMD'lerin binanın eğimline göre

ayarlanması için tasarım yöntemlerini tanıtmışlar ve ardından deprem kayıtlarına tabi önerilen sönümle sisteminin geçerliliği sayısal simülasyonla doğrulamışlardır.

Muralidhara ve diğ. (2015) çalışmalarında, deprem etkisinden dolayı seçilen sönümleyici tiplerine bağlı çok serbestlik dereceli (MDOF) binaların titreşim kontrolünü incelemişlerdir. Sismik olarak uyarılmış binanın tepki kontrolü için viskoz ve semi aktif değişken sürtünme (SAVFD) sönümleyici uygulaması değerlendirilmiş ve her iki sönümleyicinin etkinliği, binaya bağlı olan yapısal tepkilerin (yer değiştirme ve ivme) azaltılması açısından incelemişlerdir. Optimum numaraları ve sönümleyicilerin konumları optimizasyon prosedürüyle belirlemiştir. Çalışmanın sonunda, yapıları birbirine bağlamak için viskoz ve SAVFD kullanmanın, her iki yapının da deprem kaynaklı titreşim tepkilerini etkili bir şekilde azaltabildiğini, ancak SAVFD'nin binaları bağlamak için kullanıldığında yalnızca yapı yer değiştirmelerini kontrol edebileceğini öngörmüşlerdir. Ayrıca, uygun konumlarındaki daha az sönümleyicinin, birleşmiş sistemin deprem etkisini önemli ölçüde azaltabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Kamgar ve diğ. (2017) çalışmalarında, kesme binaların tepe noktası maksimum yer değiştirmelerini en aza indirmek için ayarlanmış kütle sönümleyicin (TMD) parametrelerini optimize etmişlerdir. Öncelikle, kritik depremlere maruz kalan 10 katlı kesme binasına yerleştiren TMD'nin optimum parametrelerini elde etmek için üç optimizasyon yöntemi kullanmışlardır. Daha sonra kontrolü ve kontrolsüz binaların tepe yer değiştirmesi, darbe etkileri, dönüşüm fonksiyonu ve farklı enerji biçimleri gibi tepkilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonunda, TMD'nin optimum tasarım parametrelerinin sadece tepe yer değiştirmesini etkili bir şekilde azaltmadığını, aynı zamanda binanın sismik performansını arttırdığını öngörmüşlerdir.

Jyothi ve Kangali (2017) çalışmalarında, G+9 yapısını sönümlü ve sönümsüz olarak modelleyip analiz yapmışlar ve analiz sonunda, göreceli kat yer değiştirme, göreceli hız, mutlak ivme ve sönümleme kuvveti gibi yapı tepkilerini birbiriyle karşılaştırarak sönümleyici kullanımındaki azalma yüzde oranını hesaplayarak, depreme maruz kalan viskoz sönümleyicinin yapı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tüm optimizasyon hesaplama algoritmalarını MATLAB yazılım programında geliştirmişlerdir ve viskoz sönümleyicilerin yapının tepkisini kontrol etmede çok etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Ramsey ve Wierschem (2017) çalışmalarında, geniş bir frekans aralığında titreşim azaltmalarını sağlayan, esasen doğrusal olmayan bir rijitlik bileşenini içeren, döşeme sistemlerinde oluşan titreşimleri azaltmak için önerilen pasif kontrol sönümleyicilerinden bir olan doğrusal olmayan enerji havuzu (NES) sönümleyicisini incelemişlerdir.

Dai ve diğ. (2017) çalışmalarında, 10 katlı ve 6 katlı bitişik RC çerçeve yapıları arasına yerleştirilen Maxwell Sönümleyicilerinin performansa dayalı pasif kontrol analizlerini incelemişlerdir. Sadece optimal parametreler değil, Maxwell sönümleyicilerin optimal düzenlemeleri de bitişik yapıların toplam aşma olasılığının minimum olmasını sağlayan hedefine dayanarak önermişlerdir. İlk olarak Maxwell sönümleyicinin sönümleme parametrelerinin analitik ifadelerinin farklı sismik performans hedefleri altında uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Ardından, Maxwell sönümleyicilerinin tercih ettiği sönümleme parametrelerini, kapsamlı parametrik çalışmalar yoluyla önermişlerdir.

Zhang (2017) çalışmasında, ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sistemini, yüksek katlı kulelerin sismik tasarımına dâhil etmişlerdir. TMD'nin uygun yerleştirilmesi, kuleye etki eden sismik enerjiyi etkili şekilde dağıtabilir ve böylece asansör boşluğunun kırbaç etkisinin üstesinden gelebilir. MATLAB yazılım programında geliştirilmiş armoni arama (IHS) algoritmasını kullanılarak, TMD sistemlerin optimum parametreleri belirlenmiş ve TMD sistemlerinin dayanaklığı araştırılmıştır.

Huang (2018) sönümleyici dağılımını optimize etmede, genetik algoritmaların (GA) etkinliği ve verimliğini ilk önce yıkılmayla ilişkili kuvvetli yer hareketleri ile değerlendirmiştir. Şiddetli deprem yükleri altındaki büyük kaymaların iyileşmesine ilişkin olarak, ani dirençli çerçeveler (MRF) içindeki akışkan viskoz sönümleyicilerin dağılımını optimize etmek için genetik algoritmaların (GA) ve NRH analizini kullanan pratik bir optimizasyon çerçeve yapısını önermiştir. Farklı deprem şiddeti seviyesindeki çerçeveler için uzak ve yakın fay deprem etkilerini de göz önünde bulundurmuştur. Binaların yıkılma performansına ilişkin GA optimizasyonundan elde edilen sonuçları değerlendirmek için Artımlı Dinamik Analiz (IDA) gerçekleştirmiş ve GA sönümleyici dağılımı ile güçlendirilmiş çerçevelerin yıkılma olasılığı üzerindeki rijitlik orantılı sönümleyici dağılımı arasında karşılaştırmalar yapmıştır.

Ying ve diğ. (2018) çalışmalarında, üç farklı deprem dalgası altındaki sönümleyicisi olan ve olmayan (CMD, TMD ve TLD) tek serbestlik dereceli bükülmüş çerçeve yapısının dinamik

tepkilerini araştırmak için sarsma masası deneyi tasarlamışlardır. Çalışma sonuçları, birleşik kütle sönümleyicilerin (CMD) titreşim azaltma performansının, genellikle tepe ve temel titreşim tepki oranını azaltmada geleneksel sönümleyicilerden daha iyi olduğunu öngörmüşlerdir. Geleneksel sönümleyicilerin titreşim azaltma etkisi deprem dalgalarının özelliklerine duyarlıdır, oysaki CMD daha geniş bir frekans bandında etkilidir. Ayrıca, CMD'nin titreşim azaltma etkisinin, deprem dalgalarının genliğine karşı duyarlı olmadığını, bu da sistemin iyi dirence sahip olduğu anlamına geldiğini göstermişlerdir.

Greco ve Morga (2019) deprem yer hareketi ile uyarılmış yapıların temel modunun titreşimlerini kontrol etmek için tekli ayarlı kütle sönümleyicisinin optimum tasarım stratejisini önermişlerdir. Çalışma amacı olarak, deprem uyarılı optimal ayarlanmış kütle sönümleyicisinin tasarım parametrelerinin (Frekans ve sönüm oranı) zaman ayarlarını incelemişlerdir.

Rahmani ve Könke (2019) çalışmalarında, deprem sırasındaki titreşimleri kontrol etmek için yüksek katlı binalarda kullanılan ayarlanmış kütle sönümleyicisinin (TMD) optimum yerleşimi ve özelliklerini araştırmışlardır. Sınırlı bir kütleyi tek ve çoklu ayarlanmış kütle sönümleyicilerinin (TMD) içine dağıtarak, binanın yüksekliği boyunca bu sönümleyicileri en uygun şekilde dağıtmak için bir algoritma geliştirmişlerdir. TMD'lerin optimum tasarım parametrelerini ve optimum yerleşimini aynı anda incelemek için, çok değişkenli genetik operatörler eklenerek geliştirilmiş baskın olmayan sınıflandırma genetik algoritması (NSGA-II) yöntemi kullanmışlardır. Sonuçlar, yüksek modlarda belirgin genliğe sahip olan deprem uyarıları altında, çoklu TMD'lerin binanın yüksekliği üzerine dağıtılmasının, tek bir TMD sisteminin kullanımına kıyasla titreşimlerin azaltılmasında daha etkili olduğunu göstermiştir. Optimizasyon sonuçlarından, çoklu TMD'lerin yerleşim konumlarının, alt modlarda maksimum modal yer değiştirmelere karşılık gelen katlarla ve deprem uyarıları tarafından yüksek oranda aktive edilmiş modlardaki maksimum mod değiştirmelere karşılık gelen katlarla ilgili olduğu öngörülmüşlerdir. Ayrıca, depremin frekans içeriğinin TMD'lerin optimum konumu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu da kaydetmişlerdir.

Stanikzai ve diğ. (2019) ayarlanmış kütle sönümleyicisi (TMD) kullanılan taban yalıtımlı binaların deprem etkilerini azaltılması üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, çok serbestlik dereceli iki boyutlu betonarme binayı sayısal örnek olarak modellemişler, farklı kat seviyelerine çeşitli ayarlanmış kütle sönümleyicileri yerleştirerek, deprem uyarırları altındaki

binanın tepkesini incelemişlerdir. Binanın 5, 10 ve 15'inci katlarına çok katmanlı kauçuk yatak (LRB), kurşun kauçuk yatak (N-Z), sürtünme sarkaç sistemi ve esnek sürtünme bazlı izolatör (R-FBI) istemlerini izolasyon sistemi olarak kullanmışlar. Birleştirilmiş binaların hareketlerinin diferansiyel denklemlerini çözmek için Newmark adım adım entegrasyon yöntemi kullanmışlardır. Taban yalıtımlı (BI) binaların farklı kat seviyelerine yerleştirilen ayarlanmış kütle sönümleyicileri (TMD), yapının tepe noktası ivmelerini ve izolasyon yataklarındaki yer değiştirmeleri azalttığını, izolatörlerin artan periyodunun ayarlanmış kütle sönümleyicilerinin (TMD) etkinliğini azalttığını bulmuşlardır. Ayrıca, alçak binalarda TMD'nin yerleştirilmesinin bina tepkisini azaltmada önemli bir rolünün olmadığını, ancak TMD yerleşiminin etkinliği, yüksek katlı binalarda daha çok belirginlik gösterdiğini önermişlerdir.

We ve diğ. (2019) çalışmalarında, deprem yer hareketine maruz kalan ayarlanmış inerter sönümleyici (TID) içeren yapı sisteminin teorik ve nümerik çalışmalarını sunmuşlardır. Sabit nokta teorisini kullanarak, zemin ivmesi uyarılarına maruz kalan tek bir serbestlik dereceli sisteme bağlanan TID için basit tasarım formüllerini elde etmişlerdir. Analitik ve sayısal sonuçlar, ayarlanmış inerter sönümleyicinin optimum tasarımında önerilen parametre kullanımının doğal periyodu 0.3 s ~ 0.5 s arasında değişken yapıların yer değiştirme tepkilerinin önlemesine ve performansın pozitif olarak kullanılan kütle oranı ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle, kütle oranının büyük etkisine sahip olan bir ayarlanmış interter sönümleyici, sismik izolasyon sistemine benzer şekilde ayarlanmış interter sönümleyici yapının temel periyodunu önemli ölçüde uzatabilir. Ayarlanmış inerter sönümleyicinin optimum tasarımı, kısa ve orta periyotlu yapılarının mutlak ivme tepkisini etkili bir şekilde azaltabilir, ancak uzun periyot yapılar için etkili olma olasılığı çok düşük olduğunu bulmuşlardır.

Deprem sırasındaki titreşimleri kontrol etmek için yüksek binalarda kullanılan TMD'nin optimum yerleşimi ve özelliklerini araştırmaktadır. Sınırlı bir kütleyi tek bir TMD'de veya çoklu TMD'lerde kullanmak ve bunları binanın yüksekliği boyunca en uygun şekilde dağıtmak için en uygun algoritma bulunacaktır. Örneğin, baskın olmayan sınıflandırma genetik algoritması yöntemi, çok değişkenli genetik operatörler eklenerek geliştirilmiştir ve TMD'lerin optimum tasarım parametrelerini ve optimum yerleşimi aynı anda incelemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, yüksek modlarda fark edilebilir genliğe sahip deprem uyarıları

altında, TMD'lerin binanın yüksekliği üzerine dağıtılması, tek bir TMD sisteminin kullanımına kıyasla titreşimlerin azaltılmasında daha etkilidir. Optimizasyondan, TMD'lerin konumlarının, alt modlarda maksimum modal yer değiştirmelere karşılık gelen katlar ve deprem uyarıları tarafından yüksek oranda aktive edilmiş modlarda maksimum mod yer değiştirmelerine karşılık gelen katlar ile ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, depremin frekans içeriğinin TMD'lerin optimum konumu üzerinde önemli bir etkisi olduğu da kaydedilmiştir.

Bununla birlikte, tek bir TMD'nin ana dezavantajının, TMD'nin doğal frekansının yapının doğal frekansına ayarlanmasında ve/veya TMD'nin sönümleme oranındaki dalgalanmaya karşı etkinliğinin duyarlılığı olduğu iyi bilinmektedir (Iwanami ve Seto, 1984). Tek bir TMD'nin etkinliği, TMD'deki off-tuning veya off optimum sönümleme ile önemli ölçüde azaltılır. Yani, tek bir TMD hiç sağlam değildir. Ayrıca, yapı rijitliğinin bozulması nedeniyle yapıların dinamik özellikleri güçlü depremler altında değişecektir. Bu değişiklik, frekansın ayarlanmasında ve/veya sönümleme oranındaki dengeleme nedeniyle tek bir TMD'nin performansını önemli ölçüde düşürecektir. Sonuç olarak, tek bir TMD'nin etkinliğini ve sağlamlığını artırmak için farklı dinamik özelliklere sahip birden fazla ayarlı kütle sönümleyicisinin kullanılması önerilmiştir.

Iwanami ve Seto (1984) çift ayarlı kütle sönümleyici sistemi (DTMD) önermişler ve yapının harmonik olarak zorlanmış titreşimi için DTMD'nin optimum tasarımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında çift TMD'nin tek bir TMD'den daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Son zamanlarda, dağıtılmış doğal frekanslara sahip çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri (MTMD) Igusa ve Xu (1994) tarafından önerilmiştir. Asimptotik analiz tekniğine dayanan empedans için basit bir eşdeğer ek sönümleme formülü ve ayrılmaz bir form elde etmişlerdir. Birçok araştırmacılar daha sonra dağıtılmış doğal frekanslara sahip çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri (MTMD) üzerinde birçok araştırmalar yürütmüşlerdir.

Çalışmalar, MTMD'nin tek bir TMD'ye göre yapıların titreşimi azaltılmasında daha etkili olduğunu ispatlamıştır. Bu araştırma bulguları, sismik uygulamalarda MTMD'nin değerini de doğrulamıştır. Kurulum açısından MTMD'nin tek bir TMD'ye göre üstünlüğü, MTMD'nin küçük kütleye sahip dağıtılmış sönümleyicilerden oluşması ve genellikle bunları kurmak için ayrılmış bir alan gerektirmemesidir. Mühendisler daha sonra binaların farklı katlarındaki yedek alanı tam olarak kullanabilir ve böylece bunları uygun maliyetli bir şekilde tasarlayabilirler (Li ve Qu 2006).

Önceki çalışmalarda, birçok araştırmacı kontrollü bir yapının sabit bir temel üzerine inşa edilmiş düzlemsel bir yapı olduğunu varsaymıştır. Ancak, genel olarak gerçek bir binanın aslında nominal olarak simetrik plana sahip olsa bile bir dereceye kadar asimetrik olduğu kabul edilmektedir (Chi ve diğ. 2010). Binanın asimetrik özelliği, ötelenme titreşim uyarımlar altında burulma bağlantı (TC) olarak bilinen eşzamanlı bir yanal ve burulma titreşimi yaratır. Ayarlanmış kütle sönümleyicilerinin (TMD) sismik harekete maruz kalan asimetrik yapılara uygulanması ile ilgili çalışmalar nispeten yenidir. Jangid ve Datta (1997), iki serbestlik derecesindeki burulma ile birleştirilmiş sistemlerin tepkisini kontrol etmek için çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin (MTMD) etkinliğini incelemişler. Bu çalışmada, TMD'lerin doğal frekanslarının belirli bir bant genişliği içinde eşit olarak dağıldığını ve zeminin uzunluğu boyunca birbirleri arasında aynı mesafede bulunduğunu düşünmüştür. Optimum bant genişliği hem çeviri hem de rotasyonda, sistemin MTMD'li ve MTMD'siz ortalama karekök (RMS) oranını azaltılmasıyla elde etmişler. Burulma etkisi göz ardı edilirse, asimetrik yapılarda MTMD'nin etkinliğinin fazla tahmin edildiği gösterilmiştir.

Sonraki araştırmacılar, çok katlı asimetrik binalarda MTMD'lerin tasarım parametrelerinin hesaplanması için farklı optimizasyon kriterleri kullanmışlar. Li ve diğ. (1999) iki yönlü rastgele uyarıma tabi çift TMD modelleri kullanarak, baskın modu ile ilişkili tepkinin kök ortalama karesini azaltmak için önermişlerdir. Singh ve diğ. (2002) asimetrik binaların tasarım parametresini, taban kesme kuvveti, zemin ivmesi ve katlar arası ötelenmeler gibi farklı azaltma yanıt işlevlerini en üst düzeye çıkaran dört TMD tasarım optimum parametrelerini elde etmişlerdir.

Daha sonra dağıtılmış doğal frekanslara sahip çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin (MTMD) düzensiz yapılar üzerindeki etkinliğini araştırmak için birçok çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar üzerindeki literatür çalışmaları şöyle sıralanmıştır:

Jangid ve Datta (1997) çalışmalarında, Çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri (MTMD) ile basit bir burulma bağlantılı sistemin dinamik tepki davranışını incelenmişlerdir. Sistem, geniş bantlı sabit rastgele bir süreç olarak modellenen yanal uyarıma tabi tutulmuştur. Eşit olarak dağıtılmış frekanslara sahip MTMD'ler bu amaç için dikkate alınmış ve sistemin genişliğini kapsayan bir sıra halinde düzenlenmiştir. Burulma bağlantılı sistemin tepkisinin azaltılmasında kullanılan MTMD'lerin etkinliğini araştırmak için bir parametrik çalışma yapmışlardır. Parametreler, ana sistemin eksantrikliğini, ayrılmamış burulma-yanal frekans

oranını ve MTMD'lerin sönümünü içermiştir. Burulma ile birleşen sistemin yanal tepkisini kontrol etmede MTMD'lerin etkinliğinin asimetri derecesindeki artışla azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca, burulma bağlantı etkisini göz ardı ederek asimetrik bir sistem için tasarlanan MTMD'lerin etkinliği fazla tahmin edilmektedir.

Jer-Fu ve Chi-Chang (2005) Çalışmalarında, zemin-yapı etkileşim (SSI) etkisini göz önüne alındığında taban hareketleri nedeniyle burulma ile birleştirilmiş yapılar olarak modellenen düzensiz binaların titreşim kontrolü üzerindeki çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin (MTMD) uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Verimli bir modal analiz metodolojisi sistematik asimetrik binalar üzerinde kombine zemin-yapı etkileşimi ve burulma bağlantı etkilerini değerlendirmek için kullanmışlardır. Bu yöntem, frekansa bağlı temel empedans işlevlerini doğru bir şekilde birleştirmek için frekans alanında uygulanmıştır. MTMD'nin performans endeksi, MTMD'lerin kurulumu olan ve olmayan temel kaynaklı bina kat hareketlerine dayanarak oluşturulmuştur. Geleneksel MTMD tasarım kriterlerinin aksine, her MTMD altyapısının kontrollü yapısal frekansa (frekans oranı bu yazıda bağımsızdır), böylece en uygun parametrelere sahip MTMD aslında bina yanıtlarının transfer işlevlerini düzleştirebilir. Nümerik çalışmalar, düzensiz bir binanın yükseklik-taban oranının artmasının ve zeminin yapıya nispi rijitliğinin azalmasının, özellikle yüksek burulma etkisi olan bir bina için hem SSI hem de MTMD ayarsızlık etkisini arttırdığını göstermektedir. MTMD'lerin optimum frekans aralığını uygun şekilde genişleterek, ayarsızlık etkisi azaltılabilir. Ayrıca, sayısal araştırmaların sonuçları, SSI etkisi önemli olduğundan MTMD'nin tek TMD'den daha etkili olduğunu da göstermektedir.

Li,Ch, X., (2005) aynı rijitlik ve sönümleme katsayısına ancak farklı kütlelere sahip iki grup MTMD’nin tek katlı düzensiz yapının burulma düzensizliğini kontrol etmek için en uygun tasarım parametreleri inceleyerek, MTMD’leri en uygun konuma yerleştirmiştir. MTMD’lerin optimal parametrelerinin tasarım kriteri: yapının maksimum burulma açı yer değiştirme dinamik büyütme katsayısı minimum değerinin en küçük optimum değeri olarak tanımlamıştır. MTMD’lerin etkili tasarım kriteri: yapının maksimum burulma açısal yer değiştirme dinamik büyütme katsayısı minimum değerinin en küçük optimum değerinin MTMD’siz yapının maksimum burulma açısal yer değiştirme dinamik büyütme katsayısına oranı olarak tanımlamıştır. Sonunda tanımlanan tasarım kriterlerine dayanarak, standartlaştırılmış eksantriklik katsayısının ve burulmanın, asimetrik yapının yanal frekans

oranı üzerindeki optimum tasarım parametreleri ve MTMD'nin optimal pozisyondaki etkinliği üzerindeki etkisini incelenmiştir.

Li, Ch. X., ve Qu, W. L., (2006) çalışmalarında, yer hareketlerine maruz kalan genel asimetrik yapıların dinamik özellikleri aynı rijitlik ve sönümleme katsayısına sahip çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri (MTMD) ile modellenen, ancak ötelenme ve burulma yanıtlarını bastırmak için farklı kütle uygulanan, basitleştirilmiş iki dereceli serbestlik dereceli (2DOF) yapı üzerinde incelemişlerdir. Bu 2DOF yapısı, mod indirgenmiş düzen yöntemi kullanılarak deprem uyarıları altında baskın ötelenme ve burulma tepkileri ile asimetrik bir yapıya sahip genelleştirilmiş bir 2DOF sistemidir. Nümerik çalışmalar sonucunda, normalleştirilmiş dış merkezlilik oranının (NER), hem burulma açısından esnek hem de burulma olarak ara rijit yapılar için MTMD'nin performansını önemli ölçüde etkilemesidir. NER'in etkisi, burulma açısından rijit yapılar için MTMD'nin performansı üzerinde oldukça ihmal edilebilir, bu nedenle böyle bir durumda MTMD'nin burulma bağlantısının etkilerini göz ardı ederek tasarlanabileceğini önermişlerdir. Aynı şekilde, farklı düzenlere sahip MTMD stratejilerinin etkinliği ve sağlamlığı da asimetrik yapıların burulma tepkisini hafifletmek için araştırılmış ve gösterilmiştir. Ayrıca, asimetrik yapıların frekans tepki eğrileri hem optimum MTMD ve TMD hem de optimum olmayan üç burulma-ötelenme frekans oranı (TTFR) vakası için de çizilmiş ve sonuç olarak bazı çok yararlı sonuçlar elde etmişlerdir.

Chi ve diğ. (2010), depremlerin neden olduğu gibi temel uyarmalara maruz kalan burulmalı olarak birleştirilmiş (TC) bir yapı olarak modellenen düzensiz bir bina için aktif tendon sistemlerinin titreşim kontrol etkinliği üzerindeki zemin-yapı etkileşimi (SSI) etkisini analiz etmişlerdir. Nümerik simulasyon sonuçları, gerekli sayıda sensör denetleyicisinin ve kurulum konumlarının, kat eksantrikliğinin derecesine bağlı olduğunu göstermektedir. İki yönlü geniş eksantrik bina için, direnç merkezinden (CS) en uzak iki çerçeveden birine yerleştirilen tek yönlü bir aktif tendon sistemi hem öteleme hem de burulma tepkilerini azaltabilir. Zemin-yapı etkileşimi (SSI) etkisi, üst yapının esneklik oranı ve zeminin üst yapıya rijitlik oranı ile yönetilir. Zemin-yapı etkileşimi (SSI) etkisi önemli olduğunda, önerilen kontrol sistemi yapısal tepkileri yine de varsayılan sabit tabanlı modelinden daha az etkililikle azaltabilir. Bu nedenle, özellikle yumuşak zeminde bulunan yüksek katlı binalar için Aktif Kontrol cihazlarının tasarımında TC ve SSI etkileri dikkate alınmalıdır.

Almazán ve diğ. (2012) bir veya iki ayarlı kütle sönümleyici ile donatılmış tek yönlü ve çift yönlü sismik uyarıma maruz kalan asimetrik doğrusal ve doğrusal olmayan yapıların tepkisini incelemişlerdir. Her TMD'nin optimize edilmiş parametreleri, genel burulma dengesi kavramının uygulanmasıyla elde etmişlerdir. Sonuçlar, TMD'lerin kenar deformasyonunu %20 ila %50 arasında değişen değerlerde azalttığını göstermektedir. En yüksek indirgeme deformasyonun daha büyük olduğu kenarlarda elde etmişler. Genel bir kural olarak, TMD'nin kontrolsüz yanıtın (TMD'siz) daha büyük olduğu köşeye doğru yerleştirilmesi gerektiği önermişlerdir. Ön sonuçlar, ana yapının esnekliğinin optimize edilmiş TMD frekansını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Bununla birlikte, torsiyonel olarak hibrit ve esnek yapılar için, optimize edilmiş TMD konumu ana yapının elastik olmayan davranışına duyarlı olduğu öngörmüşlerdir.

Yan ve Wang (2014) yüksek katlı çerçeve yapısının üç boyutlu sonlu eleman modelini Ansys yazılımı ile oluşturarak modal analizi yapmışlar. Modal analizi sonuçları, yapının üçüncü modunun burulma titreşimi olduğunu, yüksek katlı çerçeve fabrika bina yapısının burulma titreşiminin, deprem etkisi altında ana pozisyonu işgal edeceğini ve yapının burulma etkinin kontrol edilmesinin gerekli olduğunu göstermiştir. MTMD'lı ve MTMD'sız iki durumdaki yüksek katlı çerçeve fabrika bina yapısının deprem yükleri altında zaman tanım alanında dinamik analizi yaparak burulma direnci üzerindeki etkisi incelenmişlerdir. Sonuçlar deprem etkisi altında MTMD'nin yüksek katlı yapıların açısal yer değiştirmesini ve açısal ivmesini daha iyi kontrol edildiğini göstermektedir.

Taha ve diğ. (2019) iki yönlü deprem yer hareket uyarıları altında asimetrik binaların tepki kontrolünde burulma ayarlı kütle sönümleyicilerinin (T-TMD) etkinliğini araştırmış ve T-TMD'nin verimliliği, çift yönlü ayarlı kütle sönümleyicileri (BTMD) ile karşılaştırmışlardır. T TMD'ler, yay-dashpot elemanlarına bağlı tek bir burulma kütlesi ile yapıların düşey eksen etrafında dönmesine yönlendirilirken, BTMD, tek bir kütleyi, binanın ana eksenlerine yönelik iki ortogonal yay–dashpot elemanına bağlamıştır. Binalar, her kat için iki öteleme ve bir burulma serbestliğine sahip üç boyutlu modellerdir. Çok katlı binaların üç farklı konfigürasyonu (Haç şeklinde, L şeklinde ve T şeklinde) göz önünde bulundurmuşlardır. Ayarlanmış kütle sönümleyici şemaları olan ve olmayan 5, 15 ve 20 katlı binalar çift yönlü deprem zemin etkileşimine tabi tutmuşlardır. T-TMDs ve BTMD'nin etkinliğini değerlendirmek için rotasyon, yer değiştirme, ivme ve taban kesme kuvveti tepkileri

hesaplamışlardır. T-TMDS ve BTMD ile kurulan tüm konfigürasyonlar için kütle oranını, sönümleme oranını ve yer hareketlerini değiştirerek parametrik çalışmalar yapmışlar. T-TMD'lerin asimetrik binaların burulma tepkisini azaltmada BTMD ile karşılaştırıldığında daha etkili olduğu sonucuna varılmışlardır.

Zhen ve diğ. (2019) çoklu ayarlı bir kütle sönümleyici sisteminin geniş açıklıklı yaya asma köprüsünün insan kaynaklı titreşiminin kontrolü üzerindeki çoklu ayarlı kütle sönümleyici sisteminin etkinliğini analiz etmiş ve çoklu ayarlı kütle sönümleyici sisteminin titreşim azaltma etkisini, Dong Tan Nehri üzerindeki yaya asma köprüsünü üzerinde düzenleyerek araştırmışlardır. Analiz sonucunda, çoklu ayarlı bir kütle sönümleyici sisteminin yaya asma köprüsünün insan kaynaklı titreşimini kontrol etmede önemli bir etkiye sahip olduğunu önermişlerdir.

Akyürek ve diğ. (2019) burulma düzensizliği bulunan binaların güvenliğini ve performansını arttırmak için, çalışmalarında yeni geliştirilmiş bir Entegre Kontrol Sistemi (ICS) önerilmişlerdir. Yeni kontrol yaklaşımı, her katın iki öteleme ve bir dönme serbestlik derecesi ile temsil edildiği Kaliforniya'daki SAC çelik projesi için inşa edilen iki yönlü eksantrik Benchmark 9 katlı çelik binasına uygulamışlardır. ICS'nin performansı ve etkinliği, 1940 El Centro, 1989 Loma Prieta ve 1999 Kocaeli Türkiye depremlerinin N-S ve E-W bileşenlerinin gerçek deprem uyarılarına maruz bırakılarak, ayarlanmış kütle sönümleyicileri (TMD) yaklaşımı ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ICS'nin hem ayarlama hem de ayarında bozulma (detuning) durumları için yeni tasarım konfigürasyonu ve düzenlemesi ile yanal ve birleşim titreşimlerini etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir. ICS ayrıca TMD ile karşılaştırıldığında, katlar arası kayma oranını kısıtlamada da daha sağlam olduğunu bulmuşlardır.

Yukarıda bahsedilen araştırma sonuçlarına rağmen, asimetrik yapılarda bir veya birkaç TMD'nin nasıl tasarlanacağı ile ilgili birkaç soru vardır. Burada doğal frekansların seçimi ve TMD'lerin zemindeki yeri mutlaka açık değildir. Bu nedenle, bu araştırmacıların amacı, tek yönlü ve çift yönlü sismik harekete maruz kalan bir veya birkaç katlı asimetrik yapılarda tekli veya çoklu TMD'ler için optimize edilmiş tasarım parametrelerini elde etmektir.

Bu çalışmada amaç, tek ve çok katlı burulma düzensizliği bulunan binaların titreşim kontrolü için pasif kontrol sistemlerinden TMD’nin optimal, pratik ve uygun maliyetli bir tasarım

prosedürü elde etmektir. Kütle sönümleyicisinin fiziksel özellikleri olan kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin yanında konumu da burulma düzensizliğinden oluşan açısal titreşimin azaltılması için optimum olarak belirlenecektir. Optimizasyonda meta-sezgisel yöntemler kullanılarak sayısal iterasyon süreci kullanılacaktır. Jaya algoritması kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak yapının yer değiştirme tepkilerini düşürme yönünden optimum tasarım değişkenleri hesaplanacaktır.

Bu çalışmada, deprem uyarılarına maruz kalan düzensiz binaların titreşim kontrolü için pasif kontrol sistemlerinden tekli ve çift TMD'nin optimum ve pratik bir tasarım prosedürü önerilecektir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, ilk olarak, optimizasyon tanımı hakkında kısa bir giriş ve optimizasyonda genel olarak kullanılan algoritmalar ve genel olarak optimizasyon problemlerinin matematiksel modellerle tanımlanması hakkında denklemler sunulmuştur. İkinci olarak, yaygın olarak kullanılan meta-sezgisel algoritmalar ve optimizasyonda kullanılan denklemlerin tanımına yer verilmiştir. Üçüncü olarak, bu tez çalışmasında ağırlıklı olarak kullanılan meta-sezgisel algoritmalardan Jaya algoritmasının optimizasyon işlemler hakkında algoritma tanımına yer verilmiştir. Son olarak TMD'in optimum parametrelerin elde edilmesiyle ilgili türetilen denklemlerin tanımı hakkında bilgiler sunulmuştur.

3.1.OPTİMİZASYONA GİRİŞ

Optimizasyon, değişkenlerin kabul edilebilir değerlerini içeren ve bazı kısıtlamaların yerine getirilmesi gereken bir alan içindeki tek veya bir dizi amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize etmeye çalışan problemlere bir çözüm bulma olarak tanımlanabilir. Tanımlanan kısıtlamaları yerine getirirken amaç fonksiyonlarını maksimize eden veya minimize eden çok sayıda değişken kümesi olabilir. Bunlara kabul edilebilir çözümler ve aralarından en iyi olana ise problemin en uygun çözümü denir. Birçok gerçek dünya ve teorik problem bu genel çerçevede modellenebilir. Bir amaç fonksiyonu, modelin minimize veya maksimize edilecek ana amacını ifade eder. Örneğin, bir üretim sürecindeki amaç, karı maksimize etmek veya maliyeti minimize etmek olabilir. Bir yapı tasarlarken amaç, mukavemeti en üst düzeye çıkarmak veya yer değiştirmeleri en aza indirmek veya birçok amacın bir kombinasyonu olabilir. Mühendislik sistemlerinin tasarımı için en uygun şekle sokma tekniklerinin kullanılması, tasarımcıların sistemin performansını, kullanımını, güvenilirliğini ve maliyetini iyileştirmelerine yardımcı olur. Tipik bir mühendislik sistemi bir dizi parametre ile tanımlanır ve bu değişkenler için uygun değerleri belirlemek tasarımcının görevidir. Yetenekli tasarımcılar, bu değişkenleri belirlemek ve etkili mühendislik sistemleri tasarlamak için bilgi, deneyim ve yargılarını kullanırlar. Bununla birlikte, tipik tasarım görevinin boyutu ve karmaşıklığı nedeniyle, en yetenekli tasarımcılar bile tüm değişkenleri aynı anda hesaba katamazlar. Optimizasyon metodolojileri, bitmiş tasarımın yüksek performansa, yüksek güvenilirliğe, düşük ağırlığa ve/veya düşük maliyete sahip olmasını sağlamak için ürün

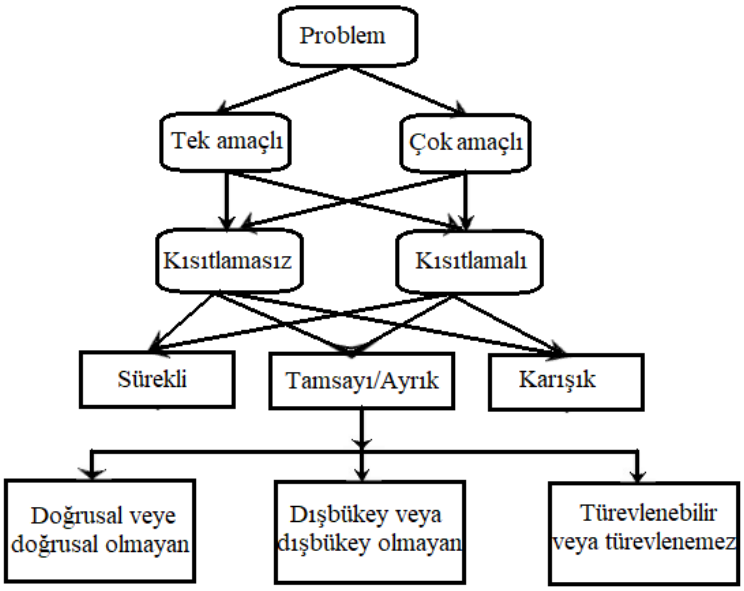
geliştirme aşamasında uygulanabilir. Alternatif olarak, potansiyel tasarım iyileştirmelerini belirlemek için mevcut ürünlere optimizasyon yöntemleri uygulanabilir (Rao, 2019).

Çeşitli mühendislik alanlarındaki çeşitli problemler, optimizasyon problemleri olarak formüle edilebilir. Bu nedenle, en uygun çözümlerin elde edilmesi daha iyi optimizasyon algoritmaları gerektirir. Geometrik programlama, doğrusal olmayan programlama, sıralı programlama, hedef programlama, dinamik programlama vb. gibi bir dizi geleneksel optimizasyon algoritmaları, özellikle türevlenemeyen, ilişkili parametre, dışbükey olmayan ve doğrusal olmayan amaç fonksiyonları ile büyük ölçekli problemler için en uygun çözümlere ulaşamamaktadır. Ayrıca, geleneksel optimizasyon yöntemleri birçok pratik durumda iyi performans göstermiş olsa da esas olarak kendi doğal arama mekanizmalarıyla ilgili belirli sınırlamalara sahiptirler. Yukarıda bahsedilen problemlerin üstesinden gelmek ve tasarım problemleri için verimli ve etkili optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle, geleneksel optimizasyon tekniklerinin sınırlamalarını göz önünde bulunduran araştırmacılar, doğadan ilham alarak geliştiren ve yaygın olarak meta-sezgisel olarak bilinen bir dizi gelişmiş optimizasyon algoritması geliştirmişler.

Literatürde deterministtik, yineleme tabanlı, skolastik, popülasyon tabanlı gibi çeşitli sınıflandırma kriterleri dikkate alınmıştır. Popülâsyona dayalı algoritmaların arama süreci, rastgele aday çözümlerin oluşturulmasıyla başlatılır. Başlangıç popülâsyonu, bir sonlandırma koşulu sağlanana kadar zamanla artar (Belazi, 2018). Bu tür algoritmalar iki ana grupta sınıflandırılabilir: sürü zekâsına dayalı algoritmalar ve evrimsel algoritmalar (EA). Tanınan evrimsel algoritmalardan bazıları şunlardır: Genetik Algoritma (GA), Evrim Stratejisi (ES), Evrim Programlama (EP), Diferansiyel Evrim (DE), Bakteri Toplayıcılık Optimizasyonu (BFO), Yapay Bağışıklık Algoritması (AIA), vb. İyi bilinen sürü zekâsı tabanlı algoritmalardan bazıları şunlardır: Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Karışık Kurbağa Sıçrayan (SFL), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO), Yapay Arı Kolonisi (ABC), Ateşböceği (FF) algoritması, vb. Evrimsel ve sürü zekâsına dayalı algoritmaların yanı sıra, farklı doğa olaylarının prensipleri üzerinde çalışan başka algoritmalar da vardır. Bunlardan bazıları: Armoni Arama (HS) algoritması, Yerçekimi Arama Algoritması (GSA), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BBO), El Bombası Patlama Yöntemi (GEM), vb. (Rao, 2016).

Optimizasyon problemi sadece tek bir amaç fonksiyonu veya birkaç amaç fonksiyonu içerebilir. Yalnızca bir amaç fonksiyonu içeren bir probleme tek amaçlı optimizasyon problemi denir. Birden fazla amaç fonksiyonu içeren bir probleme çok amaçlı optimizasyon problemi denir.

Yapısal optimizasyon problemleri üç sınıfa ayrılabilir: boyutlandırma, şekil ve topoloji optimizasyonu. Boyutlandırma optimizasyonunda yapısal elemanların yerleri ve sayıları sabittir ve nettir. Genellikle, sorun en uygun çözümü bulmak için tek elemanların özelliklerinin optimizasyonuna indirgenir. Şekil optimizasyonunda, bir yapısal alanın sınırının kontrolü, yapının bağlantısını aynı tutarken optimize edilir, başka bir deyişle, yeni sınır şartları oluşturmaz. Topoloji optimizasyonu, yapısal elemanların hem boyutunun hem de konumunun belirlenmesi ve yeni sınırların oluşumuna izin verilmesi anlamında en genel olanıdır. Yapıdaki bağlantı sayısı, bağlantı destek yerleri ve her bir birleşime bağlanan elemanların sayısı bilinmemektedir. Başka bir deyişle, tek elemanların şekline ek olarak yapının topolojisi ve şekli de optimize edilmiştir. Optimize edilen yapı, soruna bağlı olarak mekanik bir cihazın bir bileşeninden tam ölçekli bir yapının bir üyesine kadar önemli ölçüde değişebilir. Yapısal deprem mühendisliğindeki sorunların çoğu, boyutlandırma optimizasyonu kategorisine girer ve tam ölçekli yapılarla ilgilenir. Genel optimizasyon problemleri **Şekil 3.1**'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3.1: Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması.

3.1.1. Optimizasyon Probleminin Matematiksel Modeli

Optimizasyonun temel konsepti, belirli bir model/problem için mümkün olan en iyi çözümü (nokta veya alternatif) bulmaktır. Bunu bulmak için, tüm alternatifleri incelemeli ve seçilenin gerçekten en iyisi olduğunu kanıtlamalıdır. Layman'ın terimleriyle, en uygun şekle sokma problemi, verilen bir kümede çok değişkenli bir fonksiyonun maksimum veya minimum limit değerini bulmaktır. Neredeyse tüm en uygun şekle sokma problemleri aşağıdaki matematiksel modellerle tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} &\min f(x), \\ &s.t.\ x \in K, \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada, K belirli bir kümedir (uygulanabilir bir küme veya uygulanabilir bölge olarak adlandırılır), $f(x)$, K kümesinde tanımlanan gerçek değerli bir fonksiyondur. Ayrıca, formül (3.1)'de, x genellikle bir karar değişkeni olarak adlandırılır, s.t. ise sınır şartları kısaltmasıdır. İnsanlar genellikle optimizasyon problemini Denklem (3.1)'de kabaca uygulanabilir kümenin doğasına göre sınıflandırırlar:

- Doğrusal programlama ve doğrusal olmayan programlama. (Uygulanabilir küme, sonlu boyutlu uzayın bir alt kümesidir.)
- Kombinasyon optimizasyonu veya ağ planlaması. (Uygulanabilir kümedeki öğeler sınırlıdır.)
- Dinamik programlama. (Uygulanabilir set zamana bağlı bir karar dizisidir.)
- En iyi kontrol. (Uygulanabilir küme, sonsuz boyutlu bir alanda sürekli bir alt kümedir.)

Mühendislik tasarımında doğrusal olmayan programlamanın önemli uygulamaları vardır ve matematiksel modeli şu şekilde ifade edilebilir:

$$\min f(x) \tag{3.2}$$

$$s.t.\ h_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \cdots, l \tag{3.3}$$

$$g_i(x) \geq 0, \quad i = 1, 2, \cdots, m \tag{3.4}$$

Bunlar arasında, $f(x)$, $h_i(x)$ (i = 1, 2, …, l) ve $g_i(x)$ (i = 1, 2, …, m) R^n değer fonksiyonunda tanımlanan sürekli türleşebilir çok değişkenli gerçek değerli fonksiyondur ve bunlardan en az biri doğrusal değildir.

$$E = \{i : h_i(x) = 0\}, \quad I = \{i : g_i(x) \geq 0\}; \tag{3.5}$$

Eğer indeks $E \cup I = \varnothing$ olarak ayarlanmışsa, buna kısıtlanmamış bir optimizasyon sorunu denir; Aksi takdirde, sınırlı optimizasyon sorunu olarak adlandırılır. Özellikle, $E \neq \varnothing$ ve $I = \varnothing$ optimizasyon problemine eşitlik kısıtlı optimizasyon problemi denilir; $I \neq \varnothing$ ve $E = \varnothing$ optimizasyon problemine eşitsizlik kısıtlı optimizasyon problemi denilir. $f(x)$ amaç fonksiyonu olarak adlandırılır, $h_i(x)$, $g_j(x)$ (i = 1, 2, …, l; j = 1, 2, …, m) kısıtlama fonksiyonu olarak adlandırılır. Ayrıca, amaç fonksiyonunun ikinci dereceden bir fonksiyon olduğu ve kısıtlama fonksiyonunun doğrusal bir fonksiyon olduğu optimizasyon problemine genellikle ikinci dereceden programlama denir; hem amaç fonksiyonunun hem de kısıtlama fonksiyonunun lineer fonksiyon olduğu optimizasyon problemine lineer programlama denir.

3.2.METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

Son zamanlarda, sezgisel yöntemlerin verimliliğini arttırmada araştırmacılar, geleneksel optimizasyon tekniklerinin sınırlamalarını göz önünde bulundurarak, yaygın olarak meta-sezgisel olarak bilinen bir dizi gelişmiş optimizasyon algoritması geliştirmişler. Bu yöntemler, arama alanındaki umut verici bölgeleri makul bir hesaplama çabasıyla keşfetme ve bulma yetenekleri nedeniyle tüm arama alanı boyunca küresel aramalar için uygundur. Sonuç olarak, meta-sezgisel algoritmalar çoğu optimizasyon problemi için oldukça iyi performans gösterme eğilimindedir. Sezgisel kelimesi, eski Yunan eseri heuriskein'de kökenlidir, bu da problemleri çözmek için yeni stratejiler veya kurallar keşfetme sanatı anlamına gelir. Sonek meta, aynı zamanda bir Yunan öneki, İngilizce dilinde daha yüksek bir soyutlama seviyesi anlamına geldi. “Metaheuristik” terimi Glover tarafından bir makalede tanıtıldı (Glover ve Kochenberger, 2003) ve daha yüksek seviyelerde soyutlamalar kullanarak bir problemi çözme ve çözüm alanının sezgisel bir araştırmasına rehberlik etme stratejisini ifade eder.

Metasezgisel algoritmalar, Uygulamalı Matematik, Mühendislik, Tıp, Ekonomi ve diğer bilimlerin farklı alanlarında birçok uygulama bulmuştur. Mühendislikte, bu yöntemler İnşaat,

Mekanik, Elektrik ve Endüstriyel projelerin tasarım aşamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tüm algoritmaların ana sınırlaması, bu algoritmaların düzgün çalışması için farklı parametrelerin (yani algoritmaya özgü parametreler) gerekli olmasıdır. Bu algoritmalar tarafından optimum çözümün aranması için bu parametrelerin uygun şekilde ayarlanması esastır. Algoritmaya özgü parametrelerdeki bir değişiklik, algoritmanın etkinliğini değiştirir. Algoritmaya özgü parametrelerin uygun olmayan şekilde ayarlanması ya hesaplama eforunu arttırır ya da yerel optimal çözümü verir. Bu gerçeği göz önünde bulundurarak Rao 2011 yılında, algoritmaya özgü herhangi bir parametre gerektirmeyen öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritmasını tanıtmıştır. TLBO algoritmasının çalışması için yalnızca popülasyon büyüklüğü ve birkaç nesil gibi ortak kontrol parametrelerini gerektirir. TLBO algoritması, optimizasyon araştırmacıları arasında geniş bir kabul görmüştür. TLBO algoritmasının başarısını göz önünde bulundurarak, Rao 2016 yılında algoritmaya özgü parametresiz başka bir algoritma önerilmiş ve Jaya algoritması olarak adlandırmıştır. Ancak TLBO algoritmasının iki aşamasından (yani öğretmen aşaması ve öğrenci aşaması) farklı olarak Jaya algoritmasının yalnızca bir aşaması vardır. Jaya algoritması kavram olarak basittir ve diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bu algoritma, daha az hesaplama çabası ve yüksek tutarlılık ile sürekli ve ayrık optimizasyon problemleri için global çözümler elde etmek için kullanılabilir.

İnşaat mühendisliğinde doğrusal olmayan tasarım problemlerinin çözümünde analitik yaklaşımlar ve geleneksel yöntemler etkili olmadığında, karmaşık mühendislik problemlerinin optimum tasarımında meta-sezgisel algoritmalar büyük rol oynamaktadır. Genel olarak konuşursak, bu tasarım problemleri karmaşık kısıtlamalar ile oldukça doğrusal değildir ve bu nedenle de oldukça çok modludur. Bu tasarım kısıtlamaları genellikle tasarım gereksinimlerinden ve dış yükleme, çevresel faktörler ve hizmet yükleri altında kullanılabilirlik nedeniyle üyeler üzerindeki stresler gibi güvenlik önlemlerinden kaynaklanır. Tasarım kısıtlamalarına ek olarak, tasarım değişkenleri için çözüm aralıkları tanımlanmalıdır. Matematiksel bir çözüm ideal bir dünyada en iyi yaklaşım olabilir, ancak mühendislik tasarımında, bir değişken bir kütle veya uzunluk ise, tasarım değişkeninin değeri gerçekçi olmalıdır. Ayrıca tasarım değerleri pratikte üretilebilecek bir şeye karşılık gelmelidir.

Mühendislikte optimum bir tasarım problemi matematiksel formda şu şekilde yazılabilir:

$$\text{Minimize } f_i(x),\ x \in R^n,\ (i = 1, 2, \ldots, N) \tag{3.6}$$

Denklem (3.6)'ya bağlı olarak,

$$h_j(x),\ (j = 1, 2, \ldots, J) \tag{3.7}$$

$$g_k(x) \leq 0,\ (k=1,2,\ldots,K) \tag{3.8}$$

Burada,

$$x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T,\ (i = 1, 2, \ldots, n) \tag{3.9}$$

Tasarım değişkenlerini içeren tasarım vektörüdür. Amaç fonksiyonları $f_i(x)$ eşitliklerle ilgili tasarım kısıtlamaları $h_j(x)$ ve eşitsizlikler $g_i(x)$ tasarım vektörünün (x) fonksiyonudur. Meta-sezgisel algoritmaların kullanıldığı bir optimizasyon sürecinde, tasarım değişkenleri rastgele atanır ve daha sonra amaç fonksiyonları ve tasarım kısıtlamaları hesaplanır. Tasarım kısıtlamaları genellikle cezalı bir amaç fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir. Tasarım değişkenlerinin belirli bir değer kümesi bir tasarım kısıtlaması için uygun değilse, en aza indirilmesi gereken amaç fonksiyonu bir miktar ceza ile artırılmalıdır.

Tasarım değişkenleri seti veya tasarım vektörü, birkaç kez (veya popülasyon sayısı) oluşturulur ve olası çözümleri içeren bir matris olarak saklanır. Bu algoritmanın başlangıç kısmıdır ve süreç tüm meta-sezgisel algoritmalar için benzerdir. Bu ilk işlemden sonra amaç, ilgilenilen algoritmanın özel ilkelerine dayalı olarak sonuçları iyileştirmeye çalışmaktır. Bu ilkeler, her meta-sezgisel algoritma için farklıdır ve genellikle biyolojik veya doğal bir süreçten ilham alır veya bunlarla ilişkilidir. Bir sürecin gözlemlerinden ilham alan meta-sezgisel algoritmalar, genellikle yineleme sırasında mevcut tasarım değişkenlerini güncellemek için kullanılabilecek bir dizi güncelleme denklemi sağlar. Aşağıdaki alt başlıklarda çeşitli meta-sezgisel algoritmalar özetlenmiş ve bu algoritmalarla ilgili literatür çalışmaları da tartışılmıştır.

3.2.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritmaların temel ilkeleri ilk kez Michigan Üniversitesi'nde John Holland tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır. Genetik algoritma (GA), en eski meta-sezgisel algoritmalardan biridir, doğadaki evrime dayanan güçlü ve etkili araştırma

algoritmaları olarak tanımlamıştır. Charles Darwin'in doğal seleksiyon teorisine dayanmaktadır.

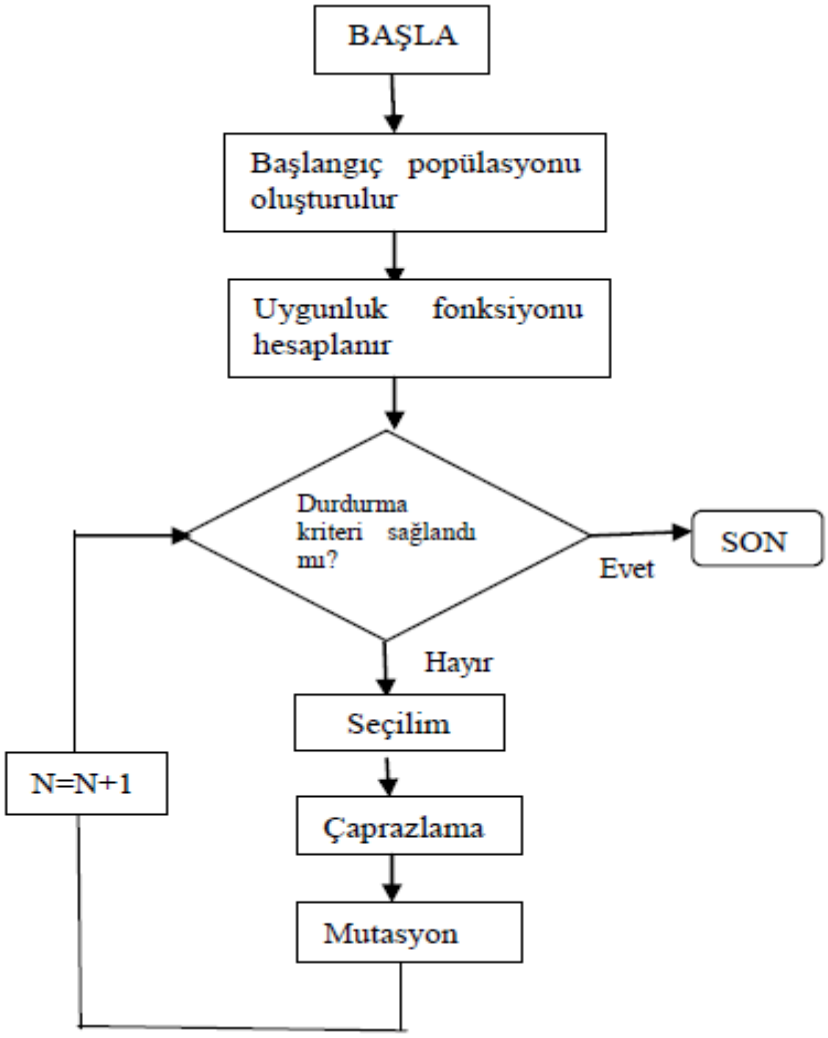
Genetik algoritmalar özellikle çözüm uzayının geniş, süreksiz, karmaşık olduğu durumlarda başarılı sonuçlar vermektedir. Genetik algoritmanın akış diyagramı ise **Şekil 3.2**'de verilmiştir. Genetik algoritma (GA) prosedürü aşağıdaki yedi adımda özetlenebilir:

Tablo 3.1: Genetik algoritmanın sözde kodu (Demirtaş ve Zengin, 2016).

1: Başlangıç popülâsyonu oluşturulur.
2: Popülâsyondaki bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır.
3: Popülâsyondaki bireyler çaprazlama için birey seçim yöntemine göre seçilir.
4: Seçilen bireyler çaprazlama olasılığına göre çaprazlanarak yeni bireyler oluşturulur.
5: Yeni bireylere mutasyon olasılığına göre mutasyon uygulanır.
6: Yeni bireyler popülâsyonun mevcut bireyleri olarak belirlenir.
7: Belirtilen nesil sayısına ulaşılana kadar veya hedef değere ulaşılana kadar Adım 2'ye gidilir.

3.2.2. Guguk Kuşu Arama Algoritması

Guguk kuşu araması (CS), özel yaşam tarzları ve saldırgan üreme stratejileri nedeniyle guguk adı verilen bir kuş ailesinin bazı türlerinden esinlenerek 2009 yılında Yang ve Deb tarafından geliştirilmiş meta-sezgisel bir algoritmadır (Yang ve Deb, 2009). Bu türler, yeni yumurtlayan yuvaları seçme ve mevcut yumurtaları çıkarma gibi şaşırtıcı yeteneklerle yumurtalarını diğer ev sahibi kuşların yuvalarına bırakırlar ve bu da yumurtalarının kuluçka olasılığını artırır. Ek olarak, bu algoritma basit izotropik rastgele yürüyüşlerden ziyade Lévy uçuşları ile geliştirilmiştir (Pavlyukevich, 2007).



Şekil 3.2: Genetik algoritma akış diyagramı (Demirtaş ve Zengin, 2016).

Son çalışmalar, Guguk kuşu aramasının (CS) PSO ve genetik algoritmalardan potansiyel olarak çok daha verimli olduğunu göstermektedir (Yang ve Deb, 2010; 2013). Matematiksel olarak konuşursak, guguk kuşu araması (CS), P_a anahtarlama parametresi tarafından kontrol edilen yerel rastgele yürüyüş ve küresel keşif rastgele yürüyüşünün dengeli bir kombinasyonunu kullanır. Yerel rastgele yürüyüş şu şekilde yazılabilir:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha s \otimes H(P_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \tag{3.10}$$

Burada x_j^t ve x_k^t , rastgele permütasyonla rastgele seçilen iki farklı çözümdür, $H(u)$ bir Havisinde işlevidir, ϵ düzgün bir dağılımdan çizilen rastgele bir sayıdır ve s adım boyutudur. Öte yandan, küresel rastgele yürüyüş, Lévy uçuşları kullanılarak gerçekleştirilir:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \lambda) \tag{3.11}$$

Burada,

$$L(s,\lambda) = \frac{\lambda\Gamma(\lambda)\sin(\pi\lambda/2)}{\pi}\frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (s>0) \tag{3.12}$$

Burada $\alpha > 0$, ilgilenilen problemin ölçekleriyle ilgili olması gereken adım boyutu ölçeklendirme faktörüdür.

Guguk kuşu araması (CS) denklemlerine matematiksel bir bakış açısıyla bakarsak, temel özelliklerini ve niteliklerini analiz edebilir ve böylece avantajlarını vurgulayabiliriz. CS'nin, GA ve SA gibi diğer algoritmalara göre iki belirgin avantajı vardır ve bu avantajlar şunlardır: verimli rastgele yürüyüşler ve dengeli karıştırma. Lévy uçuşları genellikle diğer rastgele yürüyüşe dayalı restleştirme tekniklerinden çok daha verimli olduğundan, CS küresel aramada verimli olabilir. Aslında, son çalışmalar CS'nin küresel yakınsamayı garanti edebileceğini göstermektedir (Yang, 2014).

Başka bir deyişle, CS, Lévy uçuşları tarafından gerçekleştirilen değişken bir mutasyon oranına sahiptir ve çözüm benzerliğine dayanan yeni çözümlerin fitnesi orantılı üretimi, ince bir geçit şekli sağlar. Buna ek olarak, simülasyonlar, CS'nin yeni çözümlerin umut verici küresel en uygun değerin bulunduğu bölgeye otomatik olarak yakınlaştırabilmesi anlamında otomatik yakınlaştırma yeteneğine sahip olabileceğini de göstermektedir.

3.2.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), sürüsü zekâsına dayanan ilk algoritmalardan biridir. PSO, 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından (Kennedy ve Eberhart, 1995), balıkların veya kuşların doğada sürü davranışına dayalı olarak geliştirilmiştir. Her parçacık x_i konumunu ve ν_i hızını günceller ve evrimleri, tipik $\alpha \approx \beta \approx 2$ değerleri ve [0,1] ' de eşit olarak dağıtılan iki rastgele ε_1 ve ε_2 vektörü ile iki α ve β öğrenme parametresi tarafından kontrol edilir. Kısaca söylemek gerekirse, PSO'nun ana denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\upsilon_i^{t+1} = \upsilon_i^t + \alpha\varepsilon_1\left[g^* - x_i^t\right] + \beta\varepsilon_2\left[x_i^* - x_i^t\right] \tag{3.13}$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \upsilon_i^{t+1} \tag{3.14}$$

PSO'nun iki düzineden fazla çeşidi vardır. Örneğin, Yang ve ark. Hızlandırılmış PSO'yu geliştirdi (Yang ve diğ. 2011), Fister ve diğ. PSO'nun verimliliğini artırmak için bazı akıl yürütme teknikleri kullanılmıştır (Fister ve diğ. 2014).

3.2.4. Ateşböceği Algoritması

Ateşböceği algoritması (FA) basit, esnek ve uygulaması kolaydır. Ateşböceği algoritması (FA) 2008 yılında Yang tarafından geliştirilmiştir, tropikal ateşböceklerinin yanıp sönen kalıplarına ve davranışlarına dayanmaktadır. Bu böcekler arklı uçan desenlerle biyolüminesans kullanarak iletişim kurar, av arar ve eşler bulurlar. FA'nın ana avantajlarından biri, FA'nın doğrusal olmayan çok modlu optimizasyon problemleriyle doğal olarak başa çıkabilmesidir. Bir ateşböceği i'nin hareketi başka bir daha çekici (daha parlak) ateşböceği j'ye çekilir ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}(x_j^t - x_i^t) + \alpha \varepsilon_i^t \tag{3.15}$$

Burada, ikinci terimin çekimden kaynaklandığı ve β_0'ın r = 0'daki çekiciliktir. Üçüncü terim, rasgeleleştirme parametresi olan α ile rasgele değer türetimi işlemidir ve ε_i^t , t zamanında bir Gauss dağılımından alınan rastgele sayıların bir vektörüdür. Diğer çalışmalar ayrıca, Lévy uçuşları gibi diğer dağılımlara kolayca genişletilebilen ε_i^t açısından rasgeleştirme kullanır. Ateşböceği algoritması ve varyantlarının kapsamlı bir incelemesi Fister ve diğerleri tarafından yapılmıştır (Fister ve diğ., 2013). FA'nın yeni bir özelliği, çekiciliğin kullanılmasıdır ve bu, herhangi bir SI tabanlı algoritmada türünün ilk örneğidir. Yerel çekim, uzun mesafeli çekimden daha güçlü olduğu için, FA'deki nüfus otomatik olarak birden fazla alt gruba bölünebilir ve her grup potansiyel olarak yerel bir mod etrafında toplanabilir. Tüm yerel modlar arasında, her zaman problemin gerçek en iyi değeri olan global bir en iyi çözüm vardır. Böylece, FA çok modlu problemlerle doğal ve verimli bir şekilde başa çıkabilir.

Ateşböçeği algoritması üç kurala dayanmaktadır. Bunlar:

1. Tüm ateşböcekleri unisex olduğundan birbirlerini çekerler.
2. Çekicilik, ateş böceği parlaklığına bir önermedir. Herhangi bir çift yanıp sönen ateş böceği için, daha az parlak olan, daha parlak olana doğru hareket eder. Çekicilik

parlaklıkla orantılıdır ve ikisi de mesafe arttıkça azalır. Belirli bir ateş böceğinden daha parlak biri yoksa rastgele hareket edecektir.

3. Bir ateşböceğinin parlaklığı, objektif fonksiyonun manzarasından etkilenir veya belirlenir.

3.2.5. Yarasa Algoritması

Yarasa algoritması (BA), en uygun şekle sokma amacıyla frekans ayarını kullanan türünün ilk algoritmasıdır. Yarasa algoritması (BA), 2010 yılında Yang tarafından mikro yarasaların ekolokasyon davranışından esinlenerek geliştirilmiştir. Her yarasa, *d* boyutlu bir arama veya çözüm alanında, *t* yinelemesinde bir hız υ_i^t ve x_i^t bir konum ile ilişkilidir. Tüm yarasalar arasında mevcut en iyi çözüm $x*$ vardır. Bu nedenle, x_i^t konum ve υ_i^t hız için güncelleme denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \tag{3.16}$$

$$\upsilon_i^t = \upsilon_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x*) f_i \tag{3.17}$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \upsilon_i^t \tag{3.18}$$

Burada, $\beta \in [0,1]$ düzgün bir dağılımdan çizilen rastgele bir vektördür.

Yarasaların hareketi yukarıdaki denklemlerle güncellenir, ancak ne zaman güncelleneceği ve ilk önce hangi dalın güncelleneceği, her yarasanın ses yüksekliği ve nabız sürüm oranı ile kontrol edilir. En basit durumda, ses yüksekliği ve darbe sürüm oranları aşağıdaki denklemlerle düzenlenir:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \tag{3.19}$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \left[1 - \exp(-\gamma t)\right] \tag{3.20}$$

Burada $0 < \alpha < 1$ ve $\lambda > 0$ değişken sabitleridir. Gevşek bir şekilde konuşursak, burada α, simülasyon edilmiş tavlamada bir soğutma programının soğutma faktörüne benzer. Son yıllarda BA çalışmasına çok ilgi duyulmuştur ve BA çok amaçlı optimizasyona (Yang, 2011) ve çeşitli varyantlara genişletilmiştir. Örneğin, Fister ve diğ. Tarafından hibrit bir yarasa algoritmasına genişletildi. Ön sonuçlar, çok verimli olduklarını ileri sürmüştür (Yang, 2012).

3.2.6. Levy Uçuşu ile Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması, arı kolonilerinin yiyecek kaynağı arama davranışlarına dayanarak, 2005 yılında kara boğa tarafından simülasyon edilerek geliştirilmiştir. Bu kolonilerdeki işçi, gözcü ve izci olarak üç farklı kategoriye ayrılan bal arıları, algoritmada negatif geri besleme, pozitif geri besleme ve rastgele hareketleri temsil etmektedir. Başlangıçtaki gıda kaynakları problemin arama alanında rastgele olarak üretilmektedir. Amaçları kovandaki nektar miktarının zenginliğinin artmasını sağlamak olan bal arılarının yarısı işçi arıları, diğer yarısı ise gözcü arılarıdır ve gıda kaynağı etrafındaki yığılma davranışı, işçi arılar ile başlar. İşçi arılar, her bir gıda kaynağı hafızalarına kaydeder ve bilgiler kovanda bekleyen gözcü arılar ile paylaşılır. Paylaşılan bilgilere göre kovanın yakın çevresindeki besin kaynaklarını gözcü arılar, kovandan uzak mesafelerde olanları ise izci arılar toplarlar. Gözcü ve izci arılar kovana geri dönecek yiyecek kaynağı bilgilerini işçi arılar ile paylaşırlar. Yeni gıda kaynağının bilgisi başlangıç gıda kaynağı konumu bilgisinden daha iyi ise bu bilgi güncellenir (Yücel, 2019).

Yapay arı kolonisi algoritması dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar başlangıç aşaması, işçi arılar aşaması, gözcü arılar aşaması ve kâşif arılar aşamasıdır. Bu aşamalar, Mini. z = f (x) optimizasyon problemi için aşağıda özetlenmiştir. Burada x, n adet tasarım değişkeninin bir vektörüdür.

1) Başlatma aşaması: Gıda kaynakları popülasyonunun tüm vektörlerini x_p, (p = 1, . . ., n_p) denklem (3.21)'i kullanılarak başlat, burada n_p popülasyon büyüklüğüdür (toplam yapay arı sayısı). Her bir besin kaynağı, n değişkenden oluşan bir çözüm vektörüdür (x_{pi} , i = 1, ... , n) optimizasyon problemine potansiyel bir çözümdür.

$$x_{pi} = x_{li} + rand(0,1)(x_{ui} - x_{li}) \tag{3.21}$$

   burada x_i ve x_{ui}, x_i üzerinde üst ve alt sınırlardır. rand (0, 1) 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

2) İşçi arılar aşaması: İşçi arılar denklem (3.22)'i kullanarak yeni besin kaynakları ararlar.

$$v_{pi} = x_{pi} + \varphi_{pi}(x_{pi} - x_{ki}) \tag{3.22}$$

$k \neq i$ Rastgele seçilmiş bir besin kaynağı olduğunda, φ_{pi} [-1, 1] aralığında rastgele bir sayıdır. Yeni besin kaynağı (çözüm vektörü) üretildikten sonra uygunluğu hesaplanır. Uygunluğu x_{pi} 'den daha iyiyse, yeni besin kaynağı öncekinin yerini alır. Besin kaynaklarının uygunluk değeri denklem (3.23)'e göre hesaplanır.

$$fitness(x_p) = \frac{1}{1 + f(x_p)} \tag{3.23}$$

Burada, $f(x_p)$ besin kaynağı x_p 'nın amaç fonksiyon değeridir.

3) Gözcü arılar aşaması: İşsiz arılar iki gruptan oluşur. Bunlar seyirci arılar ve izciler. İstihdam edilen arılar, besin kaynağı bilgilerini izleyici arılarla paylaşırlar. Seyirci arılar, denklem (3.24)'te gösterildiği gibi popülâsyondaki her besin kaynağının uygunluk değerleri kullanılarak hesaplanan olasılık değerine bağlı olarak besin kaynaklarını seçerler.

$$P_l = \frac{fitness(x_p)}{\sum_{p=1}^{np} fitness(x_p)} \tag{3.24}$$

Gözcü arı için bir besin kaynağı x_{pi} olasılıksam olarak seçildikten sonra, denklem (3.21) kullanılarak bir komşuluk kaynağı belirlenir ve uygunluk değeri denklem (3.23) kullanılarak hesaplanır.

4) İzci arılar aşaması: Besin kaynaklarını rastgele seçen işsiz arılara izci denir. Önceden belirlenmiş sayıda denemeden (PNT) sonra çözümleri geliştirilemeyen istihdam edilen arılar izci olur ve çözümleri terk ederler. Bu izciler yeni çözümler aramaya başlarlar.

Yapay arı kolonisi algoritması, yapısal optimizasyon problemlerinin çözümlerini elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Hadidi ve diğ. 2010; Sonmez, 2011; Talathari ve diğ. 2012; Garg, 2014; Yahya ve diğ. 2014; Aydogdu ve diğ. 2014). Yapay arı kolonisi algoritmasının, genetik algoritma, karınca kolonisi algoritması, parçacık sürü optimizasyonu, büyük patlama-büyük çöküş ve emperyalist rekabet algoritmaları gibi diğer bazı meta-sezgisel algoritmalardan daha iyi performans gösteren sağlam ve verimli bir teknik olduğu sonucuna varılmıştır.

3.2.7. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması

Öğretme-öğrenmeye tabanlı optimizasyon algoritması (TLBO) aynı zamanda bir öğretmenin öğrenciler üzerindeki etkisini taklit eden popülâsyona dayalı bir süreçtir (Rao ve diğ. 2011). Popülâsyon, öğrencilerin sınıfını temsil eder. Optimum tasarım probleminde farklı tasarım değişkenleri, öğrencilere sunulan farklı konular olarak kabul edilir. Öğrencilerin başarısı, amaç fonksiyonunun uygunluk değerine benzer. Algoritma öğretmen aşaması ve öğrenci olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Öğretmen aşamasında, sınıf öğretmenden öğrenir ve öğrenci aşamasında, öğrenme öğrenciler arasındaki etkileşim yoluyla gerçekleşir. Öğretmen aşamasında, bir öğretmen aracılığıyla öğrencilerin öğrenme süreci çoğaltılır. İyi bir öğretmen, öğrencilerin seviyesini bilgi açısından daha yükseğe çıkarmak için çaba gösterir. Bununla birlikte, gerçekte sadece öğrencilerin bilgi düzeyini artırabilecek bir öğretmenin çabası değildir. Öğrencilerin yetenekleri de bu süreçte önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle rastgele bir süreçtir. “N” öğrenci sayısına (nüfus büyüklüğü, k=1, 2, ..., n) sunulan “m” konu sayısı (tasarım değişkenleri) olduğunu varsayalım. Herhangi bir ardışık öğretme-öğrenme döngüsünde i’de, T_i'nin öğretmen olmasına ve M_i öğrencilerin başarılarının ortalaması olmasına izin verilim. T_i, ortalama M_i'yi daha yüksek bir seviyeye taşımaya çalışacaktır. T_i'nin öğretilmesinden sonra yeni bir ortalama M_{yeni} olacaktır. Çözüm, mevcut ve yeni ortalama arasındaki farka göre şu şekilde güncellenir:

$$Fark_Ortalama = r_i(M_{yeni} - T_F M_i) \tag{3.25}$$

T_F, değiştirilecek ortalamanın değerine karar veren bir öğretim faktörü olduğunda, r_i [0, 1] Aralığında rastgele bir sayıdır. T_F değeri 1 veya 2 olabilir. Algoritmada $T_F = round\left[1 + rand(0,1)(2-1)\right]$ şeklinde rastgele hesaplanan bir parametre değildir. Denklem (3.24)'te hesaplanan farkın mevcut çözümü şu şekilde değiştirir:

$$x_{yeni,i} = x_{eski,i} + Fark_Ortalama \tag{3.26}$$

Öğrenme aşamasında, öğrencilerin kendi aralarındaki etkileşim yoluyla öğrenme süreci taklit edilir. Bir öğrenci, grup tartışmaları, sunumlar ve resmi iletişimlerin yardımıyla diğer öğrencilerle rastgele etkileşime girer. Diğer öğrencinin kendisinden daha fazla bilgiye sahip olmadığı sürece, bir öğrencinin daha fazla öğrenebileceğine dikkat edilmelidir. Bu aşamada,

rastgele iki öğrenci x_i ve x_j'nin $i \neq j$ olduğu yerde seçildiğini söyler. Öğrenci değişikliği daha sonra aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x_{yeni,i} = x_{old,i} + r_i(x_i - x_j) \quad \text{if} \quad f(x_i) < f(x_j) \tag{3.27}$$

$$x_{yeni,i} = x_{old,i} + r_i(x_j - x_i) \quad \text{if} \quad f(x_i) > f(x_j) \tag{3.28}$$

$x_{yeni,i}$ daha iyi bir fonksiyon değeri verirse kabul edilir ve bu işlem popülasyondaki öğrenenler için tekrarlanır. Öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması yapısal optimizasyon algoritmaları geliştirmek için kullanılır (Togan, 2012-2013; Degertekin ve Hayalioglu, 2013). Öğretme-öğrenmeye dayalı bir optimizasyon algoritmasının, karşılaştırma için düşünülen meta-sezgisel algoritmalardan daha iyi optimum çözümler üreten sağlam ve verimli bir algoritma olduğu kanıtlanmamıştır.

3.2.8. Armoni Arama Algoritması

Geem ve diğerleri tarafından geliştirilen Armoni Arama (HS) algoritması (Geem ve diğ. 2001), bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır.

Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, HS'nin kullanımı karmaşık değildir, çünkü gradyan arama yerine skolastik rastgele arama kullanılır. Ayrıca bir tepe tırmanma algoritması değildir. Bu nedenle problemlerin çözümünde yerel optimal problemi oluşmaz. HS, ayrık ve sürekli değişkenlerle ilgili problemleri çözmek için uygundur (Lee ve Geem, 2005; Lee ve diğ. 2005). Skolastik türevleri kullanarak, HS algoritmasında yineleme sayısı azaltılabilir. Fonksiyonun matematiksel türevi analitik olarak elde edilemediğinde veya fonksiyonun tipi adım veya durum açısından önemli olduğunda, skolastik türevlerin kullanımı önemlidir (Geem, 2008).

HS algoritması çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Karar değişkenleri için özel bir başlangıç çözümü gerektirmemesi, birden fazla çözümle optimizasyon işlemine devam ettiği için birçok yönde genel optimum çözümü arayarak, bu sayede yerel optimum çözümlerden kurtulması ve optimizasyon işlemlerinde hem sürekli hem ayrık değişkenler kullanılması metodun avantajları olarak ortaya çıkmaktadır.

HS algoritması hesaplama mantığı bakımından genetik algoritma (GA) ile benzerlikleri olmasına karşın, bu iki yöntem arasındaki en belirgin fark yeniden üretim aşamasındaki varsayımlardan kaynaklanmaktadır. GA ile yeni bir karar değişkeninin oluşturulmasında toplum içerisindeki iki adet birey kullanılırken HS metodunda oluşturulan yeni birey toplum içindeki tüm bireylerin özelliklerini taşıyabilmektedir. Ayrıca HS'de bir iterasyonun tamamlanması GA'ya göre daha hızlıdır.

HS algoritmasıyla bir en uygun şekle sokma probleminin çözümü beş adımda (problemin kurulması ve çözüm parametrelerinin belirlenmesi, harmoni belleğinin oluşturulması, yeni harmoni oluşturulması, harmoni belleğinin güncellenmesi, durma koşulunun kontrolü) yapılmaktadır.

Rasgeleleştirme, yeni bir armoni vektörü oluşturulurken armoni aramanın ana kaynağıdır. Denklem (3.29)'da gösterildiği gibidir.

$$S_r = S_{alt} + Rand(S_{ust} - S_{alt}) \tag{3.29}$$

Rastgele bir çözüm (S_r), alt ve üst sınırlarla tanımlanan seçilen bir aralıkta oluşturulabilir. Rand, 0 ile 1 arasında üretilen rastgele bir sayıdır.

3.2.9. Jaya Algoritması

Jaya algoritması, ilk olarak Rao tarafından önerilen hem kısıtlanmamış hem de kısıtlanmış optimizasyon problemlerini ele almak için tasarlanmış meta-sezgisel algoritmadır (Rao, 2016). Popülâsyondaki bireyleri en kötü bireylerden uzak tutarken en yeni bireylere daha yakın tutan ve böylece çözümlerin kalitesini sürekli iyileştiren sürekli iyileştirme ilkesine dayanmaktadır. Optimizasyon açısından performansına ek olarak, kontrol parametrelerinin olmaması bu algoritmanın bir diğer önemli avantajıdır. Bununla birlikte, optimal çözüme ulaşmak veya buna yakın olmak için gereken yineleme sayısı, belki çok yüksek olabilir ve hesaplama maliyeti, zaman gereksinimlerine uyumu engelleyebilir. Geleneksel Jaya algoritması esas olarak yinelemeli denklemi (3.30) dayanır, denklem her seferinde yeni bir çözüm elde etmek için yinelemeli olarak geliştirilir. Bu nedenle, Jaya algoritması diğer evrimsel algoritmalar gibi çok fazla parametre gerektirmez. Yalnızca belirli problemler için yinelemeli sürecin parametrelerini ayarlaması gerekir, bu da çok fazla parametrenin ayarlanmasından kaynaklanan test sorununu azaltır. Diğer meta-sezgisel algoritmalarla

karşılaştırıldığında, Jaya algoritmasının anlaşılması ve uygulanması daha kolaydır. Algoritmanın yeni çözümler üretme formülü aşağıdaki gibidir:

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i} * (X_{j,en\ \text{iyi,i}} - |X_{j,k,i}|) - r_{2,j,i} * (X_{j,en\ \text{kotu,i}} - |X_{j,k,i}|) \quad (3.30)$$

$f(x)$ minimize edileceğimiz (veya maksimize edilecek) amaç fonksiyonu olsun. Herhangi bir *i* iterasyonda, '*m*' sayıda tasarım değişkeni (*j*=1,2,…,*m*), '*n*' sayıda aday çözümü (popülasyon büyüklüğü, *k*=1,2,…,*n*) olduğunu varsayalım. En iyi adayın tüm aday çözümlerinde en iyi $f(x)$ değerini ($f(x)_{en\ iyi}$) elde etmesine izin verilir ve en kötü aday en kötü tüm aday çözümlerinde en kötü $f(x)$ değerini ($f(x)_{en\ kotu}$) elde eder. Eğer $X_{j,k,i}$, i'nci iterasyon sırasında k'inci tasarım değişkeninin j'inci aday çözümünün başlangıç matrisindeki değeri ise, bu değer denklem 1'e göre değiştirilir. Burada, $X_{j,en\ \text{iyi},i}$ amaç fonksiyonu açısından en iyi olan çözüme ait j. tasarım değişkeni değerini ve $X_{j,en\ \text{kotu},i}$ amaç fonksiyonu açısından en kötü olan çözümün yer aldığı vektördeki j. tasarım değişkeni değeri ifade eder. $X'_{j,k,i}$ ise $X_{j,k,i}$ 'nin j. tasarım değişkeni için belirlenecek yeni değerini; $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$ ise [0, 1] aralığındaki i'nci iterasyon sırasında j'inci değişken için iki rastgele sayıdır. "$r_{1,j,i} * ((X_{j,en\ \text{iyi},i} - | X_{j,k,i}|)$ " terimi çözümün en iyi çözüme yaklaşma eğilimini gösterir ve "$-r_{2,j,i} * (X_{j,en\ kotu,i} - | X_{j,k,i}|)$ " çözümün en kötü çözümden kaçınma eğilimini gösterir. $X'_{j,k,i}$ daha iyi fonksiyon değeri veriyorsa kabul edilir. Yinelemenin sonunda kabul edilen tüm fonksiyon değerleri korunur ve bu değerler bir sonraki yinelemenin tasarım değişkeni olarak kabul edilir.

Ayrıca, Jaya algoritması, algoritmanın birkaç bağımsız yürütmesini (Çalıştırmalarını) gerçekleştirir. Daha önce de belirtildiği gibi, Jaya ayar parametrelerinden muaftır. Popülâsyon büyüklüğüne ve üretim sayısına ek olarak, üçüncü giriş parametresi bağımsız yürütme sayısıdır. Hesaplanan tüm çözümler (her bağımsız yürütme için bir tane) göz önüne alındığında, bu sonuçlara ilişkin istatistiksel veriler (en iyi, en kötü ve ortalama çözüm ve ayrıca standart sapma) algoritmanın çıktısını oluşturur.

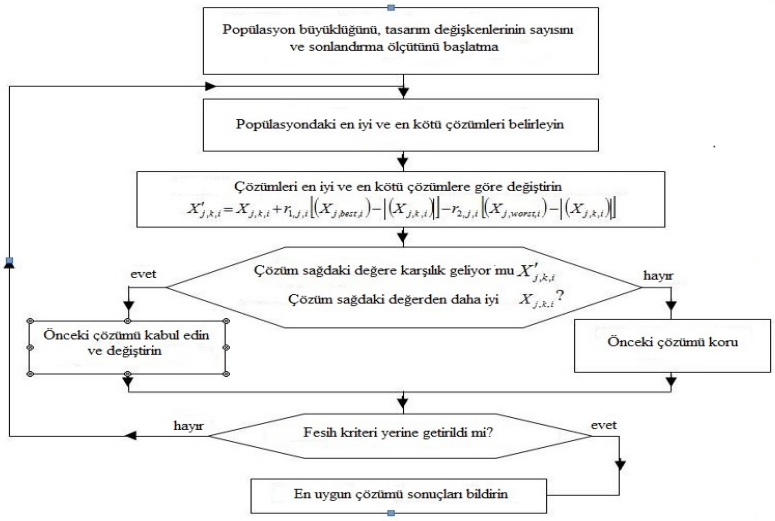
Algoritma 1, Jaya algoritmasının yapısını gösterir: satır 4'te yeni bir üye popülasyonu oluşturulur; satır 6'da üyeler aşağıdaki (1) oluşturulur ve her yeni üye, yeni üye daha iyi ise değiştirilen mevcut popülasyonun üyesi ile karşılaştırılır. Son olarak, çözüm (mevcut popülasyonun en iyi üyesi) 8. satırda depolanır ve mevcut popülasyon kaldırılır (satır 9). Jaya

prosedürünün yeni bir uygulaması başlatılır. Algoritmanın çıktısı, küresel en iyi çözümden ve her bağımsız yürütmede elde edilen çözümlerine ilişkin istatistiksel verilerden oluşur. Dikkat çekici bir şekilde, her Jaya prosedürü uygulaması, yürütmelerin geri kalanından tamamen bağımsız olan yepyeni bir popülasyonla başlar, çünkü rastgele sayıların üretimi için kullanılan değişkenlerin her yürütmede farklı olmasını sağlarız (Jimeno-Morenilla ve diğ 2019).

Şekil 3.3'te önerilen algoritmanın akış şemasını göstermektedir. Algoritma her zaman başarıya yaklaşmaya (yani en iyi çözüme ulaşmaya) ve başarısızlıktan kaçınmaya (yani en kötü çözümden uzaklaşmaya) çalışır.

Tablo 3.2: Jaya algoritması uygulama prosedürü.

Algoritma 1: Jaya algoritması uygulama prosedürü
1: Giriş parametreleri: Popülasyon sayısı, iterasyon sayısı, çalıştır
2: Minimize etmek için bir fonksiyon tanımlayın
3: **for** exec = 1 to Runs **do**
4: Yeni Popülasyon sayısı üret
5: **for** iter = 1 to Iterations **do**
6: Popülasyon sayısını güncelle
7: **end for**
8: Çözümü depola
9: Popülasyon sayısını sil
10: **end for**
11: En iyi çözümü ve İstatistiksel verileri elde edin



Şekil 3.3: Jaya algoritmasının genel akış şeması (Rao, 2016).

3.3.TMD'NİN OPTİMUM PARAMETRE DEĞERLERİNİN SEÇİMİ

Tek serbestlik dereceli TMD'li sistemin genel görünü **Şekil 3.4**'te gösterildiği gibi yapıların üstüne monte edilen kütle m_d , yay k_d ve c_d viskoz sönüm olan bir titreşim sistemidir. Yapı titreşmeye başladığında, TMD yapının hareketi ile uyarılır. Bu nedenle, yapının kinetik enerjisi, TMD'nin viskoz sönümleyici tarafından absorbe edilmek üzere TMD sistemine girer. TMD'nin en verimli enerji emme kapasitesini elde etmek için, TMD'nin doğal periyodu, sistemin "Ayarlanmış Kütle Sönümleyici" olarak adlandırıldığı yapının doğal periyodu ile kendi başına ayarlanır. TMD'nin viskoz sönümleyici, emilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için optimum değere ayarlanmalıdır. TMD, çalışması için herhangi bir harici enerji kaynağına ihtiyaç duymayan mekanik olarak basit bir sistemdir. Kolay bakım ve yüksek güvenilirlik nedeniyle, TMD Japonya'da birçok esnek ve hafif sönümlü kulede, binada ve benzerlerinde kullanılmaktadır. TMD'li sistemin deprem uyarıları altındaki hareket denklemi ise:

$$\mathbf{M}\ddot{x}(t) + \mathbf{C}\dot{x}(t) + \mathbf{K}x(t) = -\mathbf{M}\{\mathbf{1}\}\ddot{x}_g(t) \tag{3.31}$$

burada *x(t),* TMD'li yapı sisteminin yer değiştirme tepki vektördür.

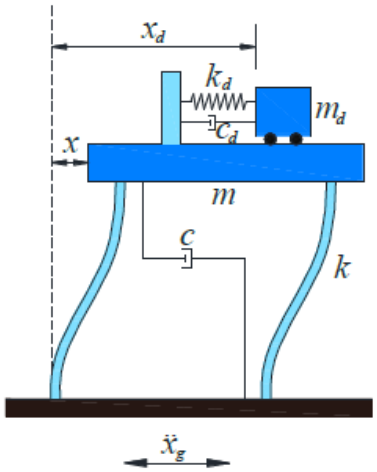
$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

$$C = \begin{bmatrix} 2m\omega\xi + 2m_d\omega_d\xi_d & -2m_d\omega_d\xi_d \\ -2m_d\omega_d\xi_d & 2m_d\omega_d\xi_d \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

$$K = \begin{bmatrix} m\omega^2 + m_d\omega_d^2 & -m_d\omega_d^2 \\ -m_d\omega_d^2 & m_d\omega_d^2 \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

Burada, *x(t)* n×1 adet yer değiştirme vektörünü; *m, ω, ξ* ve m_d, ω_d, ξ_d skaler sırasıyla, ana yapının ve ilave TMD için kütle, frekans ve sönüm oranını; Denklem (3.31)'nin sağ tarafındaki ifade sırasıyla, $-M = \begin{bmatrix} m & m_d \end{bmatrix}^T$, $\{1\}$ birim vektör ve $\ddot{x}_g(t)$ deprem yer ivmesini ifade eden dış uyarmalar ifade eder.

Bir TMD, yapının sadece tek bir titreşim modunun dinamik tepkisini azaltmada etkilidir. Bir yapının gerçekte birçok titreşim modu olmasına rağmen, TMD'nin temel özellikleri, ana yapı ve TMD sisteminden oluşan basitleştirilmiş bir SDOF modeli kullanılarak açıkça tartışılabilir (**Şekil 3.4**).



Şekil 3.4: Tek serbestlik dereceli TMD'li yapı (Bekdaş ve Nigdeli, 2018).

Tek serbestlik dereceli TMD'li bir yapı sistemindeki parametre hesaplama förülleri aşağıdaki gibi verilmiştir:

TMD'nin Doğal Frekansı:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{K_d}{m_d}} \tag{3.35}$$

TMD'nin Sönümleme Oranı:

$$\xi_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d} \tag{3.36}$$

Ana Yapının Doğal Frekansı:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \tag{3.37}$$

Ana Yapının Sönümleme Oranı:

$$\xi = \frac{c}{2m\ \omega} \tag{3.38}$$

Kütle oranı:

$$\mu = \frac{m_d}{m} \tag{3.39}$$

Frekans (Ayar) Oranı:

$$\gamma = \frac{\omega_d}{\omega} \tag{3.40}$$

$\xi_d = 0$ olduğunda, 2-DOF sistemi 2 bağlanmamış titreşim modu gösterir. $\xi_d = \infty$ olduğunda, 2DOF sistemi SDOF titreşim sistemine dönüşür. Harmonik uyarıma maruz kalan kararlı durum dinamik yanıtı analitik olarak elde edilebilir. Genellikle, harmonik uyarımın açısal frekansına karşı çizilen rezonans eğrisi veya dinamik büyütme faktörü (DMF) eğrisi olarak adlandırılır.

3.3.1. TMD'nin Titreşim Azaltma Prensibi ve Parametre Tasarımı

Ayarlı kütle sönümleyici sistemi (TMD), bir ana yapı ve ana yapıya bağlı alt yapılardan oluşan pasif kontrol sistemlerinin biridir. Bunların arasında, alt yapı kat kütle, yaylı amortisör ve sönümleyiciyi içerir ve kütle, rijitlik ve sönümlemeye sahiptir. Kütle ve rijitliği değiştirerek, altyapının doğal frekansını ana yapının temel frekansına veya tepki frekansına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde ayarlanır. Ana yapı uyarıldığında, alt yapı, yapının titreşim yönünün tersine yapıya etki edecek bir eylemsizlik kuvveti oluşturacak, böylece ana yapının titreşim tepkisi zayıflatılacak ve kontrol edilecektir. Harici yükün etkisi altında, sönümlemenin etkisi göz önüne alındığında, TMD sisteminin yapısının titreşim diferansiyel denklemi:

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + (c + c_d)\dot{x}(t) + (k + k_d)x(t) - c_d\dot{x}_d(t) - k_d x_d(t) = p(t) \\ m_d\ddot{x}_d + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) = 0 \end{cases} \tag{3.41}$$

Burada, m , c , k sırasıyla ana yapının kütle, sönüm ve rijitliği ifade eder. m_d , c_d , k_d sırasıyla altyapının kütle, sönüm ve rijitliği ifade eder. $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ sırasıyla ana yapının yer değiştirmesi, hızı ve ivmesini ifade eder. x_d , $\dot{x}_d$, $\ddot{x}_d$ sırasıyla altyapının yer değiştirmesi, hızı ve ivmesini, $p(t)$ ise dış uyarımı ifade eder.

Dinamik prensibe göre, ana yapının ve TMD sisteminin dinamik büyütme katsayıları β_1 ve β_2 şu şekilde çıkarılır:

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{f^4 + (2f\xi_2 g)^2}{\left[(1-g^2)(f^2-g^2) - g^2(\mu f^2 + 4\xi_2\xi_1 f)^2\right] + 4g^2\left[\xi_1(f^2-g^2) + \xi_2 f(1-\mu g^2 - g^2)\right]^2}} \quad (3.42)$$

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{(1-g^2)^2 + (2f\xi_1 g)^2}{\mu^2\left[(1-g^2)(f^2-g^2) - g^2(\mu f^2 + 4\xi_2\xi_1)^2\right] + 4\mu^2 g^2\left[\xi_1(f^2-g^2) + \xi_2 f(1-\mu g^2 - g^2)\right]^2}} \quad (3.43)$$

Formüldeki her bir sembolün anlamı **Tablo 3.3**'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Parametre hesaplama formülleri.

Kütle Oranı	Frekans Oranı	Harici Uyarma Frekans Oranı	Altyapı (TMD) Frekansı	Ana Yapı Frekansı	Ana Yapı Sönümleme Oranı	Altyapı Sönümleme Oranı
$\mu = \frac{m_d}{m}$	$f = \frac{\omega_d}{\omega}$	$g = \frac{\omega_g}{\omega}$	$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d}$	$\omega^2 = \frac{k}{m}$	$\xi_i = \frac{c_i}{2m_i\omega_i}$	$\xi_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d}$

Tablo 3.3'te ω , ω_d , ω_g sırasıyla ana yapının frekansı, altyapı frekansı ve dış uyarma frekansını ifade eder. Tablo 1'den yapının dinamik büyütme faktörünün diğer değişkenlerle μ , f , g , ξ_i , ξ_d ilişkili olduğu açıkça görülebilmektedir. Bu değişkenlerin makul tasarımı sayesinde sönümlü zorlanmış titreşim yapısı etkin bir şekilde kontrol edilebilmekte, böylece ana yapı ve alt yapıların titreşim tepkisi belirli bir aralıkta kontrol edilmektedir.

3.3.2. TMD Parametrelerinin Belirlenmesi

Dinamik büyütme katsayısı β_1 ve β_2 'ye göre yapının dinamik büyütme faktörü β 'nin frekans tepki karakteristiklerinin μ, ξ_i, ξ_d, f, g parametreler tarafından kontrol edildiğini görebiliyoruz. Dinamik büyütme katsayısı tasarımının anahtarı sönümleyicinin sönümleme oranını ve frekans oranını belirlenmesidir. ξ_d ve f_d değişiminin sönümleme etkisi üzerindeki etkisini belirlemek için, Dan Hartog tarafından önerilen sönümleyicinin en uygun parametrelerini hesaplama formülü şöyledir:

$$a_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad ; \quad \xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (3.44)$$

Burada, μ sönümleyici ile ana yapının kütle oranıdır.

Ayarlanmış kütle sönümleyicinin optimize edilmiş yay sabiti ve sönümleme sabiti,

$$k_{opt} = a_{opt}^2 \omega^2 m_d \quad ; \quad C_{opt} = 2 * \xi_{d_{opt}} \omega m_d \tag{3.45}$$

Burada, ω ana yapının doğal frekansı, m_d : TMD'nın kütlesini ifade eder.

TMD tasarımının ana parametreleri şunlardır: kütle ağırlığı m_d , efektif yay rijitliği k_d ve viskoz sönümleyicinin sönüm katsayısı c_d . Sönümleyicinin sönümleme ve rijitliğini optimize etmek için aşağıdaki optimal frekans oranı formülünü ve optimal sönüm oranı formülünü kullanılır:

$$f_d = a_{opt} \times f_s \; ; \quad a_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \; ; \quad \xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \tag{3.46}$$

$$\mu = \frac{m_d}{m_s}; \; k_d = (2\pi f_d)^2 \times m_d \; ; \; \mathrm{c_d} = 2\pi f_d \times 2m_d \times \xi_{opt} \tag{3.47}$$

formülde, a_{opt} en uygun frekans oranıdır; ξ_{opt} yeniden ayar parametresidir; μ sönümleyici kütlesinin ana kütleye oranıdır; f_d : TMD'nin tasarım frekansıdır; f_s hedef sönüm frekansıdır; k_d tasarım yay rijitliğidir ; c_d tasarım sönümleme katsayısıdır.

Farklı araştırmacılar, farklı kriterler veya yaklaşımlar kullanarak TMD parametrelerinin optimum değerleri için denklemler sunmuştur. Çoğu araştırmacılar, belirli bir kütle oranına dayalı olarak sönümleme ve frekans oranlarının optimum değerlerini **Tablo 3.4**'te bir özet olarak verilmiştir (Gutierrez Soto ve Adeli, 2014).

Den Hartog (1956), sinüzoidal yüklemeye maruz kalan sönümsüz tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemin tepkisini en aza indirerek denklemler türetmiştir. Belirli bir yapısal mod için titreşimi en aza indirmek için sönümleyici ve yay katsayılarının nasıl belirlenebileceğini göstermiştir.

Warburton (1982), kontrolsüz yapı arasındaki rezonans modlarının ortalama sönüm oranları fikrine dayalı olarak doğrudan bir SDOF sistemi üzerinde harmonik ve beyaz gürültü rastgele uyarılarını dikkate alan denklemleri türetmek için Den Hartog'un yaklaşımını ve geniş bant

optimizasyonunu kullanarak TMD'li bir binanın efektif sönümleme oranına yaklaşık olarak eşit olduğunu kanıtlamıştır.

Villaverde (1985), iki boyutlu üç katlı bir çerçevenin ve sismik yüklemeye maruz kalan üç boyutlu 10 katlı bir binanın dinamik tepkisini en aza indirerek, yüksek sönümlü ve küçük kütle oranlarına sahip bir TMD için denklemler türetmiştir.

Fujino ve Abe (1993), dört farklı durumdaki 2DOF sisteminin optimum ayar parametreleri elde etmek için Igusa ve Der Kiureghian (1985) tarafından önerilen, hem kütle hem de yapısal sönüm oranlarının yüzde ikiden az olduğunu varsayan yer değiştirme tepkilerinin pertürbasyon çözümlerinin ortalama-kare değerlerini kullanarak, 2DOF dinamik karakterizasyonunun bir modifikasyonuna dayanan serbest titreşim, harmonik, kendinden uyarılı ve rastgele uyarımla dört denklem seti sunmuştur. Rastgele uyarılar durumu için denklemler **Tablo 3.4**'te yer almaktadır.

Feng ve Miata (1995), iki serbestlik dereceli sisteme bağlı TMD'nin optimum frekans değerleri ve sönüm oranları değerlerini elde etmek için deplasman ve ivmenin ortalama kare değerleri açısından dinamik tepkiyi en aza indirerek, biri yer değiştirme ve diğeri ivme olmak üzere iki denklem seti önermişlerdir.

Sadek ve diğ. (1997), Villaverde (1985) tarafından önerilen denklemleri değiştirdi ve TMD sisteminin optimum parametrelerini bulmak için eğri uydurmayı kullandı, böylece kontrol edilen yapının ilk iki modu, TMD'nin ortalama sönüm oranından daha büyük bir değere eşit bir sönüm oranına sahip oldu. Formülasyonları, birincil yapısal sistemin yapısal sönümleme oranını (ξ_s) içerdiği için önceki yazarlardan farklıdır. Yazarlar ayrıca, yapının ilk mod şeklinin genliğini dikkate alan bir faktör kullanarak MDOF için optimum parametreleri araştırmışlardır.

Rudinger (2006), beyaz gürültü uyarısına maruz kalan sönümlü bir SDOF sistemi için TMD optimum ayar parametresi denklemlerini elde etmek için istatistiksel doğru sallaştırma kullanmıştır. Yazar, doğrusal davranan sönümsüz ve sönümlü sistemler için TMD optimum ayar parametrelerinin aynı olduğu sonucuna varmıştır. Aksine, TMD'li doğrusal olmayan bir sistem için en uygun parametreler yapısal sönümleme ve uyarma yoğunluğuna (titreşim genliği) bağlıdır.

Tablo 3.4: TMD'nin optimum ayar parametrelerini bulmak için kullanılan denklemler (Soto, 2012).

Yazar	Yayın Yılı	Frekans Oranı γ_{opt}	Sönümleme Oranı ξ_{dopt}	Açıklamalar
Den Hartog	1956	$\frac{1}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}}$	TMD'nin optimum ayar parametreleri ve Harmonik uyarıma dayalı sönümsüz SDOF sistemi için ilk denklemler
Warburton	1982	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}}$	Rastgele beyaz gürültü ivme uyarımına ve sönümsüz bir SDOF sistemine dayalıdır
Fujino ve Abe	1993	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{(1+\mu)(1+\mu/2)}}$	Sönümsüz 2DOF sistemleri için rastgele uyarılara dayalı
Feng ve Mita	1995	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$(i)\ \frac{1}{2}\sqrt{(1+\mu)\gamma^4+\gamma^2+\frac{1-3(1+\mu)^2\gamma^2}{(1+\mu)^3}}$ $(ii)\ \frac{\gamma}{2}\sqrt{(1+\mu)\gamma^2+1-\frac{1}{1+\mu}}$	Yer değiştirme (i) ve ivme (ii) için 2DOF sisteminin beyaz gürültü uyarısına dayalıdır
Sadek ve diğ.	1997	$(i)\ \frac{1}{1+\mu}$ $(ii)\ \frac{1}{1+\mu}\left[1-\xi_S\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right]$	$(i)\ \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$ $(ii)\ \frac{\xi_s}{1+\mu}+\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	Hem sönümsüz (i) hem de sönümlü (ii) 30 SDOF sistemi için deprem uyarımı temel alınmıştır
Rudinger	2006	$\sqrt{\frac{(2+\mu)}{2(1+\mu)^2}}$	$\sqrt{\frac{\mu(4+3\mu)}{4(1+\mu)^3}}$	Linear sönümleme =1 sönümsüz ve sönümlü doğrusal ve doğrusal olmayan SDOF sistemlerinde beyaz gürültü uyarımına dayalıdır
Krenk ve Hogsberg	2008	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	Sönümsüz ve sönümlü 2DOF sistemlerinde kuvvet ve beyaz gürültü ivmesi uyarımına dayanır

Krenk ve Hogsberg (2008), yapısal sönümleme oranından bağımsız olarak kuvvet ve ivme yarımlarına maruz kalan sönümsüz ve sönümlü 2dof sistemleri için optimum ayar denklemlerini elde etmek için minimum standart sapmaya sahip bir yaklaşım tekniği

kullanmışlartır. Yaklaşımları, ayarlama ve frekans oranlarının formasyonumda birincil sistemin yapısal sönümlemesini dikkate almadan optimum performansın elde edilebileceğini göstermektedir.

Hoang et al. (2008), doğrusal olmayan bir programlama tekniği kullanarak, baskın zemin frekansı (ω_g)'nin yapısal frekansa (ω_s), $\delta = \omega_g / \omega_s$ oranının farklı aralıkları için sismik uyarıma maruz kalan bir SDOF sistemi için, TMD'nin optimum parametreleri için denklemler sunmuşlar. Buradaki fikir, sahaya özel parametrelere sahip olmak ve böylece bir yapının inşa edildiği zemin tipini dikkate almaktır. Formasyonlarında, yazarlar kanai-Tajimi modelini kullanarak yapay depremleri simülasyon eder ve belirli bir zemin frekansını seçerler. Formülleri belirli bir zemin frekans oranları aralığında ayrılır, ancak gerçekte, bir depremdeki zemin frekansları aralığı bir olası olarak bilinemez. Yazarlar, deprem yüküne maruz kalan bir köprüde TMD için büyük kütle oranlarının etkisini inceledikleri sayısal bir örnek sunmuşlar. "Optimal TMD'nin daha düşük ayar frekansına ve artan kütle oranı ile daha yüksek sönümleme oranına sahip olduğunu" belirtmişlerdir. Ayrıca, büyük bir kütle oranı kullanmanın teorik model ile fiili pratik uygulama arasında meydana gelen parametre belirsizliklerine karşı yardımcı olabileceği sonucuna varmışlardır.

3.4. JAYA ALGORİTMASIYLA TMD'NİN OPTİMUM TASARIM DEĞİŞKENLERİNİN OPTİMİZASYONU

Şekil 3.5'te gösterilen yapının en üst katına yerleştirilen TMD'li çok serbestlik dereceli N katlı yapının deprem uyarıları altındaki hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{M}\ddot{x}(t) + \mathbf{C}\dot{x}(t) + \mathbf{K}x(t) = -\mathbf{M}\{\mathbf{1}\}\ddot{x}_g(t) \tag{3.48}$$

Denklem (3.48) sayısal bir entegrasyon yöntemi ile çözülebilir. Sayısal analizlerde, hareket denklemleri MATLAB Simulink yardımıyla 4. mertebe Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Denklem (3.48)'da kat yer değiştirmeleri olarak gösterilen *x(t)*'nin çözümü, en üst kat yer değiştirmesi x_N için *x(t)*'nin maksimum mutlak değeri dikkate alınarak amaç olarak kullanılmıştır. En üst kat yanıtına sahip en kritik uyarı dikkate alınmıştır. Yer değiştirme tepki vektörü denklem (3.49)'de verilmiştir. Denkelm (3.48)'daki, kütle (**M**), sönüm (**C**) ve rijitlik (**K**) matrisleri, i'inci katın kütlesi (m_i), rijitliği (k_i) ve sönüm katsayısı (c_i) gibi yapısal özelliklerine göre hesaplanır.

$$x(t) = \left\{ x_1(t) \quad x_2(t) \quad \cdots \quad x_N(t) \quad x_{dx}^1(t) \quad x_{dy}^1(t) \quad x_{dx}^2(t) \quad x_{dy}^2(t) \right\}^T \tag{3.49}$$

Optimizasyon sürecinin yapısı aşağıdaki gibi sıralanabilir:

i. Yapının yapısal özelliklerini, deprem yer ivmelerini, tasarım değişken aralıklarını ve nüfus sayısını (10 olarak alınmıştır) tanımlayın.

ii. Sonuçları irdelemek için TMD'siz yapıyı analiz edininiz.

iii. Seçilen aralıktaki rastgele değerleri kullanarak popülasyon sayısına göre bir başlangıç tasarım değişkenleri seti oluşturun. Tasarım değişkenleri, TMD'nin x ve y yönlerindeki rijitlik, sönüm özellikleri ve TMD'nin koordinat konumlarını kapsamaktadır. Bu değişkenler, sırasıyla denklem (3.50) ve (3.51)'lerde verildiği gibi TMD'nin rijitliğini (k_d) ve sönümünü (c_d) bulmak için kullanılır.

$$k_d = 4\pi^2 \frac{m_d}{T_d^2} \tag{3.50}$$

$$c_d = 2m_d \xi_d \sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \tag{3.51}$$

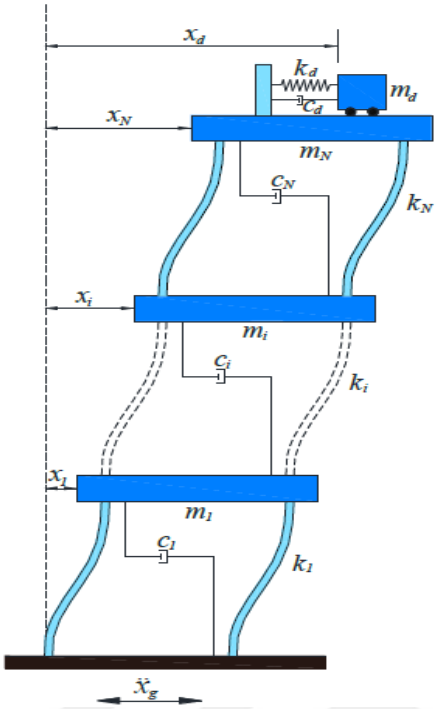
Ayrıca tüm kümeler için amaç fonksiyonu hesaplanır.

iv. Denklem (3.35)'i kullanarak JA algoritması aracılığıyla çözüm kümesini güncelleyin. Burada tasarım değişkenlerinin ilgili sınırları içerisinde kalması sağlanır. Eğer güncellenen değerler bu sınırlarda değil ise en yakın olduğu sınır değer olarak alınır.

$$X_{yeni,i} = X_{eski,i} + r_1(X_{en\ iyi} - |X_{eski,i}|) - r_2(X_{en\ kotu} - |X_{eski,i}|) \tag{3.52}$$

Denklem (3.52)'de, $X_{yeni,i}$ i. popülasyonun güncellenmiş çözümü, $X_{eski,i}$ ise mevcut çözümdür. r_1 ve r_2, 0 ile 1 arasında iki rasgele sayıdır. $X_{en\ iyi}$ ve $X_{en\ kötü}$, sırasıyla mevcut en iyi ve en kötü çözümlerdir. Amaç fonksiyonunun minimizasyonuna göre en iyi ve en kötü çözümler seçilir.

v. Birkaç yineleme için iv. işlemini tekrarlayın (örneğin, 200 yineleme).



Şekil 3.5: TMD'li MDOF yapı sistemi (Bekdaş ve Niğdeli, 2013).

3.5.ÇOK KATLI BURULMA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN YAPI MODELİ

Burulma düzensizliği, şiddetli depremler veya rüzgâr nedeniyle güçlü bir dinamik uyarım sırasında binalarda birincil başarısızlık oluşturan nedenlerinden biridir. Bu tür bir düzensizlik sadece burulma yönünde yıkıcı etkilere sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda yanal yönlerde aşırı yıkıcı etkilere de yol açabilir. Bu nedenle sismik tasarım analizinde burulma düzensizliğinin göz ardı edilmesi beklenmedik hasar ve kayıplara neden olabilir. Binaların güvenliğini ve performansını artırmak için, mevcut sismik koşulların çoğu bu düzensizliği iki ana yolla ele almaktadır. Birincisi, çeşitli mevcut sismik kod hükümlerinde sağlanan denklemleri kullanarak her katta burulma momentini hesaplamaktır. Her katta uygulandıktan sonra sismik analiz yapılacaktır. İkincisi, ek kütleler ekleyerek, desteklenmiş çapraz çerçeve sistemleri gibi yapısal bileşenler ekleyerek veya pasif veya aktif olabilen yapılara kontrol sistemleri uygulayarak eksantrikliği ortadan kaldırmak için kütle merkezini (*CM*) veya rijitliği (CS) kaydırmaktır (Akyürek, 2019).

3.5.1. Kütle Merkezi (CM)

Yatay (deprem ve rüzgâr) yükler bir yapıya etki ettiğinde, kütle merkezi (CM), depremin neden olduğu yükün yoğunlaştığı nokta olarak tanımlanabilir. Kütle merkezinin koordinatları (x_{cm} , y_{cm}) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$x_{cm} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \quad ; \quad y_{cm} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} \tag{3.53}$$

Burada, m_i i'inci elemanın topaklanmış kütlesini x_i ve y_i sırasıyla i'inci elemanın x ve y yönlerinde karşılık gelen kütle merkezinin x ve y koordinatını ifade eder.

Döşeme, rijit gövde hareketlerine (öteleme ve dönme hareketleri) yol açan rijit bir diyafram gibi davrandığında, CM, elastik veya esnek olmayan aralıklarda planı içinde farklılık göstermez. Bununla birlikte, daha gerçekçi bir temsil olabilen yarı rijit bir döşeme olarak kabul edilirse, rijit diyaframa kıyasla sadece biraz farklıdır, çünkü döşeme rijitliği karşılık gelen yanal yüke dayanıklı elemanlardan önemli ölçüde daha yüksektir. Basitlik açısından, döşemeler bu nedenle sismik analizde rijit bir diyafram olarak tanımlanır.

3.5.2. Rijitlik Merkezi (CS)

Yatay (deprem ve rüzgâr) yükler bir yapıya etki ettiğinde, rijitlik merkezi (CS), yanal yüke dirençli elemanların bu kuvvete karşı direndiği yer olarak belirlenebilir. Bu nokta, ayrıca düşey taşıyıcı elemanların ataletlerinin ağırlık merkezi olarak da tanımlanmaktadır.

Rijitlik merkezinin x ve y yönlerindeki konumları (x_{cs} , y_{cs}), $|e(t)| = \sqrt{(e_x)^2 + (e_y)^2}$ aşağıda görüldüğü gibi hesaplanabilir:

$$x_{cs} = \frac{\sum k_{yi} x_i}{\sum k_{yi}} \quad ; \quad y_{cs} = \frac{\sum k_{xi} y_i}{\sum k_{xi}} \tag{3.54}$$

Burada k_{xi} ve k_{yi} sırasıyla i'inci yanal yüke dirençli eleman için x ve y yönlerindeki yanal rijitlikleri; x_i ve y_i sırasıyla i'inci yanal yüke dirençli eleman için x ve y yönlerindeki konumlarını ifade eder.

3.5.3. Eksantriklik (Dış Merkezlik)

Eksantriklik, kütle merkezi (CM) ve rijitlik merkezi (CS) arasındaki mesafe olarak tanımlanır. x ve y yönlerindeki eksantriklikler aşağıdaki denklemlerden formüle edilebilir:

$$e_x = x_{cs} - x_{cm} \qquad \text{ve} \qquad e_y = y_{cs} - y_{cm} \tag{3.55}$$

Burada x_{cs} ve y_{cs} sırasıyla rijitlik merkezinin x ve y yönlerindeki konumları x_{cm} ve y_{cm} sırasıyla kütle merkezinin x ve y yönlerindeki konumları ifade eder.

Mutlak eksantriklik (dış merkezlik) $|e(t)|$, kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki mutlak mesafe olarak tanımlanabilir, aşağıdaki denkleme bakınız:

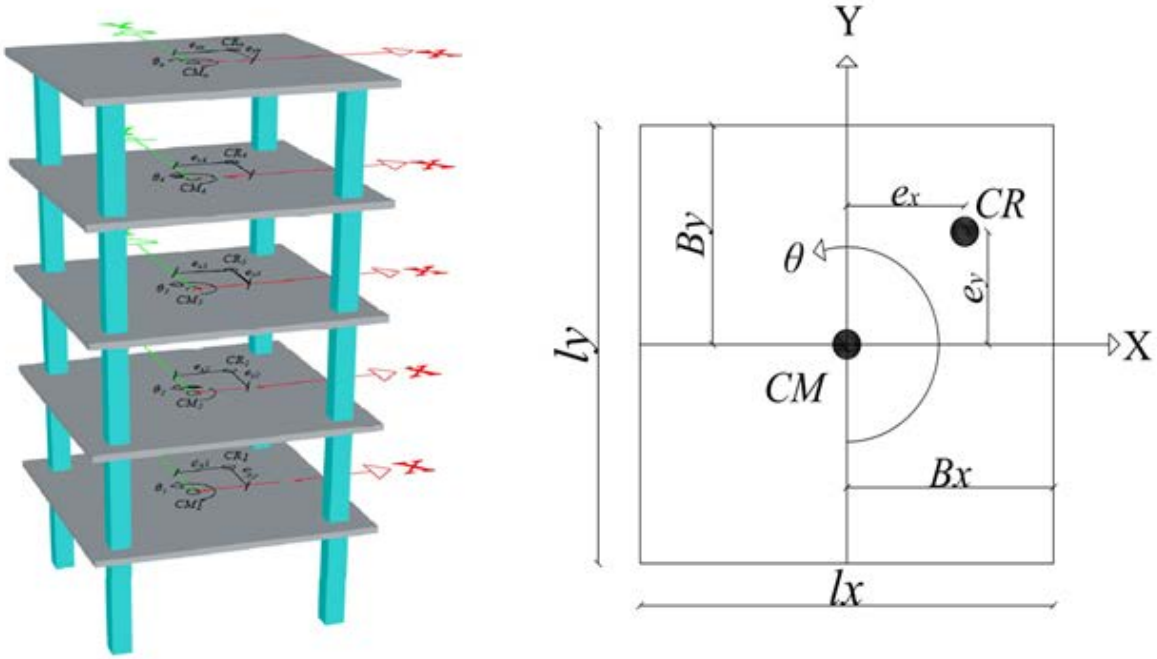
$$|e(t)| = \sqrt{(e_x)^2 + (e_y)^2} \tag{3.56}$$

Burada e_x ve e_y sırasıyla x ve y yönlerindeki eksantrikliktir.

Bu alt başlıkta, N-katlı burulma düzensizliği oluşan binanın idealize edilmiş modeli ele alınmıştır. Rijitlik ve kütle merkezi sırasıyla CS ve CM ile temsil edilmiştir. Kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki uzaklıklar e_x ve e_y ile gösterilmiştir. B_x ve B_y kütle merkezinin yerini ifade eden uzaklıklardır. l_x ve l_y ise yapının x ve y doğrultusundaki uzunluğunu ifade eder. Yatay yönlerde çift yönlü deprem uyarımının etkisi altında olan burulma düzensiz kayma yapısı, iki yönde yanal yer değiştirme ve kütle merkezinde dönme olmak üzere her kat için üç serbestlik derecesine sahiptir (**Şekil 3.6**).

Burulma açısından düzensiz N-katlı üç boyutlu sistemleri için deprem zemin uyarımı altındaki genel hareket denklemleri matris formunda denklem (3.57) ile ifade edilebilir. Ama matrisler ve vektörler her kat için çok serbestlik dereceli olacak şekilde boyutları ve içerikleri değişecektir.

Kat sayısı n olarak ifade edilen çok katlı burulma düzensizliği oluşan üç boyutlu yapının, kütle matrisi ve matrisin içinde yer alan alt matrislerin içeri Denklem (3.59) -(3.62) aralığında verilmiştir.



Şekil 3.6: Çok katlı burulma düzensizliği oluşan yapının 3D ve plan görünümü.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = E\ddot{z}_g(t) \tag{3.57}$$

$$\ddot{z}_g(t) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{y}_g(t) \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

Burada,

$$M = \begin{bmatrix} M_x & [0]_{nxn} & [0]_{nxn} \\ [0]_{nxn} & M_y & [0]_{nxn} \\ [0]_{nxn} & [0]_{nxn} & J_0 \end{bmatrix} \tag{3.59}$$

$$M_x = M_y = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_{n-1} & \\ & & & & m_n \end{bmatrix} \tag{3.60}$$

$$J_0 = \begin{bmatrix} m_1 r_1^2 & & & & \\ & m_2 r_2^2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_{n-1} r_{n-1}^2 & \\ & & & & m_n r_n^2 \end{bmatrix} \tag{3.61}$$

Rijitlik matrisi ve matris içinde yer alan alt matrisler Denklem (3.62)-(3.68) aralığında verilmiştir.

$$K = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [0]_{nxn} & -[K_{x\theta}] \\ [0]_{nxn} & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ -[K_{x\theta}] & [K_{y\theta}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \tag{3.62}$$

$$[K_{xx}] = \begin{bmatrix} (k_x^1 + k_x^2) & -k_x^2 & & & & \\ -k_x^2 & (k_x^2 + k_x^3) & & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & -k_x^{N-1} & (k_x^{N-1} + k_x^N) & -k_x^N \\ & & & & -k_x^N & k_x^N \end{bmatrix} \tag{3.63}$$

$$[K_{yy}] = \begin{bmatrix} (k_y^1 + k_y^2) & -k_y^2 & & & & \\ -k_y^2 & (k_y^2 + k_y^3) & & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & -k_y^{N-1} & (k_y^{N-1} + k_y^N) & -k_y^N \\ & & & & -k_y^N & k_y^N \end{bmatrix} \tag{3.64}$$

$$[K_{x\theta}] = \begin{bmatrix} (k_x^1 e_y^1 + k_x^2 e_y^2) & -k_x^2 e_y^2 & & & & \\ -k_x^2 e_y^2 & (k_x^2 e_y^2 - k_x^3 e_y^3) & -k_x^3 e_y^3 & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & (k_x^{N-1} e_y^{N-1} + k_x^N e_y^N) & -k_x^N e_y^N \\ & & & & -k_x^N e_y^N & k_x^N e_y^N \end{bmatrix} \tag{3.65}$$

$$[K_{y\theta}] = \begin{bmatrix} (k_y^1 e_x^1 + k_y^2 e_x^2) & -k_y^2 e_x^2 & & & & \\ -k_y^2 e_x^2 & (k_y^2 e_x^2 - k_y^3 e_x^3) & -k_y^3 e_x^3 & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & (k_y^{N-1} e_x^{N-1} + k_y^N e_x^N) & -k_y^N e_x^N \\ & & & & -k_x^N e_y^N & k_y^N e_x^N \end{bmatrix} \tag{3.66}$$

$$k_{\theta 0_i} = k_{\theta_i} + k_{x_i} e_{y_i}^2 + k_{y_i} e_{x_i}^2 \quad for\ i = 1:n \tag{3.67}$$

$$[K_{\theta\theta}] = \begin{bmatrix} (k_\theta^{0_1} + k_\theta^{0_2}) & -k_\theta^{0_2} & & & & \\ -k_\theta^{0_2} & (k_\theta^{0_2} + k_\theta^{0_3}) & -k_\theta^{0_3} & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & (k_\theta^{0_{N-1}} + k_\theta^{0_N}) & -k_\theta^{0_N} \\ & & & & -k_\theta^{0_N} & k_\theta^{0_N} \end{bmatrix} \tag{3.68}$$

$$E = \begin{bmatrix} -M_x[1]_{nx1} & [0]_{nx1} \\ [0]_{nx1} & -M_y[1]_{nx1} \\ [0]_{nx1} & [0]_{nx1} \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} [x_1 & x_2 & \cdots & x_n]^T \\ [y_1 & y_2 & \cdots & y_n]^T \\ [\theta_1 & \theta_2 & \cdots & \theta_n]^T \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

Denklemlerde, *m*: kat kütlesini; k_x, k_y ve k_θ sırasıyla *x*, *y ve* θ yönlerindeki kat rijitlikleri; $\ddot{x}_g(t)$ ve $\ddot{y}_g(t)$ sırasıyla x ve y yönlerinde yer ivmesini; J_0 kütlesel dönel atalet momenti; *r* ise kat kütlesel atalet yarıçapını ifade eder. Bu denklemlerde *n* kat sayısını temsil ederken, değişkenlerdeki alt simgeler (*i*) karşılık gelen katları temsil eder. Sönümleme matrisi (*C*), Rayleigh yöntemi kullanılarak kütle matrisi (*M*) ve rijitlik matrisi (*K*) ile orantılı olarak alınmıştır (Nigdeli ve Boduroglu, 2013).

3.6.TMD'Lİ ÇOK SERBESTLİK DERECELİ YAPININ HAREKET DENKLEMLERİ

Çok serbestlik dereceli N-katlı bir yapının en üst katına yerleştirilen m adet TMD'li sistemin genel hareket denklemi Denk. (3.71)'de, m adet TMD'li sistemin kütle matrisi M_{TMD} ise Denk. (3.72)'de, ana yapının kütle matrisini *M* ise Denk. (3.59)'da m adet TMD'nin *x* ve *y* yönlerindeki optimum kütle matrisleri M_T ise Denk. (3.73)'te verilmiştir. Ana yapının ve TMD'lerin deprem uyarım etkisi altındaki yer değiştirmeleri Denk. (3.74)'te verilmiştir. Denklemdeki, *x(t)* yer değiştirmesi Denk. (3.70)'te verilmiştir, diğer vektörler ise sırasıyla, birinci, ikinci ve N'inci sönümleyicinin *x* ve *y* yönlerindeki yer değiştirmelerini ifade etmektedir. Burada, alt indeksi n yapının kat sayısını, m ise sönümleyici sayısını $m_{d_{1x}}$ ve $m_{d_{1y}}$ ise en üst kata yerleştiren birinci sönümleyicinin *x* ve *y* yönlerindeki kütlesini, diyagonal

matrislerdeki diğer terimler ise sırasıyla ikinci, üçüncü ve i'nici sönümleyicinin *x* ve *y* yönlerindeki kütlesini ifade etmektedir.

$$M_{TMD}\ddot{x}_{TMD}(t) + C_{TMD}\dot{x}_{TMD}(t) + K_{TMD}x_{TMD}(t) = E_{TMD}\ddot{z}_g(t) \tag{3.71}$$

$$M_{TMD} = \begin{bmatrix} M & [0]_{3nx2m} \\ [0]_{2mx3n} & M_T \end{bmatrix} \tag{3.72}$$

$$M_T = \begin{bmatrix} m_{d_{1x}} & & & & & & & & \\ & m_{d_{1y}} & & & & & & & \\ & & m_{d_{2x}} & & & & & & \\ & & & m_{d_{2y}} & & & & & \\ & & & & \ddots & & & & \\ & & & & & m_{d_{(N-1)x}} & & & \\ & & & & & & m_{d_{(N-1)y}} & & \\ & & & & & & & m_{d_{Nx}} & \\ & & & & & & & & m_{d_{Ny}} \end{bmatrix} \tag{3.73}$$

$$x_{TMD}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \begin{bmatrix} x_{d_{1x}}(t) & x_{d_{1y}}(t) & x_{d_{2x}}(t) & x_{d_{2y}}(t) & \cdots & x_{d_{(N-)x}}(t) & x_{d_{(N-1)y}}(t) & x_{d_{Nx}}(t) & x_{d_{Ny}}(t) \end{bmatrix}^T \end{bmatrix} \tag{3.74}$$

Uygulama ve denklemlerin kolay yazılımı açısından, TMD'li sistemin toplam rijitlik ve sönüm matrisleri sadece üç katlı, üç adet TMD için Denk. (3.75-3.76)'lerde sunulmuştur.

$$K_{TMD} = \begin{bmatrix} K & 0_{(3n\ \mathrm{x}\ 2m)} \\ 0_{(2m\ \mathrm{x}\ 3n)} & 0_{(2m\ \mathrm{x}\ 2m)} \end{bmatrix} + K_T \tag{3.75}$$

$$C_{TMD} = \begin{bmatrix} C & 0_{(3n\ \mathrm{x}\ 2m)} \\ 0_{(2m\ \mathrm{x}\ 3n)} & 0_{(2m\ \mathrm{x}\ 2m)} \end{bmatrix} + C_T \tag{3.76}$$

K_T rijitlik matrisi üç katlı, üç adet sönümleyici için yazıldığında, Denk.(3.77)'de görüldüğü gibi 15x15 matris boyutunda yazılmıştır. Denklemdeki, 1, 2, 3 üst indik isler sayıları sönümleyici sayını; *dx* ve *dy* ise sönümleyicinin *x* ve *y* yönlerindeki rijitliklerini; *lx* ve *ly* ise, yapının *x* ve *y* yönlerindeki boyutlarını ifade etmektedir.

$$K_T = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & (k_{dx}^1 + k_{dx}^2 + k_{dx}^3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{matrix}(k_{dx}^1 * l_y) \\ +(k_{dx}^2 * l_y) \\ +(k_{dx}^3 * l_y)\end{matrix} & -k_{dx}^1 & 0 & -k_{dx}^2 & 0 & -k_{dx}^3 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (k_{dy}^1 + k_{dy}^2 + k_{dy}^3) & 0 & 0 & \begin{matrix}(k_{dy}^1 * l_x) \\ +(k_{dy}^2 * l_x) \\ +(k_{dy}^3 * l_x)\end{matrix} & 0 & -k_{dy}^1 & 0 & -k_{dy}^2 & 0 & -k_{dy}^3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \begin{matrix}(k_{dx}^1 * l_y) + \\ (k_{dx}^2 * l_y) + \\ (k_{dx}^3 * l_y)\end{matrix} & 0 & 0 & \begin{matrix}(k_{dy}^1 * l_x) + \\ (k_{dy}^2 * l_x) + \\ (k_{dy}^3 * l_x)\end{matrix} & 0 & 0 & \begin{matrix}(k_{dx}^1 * l_y^2) + (k_{dy}^1 * l_x^2) + \\ (k_{dx}^2 * l_y^2) + (k_{dy}^2 * l_x^2) + \\ (k_{dx}^3 * l_y^2) + (k_{dy}^3 * l_x^2)\end{matrix} & -k_{dx}^1 * l_y & -k_{dy}^1 * l_x & -k_{dx}^2 * l_y & -k_{dy}^2 * l_x & -k_{dx}^3 * l_y & -k_{dy}^3 * l_x \\
0 & 0 & -k_{dx}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{dx}^1 * l_y & k_{dx}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{dx}^1 & 0 & 0 & -k_{dy}^1 * l_x & 0 & -k_{dy}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -k_{dx}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{dx}^2 * l_y & 0 & 0 & k_{dx}^2 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{dx}^2 & 0 & 0 & -k_{dy}^2 * l_x & 0 & 0 & 0 & k_{dy}^2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -k_{dx}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{dx}^3 * l_y & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{dx}^3 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{dx}^3 & 0 & 0 & -k_{dy}^3 * l_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{dy}^3
\end{bmatrix} \quad (3.77)$$

C_T sönüm matrisi üç katlı, üç adet sönümleyicinin sönümü için yazıldığında, Denk.(3.78)'de görüldüğü gibi 15x15 matris boyutunda yazılmıştır. Denklemdeki, 1, 2, 3 üst indik sayıları sönümleyici sayını; *dx* ve *dy* ise sönümleyicinin *x* ve *y* yönlerindeki değerlerini; *lx* ve *ly* ise, yapının *x* ve *y* yönlerindeki boyutlarını ifade etmektedir.

$$C_T = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & (c_{dx}^1 + c_{dx}^2 + c_{dx}^3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \begin{matrix}(c_{dx}^1 * l_y) + \\ (c_{dx}^2 * l_y) + \\ (c_{dx}^3 * l_y)\end{matrix} & -c_{dx}^1 & 0 & -c_{dx}^2 & 0 & -c_{dx}^3 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (c_{dy}^1 + c_{dy}^2 + c_{dy}^3) & 0 & 0 & \begin{matrix}(c_{dy}^1 * l_x) + \\ (c_{dy}^2 * l_x) + \\ (c_{dy}^3 * l_x)\end{matrix} & 0 & -c_{dy}^1 & 0 & -c_{dy}^2 & 0 & -c_{dy}^3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \begin{matrix}(c_{dx}^1 * l_y) + \\ (c_{dx}^2 * l_y) + \\ (c_{dx}^3 * l_y)\end{matrix} & 0 & 0 & \begin{matrix}(c_{dy}^1 * l_x) + \\ (c_{dy}^2 * l_x) + \\ (c_{dy}^3 * l_x)\end{matrix} & 0 & 0 & \begin{matrix}(c_{dx}^1 * l_y^2) + (c_{dy}^1 * l_x^2) + \\ (c_{dx}^2 * l_y^2) + (c_{dy}^2 * l_x^2) + \\ (c_{dx}^3 * l_y^2) + (c_{dy}^3 * l_x^2)\end{matrix} & -c_{dx}^1 * l_y & -c_{dy}^1 * l_x & -c_{dx}^2 * l_y & -c_{dy}^2 * l_x & -c_{dx}^3 * l_y & -c_{dy}^3 * l_x \\
0 & 0 & -c_{dx}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dx}^1 * l_y & c_{dx}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dx}^1 & 0 & 0 & -c_{dy}^1 * l_x & 0 & -c_{dy}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -c_{dx}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dx}^2 * l_y & 0 & 0 & c_{dx}^2 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dx}^2 & 0 & 0 & -c_{dy}^2 * l_x & 0 & 0 & 0 & c_{dy}^2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -c_{dx}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dx}^3 * l_y & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{dx}^3 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dx}^3 & 0 & 0 & -c_{dy}^3 * l_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{dy}^3
\end{bmatrix} \quad (3.78)$$

4. BULGULAR

Bu bölümde, öncelikle **Şekil 4.1**'de gösterilen iki yönde de deprem etkisinde olan tek katli burulma düzensiz oluşan çerçeve sistemin iki yönde yanal yerdeğiştirme ve dönme olmak üzere üç tane serbestliği derecesine sahip örnek yapıya tek ve çift TMD ilave ederek, Yapı-TMD'li etkileşim sistemi oluşturulurmuştur. Daha sonra, **Tablo 4.2**'de verilen TMD'siz tek katlı örnek yapının yapısal parametreleri tasarım değişkenleri olarak ele alınmış ve Jaya algoritması ile MATLAB yazılımında optimizasyon analizleri yapılmıştır. Optimizasyon işlemlerinde tek TMD için kütle oranı $\mu = m_d / m = 0.05\,(\%5)$ olarak dikkate alınırken, çift TMD uygulamada her bir TMD için $\mu_1 = m_{d_1} / m = 0.025$, $\mu_2 = m_{d_2} / m = 0.025$ olarak toplam kütle oranı $\mu = \mu_1 + \mu_2 = 0.05$ olarak dikkate alınmıştır. TMD'nin minimum frekansı ise yapının birinci frekansının 0.8 katı olarak, TMD'nin maksimum frekansı ise her katta *x, y* ve θ yönlerindeki üç mod şekli dikkate alınarak yapının son modunun frekansının 1.2 katı alınarak dinamik analiz yapılmıştır. Yapılan dinamik ve optimizasyon analiz sonuçlarından, TMD'nin $C_{r\min}$ ve $C_{r\max}$ sonuçları, yapının her köşesindeki noktaların burulma değerleri dikkate alınarak, yer değiştirmelerin maksimum değerleri kontrol edilmiştir. Daha sonra, gerçek çalışma olarak ele alınan 10 katlı burulma düzensizliği bulunan yapının analizleri tek katlı yapının analizlerine benzer şekilde yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, tek katlı örnek yapı olsun yâda 10 katlı perde-çerçeveli yapı sistemi olsun, tüm analizlerde dış etki yükü olarak, **Tablo 4.1**'de verilen ve FEMA P-695'te tanımlanan 22 adet uzak fay deprem kayıtları kullanılmıştır. Böylelikle optimum sonuçların tek deprem için değil, birden çok kayıt altında etkili olduğu sağlanmıştır. FEMA P-695'de listelenen deprem kayıtlarının alınarak kabul gören bir set deprem verisi için optimizasyon yapılmıştır. Jaya algoritması ile yapılan optimum analizlerde, amaç fonksiyonu olarak yapının köşe noktalarında oluşan en üst kat yer değiştirmeleri minimize edilecek ve yer değiştirmeleri en fazla olan deprem kayıtları kritik deprem kayıtları olarak kabul edilerek değerler irdelenmiştir.

Jaya algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasında, amaç fonksiyonumuz burulmanın da etkisini gösterdiği köşe noktalarda maksimum yer değiştirmesini en aza

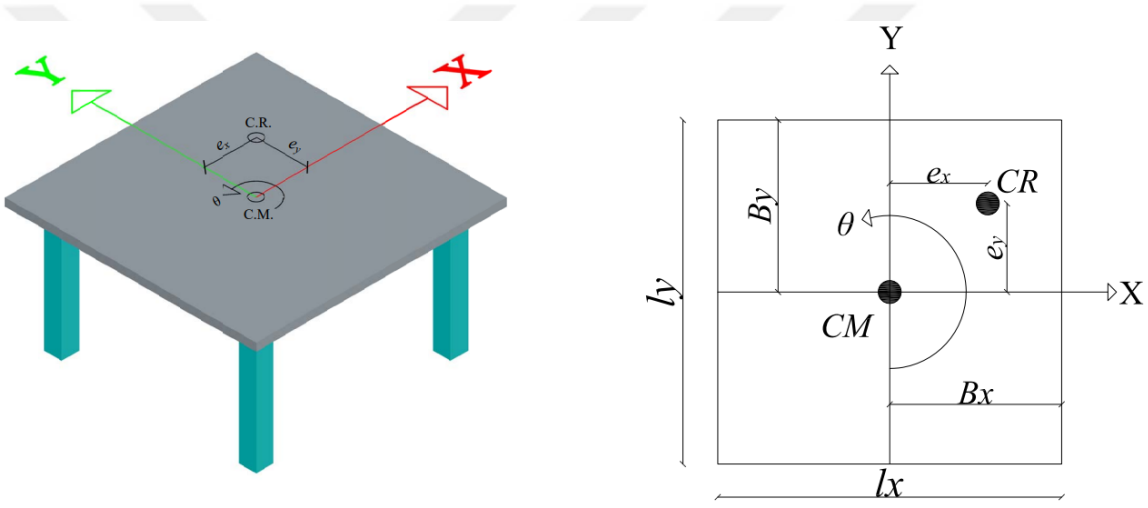
indirmektir. Optimizasyondaki iterasyon sayısı 5000 alınmıştır. İterasyon sonucunda elde edilen TMD'nin rijitlik ve sönüm parametre değerleri, ETAS analiz programında lineer link elemanı olarak modellenmiş ve optimumda seçilen kritik deprem kayıtları altında zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. Elde edilen TMD'siz ve TMD'li yer değiştirme, ivme ve tanban kesme kuvvetleri karşılaştırılarak tek ve çift TMD etkinleri dikkate alınarak planda düzensiz olarak modellenen 3D boyutlu yapılardaki kullanım uygunluğu araştırılmıştır.

Tablo 4.1: Optimizasyonda kullanılan FEMA deprem kayıtları (FEMA, 2009).

Deprem No.	Deprem	Kayıt istasyonu	Yıl	Magnitüt	FN bileşeni	FP bileşeni
1	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	1994	6.7	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279
2	Northridge	Canyon Country-WLC	1994	6.7	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270
3	Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090
4	Hector Mine	Hector	1999	7.1	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090
5	Imperial Valley	Delta	1979	6.5	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352
6	Imperial Valley	El Centro Array #11	1979	6.5	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230
7	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	1995	6.9	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090
8	Kobe, Japan	Shin-Osaka	1995	6.9	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090
9	Kocaeli, Turkey	Duzce	1999	7.5	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270
10	Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.5	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090
11	Landers	Yermo Fire Station	1992	7.3	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360
12	Landers	Coolwater	1992	7.3	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR
13	Loma Prieta	Capitola	1989	6.9	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090
14	Loma Prieta	Gilroy Array #3	1989	6.9	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090
15	Manjil, Iran	Abbar	1990	7.4	MANJIL/ABBAR--L	MANJIL/ABBAR--T
16	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	1987	6.5	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090
17	Superstition Hills	Poe Road (temp)	1987	6.5	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360
18	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	1992	7.0	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360
19	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	1999	7.6	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N
20	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	1999	7.6	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N
21	San Fernando	LA - Hollywood Stor	1971	6.6	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180
22	Friuli, Italy	Tolmezzo	1976	6.5	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270

4.1.TEK KATLI BURULMA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN ÖRNEK YAPI MODELİ

x ve *y* yönlerinde deprem etkisine maruz kalan tek katlı çerçeve sistemin, iki yönde yanal yer değiştirme (u_x ve u_y) ve dönme (u_θ) olmak üzere üç tane serbestliği vardır. **Şekil 4.1**'de gösterilen yapının hareket denklemi denklem (4.1)'de verilmiştir. Kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki uzaklıklar *x* ve *y* yönlerdeki eksantriklik olarak e_x ve e_y ile gösterilmiştir. **Şekil 4.1**'de kütle merkezi CM olarak rijitlik merkezi ise CR ile gösterilmiştir. B_x ve B_y ise kütle merkezinin yerini ifade eden uzaklıklardır. l_x ve l_y ise yapının *x* ve *y* doğrultusundaki uzunluğudur.



(a) (b)

Şekil 4.1: (a) Tek katlı yapının 3D görünümü, (b) Tek katlı yapının plan görünümü.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = E\ddot{z}(t) \tag{4.1}$$

Denklem 4.1'de *M* kütle matrisi, *C* sönüm matrisi ve *K* rijitlik matrisidir. *E* ise dış etki konum matrisidir. Sönüm matrisinin, kütle ve rijitlik matrisi ile orantılı olduğu kabul edilmiştir. *x*(t) ise kütle merkezinde oluşan yanal yer değiştirmeleri ve dönmeyi ifade eden vektördür. Zamana göre değişken *x*(t) , $\dot{x}$(t) ve $\ddot{x}$(t) vektörünün türevleridir ve $\ddot{z}$(t) ise iki yöndeki deprem ivmelerini içeren vektördür. Bu matris ve vektörler denklem (4.2-4.7) arasında verilmiştir. Bu denklemlerde bulunan *m* yapının kütlesi, k_x, k_y ve k_θ sırasıyla *x*, *y* ve θ yönündeki rijitlikler, $\ddot{x}_g$ ve $\ddot{y}_g$ ise *x* ve *y* yönlerindeki deprem ivmeleridir. J_0 ise kütle polar atalet momenti olup, yapının kütlesinin atalet yarıçapı *r*'nin karesi ile çarpımı ile elde edilir (Niğdeli, 2012).

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J_0 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & -k_x e_y \\ 0 & k_y & k_y e_x \\ -k_x e_y & k_y e_x & k_\theta + k_x e_y^2 + k_y e_x^2 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

$$C = \alpha M + \beta K \tag{4.4}$$

$$E = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ 0 & -m \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

$$x(t) = \left[x(t) \;\; y(t) \;\; \theta(t) \right]^T \tag{4.6}$$

$$\ddot{Z}(t) = \left[\ddot{x}_g(t) \;\; \ddot{y}_g(t) \right] \tag{4.7}$$

$$J_0 = mr^2 \tag{4.8}$$

Denklem (4.4)'te bulunan α ve β katsayıları Rayleigh metodu ile bulunmuştur (Hart ve Wong, 1999). Bu katsayılar denklem (4.9- 4.10)'da verilmiştir. Bu denklemlerde ω_x ve ω_y sırasıyla x ve y yönlerindeki doğal frekanslar, ζ_x ve ζ_y ise sırasıyla x ve y yönlerindeki sönüm oranları ifade eder. Hesaplamalarda tek katlı yapının sönüm değeri birinci ve ikinci mod dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\alpha = \frac{2\omega_x \omega_y (\zeta_x \omega_y - \zeta_y \omega_x)}{\omega_y^{\,2} - \omega_x^{\,2}} \tag{4.9}$$

$$\beta = \frac{2(\zeta_y \omega_y - \zeta_x \omega_x)}{\omega_y^{\,2} - \omega_x^{\,2}} \tag{4.10}$$

Tek katlı burulma düzensizliği oluşan yapının ve TMD sisteminin özellikleri **Tablo 4.2**'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Tek katlı burulma düzensizliği bulunan yapının özellikleri (Lin ve diğ. 2010).

Açıklamalar	İfade şekli ve birimi	Değerler
Kütle	m (kg)	2923.5
x, y ve doğrultularındaki doğal frekansları	ω_x (Hz)	3.47
	ω_y (Hz)	3.81
	ω_θ (Hz)	4.16
x, y ve θ doğrultularındaki sönüm oranları	$\xi_x = \xi_y = \xi_\theta$ (%)	1.24
Ağırlık merkezi konumu	$B_x/r = B_y/r$ (m)	$\sqrt{3/2}$
Rijitlik merkezi konumu	$e_x/r = e_y/r$ (m)	0.3

Tek katlı örnek yapının yapısal özelliklerine göre, MATLAB yazılım programında Jaya algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon analizlerden elde edilen tekli TMD'nin optimum sonuçları **Tablo 4.3**'te çift TMD'nin optimum sonuçları ise **Tablo 4.4**'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Tek katlı tekli TMD'nin optimum parametre değerleri.

Kütle m_d (kg)	Frekans ω_{d_x} (rad/s)	Sönüm oranı ξ_{d_x}	Frekans ω_{d_y} (rad/s)	Sönüm oranı ξ_{d_y}	TMD *x* yöndeki konumu (m)	TMD *y* yöndeki konumu (m)
146.175	19.26527673	0.15265648	35.54636188	0.010019323	1.224705036r	1.22422752r

Kütle oranı $\mu = \frac{m_d}{m} = \frac{146.175}{2923.5} = 0.05$ tek TMD'li için %5 olarak dikkate alınmıştır. TMD'nin *x* ve *y* yönlerindeki sönüm oranı $\xi_{d_x} = 0.153$ ve $\xi_{d_y} = 0.01$ olup 0.01~0.5 sınırlar içindendir.

Tablo 4.4: Tek katlı çift TMD'nin optimum parametre değerleri.

Parametre / TMD No.	Kütle m_d (kg)	Frekans ω_{d_x} (rad/s)	Sönüm oranı ξ_{d_x}	Frekans ω_{d_y} (rad/s)	Sönüm oranı ξ_{d_y}	TMD_x konumu (m)	TMD_y konumu (m)
TMD_1	73.0785	19.3737601	0.04476769	26.1125022	0.28351144	1.057289	1.22473695
TMD_2	73.0785	24.1430970	0.17673303	17.3260364	0.26783686	-1.212336	1.22473603

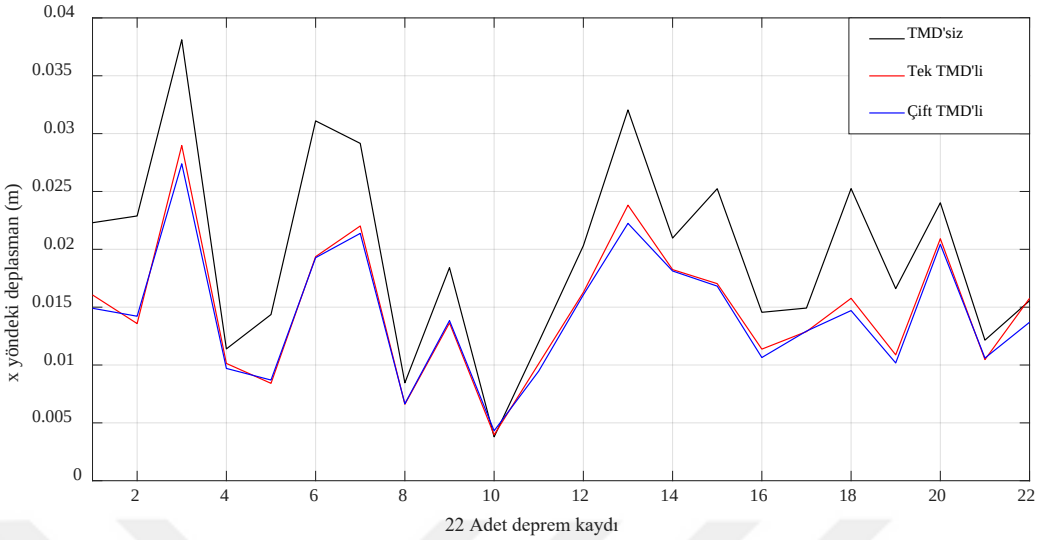
Kütle oranı $\mu_1 = \mu_2 = \frac{m_d}{m} = \frac{73.0785}{2923.5} = 0.025$ çift TMD için her bir TMD'nin kütle oranı %2.5 olarak toplam % 5 kütle oranı dikkate alınmıştır. TMD_1'nin *x* ve *y* yönlerindeki sönüm oranı $\xi_{d_{1x}} = 0.04477$ ve $\xi_{d_{1y}} = 0.2835$ olup 0.01~0.3 sınırlar içindendir. TMD_2'nin *x* ve *y* yönlerindeki sönüm oranı $\xi_{d_{2x}} = 0.1767$ ve $\xi_{d_{2y}} = 0.2678$ olup 0.01~0.3 sınırlar içindedir.

Tablo 4.2'de verilen yapı özellikleri tasarım değişken parametreleri olarak, Jaya algoritması kullanılarak yapılan çalışmalarda, **Tablo 4.1**'de 22 adet darbe titreşimi içeren uzak fay deprem kayıtlarından optimizasyon sonucunda, kritik deprem kayıtları olarak 3 ve 13'nolu deprem kayıtları seçilmiştir. 22 adet deprem kayıtlarıyla tek katlı tekli TMD ve çift TMD'li yapı sistemi üzerinde yapılan zaman tanım alanındaki analizlerinden elde edilen TMD'siz, tekli TMD'li ve çift TMD'li yer değiştirme sonuçları aşağıdaki tablo ve grafiklerde sunulmuştur.

Tablo 4.5: 22 adet deprem etkisi altındaki yapının *x* yöndeki deplasmanı.

Deplasman / Deprem	TMD'siz *x* yöndeki deplasman (m)	Tekli TMD *x* yöndeki deplasman (m)	Çift TMD *x* yöndeki deplasman (m)
1. deprem kaydı	0.022300175	0.016058242	0.014905423
2. deprem kaydı	0.022884199	0.013581704	0.014217322
3. deprem kaydı	0.038112968	0.028974505	0.027395968
4. deprem kaydı	0.011393793	0.010138460	0.009706488
5. deprem kaydı	0.014364185	0.008417161	0.008702391
6. deprem kaydı	0.031101029	0.019366877	0.019278204
7. deprem kaydı	0.029155743	0.022018147	0.021377841
8. deprem kaydı	0.008461972	0.006607591	0.006653751
9. deprem kaydı	0.018415678	0.013637725	0.013841157
10. deprem kaydı	0.003792635	0.003964214	0.004314592
11. deprem kaydı	0.011981953	0.010119119	0.009477223
12. deprem kaydı	0.020313335	0.016279714	0.016064643
13. deprem kaydı	0.032049446	0.023816721	0.022244893
14. deprem kaydı	0.020974038	0.018245954	0.018128047
15. deprem kaydı	0.025239099	0.017033254	0.016819801
16. deprem kaydı	0.014556829	0.011374383	0.010648615
17. deprem kaydı	0.014924041	0.012889370	0.012931645
18. deprem kaydı	0.025248974	0.015764644	0.014706385
19. deprem kaydı	0.016605699	0.010878853	0.010178102
20. deprem kaydı	0.024022089	0.020918041	0.020427548
21. deprem kaydı	0.012151268	0.010470923	0.010604305
22. deprem kaydı	0.015560022	0.015766907	0.013699283

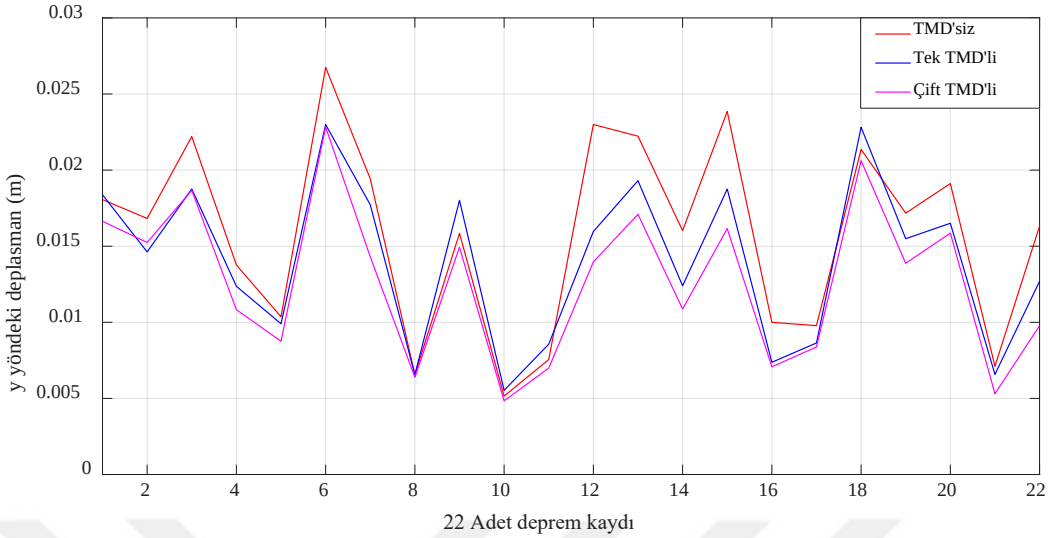
22 adet deprem kaydı etkisi altındaki tek katlı burulma düzensizliği oluşan yapının tekli ve çift TMD'li durumda *x* yönündeki yer değiştirmeleri **Şekil 4.2**'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: 22 adet deprem kaydı etkisi altındaki yapının *x* yönündeki deplasmanı.

Tablo 4.6: 22 adet deprem etksi altındaki yapının y yönündeki deplasmanı.

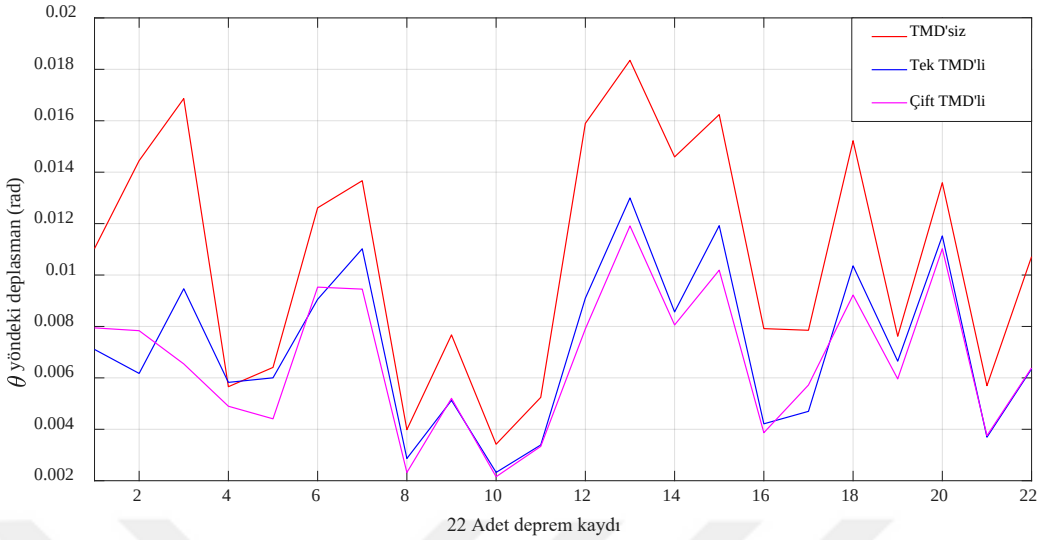
Deplasman / Deprem	TMD'siz *y* yöndeki deplasman (m)	Tekli TMD *y* yöndeki deplasman (m)	Çift TMD *y* yöndeki deplasman (m)
1. deprem kaydı	0.018062279	0.018380630	0.016642308
2. deprem kaydı	0.016824747	0.014626113	0.015246310
3. deprem kaydı	0.022206703	0.018763099	0.018673556
4. deprem kaydı	0.013769795	0.012369074	0.010833987
5. deprem kaydı	0.010371165	0.009906480	0.008757450
6. deprem kaydı	0.026750370	0.022996324	0.022834756
7. deprem kaydı	0.019433522	0.017727659	0.014308826
8. deprem kaydı	0.006555663	0.006561400	0.006392821
9. deprem kaydı	0.015846344	0.018018910	0.014936989
10. deprem kaydı	0.005153038	0.005531187	0.004843156
11. deprem kaydı	0.007553553	0.008563472	0.006991600
12. deprem kaydı	0.022994723	0.015966738	0.013972492
13. deprem kaydı	0.022230501	0.019304677	0.017095735
14. deprem kaydı	0.016021070	0.012398119	0.010869498
15. deprem kaydı	0.023851979	0.018755983	0.016158783
16. deprem kaydı	0.010000687	0.007374479	0.007078565
17. deprem kaydı	0.009782036	0.008644206	0.008381986
18. deprem kaydı	0.021359012	0.022815601	0.020617690
19. deprem kaydı	0.017175553	0.015494026	0.013876112
20. deprem kaydı	0.019117610	0.016509590	0.015864647
21. deprem kaydı	0.007116177	0.006580707	0.005305783
22. deprem kaydı	0.016326926	0.012701620	0.009782301



Şekil 4.3: 22 adet deprem kaydı etkisi altındaki yapının *y* yönündeki deplasmanı.

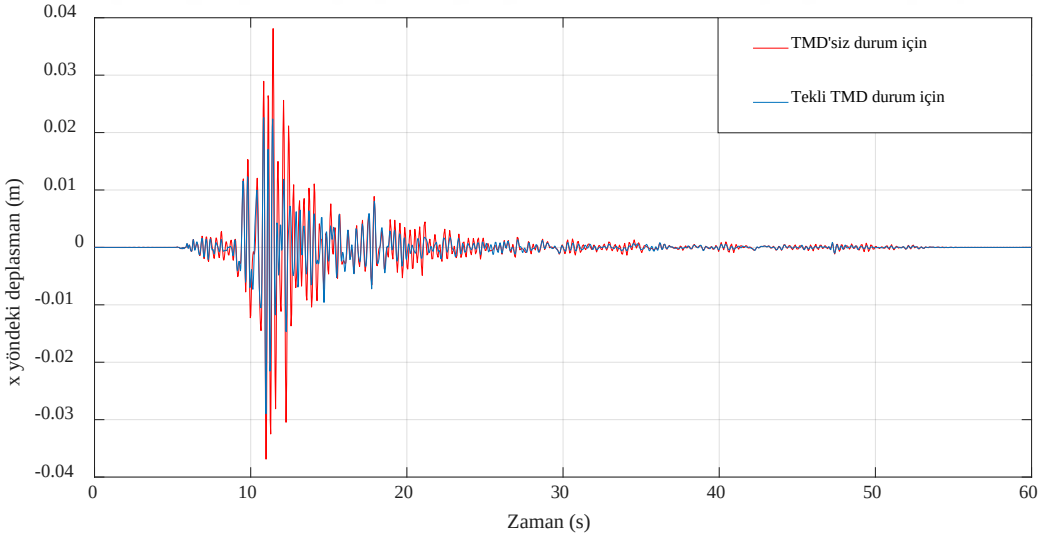
Tablo 4.7: 22 adet deprem etksi altındaki yapının θ yönündeki dönmesi.

Deplasman Deprem kaydı	TMD'siz θ yöndeki dönmesi (rad)	Tekli TMD θ yöndeki dönmesi (rad)	Çift TMD θ yöndeki dönmesi (rad)
1. deprem kaydı	0.011030975	0.007107148	0.007945446
2. deprem kaydı	0.014449166	0.006173394	0.007835757
3. deprem kaydı	0.016864264	0.009467439	0.006543974
4. deprem kaydı	0.005656977	0.005825205	0.004897599
5. deprem kaydı	0.006407108	0.006002410	0.004408098
6. deprem kaydı	0.012613624	0.009055438	0.009529895
7. deprem kaydı	0.013669264	0.011021468	0.009452303
8. deprem kaydı	0.003984197	0.002864669	0.002319890
9. deprem kaydı	0.007672297	0.005125547	0.005204430
10. deprem kaydı	0.003419237	0.002323366	0.002156115
11. deprem kaydı	0.005241648	0.003390187	0.003335563
12. deprem kaydı	0.015897600	0.009100361	0.007904373
13. deprem kaydı	0.018350580	0.012998686	0.011909963
14. deprem kaydı	0.014594521	0.008565537	0.008059065
15. deprem kaydı	0.016240213	0.011920778	0.010190149
16. deprem kaydı	0.007916350	0.004213145	0.003867560
17. deprem kaydı	0.007851297	0.004698565	0.005722700
18. deprem kaydı	0.015224585	0.010358687	0.009221784
19. deprem kaydı	0.007618713	0.006649226	0.005959997
20. deprem kaydı	0.013590661	0.011522640	0.011023369
21. deprem kaydı	0.005696050	0.003693415	0.003754410
22. deprem kaydı	0.010715127	0.006349864	0.006387021

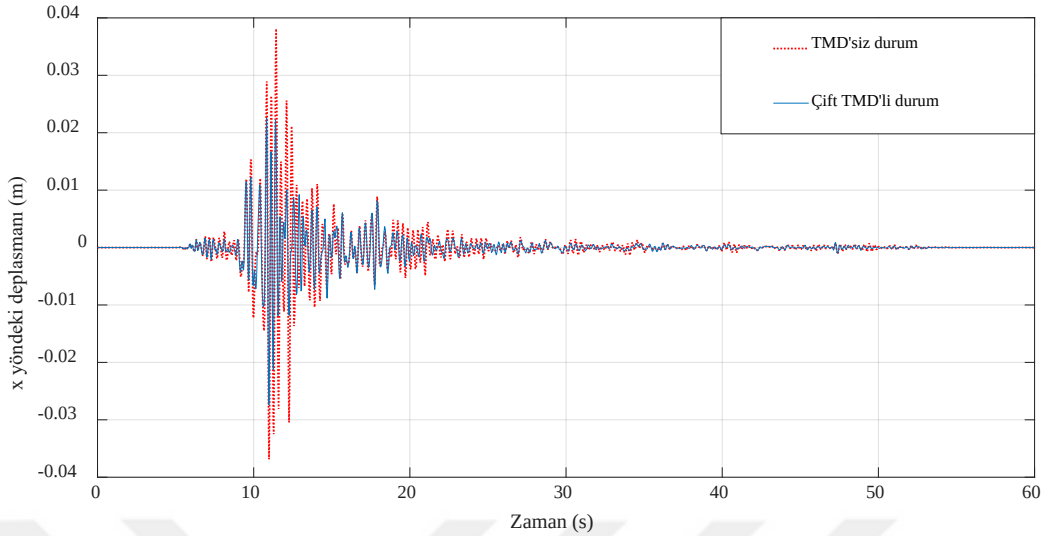


Şekil 4.4: 22 adet deprem kaydı etkisi altındaki yapının θ yönündeki u_θ dönmesi.

22 adet deprem kaydı içinden kritik olarak seçilen 3'nolu deprem kaydına göre zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçlarından, tek TMD'li yapının x yönündeki deplasmanı, TMD'siz durumda 0.03811 m, tekli TMD'li durumda ise 0.0226 m olmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin etkinliği ise %40.689 çıkmaktadır.

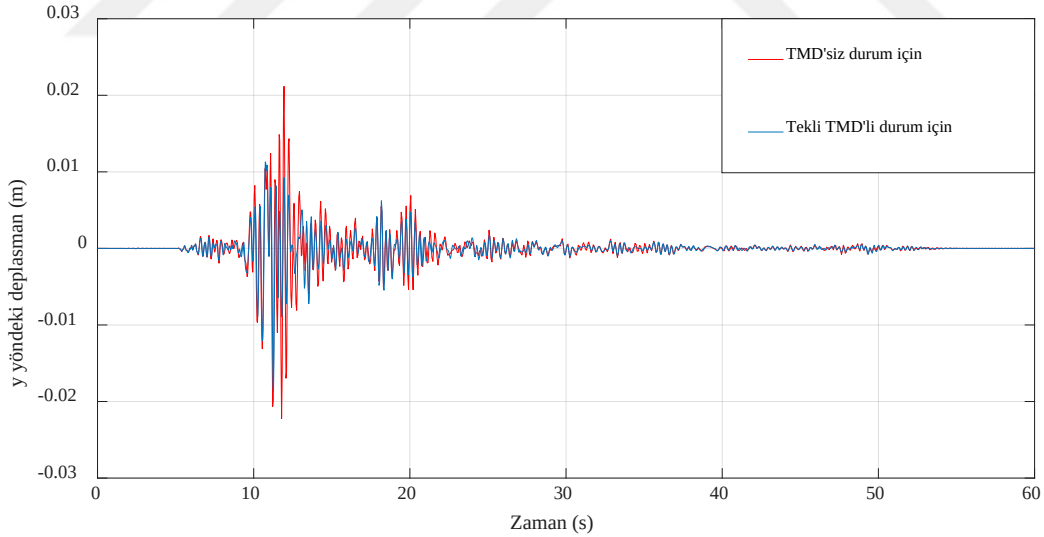


Şekil 4.5: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_x deplasmanı.



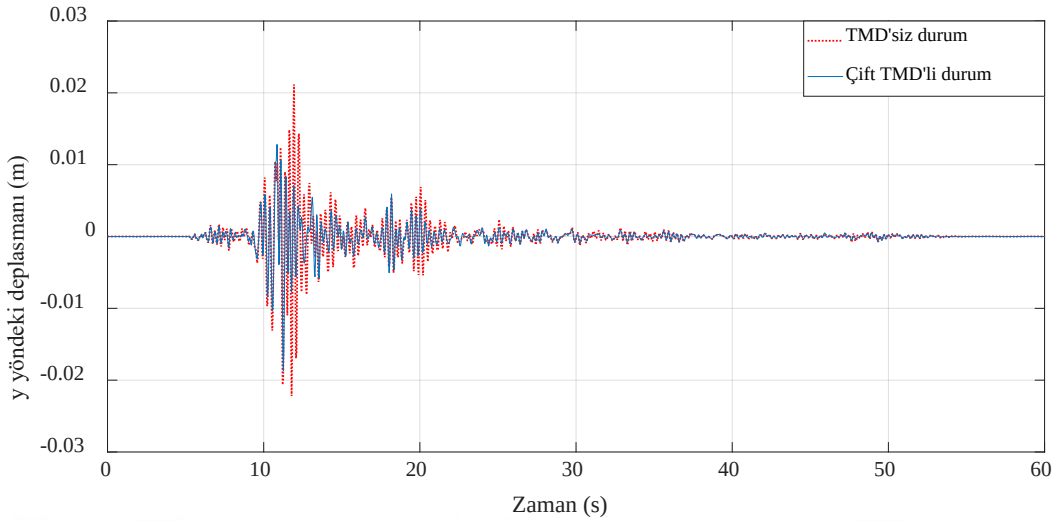
Şekil 4.6: 3'nolu kritik deprem kayıdına göre çift TMD'li yapının u_x deplasmanı.

Seçilen 3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının *x* yönündeki etkinliği %40.829 çıkmaktadır. Bu durumda, u_x deplasmanı TMD'siz durumda 0.03811 m, çift TMD'li durumda ise 0.02255 m olmaktadır.



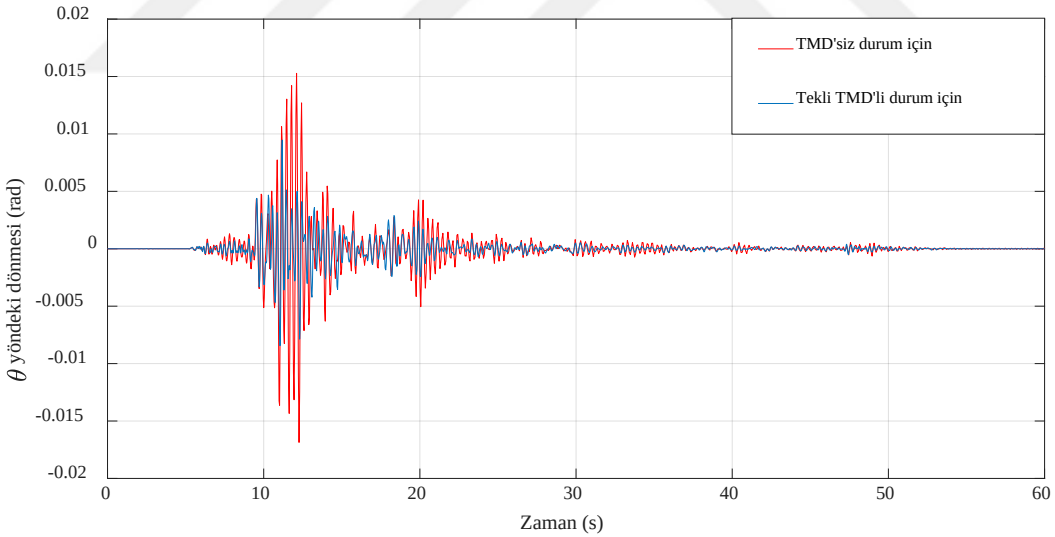
Şekil 4.7: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_y deplasmanı.

3'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının *y* yönündeki deplasmanı, TMD'siz durumda 0.02117 m, tekli TMD'li durumda ise 0.01131 m olmaktadır. Bu durumdaki, tekli TMD'nin etkinliği %46.575 çıkmaktadır.



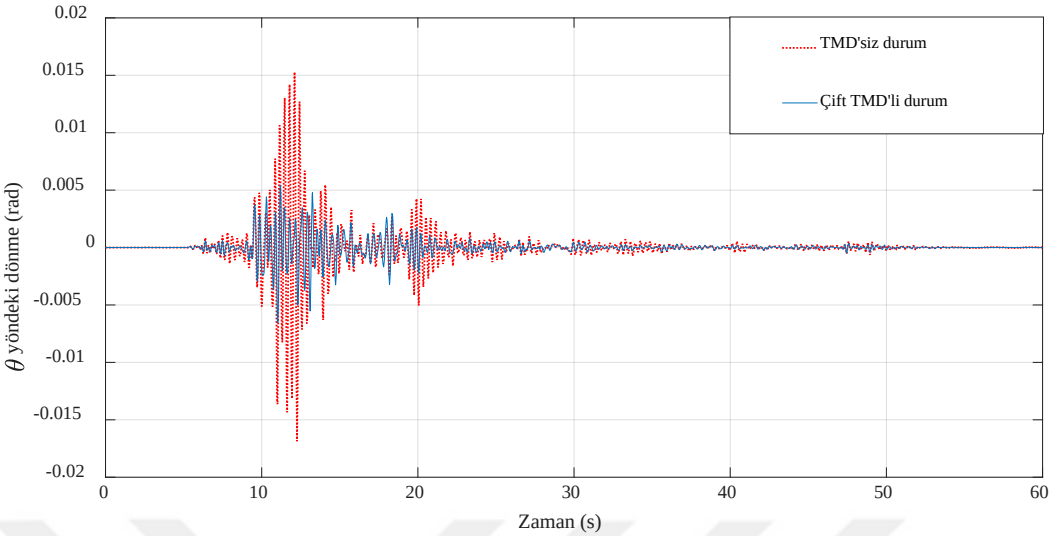
Şekil 4.8: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_y deplasmanı.

Seçilen 3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının *y* yönündeki etkinliği %39.490 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y deplasmanı TMD'siz durumda 0.02117 m, çift TMD'li durumda ise 0.01281 m olmaktadır.



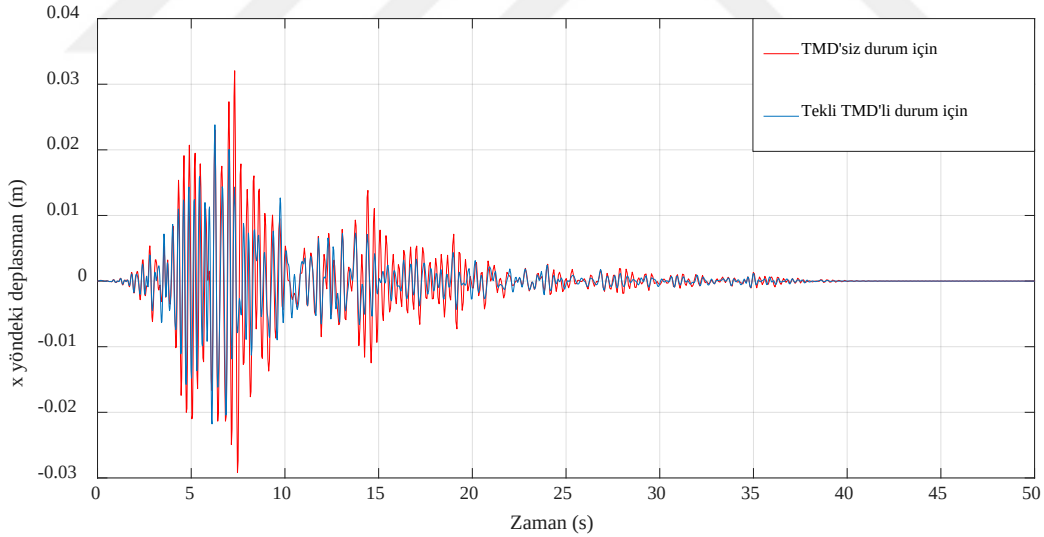
Şekil 4.9: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre tek TMD'li yapının u_θ dönmesi.

Tekli TMD'li yapının θ yönündeki u_θ dönmesi, kritik olarak seçilen 3'nolu deprem kayıtına göre yapılan analizde, TMD'siz durumda 0.01528 rad, tek TMD'li durumda 0.009467 rad çıkmaktadır. Bu durumdaki, tekli TMD'nin etkinliği ise %38.043 çıkmaktadır.



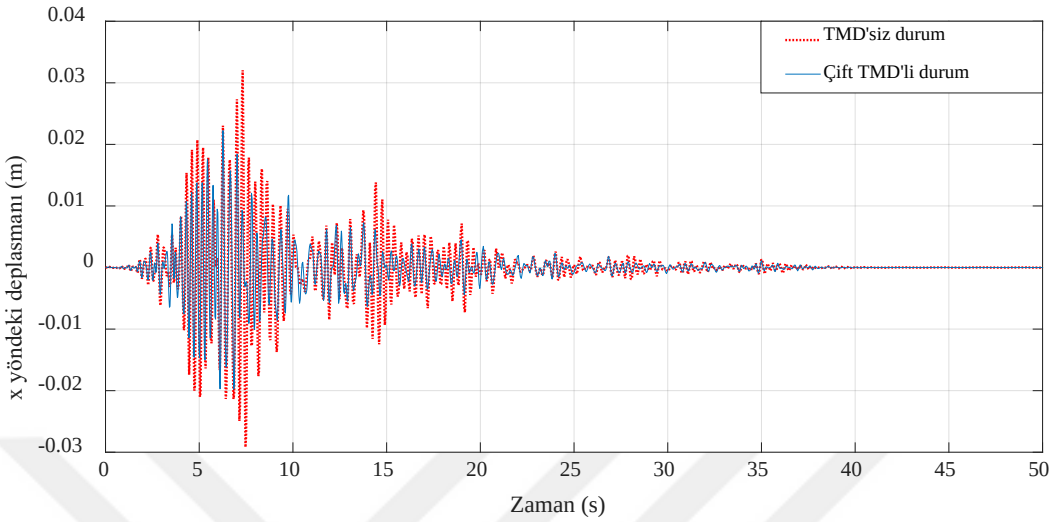
Şekil 4.10: 3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_θ dönmesi.

3'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının θ yönündeki u_θ dönmesi, TMD'siz durumda 0.01528 rad, çift TMD'li durumda 0.00545 rad olmaktadır. Bu durumda, çift TMD'nin etkinliği %64.332 çıkmaktadır.



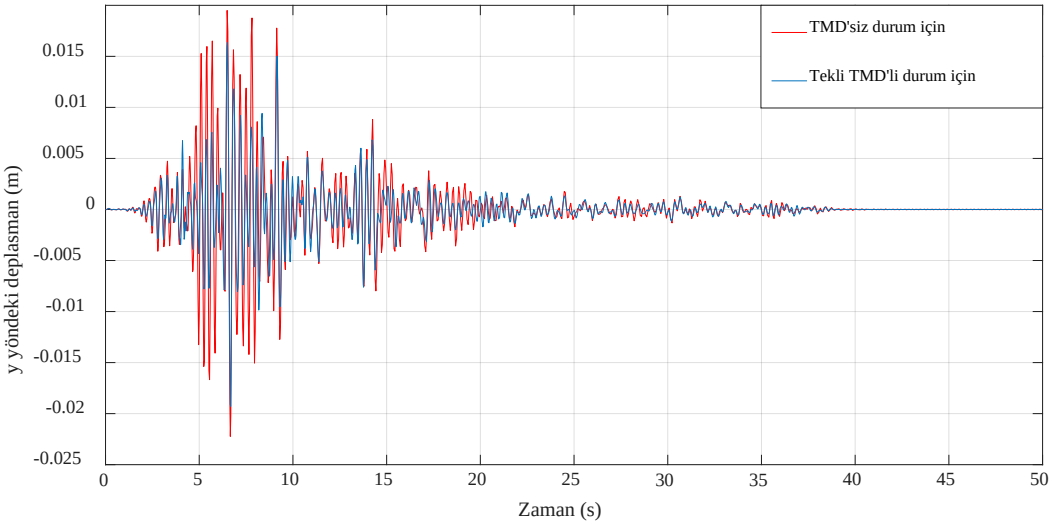
Şekil 4.11: 13'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_x deplasmanı.

Optimizasyonda seçilen 13'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının x yönündeki etkinliği %25.710 çıkmaktadır. Bu durumdaki, u_x deplasmanı TMD'siz durumda 0.03205 m, tekli TMD'li durumda ise 0.02381 m olmaktadır.



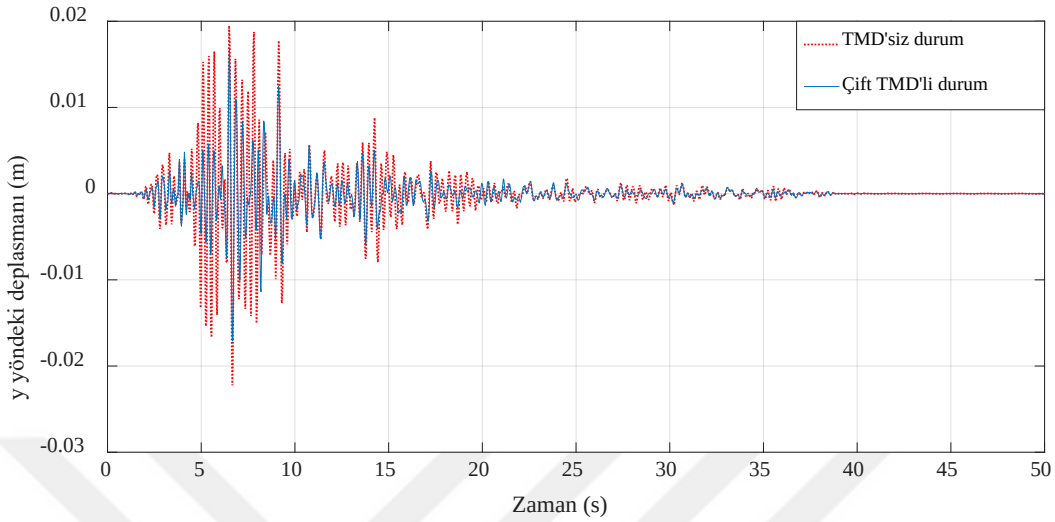
Şekil 4.12: 13'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_x deplasmanı.

Kritik olarak seçilen 13'nolu deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının x yönündeki deplasmanı, TMD'siz durumda 0.03205 m, çift TMD'li durumda ise 0.02224 m olmaktadır. Bu durumda, çift TMD'nin etkinliği %30.608 çıkmaktadır.



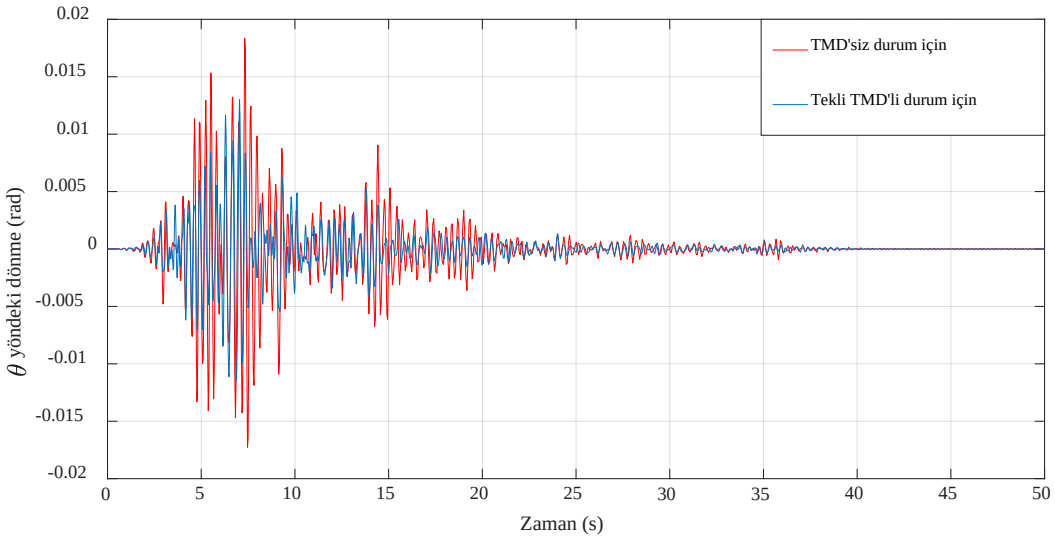
Şekil 4.13: 13'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_y deplasmanı.

13'nolu kritik deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının y yönündeki deplasmanı, TMD'siz durumda 0.0195 m, çift TMD'li durumda ise 0.01633 m olmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin etkinliği %16.256 çıkmaktadır.



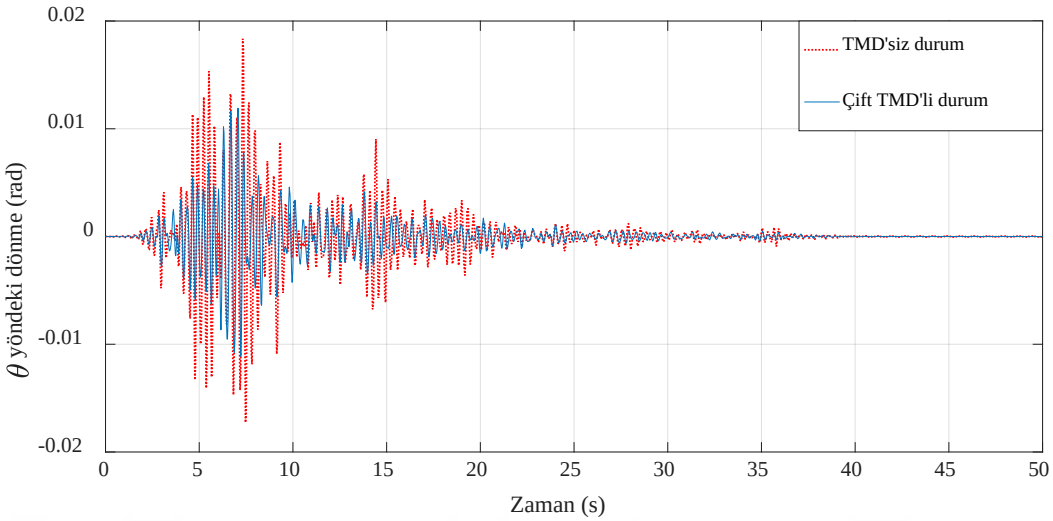
Şekil 4.14: Seçilen 13'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_y deplasmanı.

Çift TMD'li yapının *y* yönündeki deplasmanı, kritik olarak seçilen 13'nolu deprem kayıtına göre yapılan analizde, TMD'siz durumda 0.0195 m, çift TMD'li durumda ise 0.01661 m çıkmaktadır. Bu durumdaki çift TMD'nin etkinliği %14.821 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.15: Kritik olarak seçilen 13'nolu deprem kayıtına göre tekli TMD'li yapının u_θ dönmesi.

Seçilen 13'nolu kritik deprem kayıtına göre tek TMD'li yapının θ yönündeki u_θ dönmesi, TMD'siz durumda 0.01835 rad, tek TMD'li durumda ise 0.013 rad çıkmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin u_θ dönmesindeki etkinliği % 29.155 çıkmaktadır.

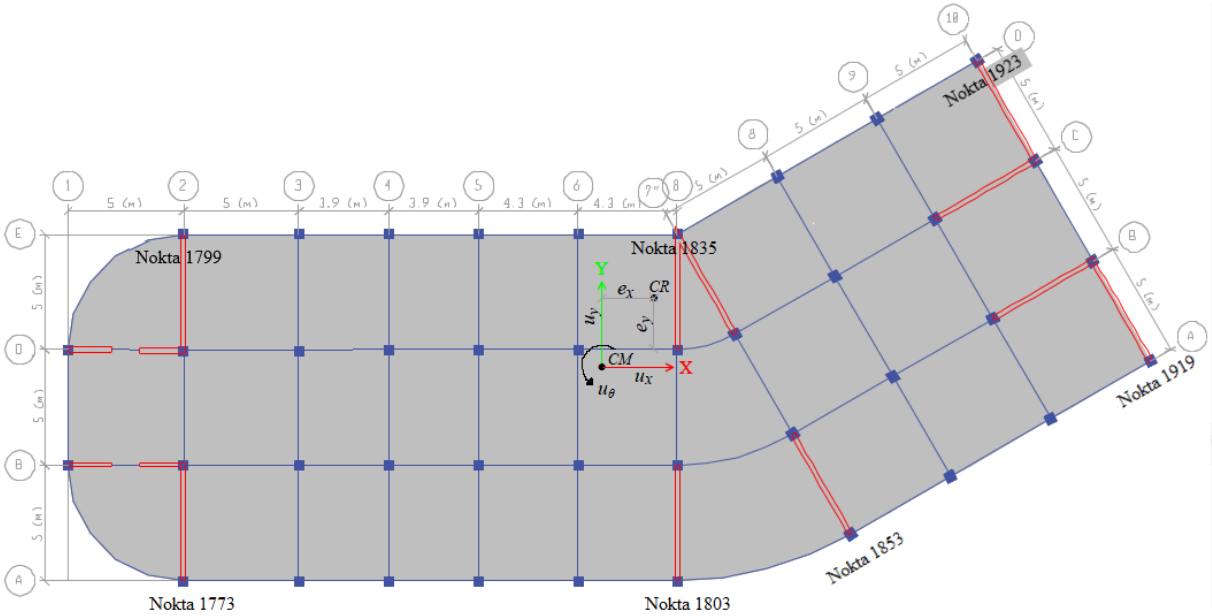


Şekil 4.16:13'nolu kritik deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının u_θ dönmesi.

Optimizasyonda kritik olarak seçilen 13'nolu deprem kayıtına göre çift TMD'li yapının θ yönündeki u_θ dönmesi, TMD'siz durumda 0.01835 rad, çift TMD'li durumda ise 0.01191 rad olmaktadır. Bu durumda, çift TMD'nin etkinliği %35.095 çıkmaktadır.

4.2.10 KATLI BURULMA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN YAPININ MODELİ

Bu tez çalışmasında, döşemelerin planında rijit diyaframlar olarak kabul edildiği, tüm katların eşit yüksekliğe (h), eşit kat kütle (m_s) ve kat kütlesel atalet yarıçapı (ρ_s) 10 katlı çerçeve-perde sistemli asimetrik yapısal model ele alınmıştır. Yapının toplam yüksekliği 32.0 m olmaktadır. Yapının en üst kattaki ivme ve yer değiştirme tepkisi deprem yarımları altında en büyük olduğundan, TMD'ler yapının en üst kat'a yerleştirilmiştir. Örnek hesaplamada, yapının kat sayısına göre tasarım yapısı basitleştirilmiş ve yapı 10 adet toplanmış kütle olarak basitleştirilmiştir. Her katın kütle merkezi (CM), kat rijitlik merkezi (CR) ile ifade edilmiştir. Her katta x ve y yönlerindeki ötelemeler ve kütle merkezi etrafındaki dönme olarak üç serbestlik derecesi vardır (**Şekil 4.17**).



Şekil 4.17: 10 katlı asimetrik yapının plan görünümü.

Bu çalışmada ele alınan 10 katlı çerçeve-perde sistemli asimetrik yapının malzeme ve kesit özellikler **Tablo 4.8**'de verilmiştir.

Tablo 4.8: Ana yapının malzeme ve kesit özellikleri.

Malzeme ve Kesit Özellikleri		
Değişkenler		Veriler
Binanın türü		Çerçeve-Perde duvar yapısı
Kat sayısı		10
Kat yüksekliği		3.2 m
Beton sınıfı		C25
Beton yoğunluğu		25 kN/m3
Elastisite Modülü, E		32000 Mpa
Poisson oranı		0.2
Modal Sönüm oranı		0.05
Donatı	S420a	Fy=420 Mpa; Fu=500 Mpa
	S220	Fy=220 Mpa; Fu=340 Mpa
Donatı Elastisite Modülü, E		200000 Mpa
Kolon boyutu		400x400 mm
Kiriş boyutu		250x450 mm; CB 200x1000 mm
Perde duvar kalınlığı		200 mm
Döşeme kalınlığı		150 mm

Önerilen MTMD sistemi, 10 katlı bir ofis binasında deprem etkisinde oluşan titreşimlerin azaltılmasında etkili olması için uygulanmaktadır. Bina 32 m yüksekliğinde olup, toplam

ağırlığı 4849.831 ton'dur. Binanın FEM modeli ETABS programı ile modellenmiştir. Binanın ilk üç mod periyodu, modal katılım kütle oranı (MPMR) ve modal yön faktörü (MDF) değerleri **Tablo 4.9**'da verilmiştir.

Tablo 4.9: 10 katlı binanın baskın periyotu , MPMR ve MDF değerleri.

Mode	1	2	3
Periyot (s)	0.256	0.214	0.176
MPMR*x*	0.8036	0.0001	0.0447
MPMR*y*	0.0147	0.6064	0.2273
MPMR*rz*	0.0303	0.2432	0.5751
MDF*x*	0.947	0	0.053
MDF*y*	0.017	0.715	0.267
MDF*rz*	0.035	0.284	0.68

Burada, MPMR: modal katılımcı kütle oranı (*x*,*y* ve *rz* yönündeki); MDF: modal yön faktörü(*x*,*y* ve *rz* yönündeki) ifade eder. Bina sönüm oranı %5 seçilerek ETABS programında hesaplamalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, yapıyı simüle ve analiz etmek için yapısal analiz ve hesaplamalarda ETABS paket analiz programı kullanılmıştır. ETABS, genel yüksek katlı yapıların hesaplama fonksiyonlarına ek olarak, ayrıca özel çelik yapılar, kancalar, çatılar, yaylar, yapısal sönümleme hareketlerini, eğimli plakaları, değişken kesitli kirişleri veya kirişler gibi özel elemanları ve yapısal doğrusal olmayan hesaplamaları da hesaplayabilir (Pushover, Buckling, inşaat sırası yükleme vb.), yapısal taban izolasyon ve enerji sönümleyici cihazlar gibi karmaşık problemleri de hesaplayabilir ve çok güçlü özel fonksiyonlara sahiptir. Bu çalışmada, ETABS'ın nispeten hızlı yapısal modelleme ve doğru sismik izolasyon analiz yeteneklerini göz önünde bulundurarak, yapısal analiz programı olarak kullanılmıştır.

Ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımında gerekli ana yapının kat kütlesi, ilk üç periyodu, kat kütlesel atalet yarıçapı ve eksantriklik gibi yapısal özellikleri **Tablo 4.10**'da verilmiştir. Bu parametre değerleri ETABS yapısal analiz programı ile elde edilmiştir.

Optimizasyonda gerekli ana yapının parametre değerleri *x, y* ve θ yönleri için **Tablo 4.11**'de verilmiştir.

Tablo 4.10: Optimizasyonda gerekli ana yapının parameterleri.

Kat No:	Kat Kütlesi *(kg)*	Period T_1 (s)	Period T_2 (s)	Period T_3 (s)	Kat kütlesel atalet yarıçapı r (m)	Eksantriklik e_x (m)	Eksantriklik e_y (m)
10	411262.98	0.0357641	0.0299518	0.024047	13.93914009	2.5049	2.6145
9	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
8	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
7	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
6	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
5	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
4	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
3	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
2	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376
1	484983.1	0.0357641	0.0299518	0.024047	14.27583242	2.2301	2.478376

Tablo 4.11: Ana yapının katlara göre x, y ve θ yönlerindeki rijitlikleri.

Kat No:	Kat Yükeskliği (m)	Kat Kütlesi x 10^6(kg)	Eşdeğer Rijitlik x 10^6(kN/m) x yönde	Eşdeğer Rijitlik x 10^6(kN/m) y yönde	Eşdeğer Rijitlik x 10^6(kN/m) θ yönde
10	3.2	4.11263	1.2694	1.8098	5.6557
9	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
8	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
7	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
6	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
5	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
4	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
3	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
2	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459
1	3.2	4.849831	1.4969	2.1342	6.9459

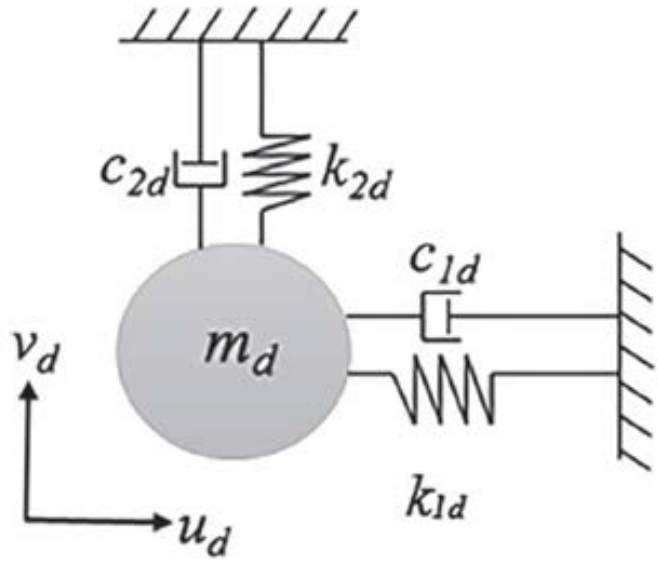
4.3. 10 KATLI TEKLİ TMD'NİN FARKLI KONUMLARDAKİ ANALİZİ

Bu alt bölümde, TMD optimum konum yerlerinin, optimizasyonda kritik olarak seçilen deprem yer hareketleri etkisi altında ana yapının en üst kat yer değiştirmelerini nasıl etkilediğini incelenmiştir. Ayrıca, TMD'nin etkilerinin optimum parametre değerleri dışında optimum konumun da çok önemli olduğu incelenmiştir. **Tablo 4.10** ve **Tablo 4.11**'deki ana yapının parametre değerlerini kullanarak, MATLAB programı ile Jaya algoritması kullanarak elde edilen tekli TMD'nin optimizasyon değerleri **Tablo 4.12** verilmiştir.

Tablo 4.12: 10 katlı tekli TMD'nin optimum parametre değerleri.

Açıklamalar	Parametre ve birimi	Parametre değeri
Kütle	m_d (kg)	238805.544
x ve *y* yönlerindeki doğal frekansı	ω_{dx} (Hz)	26.97937597
	ω_{dy} (Hz)	34.03327077
x ve *y* yönlerindeki sönüm oranı	ξ_{dx}	0.078387203
	ξ_{dy}	0.099867359
x ve *y* yönlerindeki rijitliği	k_{dx}	173823.39
	k_{dy}	276599.75
x ve *y* yönlerindeki sönümü	c_{dx}	1010.07
	c_{dy}	1623.3107
x ve *y* yönlerindeki optimum konum	x *(m)*	10
	y *(m)*	10

Optimizasyon sonuçlarına göre, deprem yer hareketleri etkisi altında en büyük yer değiştirmelerin genelde bina yapısının en üst katında belirgin olduğu için, tekli TMD optimum konumlarına göre bina yapısının en üst katına konumlandırılmıştır. TMD'lerin *x*, y ve θ yönlerindeki etkileri dikkate alınarak, TMD'nin çift yönlü olarak yerleştirilen plan görünümü **Şekil 4.18**'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18: Çift yönlü ayarlı kütle sönümleyicinin konum plan görünümü (Taha ve diğ. 2019).

Optimizasyonda, 1979 yılında meydana gelen El Centro depreminin *x* yönündeki IMPVALL/H-E11140 kaydı ve *y* yönündeki IMPVALL/H-E11230 kaydı kritik deprem olarak

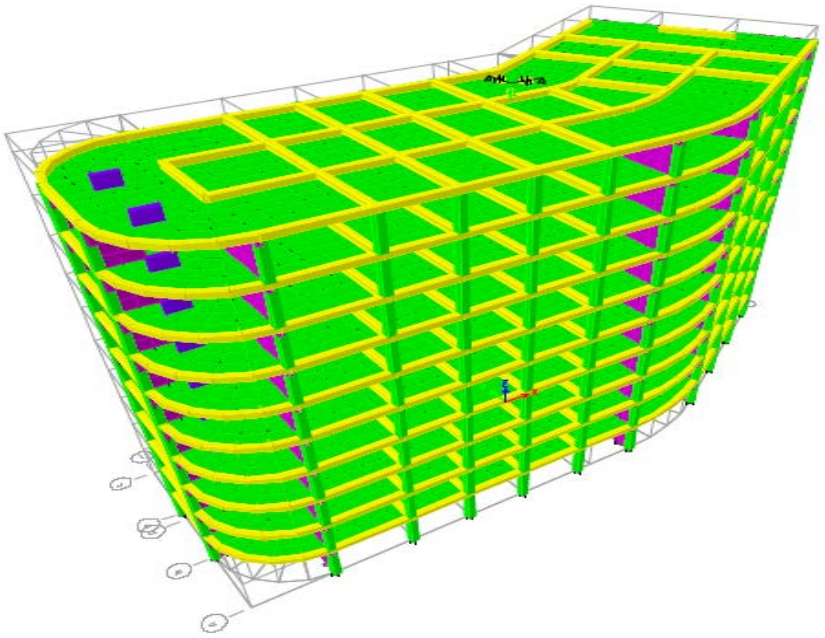
seçilmiştir. Tekli TMD'nin bu kritik deprem yükleri etkisi altında kütle merkezi ve optimizasyon sonuçlarından elde edilen konumlara yerleştirilerek ETABS program ile zaman tanım alanında yapılan analizlerinden elde edilen sonuçlara göre bina yapısının en üst kat köşe noktalarında meydana gelen köşe nokta deplasman ve kat yer değiştirmeleri aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

Çalışmada optimum olarak bulunan konumun dışında aynı optimum özelliklere sahip olan kütle sönümleyicileri yapının kütle merkezine yerleştirilerek optimum konumun da ne kadar faydalı olduğu irdelenmiştir.

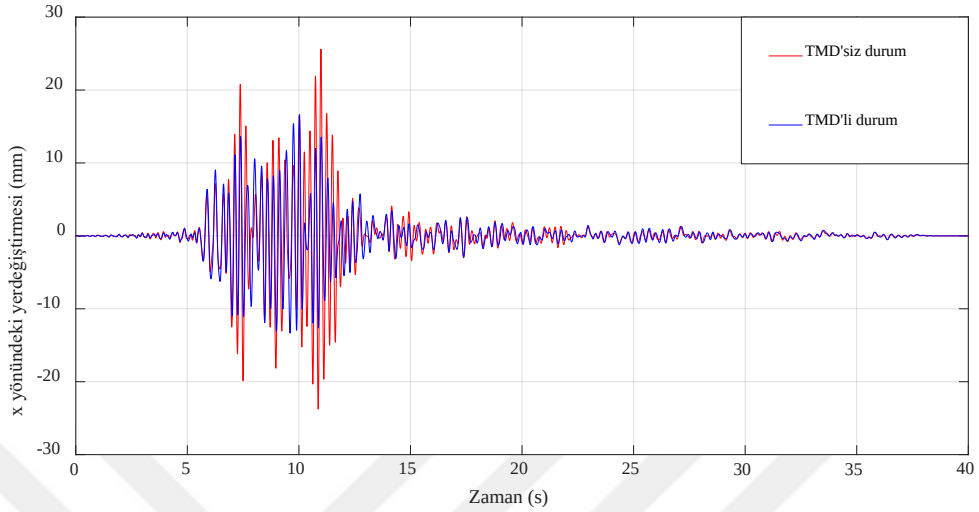
4.3.1. Tekli TMD'nin Kütle Merkezine Konumlandırılması Durumu

Tekli TMD'nin kütle merkezine konumlandırma durumundaki üç boyutlu görünümü **Şekil 4.19**'da gösterilmiştir. Optimum parametre değerli olarak, **Tablo 4.12**'deki tekli TMD'nin optimum parametre değerleri dikkate alınmış olup, sadece konumu yeri kütle merkezi konumu olarak seçilmiştir.

ETABS paket analiz programı ile seçilen *x* ve *y* yönlerindeki kritik depremlere göre zaman tanım alanında yapılan analizi sonuçları, TMD'siz ve TMD'li olarak aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir:

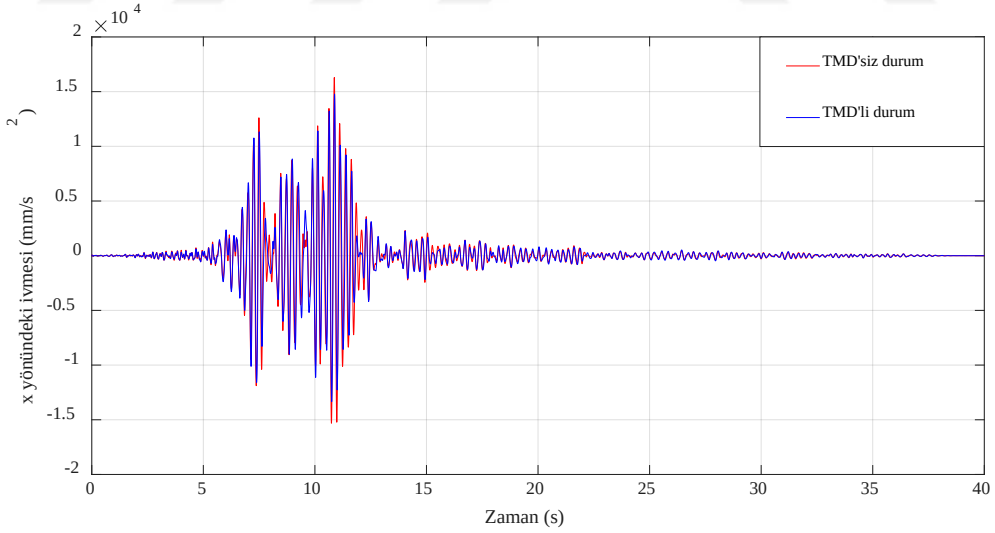


Şekil 4.19: Tekli TMD'nin kütle merkezi konumuna konulan yapının 3D görünümü.



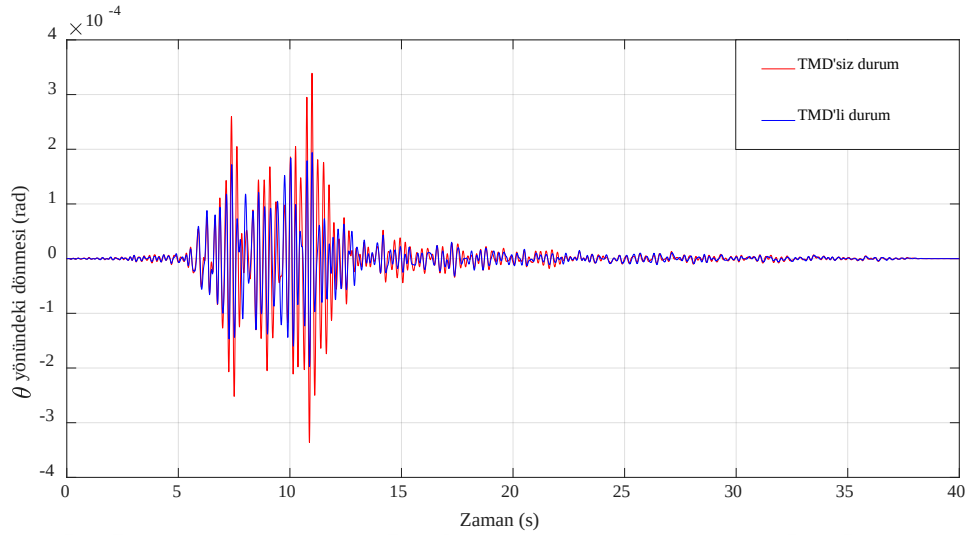
Şekil 4.20: 1773 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.

1773 düğüm noktasının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, u_x deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 25.603 mm, TMD'li durumda ise 16.628 mm çıkmaktadır. Bu durumda, u_x yer değiştirmesindeki TMD'nin etkinliği ise %35.05 olarak hesaplanmıştır.



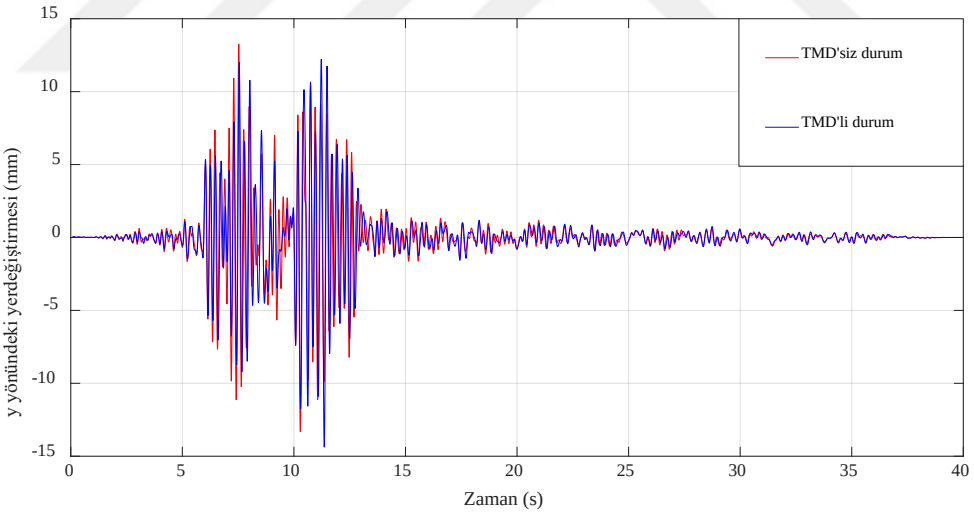
Şekil 4.21: 1773 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

Kritik olarak seçilen *x* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, 1773 düğüm noktasının, *x* yönündeki a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 16286.47 mm/s^2, TMD'li durumda ise 8950.50 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin etkinliği %45.043 çıkmaktadır.



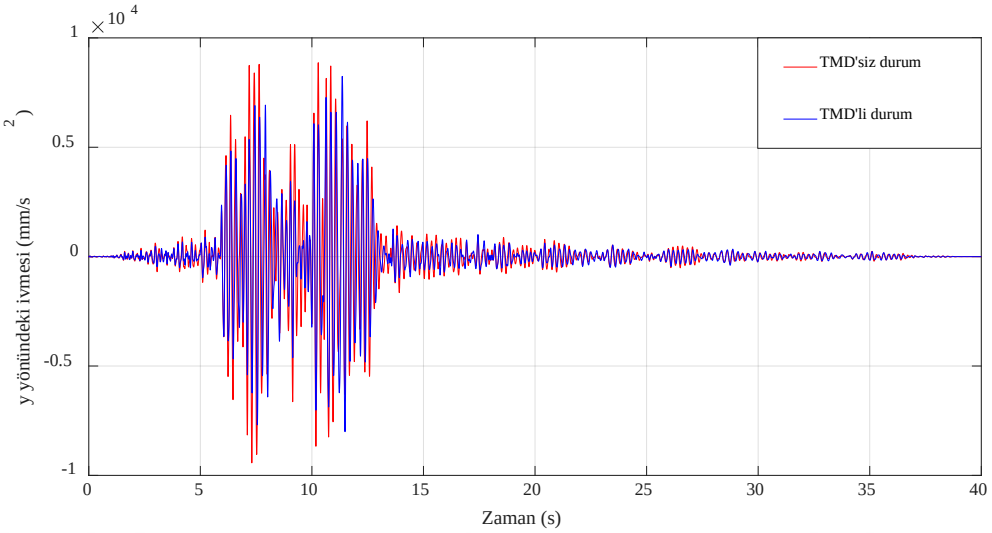
Şekil 4.22: 1773 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.

x yönünde seçilen kritik deprem kayıtına göre, 1773 düğüm noktasının u_θ yönündeki dönmesi TMD'siz durumda maksimum 0.000339 rad, TMD'li durumda ise 0.000194 rad çıkmaktadır. Bu durumdaki TMD'nin etkinliği ise % 42.77 olarak hesaplanmıştır.



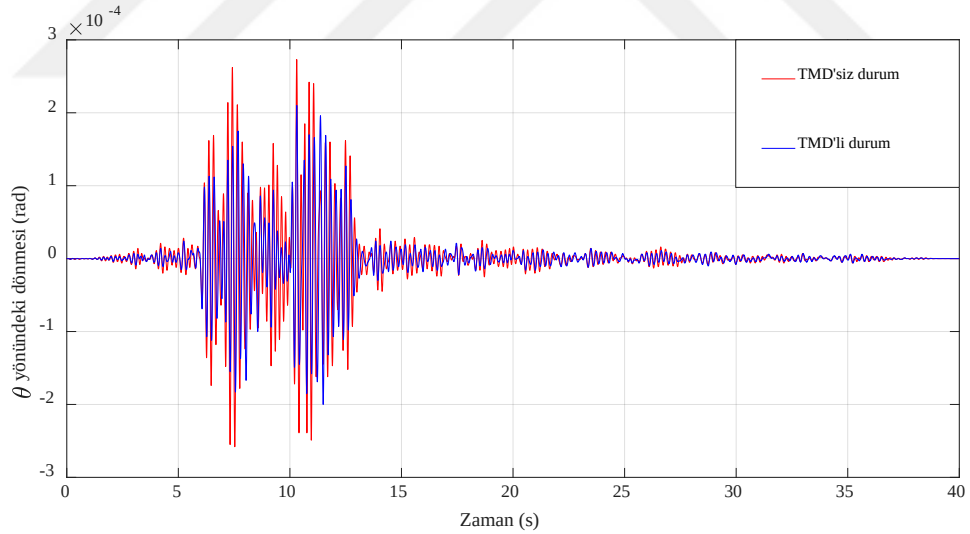
Şekil 4.23: 1773 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

1773 düğüm noktasının *y* yönünde seçilen kritik deprem kayıtına göre yapılan analizde, *y* yönündeki u_y deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 13.249 mm, TMD'li durumda ise 12.208 mm olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %7.86 çıkmaktadır.



Şekil 4.24: 1773 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivemsi.

y yönünde seçilen kritik deprem kayıtına göre, 1773 düğüm noktasının *y* yönündeki a_y ivmesi TMD'siz durumda maksimum 8865.14 mm/s^2, TMD'li durumda ise 8241.32 mm/s^2 çıkmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği % 7.04 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.25: 1773 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.

1773 düğüm noktasının, *y* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altındaki u_θ dönmesi TMD'siz durumda maksimum 0.000273 rad, TMD'li durumda ise 0.00021 rad çıkmaktadır. Bu durumdaki TMD'nin etkinliği ise % 23.08 olarak hesaplanmıştır.

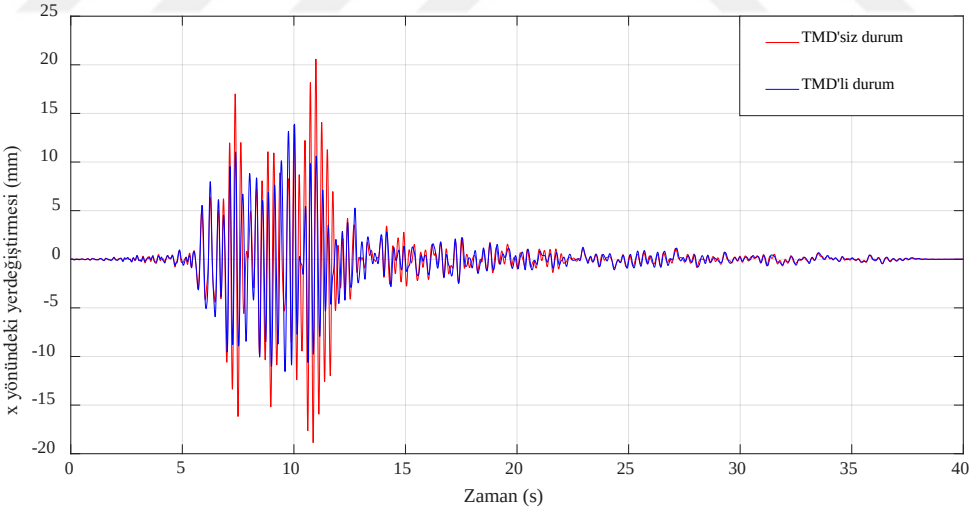
Tablo 4.13: Kritik deprem etksi altında 1773 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	16286.47	25.603	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
TMD'li	8950.5	16.628	0.000194	8241.32	12.208	0.00021
TMD'nin etkinliği	%45.043	%35.054	%42.773	%7.037	%7.857	%23.077

x ve *y* yönlerindeki kritik deprem yer hareketi etkisi altında, **Şekil 4.17**'de gösterilen diğer köşe noktalarındaki u_θ dönmelerinde TMD'nin etkinliği hemen hemen aynı olduğu için bundan sonraki noktaların sadece *x* ve *y* yönlerindeki öteleme ve ivme şekiller verilecektir, dönme şekilleri verilmeyecektir.

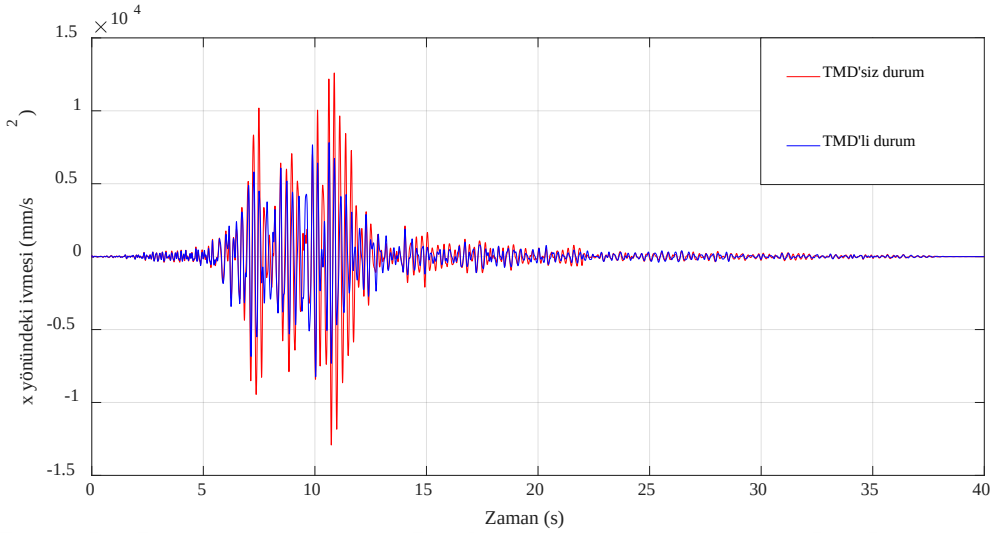
Tablo 4.14: Kritik deprem etksi altında 1799 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	12594.98	20.581	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
TMD'li	7821.65	13.898	0.000194	8241.32	12.208	0.00021
TMD'nin etkinliği	%37.899	%32.472	%42.773	%7.037	%7.857	%23.077



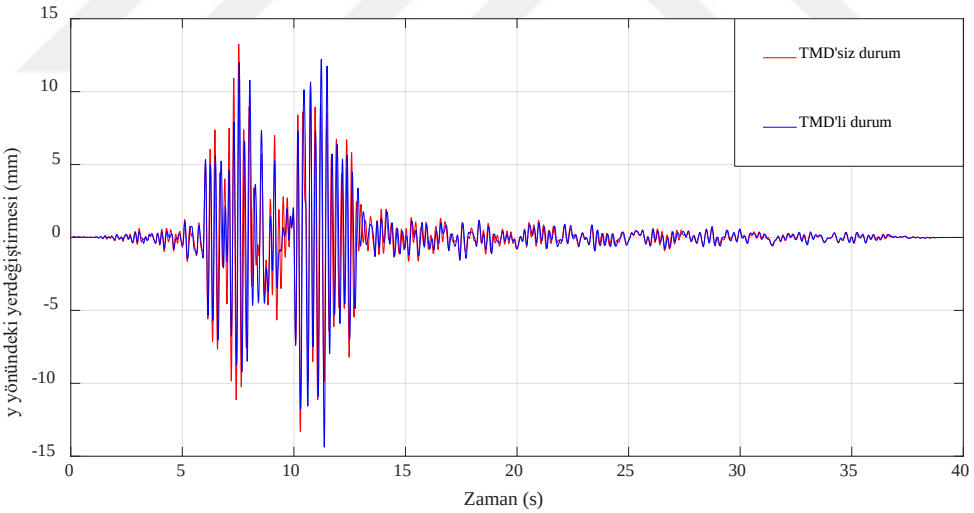
Şekil 4.26: 1799 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.

1799 düğüm noktasının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altındaki, tekli TMD'nin etkinliği %32.47 çıkmaktadır. Bu durumda, *x* yönündeki u_x deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 25.581 mm, TMD'li durumda ise 13.898 mm olmaktadır.



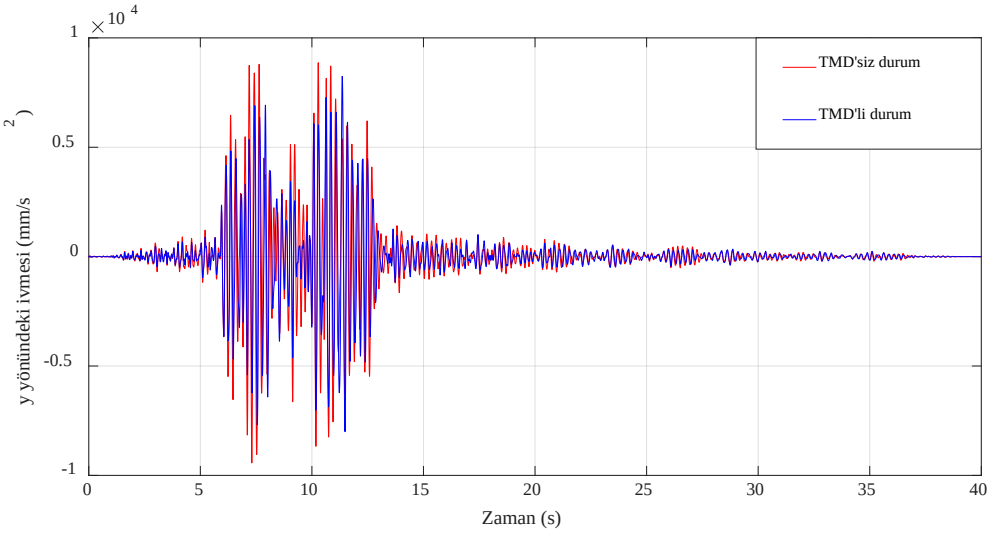
Şekil 4.27: 1799 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

1799 düğüm noktasının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, *x* yönündeki a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 12594.89 mm/s^2, TMD'li durumda ise 7821.65 mm/s^2 çıkmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %37.90 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.28: 1799 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı

y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1799 düğüm noktasının *y* yönündeki u_y deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 13.249 mm, TMD'li durumda ise 12.208 mm çıkmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %7.86 olarak hesaplanmıştır.

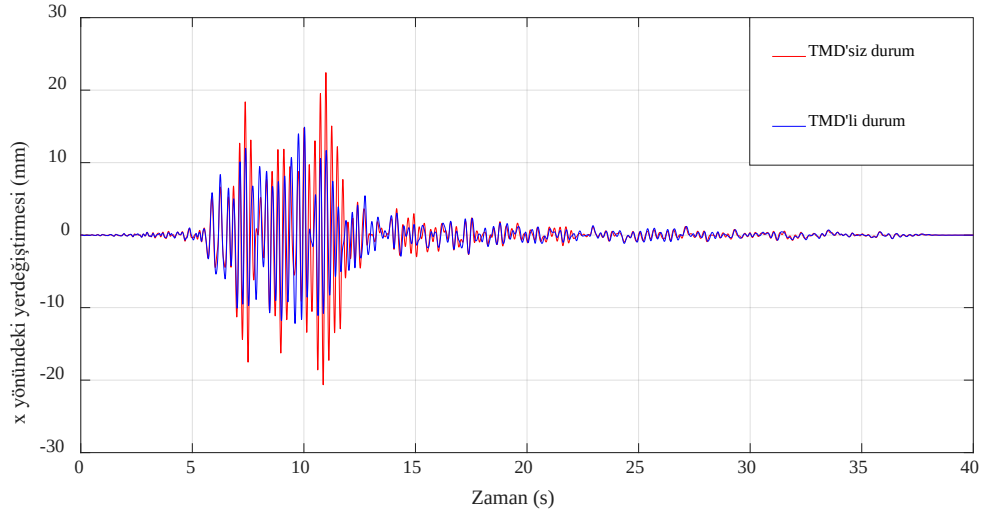


Şekil 4.29: 1799 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

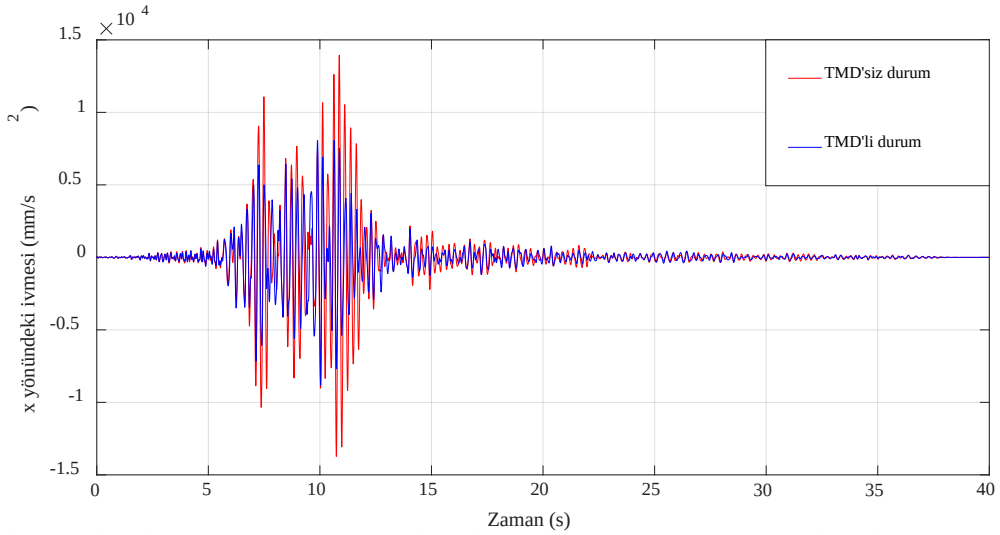
y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1799 düğüm noktasının *y* yönündeki a_y ivmesi TMD'siz durumda maksimum 8865.14 mm/s^2, TMD'li durumda ise 8241.32 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği % 7.04 çıkmaktadır.

Tablo 4.15: Kritik deprem etksi altında 1919 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	13940.24	22.419	0.000339	7838.88	7.295	0.000273
TMD'li	8076.12	14.897	0.000194	5255.41	6.200	0.00021
TMD'nin etkinliği	%42.066	%33.552	%42.773	%32.957	%15.010	%23.077

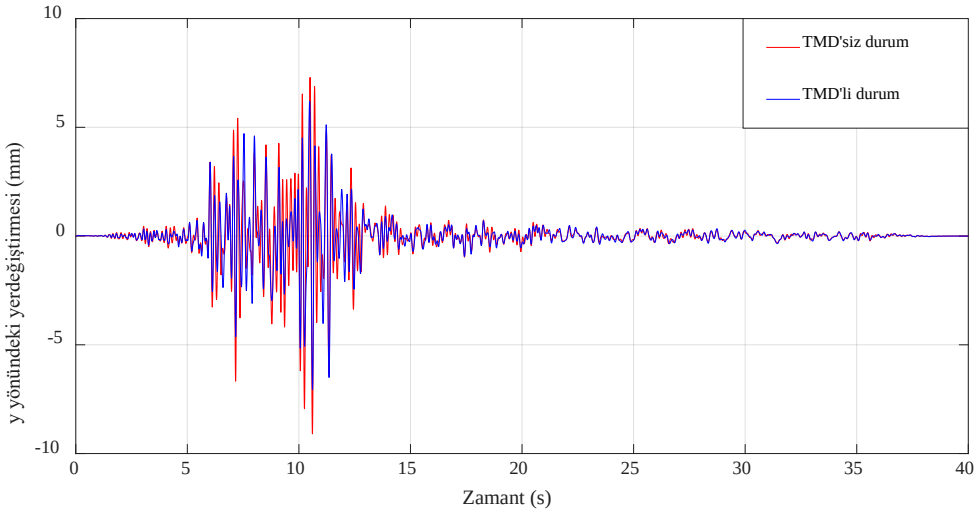


Şekil 4.30: 1919 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.



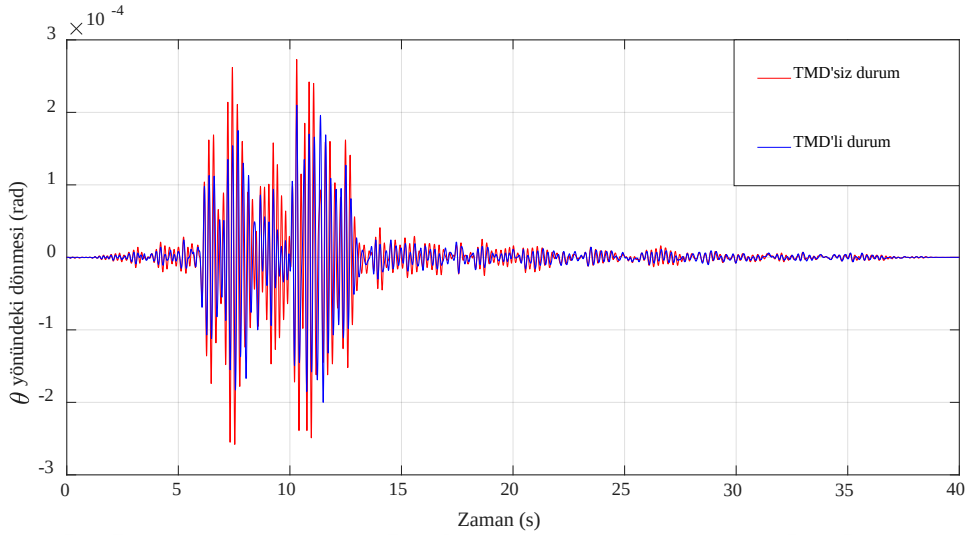
Şekil 4.31: 1919 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

Kritik olarak seçilen *x* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, 1919 düğüm noktasının *x* yönündeki u_x deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 22.419 mm, TMD'li durumda ise 14.897 mm çıkmaktadır. Bu durumdaki, tekli TMD'nin etkinliği %33.55 olarak hesaplanmıştır. Aynı düğüm noktasının, *x* yönündeki a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 13940.24 mm/s^2, TMD'li durumda ise 8076.12 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin etkinliği % 42.07 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.32: 1919 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

1919 düğüm noktasının *y* yönünde seçilen kritik deprem kayıtına göre yapılan analizde, TMD'nin etkinliği %15.01 çıkmaktadır. Bu durumda, *y* yönündeki u_y deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 7.295 mm, TMD'li durumda ise 6.2 mm olmaktadır.

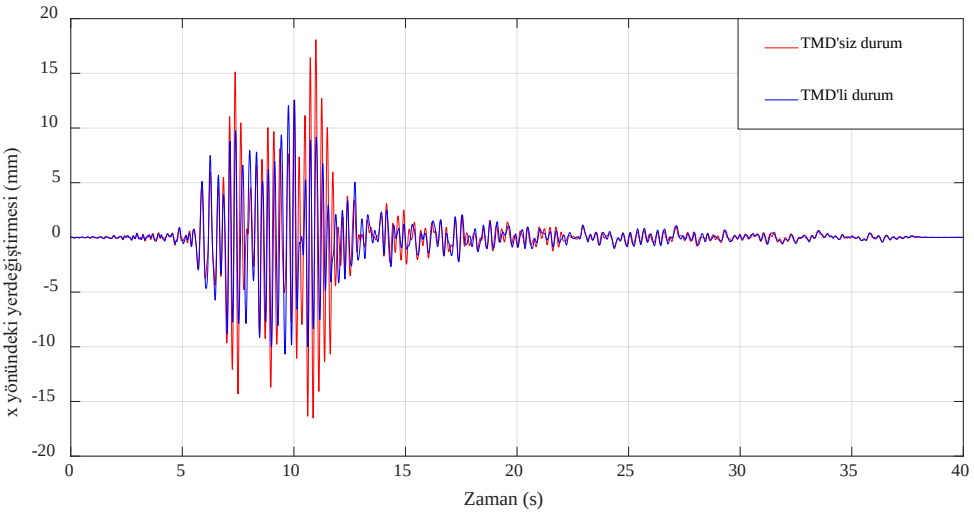


Şekil 4.33: 1919 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

1919 düğüm noktasının *y* yönünde seçilen kritik deprem kayıtına göre yapılan analizde, a_y ivmesi TMD'siz durumda maksimum 7838.88 mm/s^2, TMD'li durumda ise 5255.41 mm/s^2 çıkmaktadır. Bu durumdaki, TMD'nin etkinliği ise %32.96 olarak hesaplanmıştır.

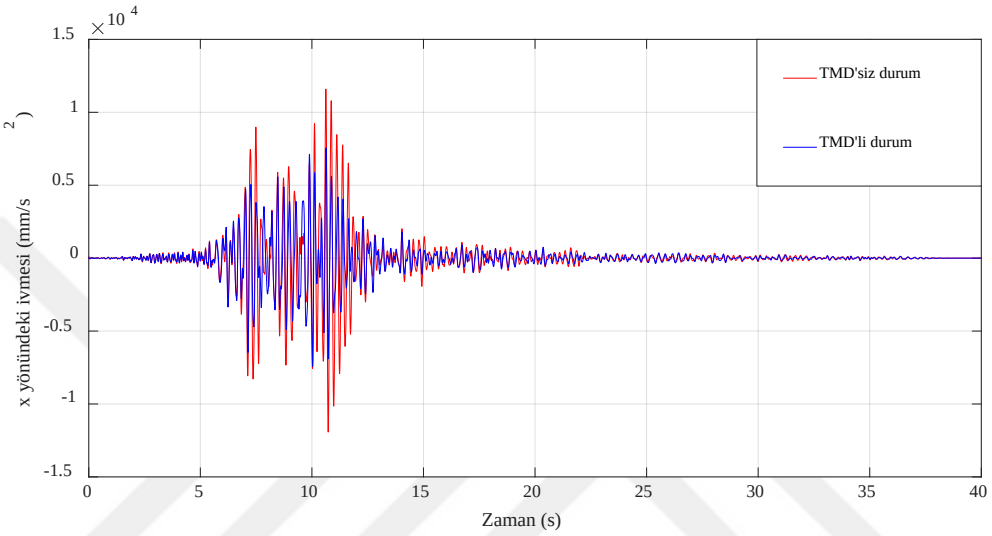
Tablo 4.16: Kritik deprem etksi altında 1923 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	11590.05	18.069	0.000339	7493.39	6.607	0.000273
TMD'li	7567.24	12.568	0.000194	5255.41	6.731	0.00021
TMD'nin etkinliği	%34.709	%30.444	%42.773	%29.866	%1.877	%23.077

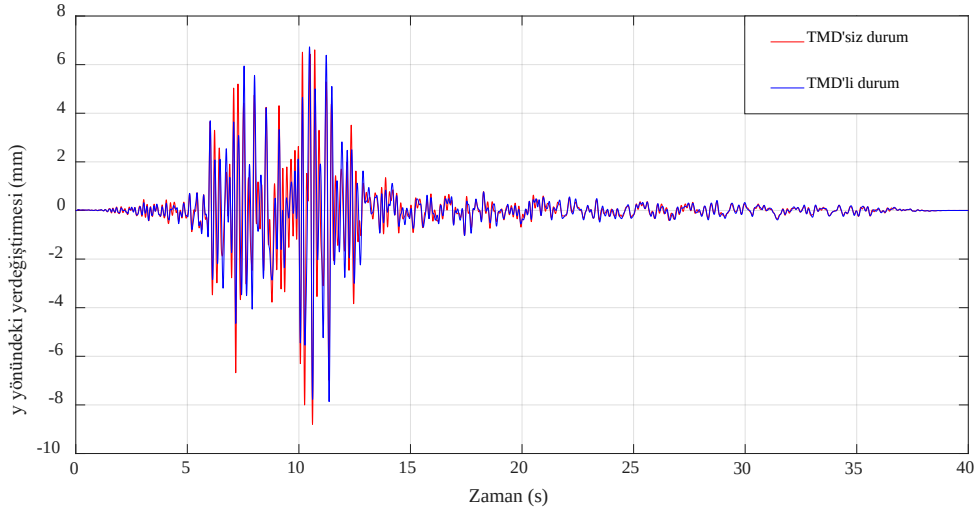


Şekil 4.34: 1923 Noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.

1923 düğüm noktasının x yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, u_x yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 18.069 mm, TMD'li durumda ise 12.568 mm olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %33.55 çıkmaktadır. Aynı düğüm noktasının x yönündeki a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 11590.05 mm/s^2, TMD'li durumda ise 7567.24 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %34.71 çıkmaktadır.



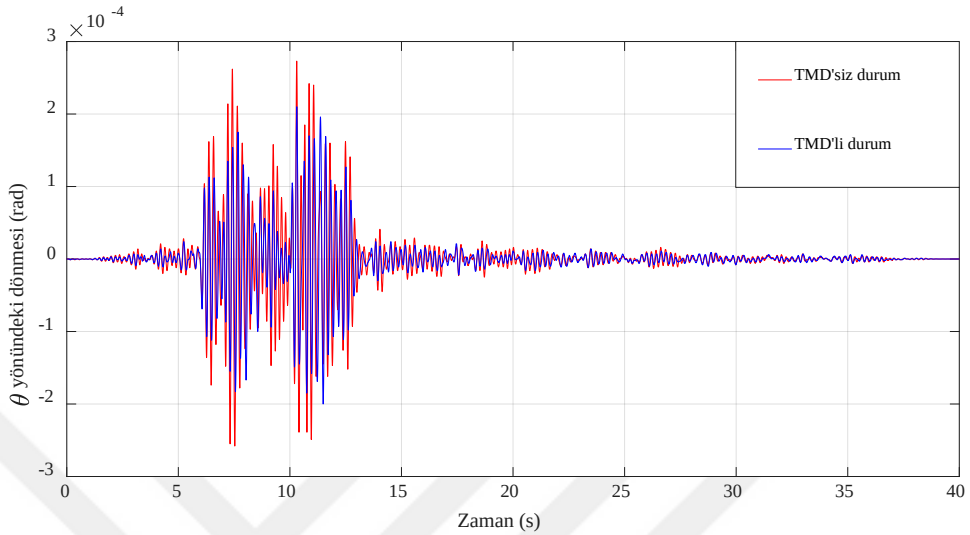
Şekil 4.35: 1923 Noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.



Şekil 4.36: 1923 Noktasının y yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

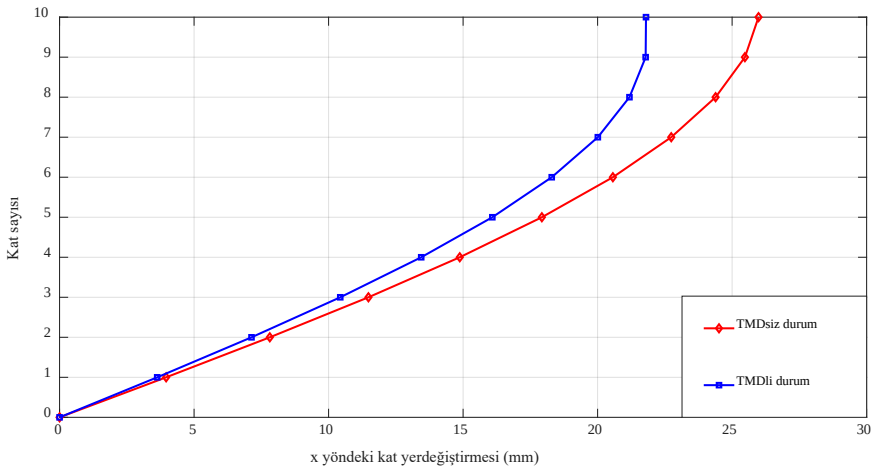
y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1923 düğüm noktasının y yönündeki u_y yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 6.607 mm, TMD'li durumda ise 6.731 mm olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %1.88 çıkmaktadır. Ayını düğüm noktasının y

yönündeki a_y ivmesi TMD'siz durumda maksimum 7493.39 mm/s^2, TMD'li durumda ise 5255.41 mm/s^2 çıkmaktadır. Bu durumdaki TMD'nin etkinliği %29.87 olarak hesaplanmıştır.

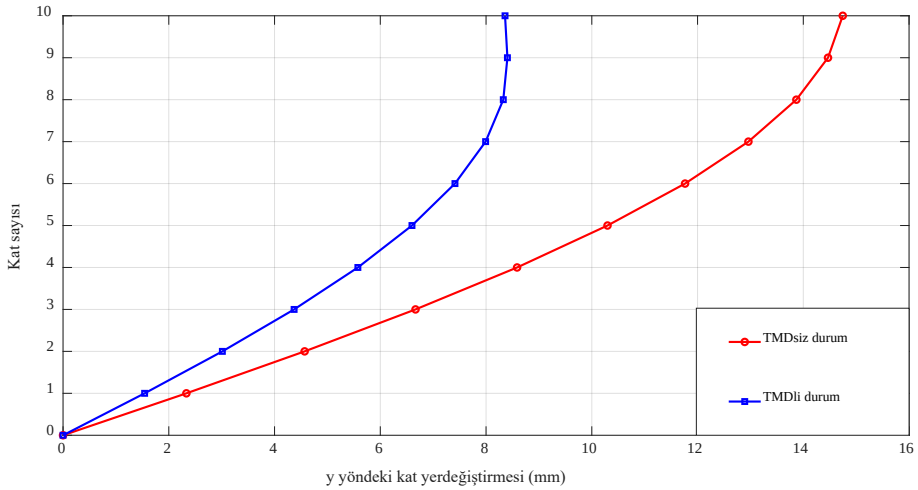


Şekil 4.37: 1923 Noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

Kat yüksekliği boyunca göreceli kat yer değiştirmeleri, *x* yönündeki kritik olarak seçilen deprem uyarım etkisi altında, TMD'siz durumda maksimum 25.982 mm, tekli TMD'li durumda 21.799 mm çıkmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin kat yer değiştirme etkinliği %16.10 olarak hesaplanmıştır. *y* yönündeki göreceli kat yer değiştirmeleri, kritik olarak seçilen deprem uyarım etkisi altında, TMD'siz durumda maksimum 14.746 mm, tekli TMD'li durumda ise 8.404 mm olmaktadır. Bu durumda, tekli TMD'nin *y* yönündeki kat yer değiştirme etkinliği %43.008 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.38: katlara göre x yönündeki deprem etkisi altındaki kat yerdeğiştirmesi.

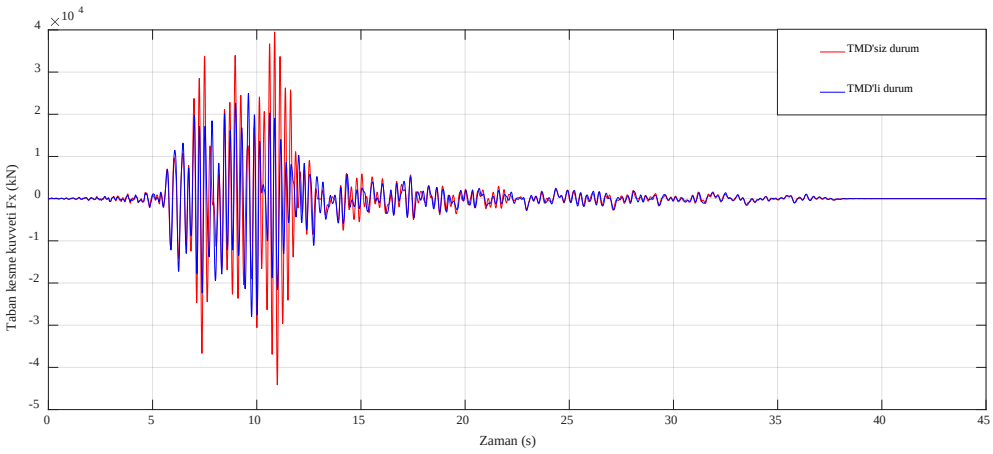


Şekil 4.39: katlara göre y yönündeki deprem etkisi altındaki kat yerdeğiştirmesi.

x ve y yönünde seçilen kritik deprem yer ivme hareketi etkisi altında TMD'siz ve TMD'li yapıda oluşan binanın *x* yönündeki taban kesme kuvveti Fx, y yönündeki taban kesme kuvveti Fy ve moment M_θ değerleri ve TMD etkinliği Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.17: Kritik olarak seçilen depren etkisi altındaki taban kesme kuvvetleri.

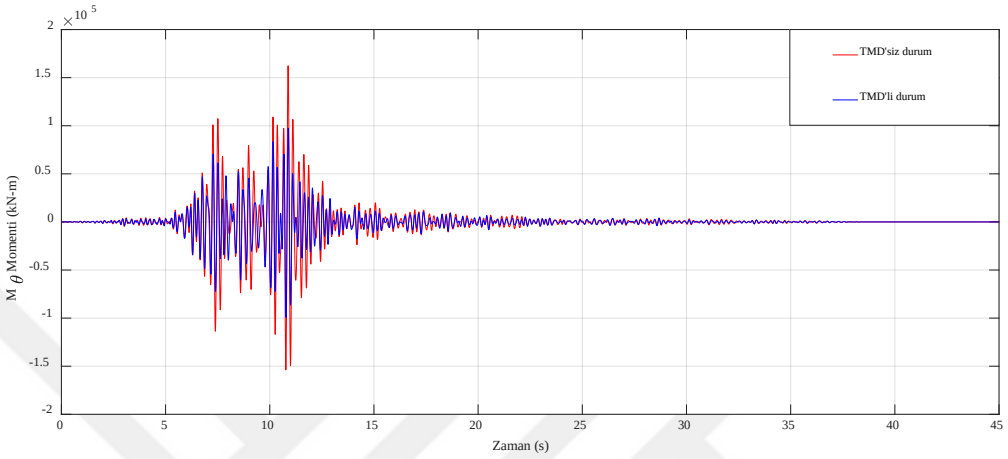
Parametre / TMD Durumu	*x* yönündeki deprem etkisi		*y* yönündeki deprem etkisi	
	F_x (kN)	M_θ (kN-m)	F_y (kN)	M_θ (kN-m)
TMD'siz	39489.856	162254.0046	30814.15	159041.94
TMD'li	24957.056	97322.1152	33117.957	101424.72
TMD'nin etkinliği	%36.801	%40.019	%-7.476	%36.228



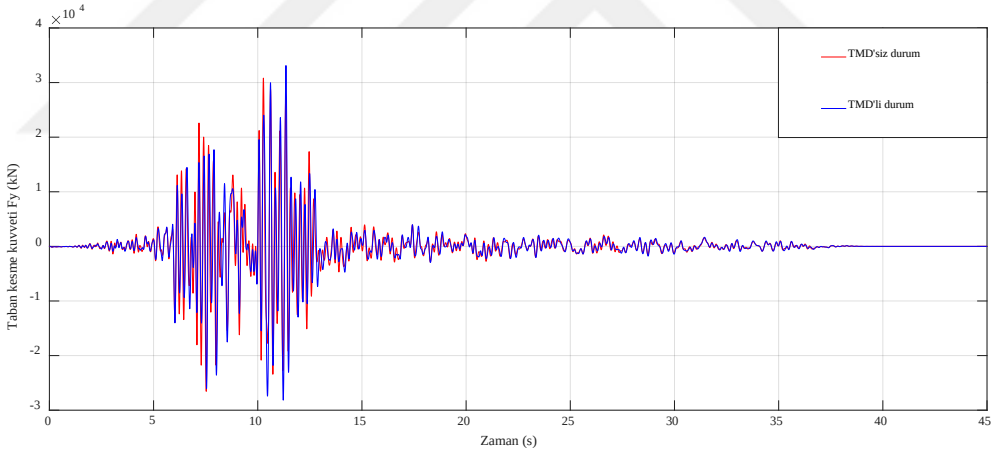
Şekil 4.40: *x* yönündeki deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fx.

Tablo 4.17'den görüldüğü gibi x yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, binanın *x* yönündeki F_x taban kesme kuvveti TMD'siz durumda maksimum 39489.856 kN, TMD'li

durumda ise 24957.056 kN olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %36.801 çıkmaktadır. Aynı deprem etkisi altındaki M_θ burulma momenti TMD'siz durumda 162254.0046 kN-m çıkmışken, DTMD'li durumda 97322.1152 kN-m çıkmaktadır. Bur durumda TMD'nin etkinliği %36.228 olarak hesaplanmıştır.

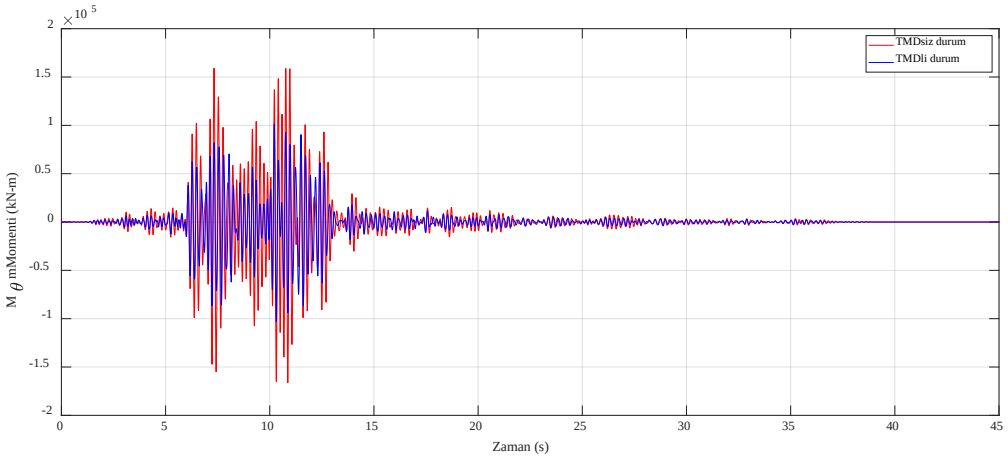


Şekil 4.41: *x* yönündeki deprem etkisi altındaki taban momenti M_θ.



Şekil 4.42: *y* yönündeki deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fy.

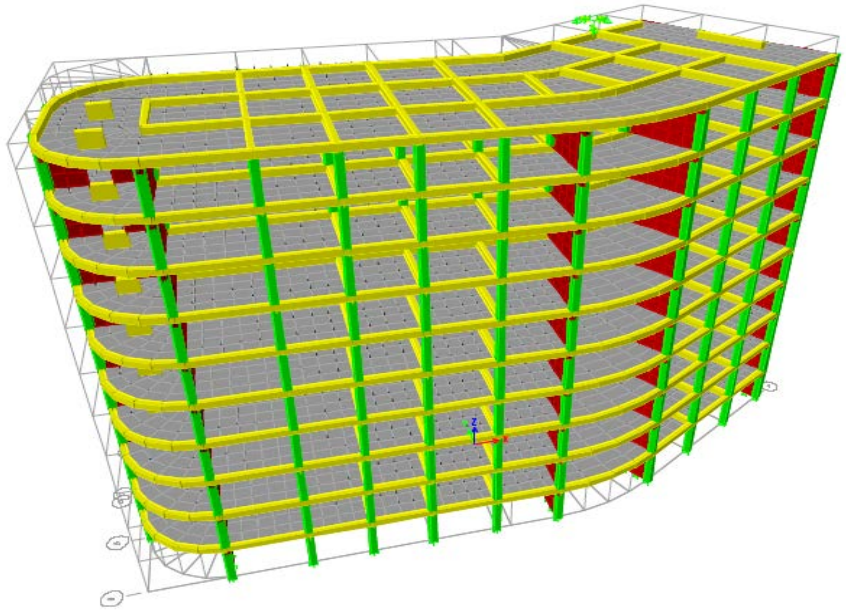
Tablo 4.17'den görüldüğü gibi y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, binanın *y* yönündeki F_y taban kesme kuvveti TMD'siz durumda maksimum 30814.15 kN, TMD'li durumda ise 33117.957 kN olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği -%7.476 çıkmaktadır. Aynı deprem etkisi altındaki M_θ burulma momenti TMD'siz durumda 159041.94 kN-m çıkmışken, TMD'li durumda 101424.72 kN-m çıkmaktadır. Bur durumda TMD'nin etkinliği %40.019 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.43: y yönündeki deprem etkisi altındaki taban momenti M_θ.

4.3.2. Tekli TMD'nin Optimum Konum Yerine Konulması Durumu

Tekli TMD'nin Jaya algoritması ile yapılan optimum sonuçları **Tablo 4.12**'de verilen sonuçlara göre *x*=10 m ve *y*=10 m konumuna konulması durumundaki 3D boyutlu görünümü **Şekil 4.44**'ta gösterilmiştir.

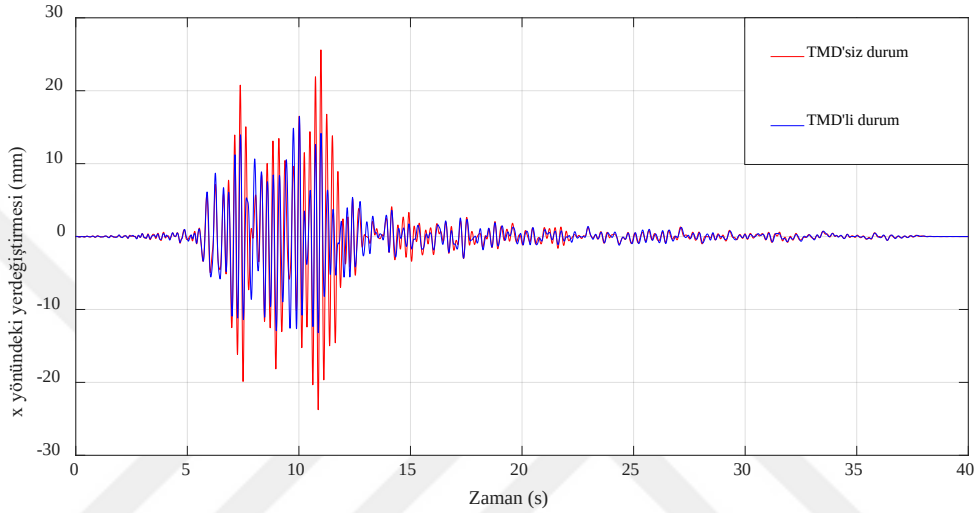


Şekil 4.44: Tekli TMD'nin optimum konum yerine konulan yapının 3D görünümü.

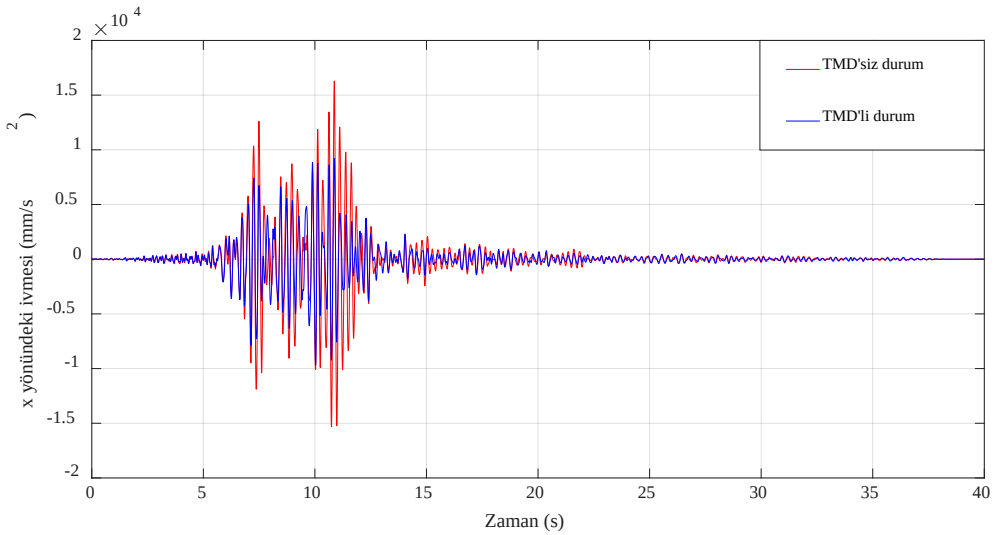
ETABS paket analiz programı ile kritik olarak seçilen *x* ve *y* yönlerindeki deprem kayıtlarına göre zaman tanım alanında yapılan analizi sonuçları, TMD'siz ve TMD'li olarak aşağıdaki tablo ve şekillerde gösterilmiştir:

Tablo 4.18: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1773 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	x yönündeki deprem etkisi			y yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	16286.470	25.603	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
TMD'li	9214.380	16.450	0.000216	7759.840	10.688	0.000156
TMD'nin etkinliği	%43.423	%35.750	%36.283	%12.468	%19.330	%42.857



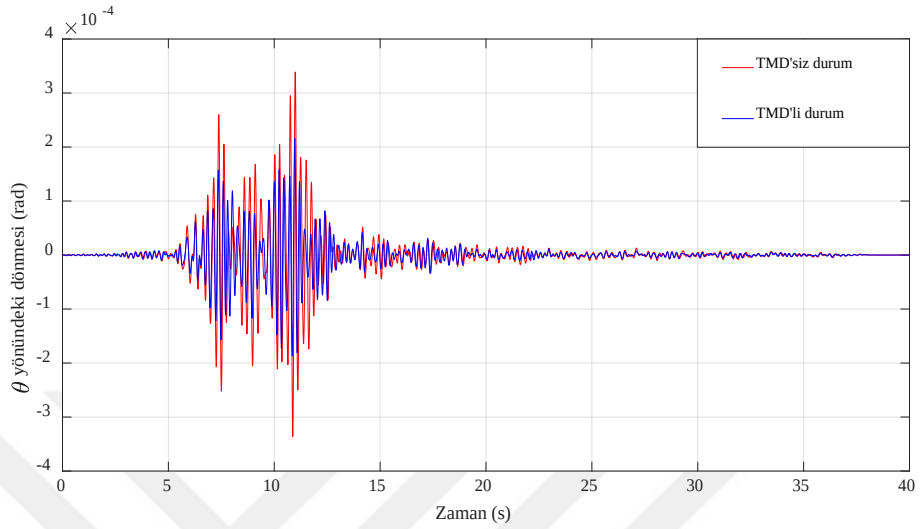
Şekil 4.45: 1773 noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki u_x yerdeğiştirmesi.



Şekil 4.46: 1773 noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

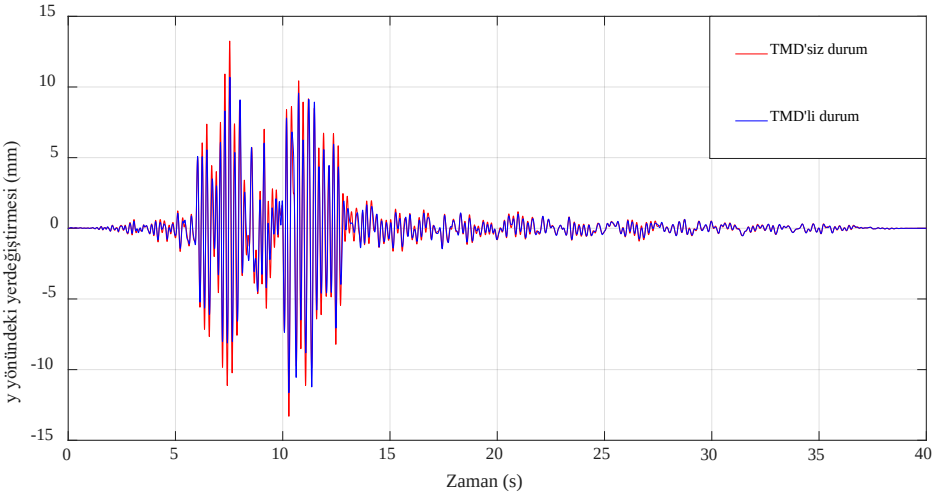
1773 düğüm noktasının x yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, TMD'nin etkinliği %35.75 çıkmaktadır. Bu durumda, u_x yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 25.603 mm, TMD'li durumda ise 16.45 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının x yönündeki

a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 16286.47 mm/s^2, TMD'li durumda ise 9214.38 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumdaki, TMD'nin etkinliği ise %43.42 çıkmaktadır.



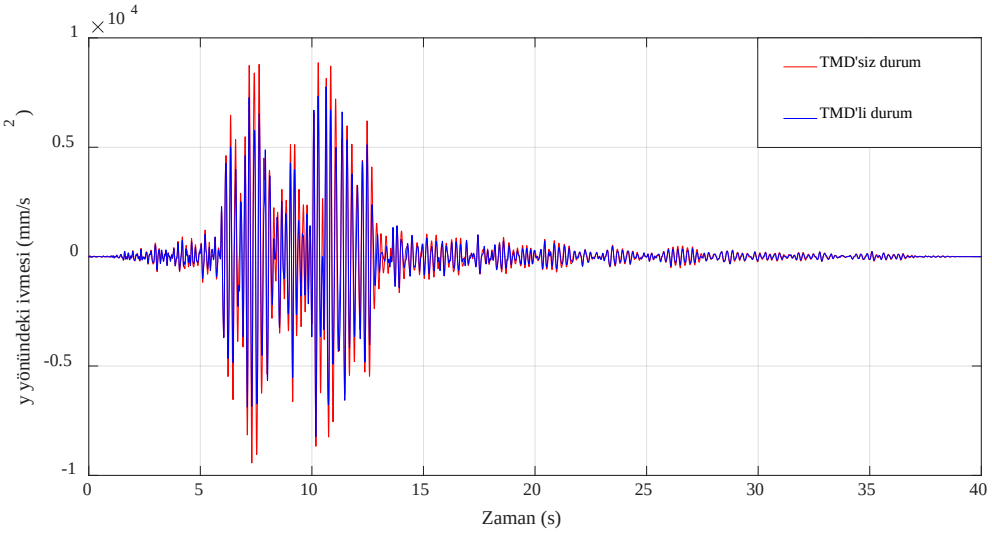
Şekil 4.47: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında u_θ dönmesi.

1773 düğüm noktasının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, θ yönündeki u_θ dönmesi TMD'siz durumda maksimum 0.000339 rad, TMD'li durumda ise 0.000216 rad olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %36.28 çıkmaktadır.

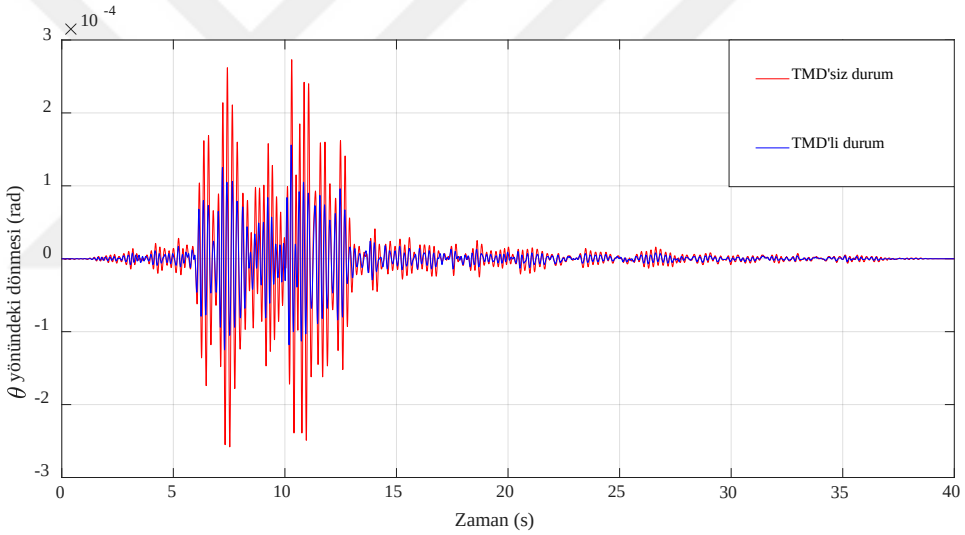


Şekil 4.48: 1773 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.

1773 düğüm noktasının *y* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, TMD'nin etkinliği % 19.33 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y yerdeğiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 13.249 mm, TMD'li durumda ise 10.688 mm olmaktadır.



Şekil 4.49: 1773 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.

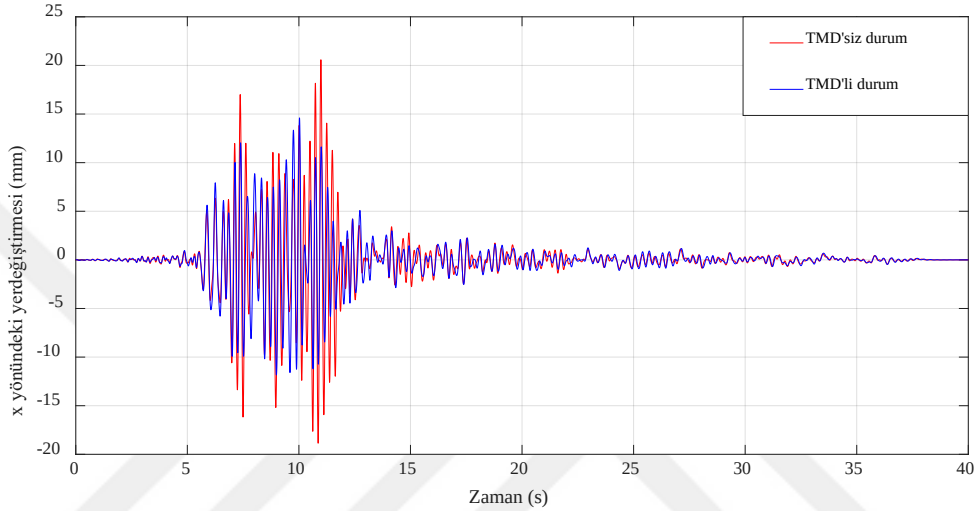


Şekil 4.50: 1773 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_θ dönmesi.

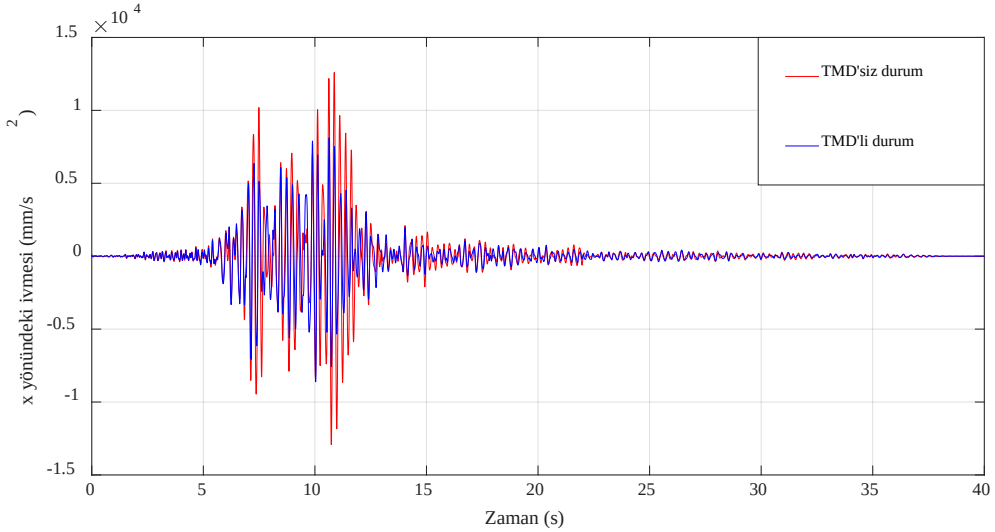
1773 düğüm noktasının *y* yönündeki a_y ivmesi, kritik olarak seçilen deprem yer hareketi etkisi altında, TMD'siz durumda maksimum 8865.14 mm/s^2, TMD'li durumda ise 7759.84 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %12.47 çıkmaktadır. Aynı düğüm noktasının *y* yönündeki u_θ dönme durumundaki TMD'nin etkinliği %42.86 çıkmaktadır. Bu durumda, u_θ dönmesi TMD'siz durumda maksimum 0.000273 rad, TMD'li durumda ise 0.000156 rad olmaktadır.

Tablo 4.19: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1799 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	12594.980	20.581	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
TMD'li	8118.980	14.603	0.000216	7759.840	10.688	0.000156
TMD'nin etkinliği	%35.538	%29.046	%36.283	%12.468	%19.330	%42.857



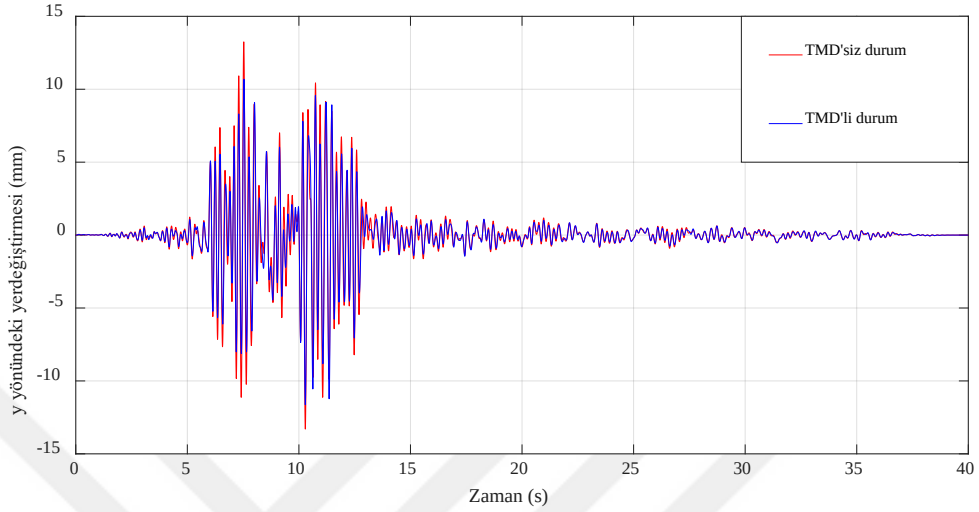
Şekil 4.51: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında u_x yerdeğiştirmesi.



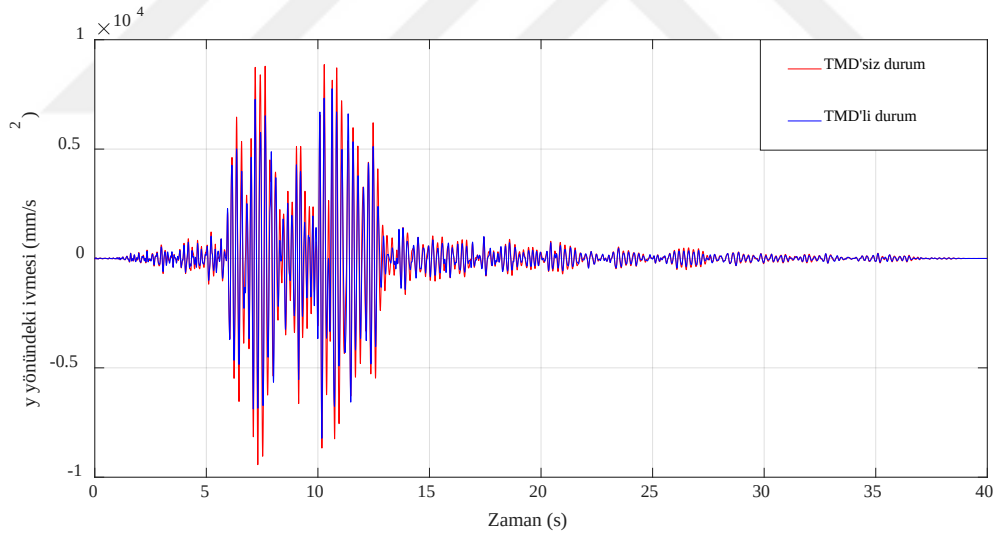
Şekil 4.52: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altında a_x ivmesi.

1799 düğüm noktasının kritik olarak seçilen deprem uyarım etkisi altında, TMD'nin etkinliği %29.05 çıkmaktadır. Bu durumda, *x* yönündeki u_x deplasmanı TMD'siz durumda maksimum 20.581 mm, TMD'li durumda ise 14.603 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının *x* yönündeki a_x ivmesinin TMD etkinliği %35.54 çıkmaktadır. Bu durumda, a_x ivmesinin

TMD’siz durumdaki maksimum ivmesi 12594.98 mm/s^2, TMD’li durumda ise 8118.98 mm/s^2 olmaktadır.



Şekil 4.53: 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.

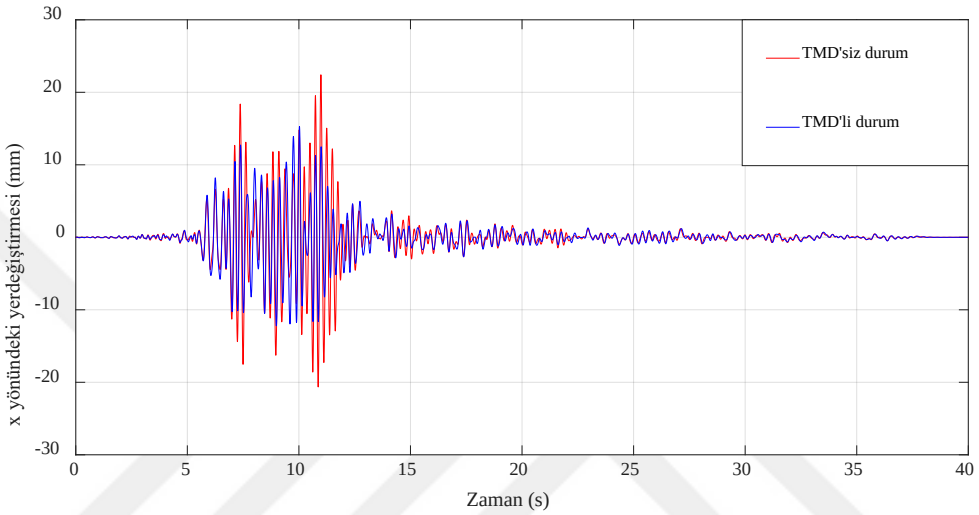


Şekil 4.54: 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.

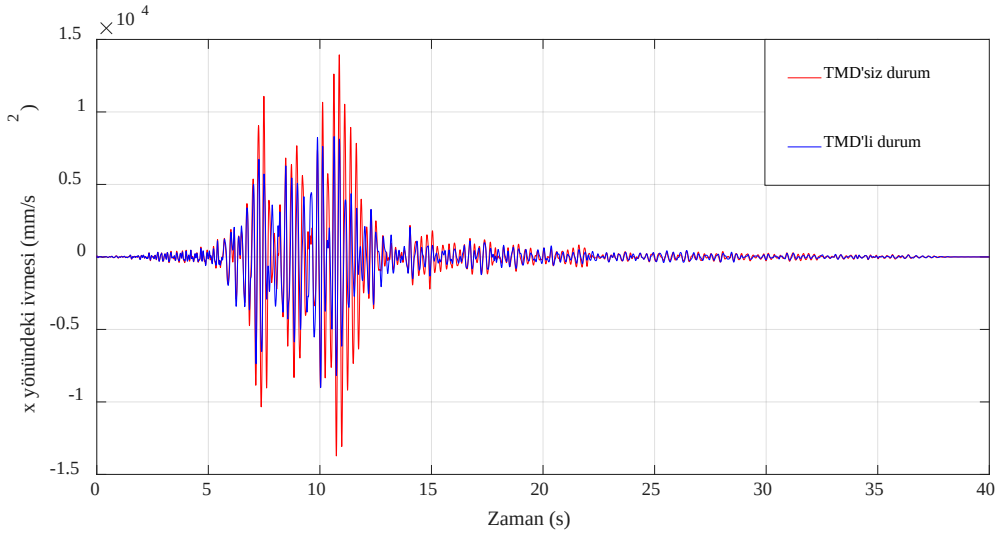
y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1799 düğüm noktasının TMD etkinliği % 19.33 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y yer değiştirmesi TMD’siz durumda maksimum 13.249 mm, TMD’li durumda ise 10.688 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_y ivmesindeki TMD’nin etkinliği %12.47 çıkmaktadır. Bu durumda, a_y ivmesinin TMD’siz durumdaki maksimum ivmesi 8865.14 mm/s^2, TMD’li durumda ise 7759.84 mm/s^2 olmaktadır.

Tablo 4.20: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1919 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durum	x yönündeki deprem etkisi			y yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	13940.240	22.419	0.000339	7838.880	7.295	0.000273
TMD'li	8303.900	15.279	0.000216	4941.110	7.151	0.000156
TMD'nin etkinliği	%40.432	%31.848	%36.283	%36.967	%1.974	%42.857



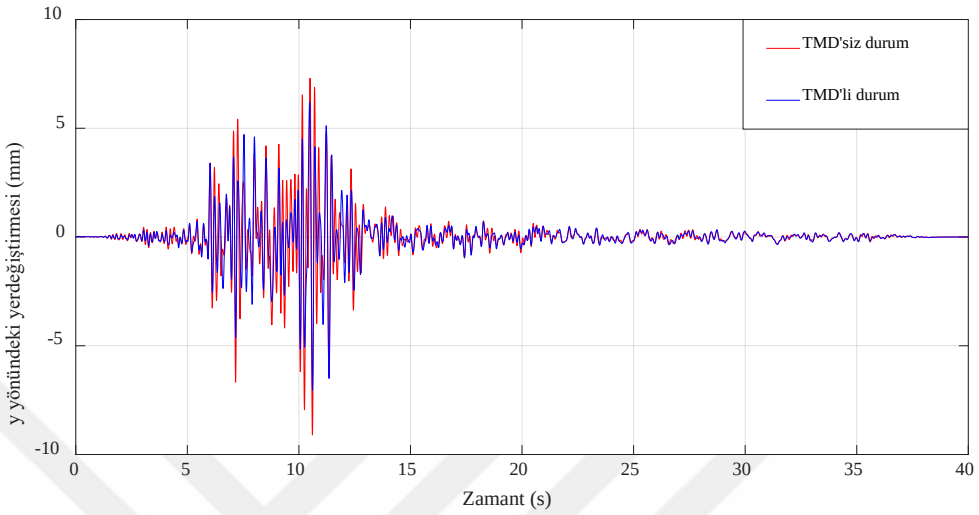
Şekil 4.55: 1919 noktasının x yönündeki deprem etkisi altında u_x yerdeğiştirmesi.



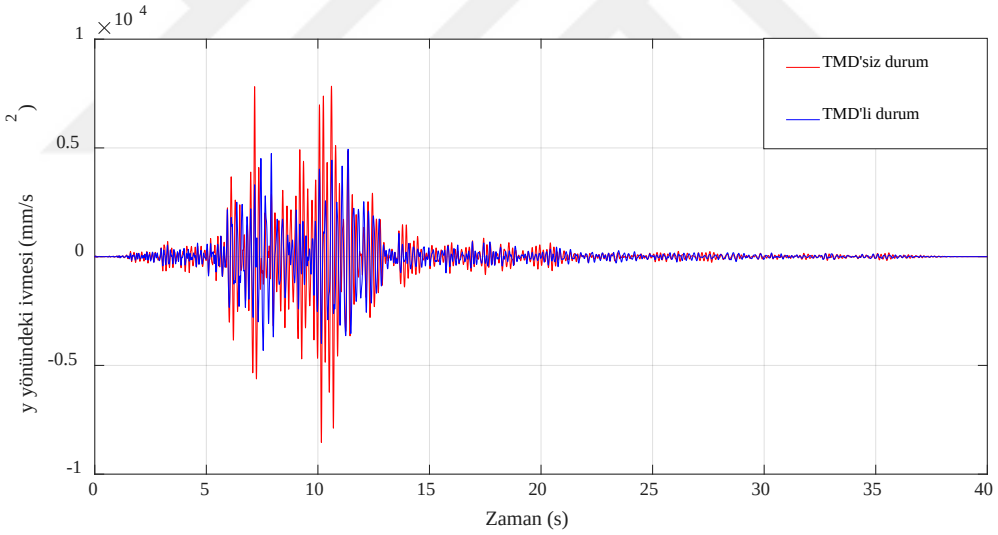
Şekil 4.56: 1919 noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

1919 düğüm noktasının x yönündeki u_x yer değiştirmesi kritik olarak seçilen deprem uyarım etkisi altında, TMD'siz durumda maksimum 22.419 mm, TMD'li durumda ise 15.279 mm olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %31.85 çıkmaktadır. Aynı düğüm noktasının x

yönündeki a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 13940.24 mm/s^2, TMD'li durumda ise 8303.90 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %40.43 çıkmaktadır.



Şekil 4.57: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.

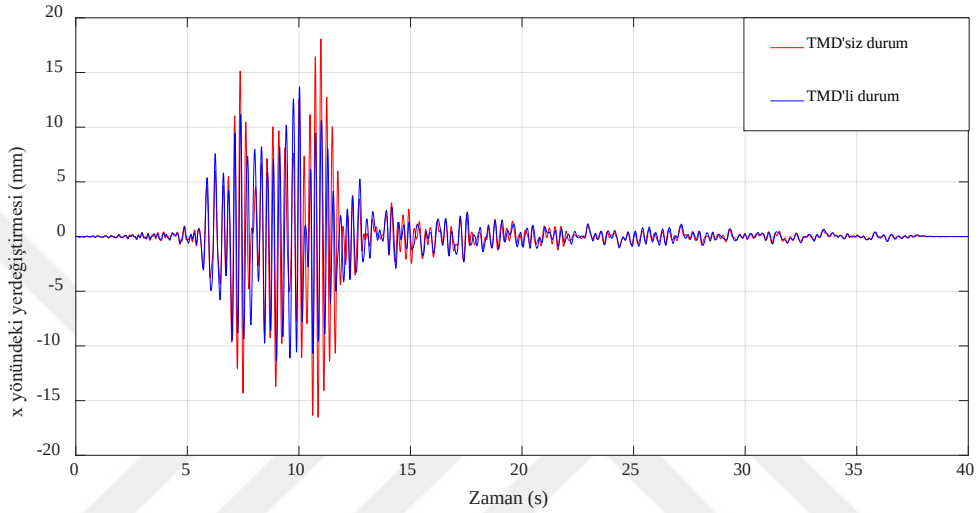


Şekil 4.58: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.

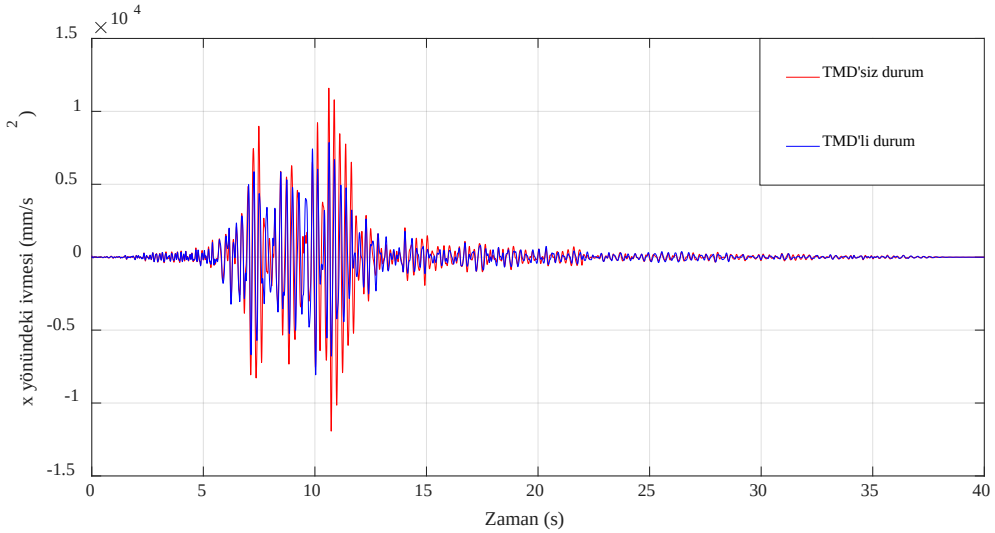
Kritik olarak seçilen *y* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, 1919 düğüm noktasının TMD etkinliği %1.97 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 7.295 mm, TMD'li durumda ise 7.151 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_y ivmesindeki TMD'nin etkinliği %36.97 çıkmaktadır. Bu durumda, a_y ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum ivmesi 7838.88 mm/s^2, TMD'li durumda ise 4941.11 mm/s^2 olmaktadır.

Tablo 4.21: Kritik olarak seçilen deprem etksi altında 1923 noktasının TMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	x yönündeki deprem etkisi			y yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	11590.050	18.069	0.000339	7493.39	6.607	0.000273
TMD'li	7866.370	13.695	0.000216	5233.76	7.327	0.000156
TMD'nin etkinliği	%32.128	%24.207	%36.283	%30.155	%10.898	%42.857



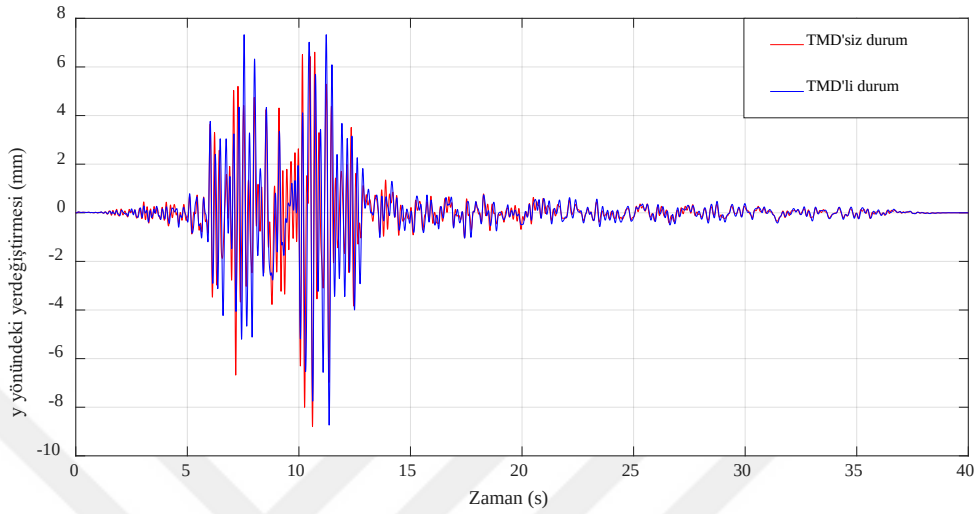
Şekil 4.59: 1923 noktasının x yönündeki deprem etkisi altında u_x yerdeğiştirmesi.



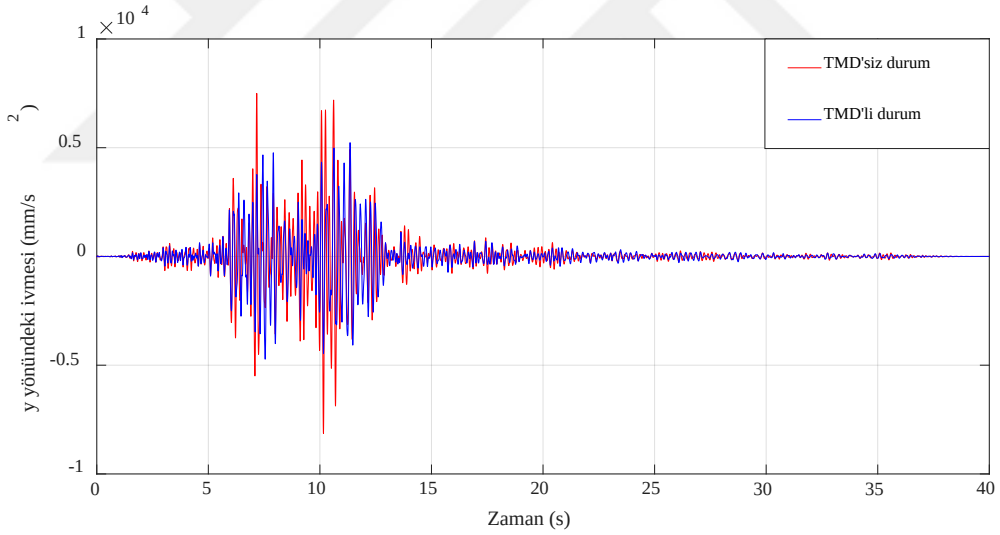
Şekil 4.60: 1923 noktasının x yönündeki deprem etkisi altında a_x ivmesi.

1923 düğüm noktasının x yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, x yönündeki u_x yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 18.069 mm, TMD'li durumda ise 13.695 mm olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %24.21çıkmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_x ivmesinin TMD etkinliği %32.13 çıkmaktadır. Bu durumda, a_x ivmesinin TMD'siz

durumdaki maksimum ivmesi 11590.05 mm/s^2, TMD'li durumda ise 7866.37 mm/s^2 olmaktadır.

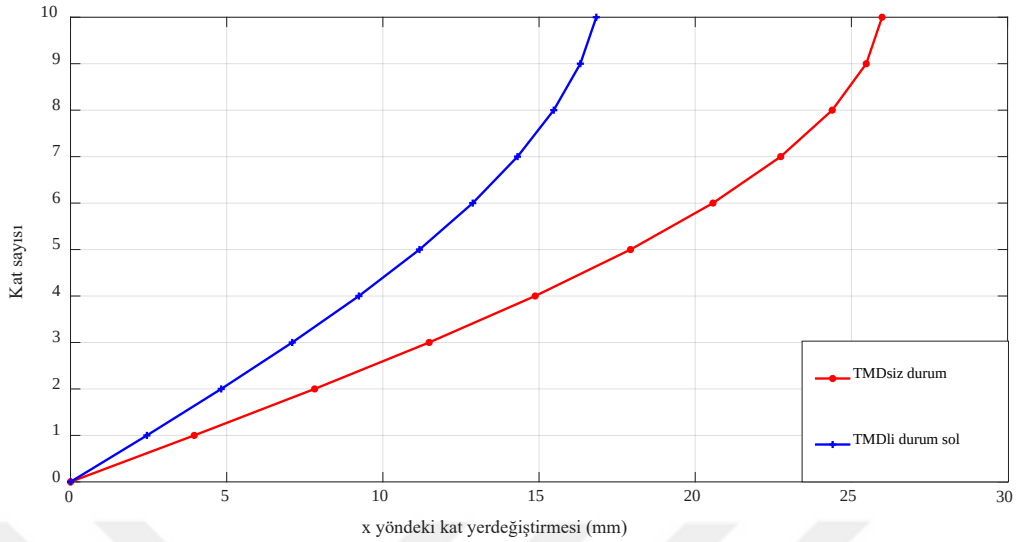


Şekil 4.61: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında u_y yerdeğiştirmesi.

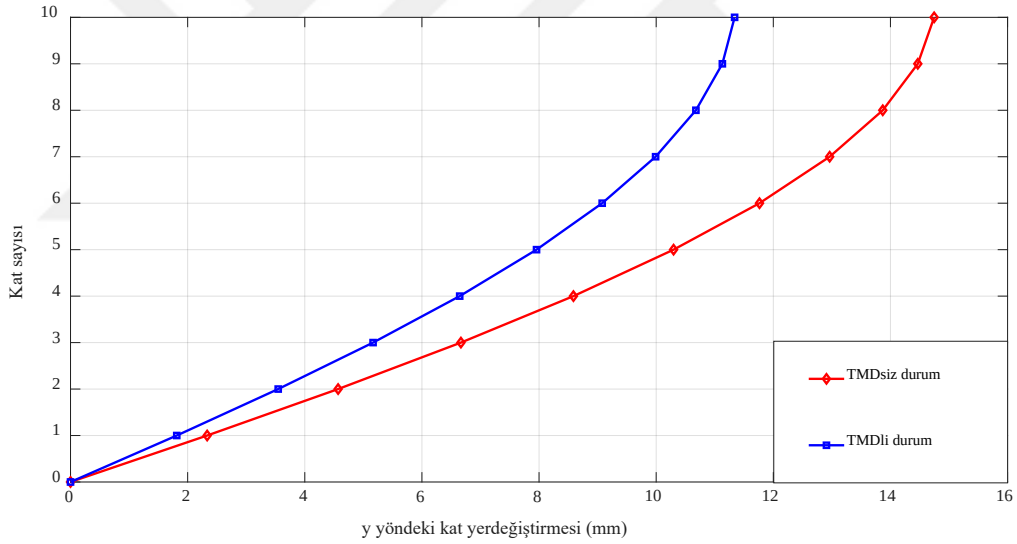


Şekil 4.62: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altında a_y ivmesi.

1923 düğüm noktasının kritik olarak seçilen *y* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, TMD'nin etkinliği %10.90 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y yerdeğiştmesi TMD'siz durumda maksimum 6.607 mm, TMD'li durumda ise 7.327 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_y ivmesindeki TMD'nin etkinliği %30.15 çıkmaktadır. Bu durumda, a_y ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum ivmesi 7439.39 mm/s^2, TMD'li durumda ise 5233.76 mm/s^2 olmaktadır.



Şekil 4.63: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *x* yönündeki kat yer değiştirmesi.



Şekil 4.64: y yönündeki kritik deprem etkisi altındaki y yönündeki kat yer değiştirmesi.

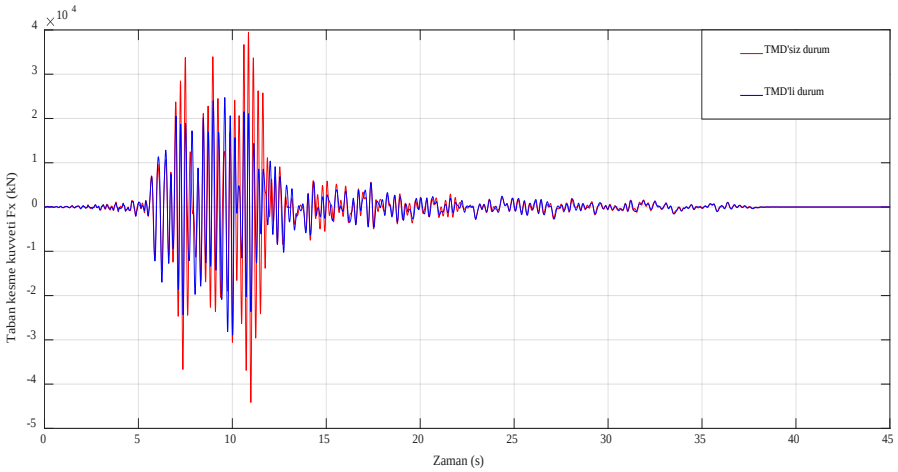
Kritik olarak seçilen *x* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, TMD'nin *x* yönündeki kat yer değiştirme etkinliği %35.213 çıkmaktadır. Bu durumda, *x* yönündeki kat yer değiştirmesi TMD'siz durumda 25.982 mm, TMD'li durumda ise 16.833 mm olmaktadır. *y* yönündeki seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, TMD'nin *y* yönündeki kat yer değiştirme etkinliği % 23.105 çıkmaktadır. Bu durumda, *y* yönündeki kat yer değiştirmesi TMD'siz durumda 14.746 mm, TMD'li durumda ise 11.339 mm olmaktadır.

Tekli TMD'nin optimum konum yerine konulması durumunda, x ve y yönlerindeki kritik olarak seçilen deprem ivme kayıtları etkisi altındaki bina taban kesme kuvvetleri aşağıdaki tablo ve şekillerde sunulmuştur.

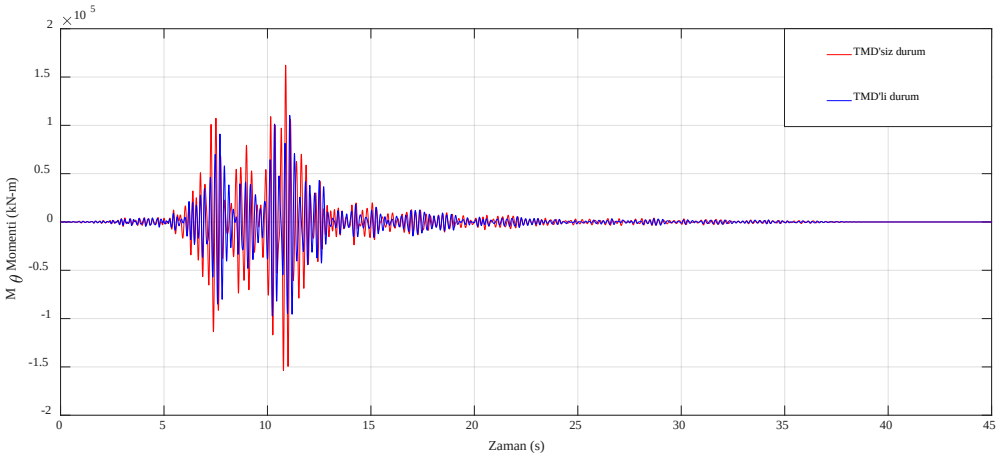
Tablo 4.22: TMD'nin optimum konumuna konulması durumundaki taban kesme kuvvetleri.

Parametre / TMD Durumu	*x* yönündeki deprem etkisi		*y* yönündeki deprem etkisi	
	F_x (kN)	M_θ (kN-m)	F_y (kN)	M_θ (kN-m)
TMD'siz	39489.856	162254.0046	30814.15	159041.94
TMD'li	24726.59	110303.9235	31315.934	64690.8729
TMD'nin etkinliği	%37.385	%32.018	%-1.628	%59.325

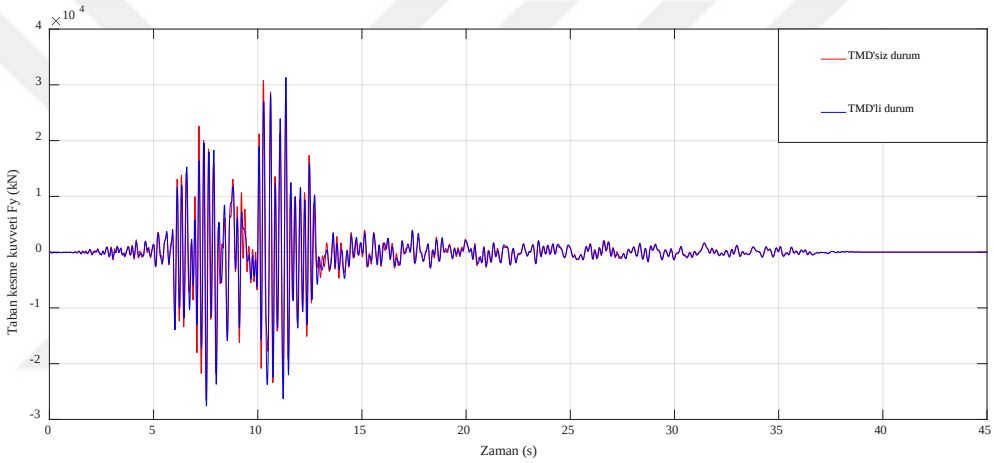
Tablo 4.22'den görüldüğü gibi, *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, binanın *x* yönündeki F_x taban kesme kuvveti TMD'siz durumda maksimum 39489.856 kN, TMD'li durumda ise 24726.59 kN olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği %37.385 çıkmaktadır. Aynı deprem etkisi altındaki M_θ burulma momenti TMD'siz durumda 162254.0 kN-m çıkmışken, DTMD'li durumda 110303.9235 kN-m çıkmaktadır. Bur durumda DTMD'nin etkinliği %32.018 olarak hesaplanmıştır.



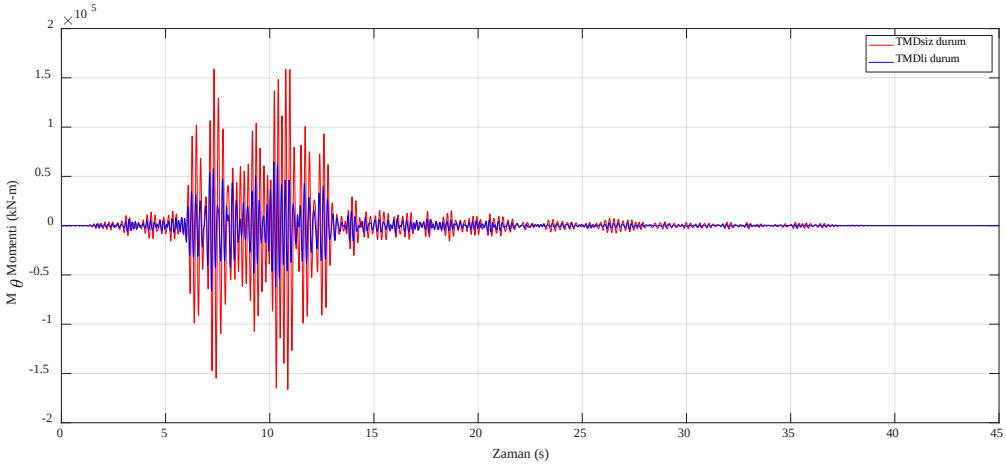
Şekil 4.65: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fx.



Şekil 4.66: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ.



Şekil 4.67: *y* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fy.



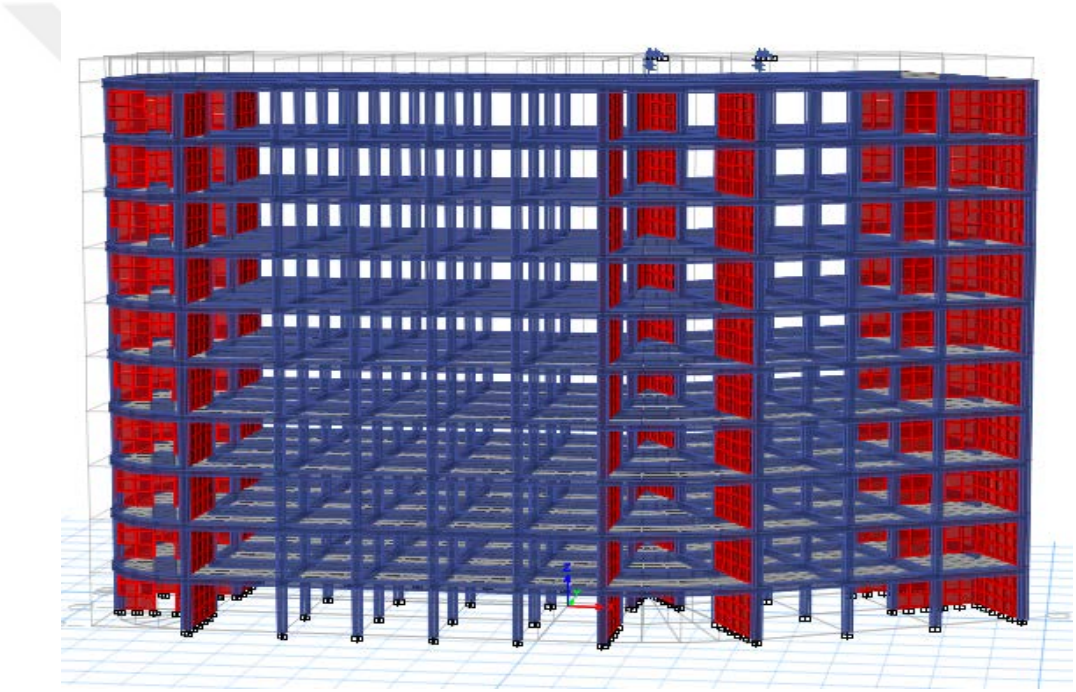
Şekil 4.68: *y* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ.

Tablo 4.22'den görüldüğü gibi, *y* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, binanın *y* yönündeki F_y taban kesme kuvveti TMD'siz durumda maksimum 30814.15 kN, TMD'li durumda ise 31315.934 kN olmaktadır. Bu durumda, TMD'nin etkinliği -%1.628 çıkmaktadır.

Aynı deprem etkisi altındaki M_θ burulma momenti TMD'siz durumda 159041.94 kN-m çıkmışken, DTMD'li durumda 64690.8729 kN-m çıkmaktadır. Bur durumda DTMD'nin etkinliği %59.325 olarak hesaplanmıştır.

4.4.10 KATLI ÇİFT TMD'Lİ DURUMDAKİ ANALİZ

Bu alt bölümde, önerilen DTMD sistemi, 10 katlı perde-çerçeveli ofis binasının deprem uyarılarına karşı titreşimi bastırmak için uygulanmıştır. Bina toplam kat yüksekliği 32 m olup, toplam ağırlığı 4849.831 ton, yükseklik/genişlik oranı **Şekil 4.17**'de gösterildiği gibi y yönünde 2.133'tür. Binanın FEM modeli ETABS programı ile modellenmiştir.



Şekil 4.69: 10 katlı DTMD'li assimetrik yapının 3D görünümü.

Tablo 4.10'da verilen TMD'siz yapının yapısal parametre özelliklerini kullanrak, MATLAB yazılım programı ile Meta-sezgisel algoritmalardan Jaya algoritması kullanarak çift TMD'nin *x* ve *y* yönündeki optimum konum koordinatları ve her iki doğrultadaki optimum rijitlik ve sönüm parametre değerleri optimize edilmiştir ve **Tablo 4.22**'da uyguladığımız çift TMD'ler için optimum analiz sonuçları verilmiştir.

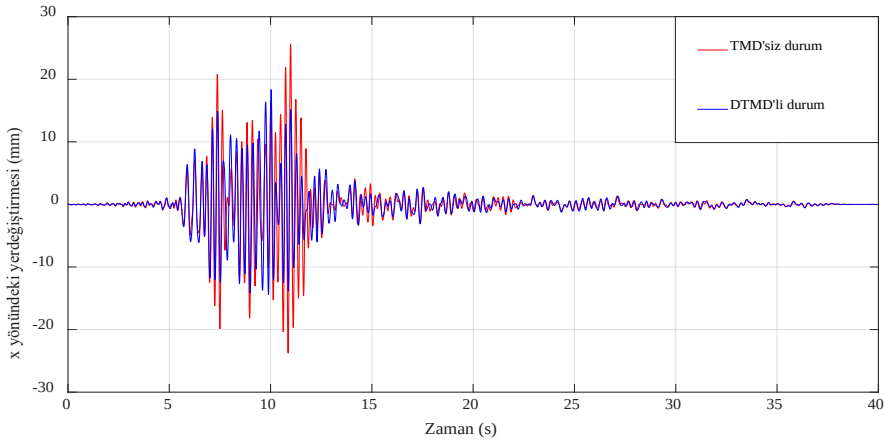
Tablo 4.23: 10 katlı yapı çift TMD'nin optimum parametre değerleri.

Açıklamalar	TMD_1 Parametre ve birimi	TMD_1 Parametre değeri	TMD_2 Parametre ve birimi	TMD_2 Parametre değeri
Kütle	m_d^1 (kg)	119402.772	m_d^2 (kg)	119402.772
x ve y yönlerindeki doğal frekansı	ω_{dx}^1 (Hz)	24.88316765	ω_{dx}^2 (Hz)	31.23529816
	ω_{dy}^1 (Hz)	29.29592301	ω_{dy}^2 (Hz)	605.2859071
x ve y yönlerindeki sönüm oranı	ξ_{dx}^1	0.014863218	ξ_{dx}^2	0.033340196
	ξ_{dy}^1	0.299974998	ξ_{dy}^2	0.010707674
x ve y yönlerindeki rijitliği	k_{dx}^1	73930.857	k_{dx}^2	116494.58
	k_{dy}^1	102477.56	k_{dy}^2	437457.16
x ve y yönlerindeki sönümü	c_{dx}^1	88.320782	c_{dx}^2	2098.6337
	c_{dy}^1	248.68994	c_{dy}^2	1547.7474
x ve y yönlerindeki optimum konumu	x_d^1 (m)	3.6	x_d^2 (m)	9.4
	y_d^1 (m)	5.0	y_d^2 (m)	5.0

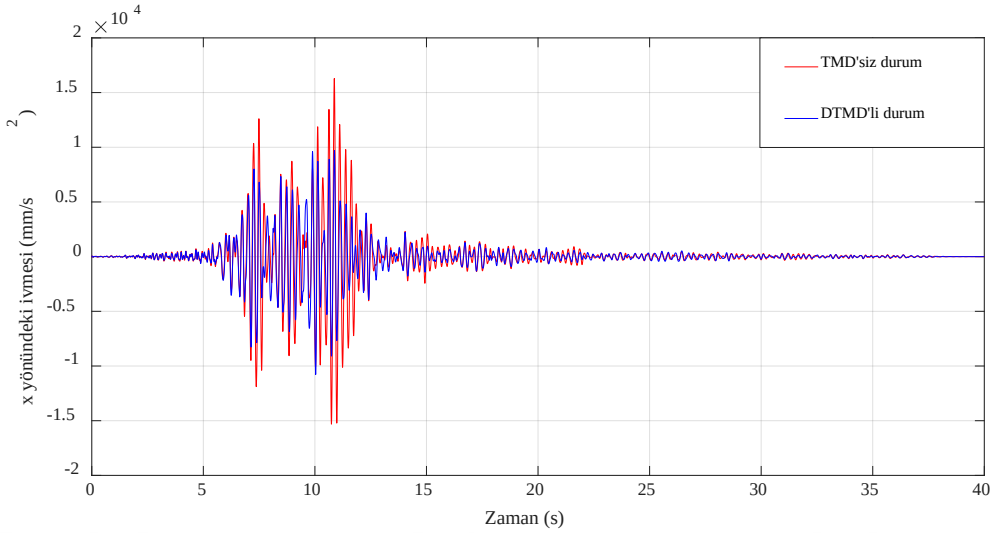
x ve y yönlerinde Jaya algoritmasıyla seçilen kritik deprem yer hareketleri etkisi altında ETABS programı ile zaman tanım alanında yapılan analiz sonuçları aşağıdaki tablo ve şekillerde gösterilmiştir:

Tablo 4.24: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1773 noktasının DTMD etkinliği.

Parametre / TMD durumu	x yönündeki deprem etkisi			y yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	16286.470	25.603	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
DTMD'li	9693.900	18.345	0.000183	7928.820	9.134	0.000151
DTMD'nin etkinliği	%40.479	%28.348	%46.018	%10.562	%31.059	%44.689

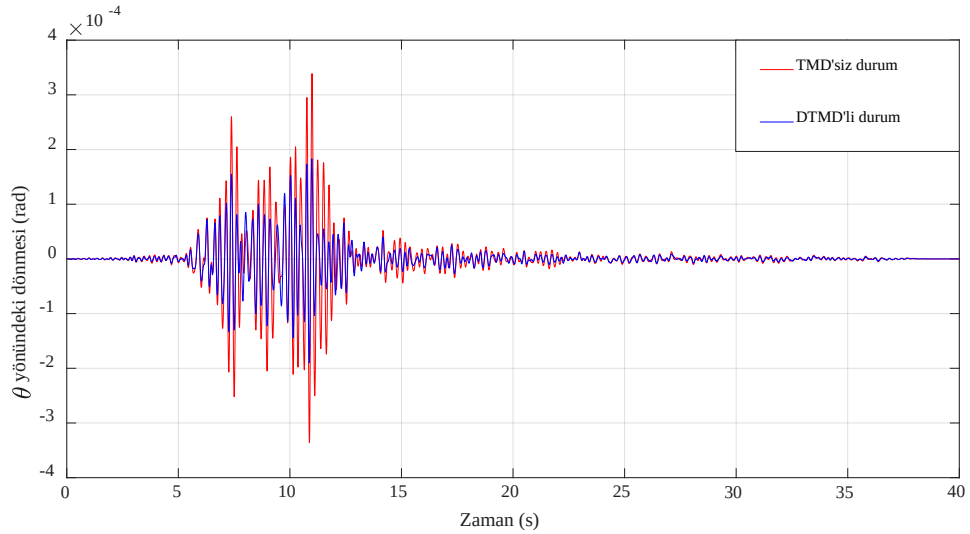


Şekil 4.70: 1773 noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.



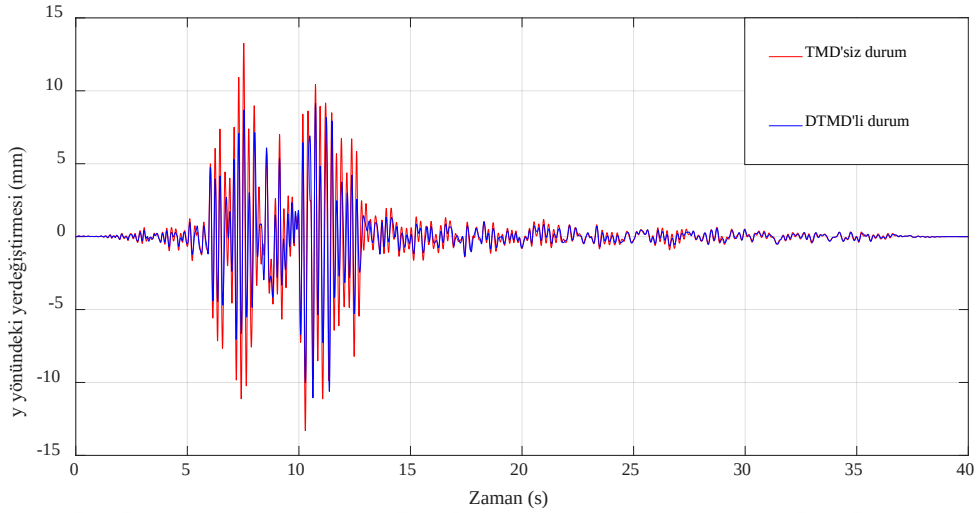
Şekil 4.71: 1773 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

1773 noktalarının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, u_x deplasmanı TMD'siz durumda 25.603 mm olmuşken, DTMD'li durumda 18.345 mm çıkmaktadır. Bu durumda, DTMD'nin etkinliği %28.348 çıkmaktadır. Ayını düğüm noktasının a_x ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum ivmesi 16286.47 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 9693.95 mm/s^2 olmaktadır. Bu durumda DTMD'nin etkinliği %40,48 çıkmaktadır.



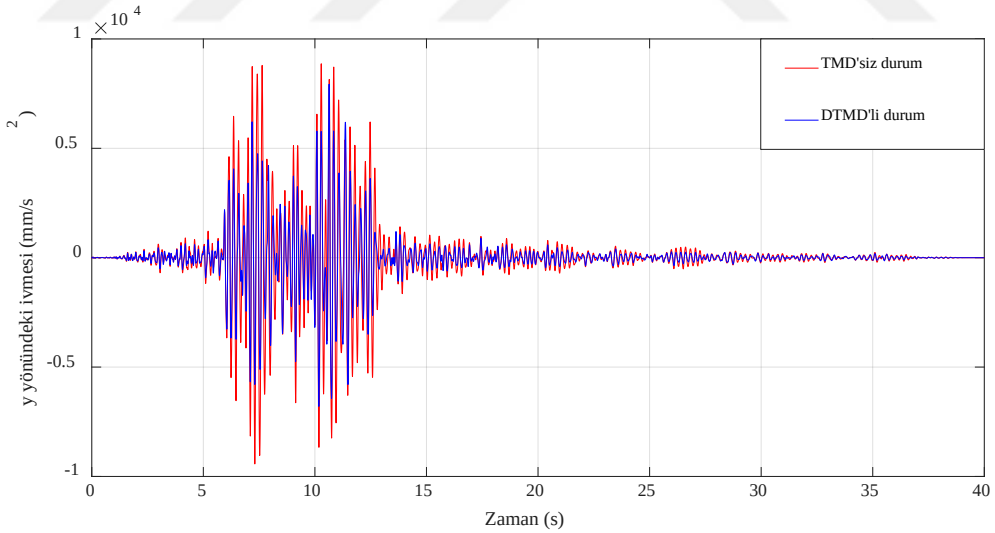
Şekil 4.72: 1773 ve 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.

1773 ve 1799 düğüm noktalarının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, θ yönündeki u_θ dönmesi TMD'siz durumda maksimum 0.000339 rad, DTMD'li durumda ise 0.000183 rad olmaktadır. Bu durumdaki, DTMD'nin etkinliği ise %46.02 çıkmaktadır.



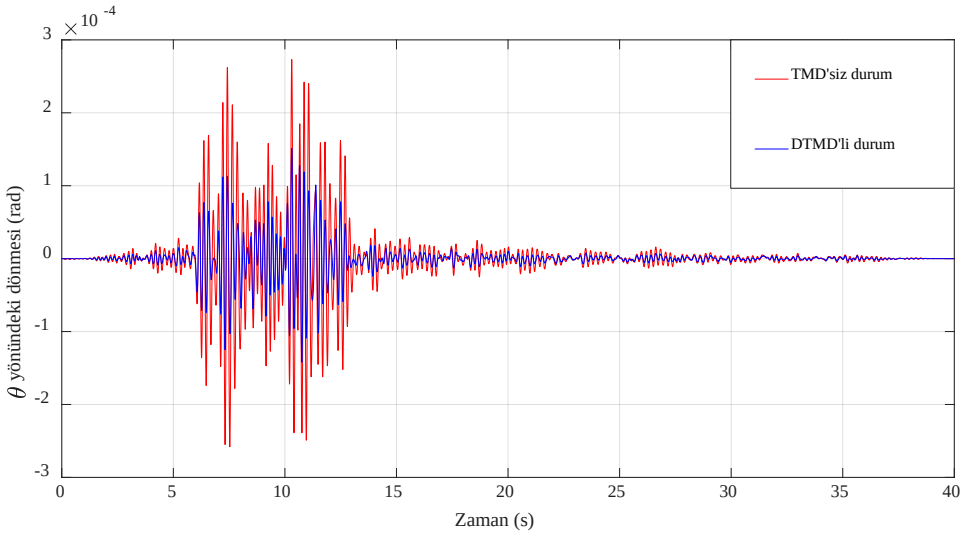
Şekil 4.73: 1773 ve 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

Kritik olarak seçilen y yönündeki deprem uyarım etkisi altında, 1773 ve 1799 düğüm noktalarının noktalarının DTMD etkinliği %31.06 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 13.249 mm, DTMD'li durumda ise 9.134 mm olmaktadır.



Şekil 4.74: 1773 ve 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1773 ve 1799 düğüm noktalarının a_y ivmesindeki DTMD'nin etkinliği % 10.56 çıkmaktadır. Bu durumda, a_y ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum ivmesi 8865.14 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 7928.82 mm/s^2 olmaktadır.

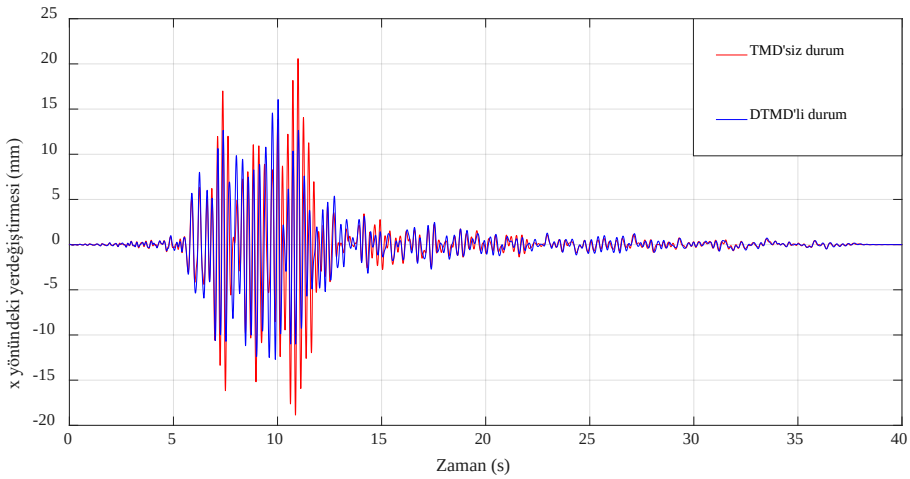


Şekil 4.75: 1773 ve 1799 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.

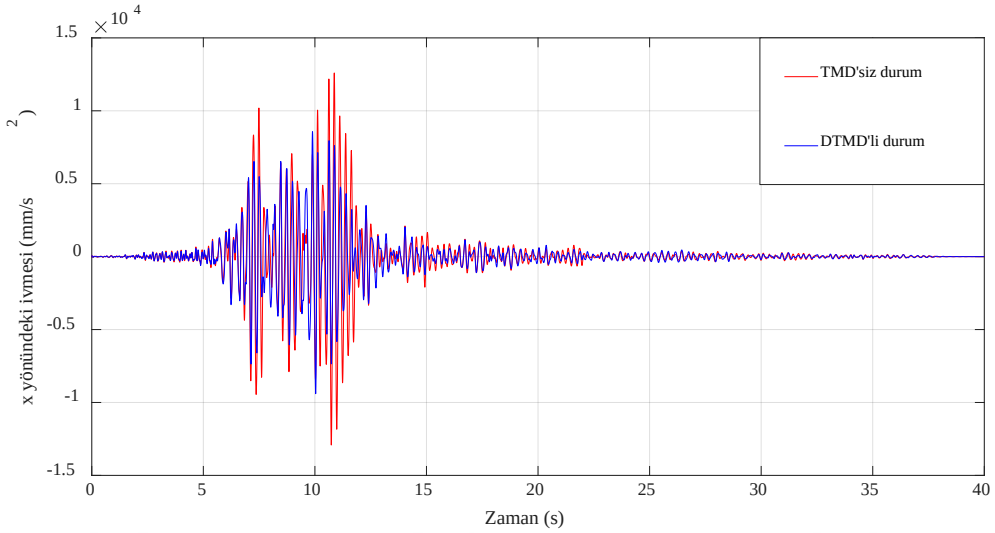
y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1773 ve 1799 düğüm noktalarının u_θ dönmesindeki DTMD'nin etkinliği %44,69 çıkmaktadır. Bu durumda, u_θ dönmesin TMD'siz durumdaki maksimum değeri 0.000273 rad, DTMD'li durumda ise 0.000151 rad olmaktadır.

Tablo 4.25: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1799 noktasının DTMD etkinliği.

Parametreler / DTMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	12594.980	20.581	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
DTMD'li	8572.090	16.055	0.000183	7928.820	9.134	0.000151
DTMD'nin etkinliği	%31.940	%21.991	%46.018	%10.562	%31.059	%44.689



Şekil 4.76: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.

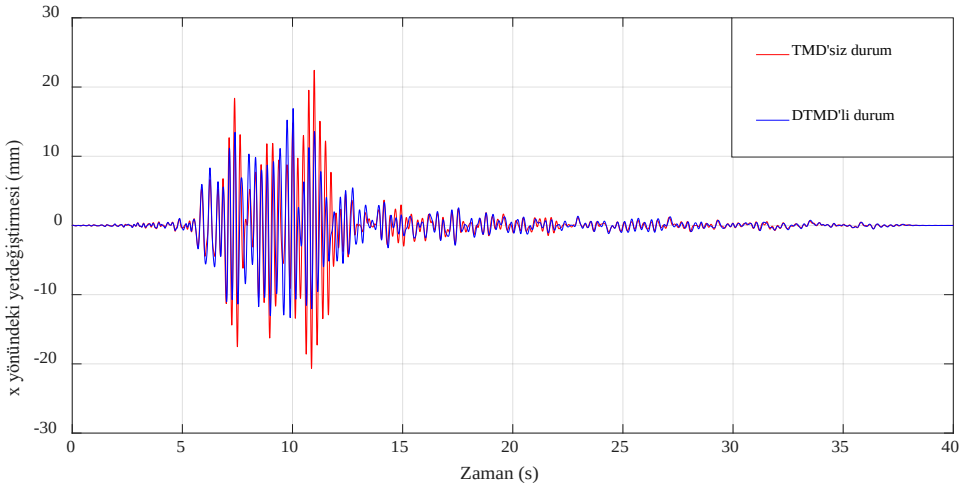


Şekil 4.77: 1799 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

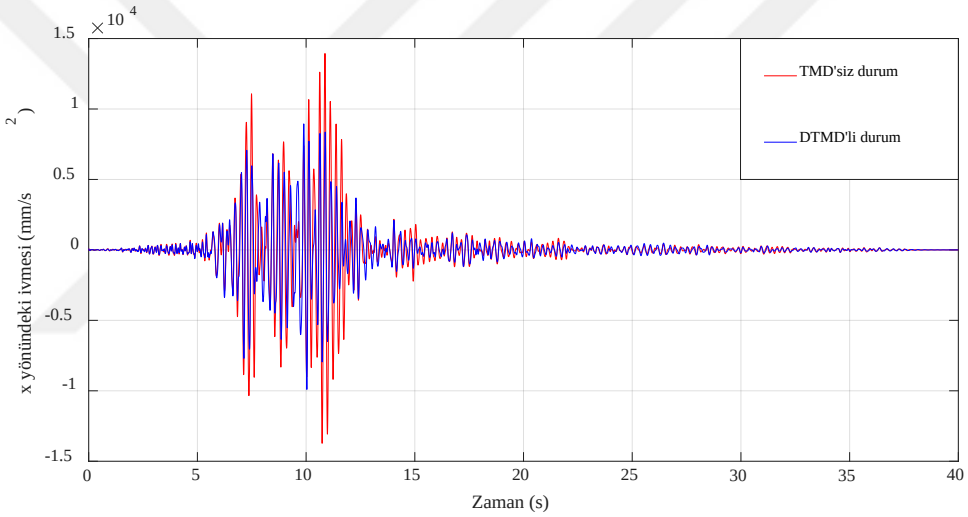
1799 düğüm noktasının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, DTMD'nin etkinliği %21.99 çıkmaktadır. Bu durumda, u_x yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 20.581 mm, DTMD'li durumda ise 16.055 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_x ivmesinde DTMD'nin etkinliği %31.94 çıkmaktadır. Bu durumda, a_x ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum değeri 12594.98 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 8572.09 mm/s^2 olmaktadır.

Tablo 4.26: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1919 noktasının DTMD etkinliği.

Parametreler / DTMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	13940.240	22.419	0.000339	7838.880	7.295	0.000273
DTMD'li	8944.780	16.893	0.000183	6047.140	7.172	0.000151
DTMD'nin etkinliği	%35.835	%24.649	%46.018	%22.857	%1.686	%44.689

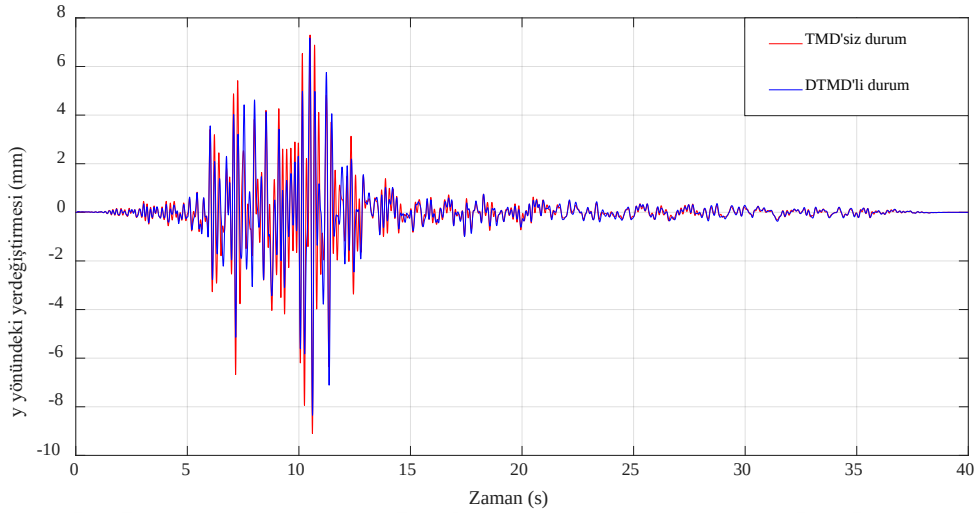


Şekil 4.78: 1919 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.

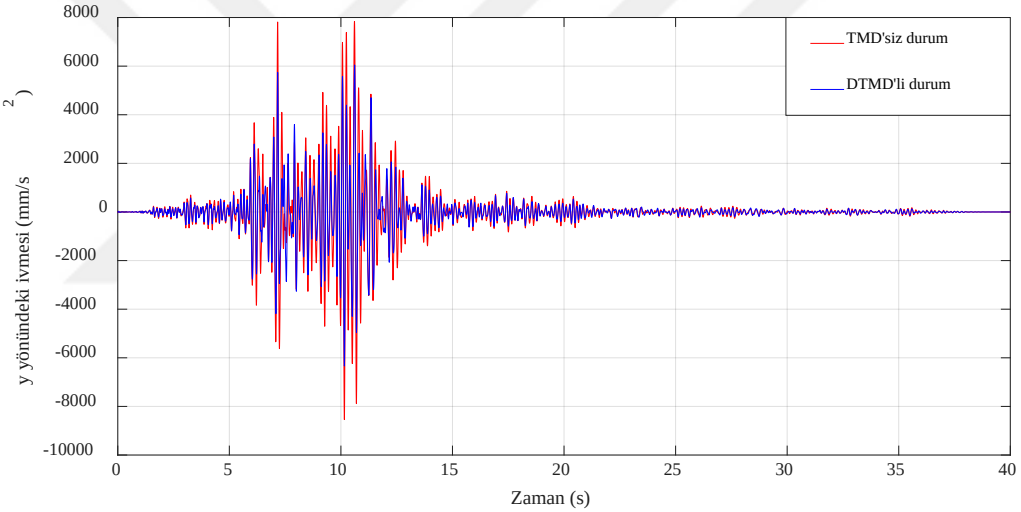


Şekil 4.79: 1919 noktasının *x* yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

x yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, 1919 düğüm noktasının u_x yer değiştirmesindeki DTMD etkinliği % 24.65 çıkmaktadır. Bu durumda, u_x yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 22.419 mm, DTMD'li durumda ise 16.893 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_x ivmesinde DTMD'nin etkinliği %35.83 çıkmaktadır. Bu durumda, a_x ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum değeri 13940.24 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 8944.78 mm/s^2 olmaktadır.



Şekil 4.80: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

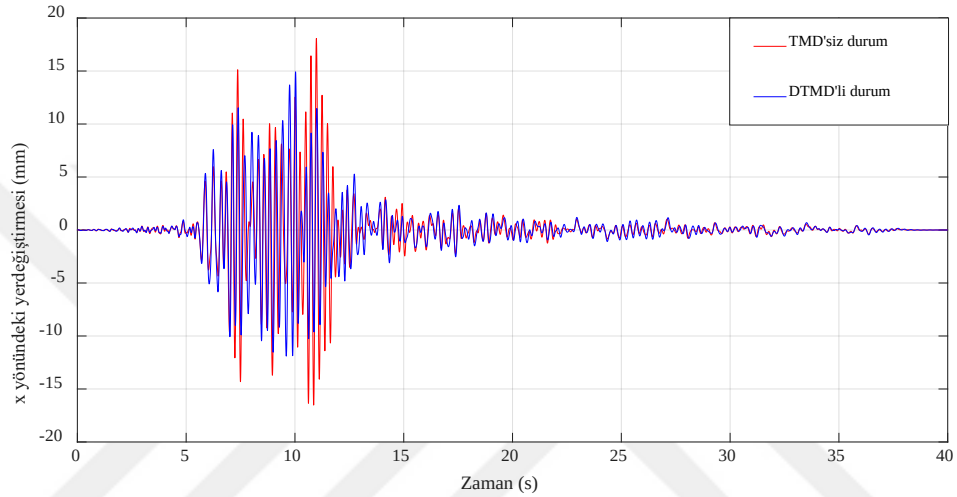


Şekil 4.81: 1919 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

1919 düğüm noktasının kritik olarak seçilen *y* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, DTMD'nin etkinliği %1.69 çıkmaktadır. Bu durumda, u_y yer değiştirmesinin TMD'siz durumdaki maksimum değeri 7.295 mm, DTMD'li durumda ise 7.172 mm olmaktadır. Aynı düğüm noktasının a_y ivmesinde DTMD'nin etkinliği %22.86 çıkmaktadır. Bu durumda, a_y ivmesinin TMD'siz durumdaki maksimum değeri 7838.88 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 6047.14 mm/s^2 olmaktadır.

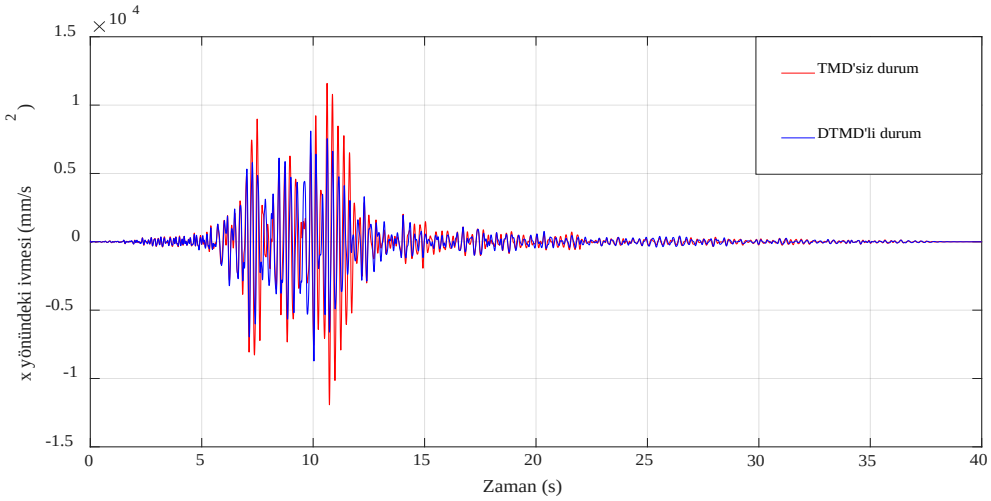
Tablo 4.27: Kritik olarak seçilen deprem etkisi altındaki 1923 noktasının DTMD etkinliği.

Parametreler / DTMD durumu	x yönündeki deprem etkisi			y yönündeki deprem etkisi		
	a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	11590.050	18.069	0.000339	7493.39	7.129	0.000273
DTMD'li	8101.120	14.922	0.000182	6163.86	7.129	0.000152
DTMD'nin etkinliği	%30.103	%17.417	%46.313	%17.743	%0.000	%44.322



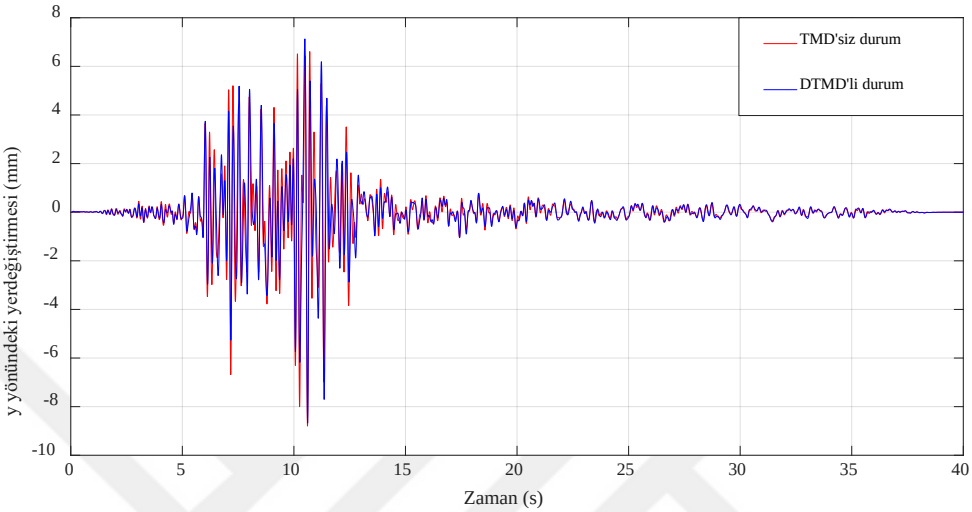
Şekil 4.82: 1923 noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.

1923 düğüm noktasının x yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, u_x yer değiştirmesinin TMD'siz durumdaki maksimum değeri 18.069 mm, DTMD'li durumda ise 14.922 mm olmaktadır. Bu durumda, DTMD'nin etkinliği % 17.42 çıkmaktadır.



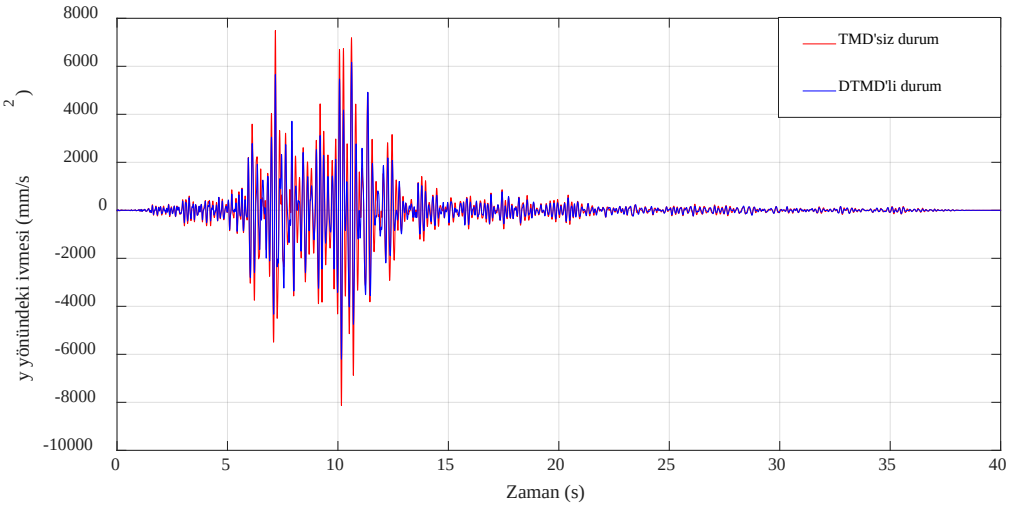
Şekil 4.83: 1923 noktasının x yönündeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.

1923 düğüm noktasının *x* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, a_x ivmesi TMD'siz durumda maksimum 11590.05 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 8101.12 mm/s^2 çıkmaktadır. Bu durumda, DTMD'nin etkinliği % 30.10 olarak hesaplanmıştır.



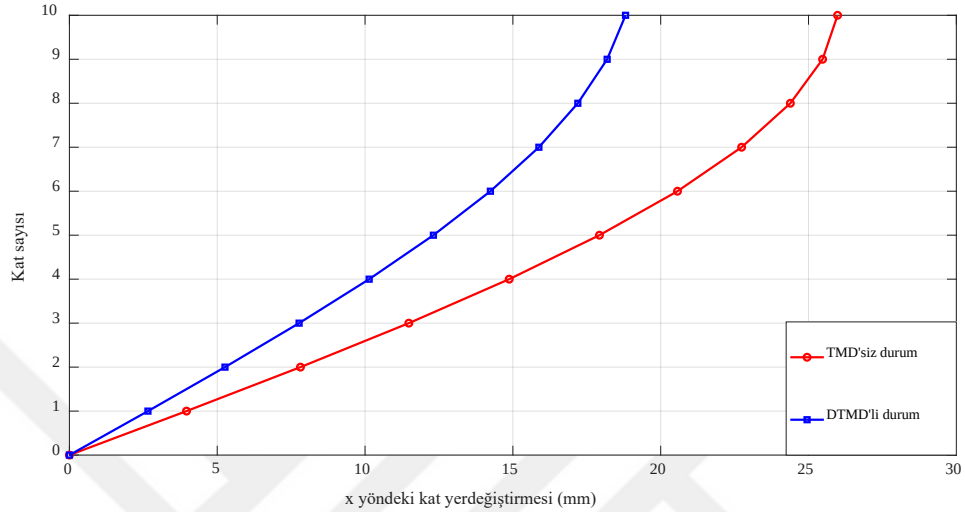
Şekil 4.84: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

1923 düğüm noktasının *y* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, u_y yer değiştirmesinde DTMD'nin etkisi olmuştur ama pik değerleri aynı çıkmıştır. Bu durumda, u_y yer değiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 7.129 mm, DTMD'li durumda ise 7.129 mm olmaktadır.



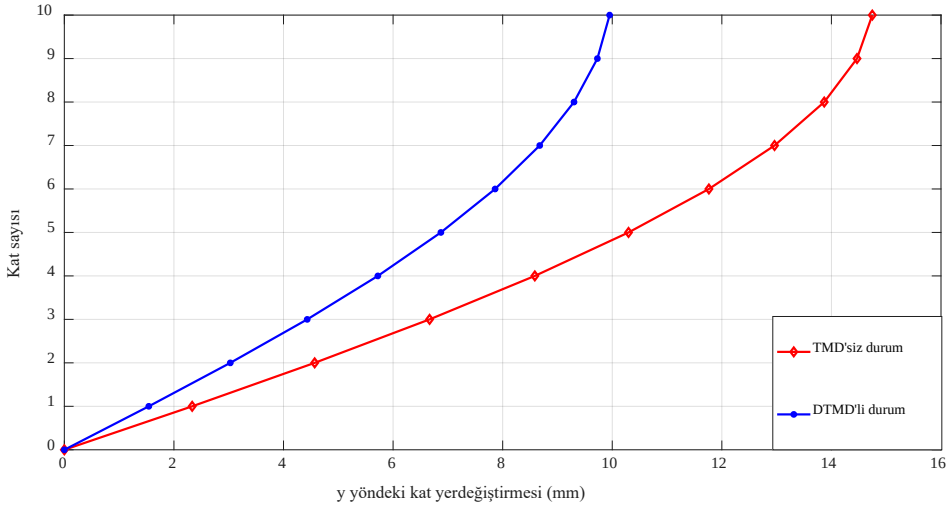
Şekil 4.85: 1923 noktasının *y* yönündeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

Kritik olarak seçilen *y* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, a_y ivmesi TMD'siz durumda maksimum 7493.39 mm/s^2, DTMD'li durumda ise 6163.85 mm/s^2 çıkmaktadır. Bu durumda, DTMD'nin etkinliği % 17.74 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.86: *x* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *x* yönündeki kat yer değiştirmesi.

Kritik olarak seçilen *x* yönünde deprem uyarım etkisi altında, DTMD'nin kat yerdeğiştirmesindeki etkinliği % 27.60 çıkmaktadır. Bu durumda, kat yerdeğiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 25.982 mm, DTMD'li durumda 18.811 mm olmaktadır.



Şekil 4.87: *y* yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *y* yönündeki kat yer değiştirmesi.

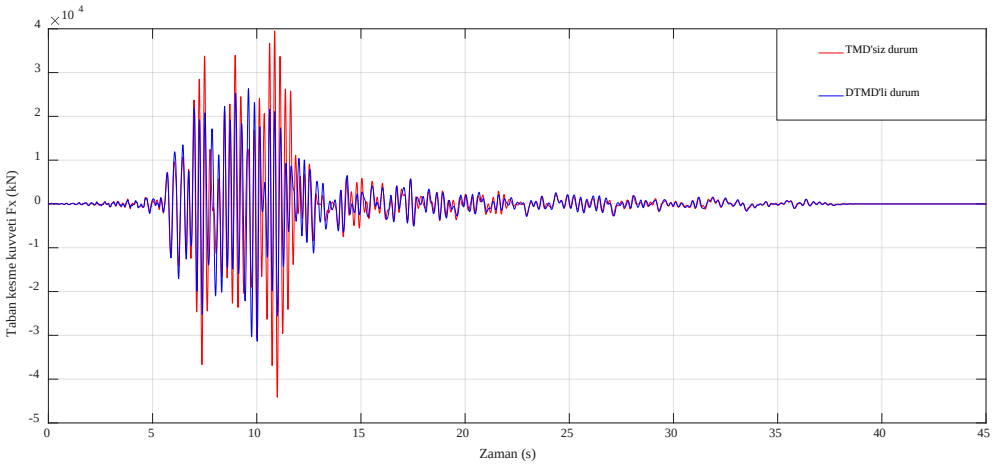
DTMD'nin kat yerdeğiştirme etkinliği *y* yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında % 32.511 çıkmaktadır. Bu durumda, kat yerdeğiştirmesi TMD'siz durumda maksimum 14.746 mm, DTMD'li durumda ise 9.952 mm olmaktadır.

Tablo 4.28: Çift TMD'li durumdaki taban kesme kuvvet etkinliği.

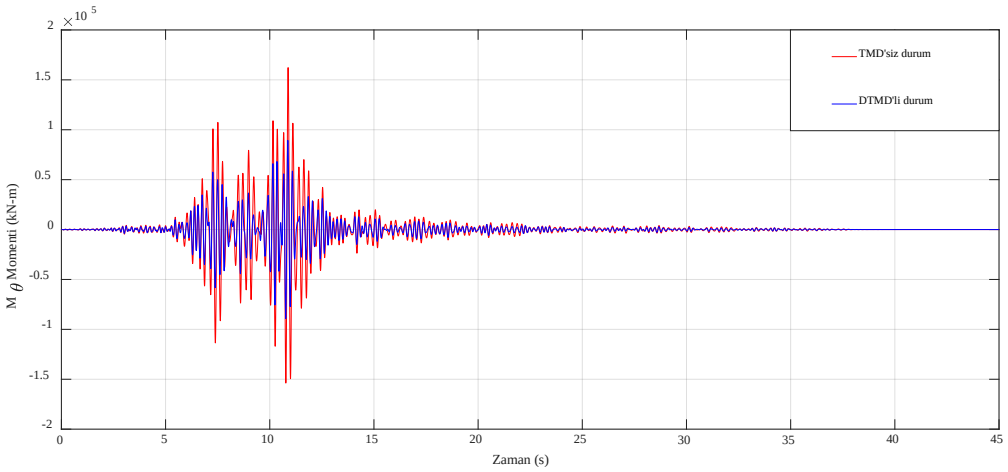
Parametre / DTMD Durumu	*x* yönündeki deprem etkisi		*y* yönündeki deprem etkisi	
	F_x (kN)	M_θ (kN-m)	F_y (kN)	M_θ (kN-m)
TMD'siz	39489.856	162254	30814.15	159041.94
DTMD'li	26327.43	89393.756	30275.385	83542.5556
DTMD'nin etkinliği	%33.331	%44.905	%1.748	%47.471

Çift TMD uyulama durumunda, x ve y yönlerinde krtik olarak seçilen deprem kuvvetleri etkisi altında, yapıda oluşan taban kesem kuvvetleri **Tablo 4.28** ve **Şekil 4.88-4.91** sunulmuştur.

Kritik olarak seçilen *x* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, Fx taban kuvveti TMD'siz durumda 39489.856 kN çıkmışken, DTMD'li durumda 26327.43 kN çıkmaktadır. Bur durumda DTMD'nin etkinliği %33.331 olarak hesaplanmıştır. Aynı deprem etkisi altındaki M_θ burulma momenti TMD'siz durumda 162254.0 kN-m çıkmışken, DTMD'li durumda 89393.756 kN-m çıkmaktadır. Bur durumda DTMD'nin etkinliği %44.905 olarak hesaplanmıştır.

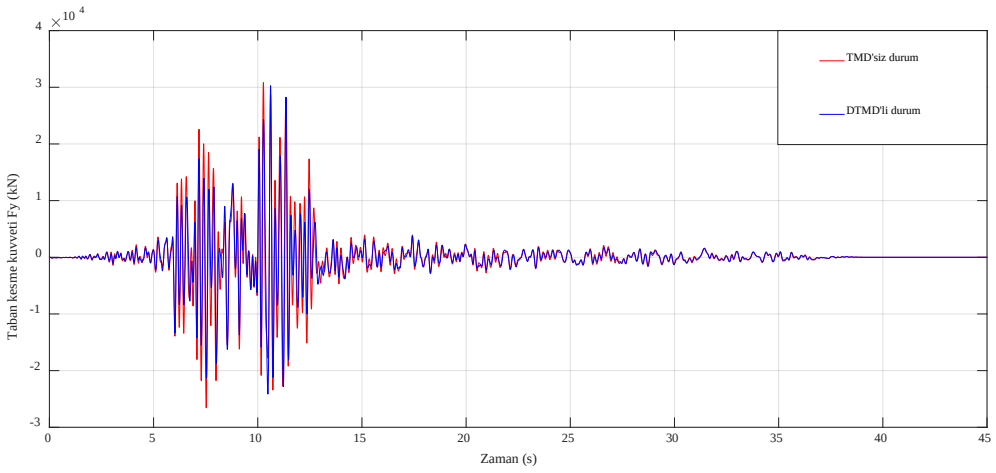


Şekil 4.88: *x* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fx.

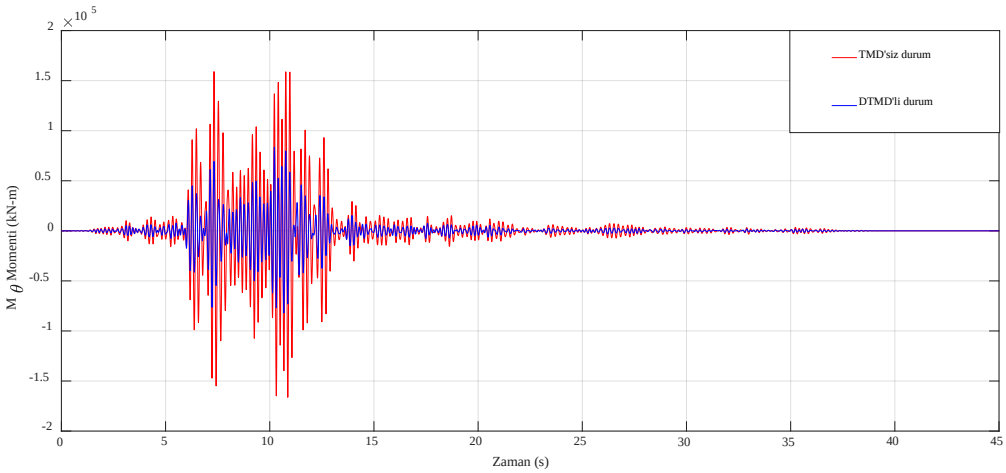


Şekil 4.89: *x* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ.

Kritik olarak seçilen *y* yönündeki deprem uyarım etkisi altında, Fy taban kuvveti TMD'siz durumda 30814.15 kN çıkmışken, DTMD'li durumda 30275.385 kN çıkmaktadır. Bur durumda DTMD'nin etkinliği %1.748 olarak hesaplanmıştır. Aynı deprem etkisi altındaki M_θ burulma momenti TMD'siz durumda 159041.94 kN-m çıkmışken, DTMD'li durumda 83542.5556 kN-m çıkmaktadır. Bur durumda DTMD'nin etkinliği %47.471 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.90: *y* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki taban kesme kuvveti Fy.



Şekil 4.91: *y* yönünde seçilen kritik deprem etkisi altındaki momenti M_θ.

Planda düzensizliği bulunan 10 katlı perde-çerçeveli yapının en üst katına uyguladığımız tekli TMD ve çift TMD sönümleyicilerin, kritik olarak seçilen deprem yer hareketleri etkisi altında, *x* ve *y* yönlerinde iki öteleme ve kütle merkezi etrafındaki dönme olacak şekilde tekli TMD ve çift TMD etkinliği aynı görsel şekillerde karşılaştırma olarak Ek1. Bölümünde, kat yer değiştirmeleri ise EK2. Bölümünde sunulmuştur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde, tez çalışması olarak ele alınan tek katlı burulma düzensizliği oluşan düzlem örnek yapı ve üç boyutlu 10 katlı Perde-çerçeveli yapı sisteminin en üst katına yerleştirilen tekli ve çift TMD'lerin kritik olarak seçilen deprem uyarım etkisine maruz kalan yapılardaki yapısal titreşimlerin maksimum değerlerini azaltılmasında, TMD'lerin etkinliği bir önceki bölümdeki tablo ve şekillerden yola çıkarak anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tek ve çift TMD etkinliğinin perde-çerçeveli yapılar üzerindeki etkileri tartışılacak ve TMD etkilerin daha iyi performans göstermesi için öneriler sunulacaktır.

5.1.TEK KATLI BURULA DÜZENSİZLİĞİ OLUŞAN DEZLEM ÖRNEK YAPI

Düzlem örnek yapıya uyguladığımız 22 adet kritik deprem yükleri etkisi altındaki analizlerde, *x*, *y* ve θ yönlerindeki TMD'siz, tekli TMD'li ve çift TMD'li analiz sonuçları, maksimum yer değiştirme ve TMD'lerin etkinliği olacak şekilde **Tablo 5.1**'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Kritik 22 adet deprem etkisi altındaki TMD'nin etkinlikleri.

Parametreler / TMD durumu	22 adet kritik deprem etkisi		
	u_x (m)	u_y (m)	u_θ (rad)
TMD'siz	0.038112968	0.026750370	0.018350580
TMD'li	0.028974505	0.022996324	0.012998686
DTMD'li	0.027395968	0.022834756	0.011909963
TMD'nin etkinliği	%23.977	%14.034	%29.165
DTMD'nin etkinliği	%28.119	%14.638	%35.098

Yukarıdaki tablodan görüldüğü gibi, burulma düzensizliği bulunan düzlem yapılarda, TMD'lerin yapının maksimum yapısal yer değiştirmeleri azaltmada etkili olduğu görülmektedir. Özellikle de çift TMD'nin *x* yönündeki u_x ötelemesini ve θ yönündeki burulma u_θ dönme etkisini azaltmada tekli TMD'ye göre daha etkili olduğu görülmektedir.

22 adet olarak belirtilen kritik deprem kayıtları içinden, TMD'lerin optimum parametre değerlerinin edilmesinde daha da kritik olarak 3 ve 13 no'lu deprem kayıtları seçilmiştir. Tek ve çift TMD durumlarında kritik olan depremler değişmektedir. Bu iki adet kritik deprem kaydına göre yapılan analiz sonuçları, *x* ve *y* yönlerindeki öteleme ve θ yönündeki dönmesi olarak aşağıdaki **Tablo 5.2**'de verilmiştir.

Tablo 5.2: Kritik olarak seçilen 3 ve 13 no'lu deprem etkisi altındaki TMD'nin etkinlikleri.

Parametreler / TMD durumu	3 No'lu kritik deprem etkisi			13 No'lu kritik deprem etkisi		
	u_x (m)	u_y (m)	u_θ (rad)	u_x (m)	u_y (m)	u_θ (rad)
TMD'siz	0.03811	0.02117	0.015280	0.03205	0.01950	0.01835
TMD'li	0.02260	0.01131	0.009467	0.02381	0.01633	0.01300
DTMD'li	0.02255	0.01281	0.00545	0.02224	0.01661	0.01191
TMD'nin etkinliği	%40.698	%46.575	%38.043	%25.710	%16.256	%29.155
DTMD'nin etkinliği	%40.829	%39.490	%64.332	%30.608	%14.821	%35.095

TMD'lerin optimum parametre değerlerine göre seçilen iki adet kritik deprem etkisine göre yapılan analizlerde tekli TMD'nin 3 no'lu deprem etkisinde çift TMD'ye göre x ve y yönlerinde daha etkili olduğu, ancak θ yönündeki dönme etkisinde daha az olduğu görülmektedir. 13 no'lu deprem etkisi altında ise çift TMD'nin x ve θ yönlerindeki etkisi tekli TMD'ye göre daha etkili olduğu görülmektedir.

5.2.10 KATLI TEKLİ TMD'Lİ PERDE-ÇERÇEVELİ YAPI SİSTEMİ

Kritik olarak seçilen deprem yükleri etkisi altında, tekli TMD'nin farklı konumlarındaki etkinliği araştırmak için, külte merkezi ve optimum konum olarak belirtilen konumlarındaki etkinliği aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

5.2.1. Tekli TMD'nin Kütle Merkezi Konumuna Yerleştirme Durumu

Meta-sezgisel algoritmalardan Jaya algoritması ile elde edilen TMD'nin optimum parametre değeri, konum olarak burulma düzensizliği bulunan yapının kütle merkezine konumlandırılmış olup, kritik deprem etkisi altında zaman tanım alanında yapılan analizlerden, sonuç olarak yapının en üst katının dört köşe noktasındaki iki öteleme, dönme ve ivme sonuçları TMD'siz ve tekli TMD'li olarak **Tablo 5.3**'te verilmiştir.

Tablo sonuçlarından, 1773, 1799 ve 1919 düğüm noktalarının x ve y yönlerindeki kritik deprem yer hareketleri etkisi altında, a_x ivmesi ve u_x ötelemelerinde etkili olmuşken, u_y ötelemelerinde çok etkili olmamıştır. u_θ dönmesinde etkili olmuş ama dört noktada bir farklılık göstermemiştir. 1923 düğüm noktasında ise, sadece u_y ötelemesinde çok etkinlik göstermemişken, diğer üç noktaya göre, u_x öteleme, a_x ve a_y ivmesi ve u_θ dönmesinde çok etkili olduğu görülmektedir. Özellikle de x yönündeki deprem etkisi altında burulama etkisini baya etkilemiştir.

Tablo 5.3: TMD'nin kütle merkezi konumunda en üst katın dört köşe noktasının TMD etkinliği.

Düğüm No	Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
		a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
1773	TMD'siz	16286.47	25.603	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	TMD'li	8950.500	16.628	0.000194	8241.32	12.208	0.00021
	TMD'nin etkinliği	%45.043	%35.054	%42.773	%7.037	%7.857	%23.077
1799	TMD'siz	12594.98	20.581	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	TMD'li	7821.65	13.898	0.000194	8241.32	12.208	0.00021
	TMD'nin etkinliği	%37.899	%32.472	%42.773	%7.037	%7.857	%23.077
1919	TMD'siz	13940.24	22.419	0.000339	7838.88	6.607	0.000273
	TMD'li	8076.120	14.897	0.000194	5255.41	6.200	0.00021
	TMD'nin etkinliği	%42.066	%33.552	%42.773	%32.957	%6.160	%23.077
1923	TMD'siz	11590.050	18.069	0.000339	7493.39	6.607	0.000273
	TMD'li	7567.240	12.568	0.000194	5255.41	6.731	0.00021
	TMD'nin etkinliği	%34.709	%30.444	%42.773	%29.866	%1.877	%23.077

5.2.2. Tekli TMD'nin Optimum Konumuna Yerleştirme Durumu

Meta-sezgisel algoritmalardan, Jaya algoritması ile yapılan TMD optimum parametre ve konum sonuçlarına göre, tekli TMD yapının *x*=10 m ve *y*=10 m konumuna yerleştirilmiştir. Analiz sonuçları olarak yapının en üst katının dört köşe noktasındaki iki öteleme, dönme ve ivme sonuçları TMD'siz ve tekli TMD'li olarak **Tablo 5.4**'te verilmiştir.

Tablo 5.4: TMD'nin optimum konumunda en üst katın dört köşe noktasının TMD etkinliği.

Düğüm No	Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
		a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
1773	TMD'siz	16286.47	25.603	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	TMD'li	9214.380	16.450	0.000216	7759.84	10.688	0.000156
	TMD'nin etkinliği	%43.423	%35.750	%36.283	%12.468	%19.330	%42.857
1799	TMD'siz	12594.98	20.581	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	TMD'li	8118.98	14.603	0.000216	7759.84	10.688	0.000156
	TMD'nin etkinliği	%35.538	%29.046	%36.283	%12.468	%19.330	%42.857
1919	TMD'siz	13940.24	22.419	0.000339	7838.88	7.295	0.000273
	TMD'li	8303.900	15.279	0.000216	4941.11	7.151	0.000156
	TMD'nin etkinliği	%40.432	%31.848	%36.283	%36.967	%1.974	%42.857
1923	TMD'siz	11590.050	18.069	0.000339	7493.39	6.607	0.000273
	TMD'li	7866.370	13.695	0.000216	5233.76	7.327	0.000156
	TMD'nin etkinliği	%32.128	%24.207	%36.283	%30.283	%10.898	%42.857

TMD'nin Meta-sezgisel algoritmalardan Jaya algoritması ile elde edilen optimum konum yerine konulması durumunda, *x* yönlerindeki deprem etkisi altında, a_x ivmesi dört köse nokta etkili olmuşken, u_θ dönmesinin *y* yönündeki deprem etkisindeki etkinliği *x* yönündeki deprem etkisi altındaki etkinliğinden daha çok olduğu, 1919 düğüm noktasında u_y ötelemesi etkili olmamıştır. 1923 düğüm noktasında, uy ötelemesi harç diğer yönlerde etkili olduğunu göstermektedir.

TMD'nin ortalama etkinliği olarak kıyaslandığında, optimum konum yerindeki TMD'nin etkinliği, kütle merkezi konumundakinden daha çok etkili olduğu tablo ve şekillerden görülmektedir.

5.3.DTMD 10 KATLI PERDE-ÇERÇEVELİ YAPI SİSTEMİ

Üç boyutlu 10 katlı perde-çerçeveli planda düzensiz yapının en üst katına çift TMD sistemi yerleştirme durumunda, kritik olarak seçilen deprem uyarım etkisi altındaki DTMD etkinliği yapının en üst katındaki dört köşe noktasının ivme, öteleme ve dönmeleri olarak **Tablo 5.5'**te verilmiştir.

Tablo 5.5: DTMD'nin optimum konumunda en üst katın dört köşe noktasının DTMD etkinliği.

Düğüm No	Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
		a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
1773	TMD'siz	16286.47	25.603	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	DTMD'li	9693.950	18.345	0.000183	7928.82	9.134	0.000151
	DTMD'nin etkinliği	%40.479	%28.348	%46.018	%10.562	%31.059	%44.689
1799	TMD'siz	12594.98	20.581	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	DTMD'li	8572.09	16.055	0.000183	7928.82	9.134	0.000151
	DTMD'nin etkinliği	%31.940	%21.991	%46.018	%10.562	%31.059	%44.689
1919	TMD'siz	13940.24	22.419	0.000339	7838.88	7.295	0.000273
	DTMD'li	8944.780	16.893	0.000183	6047.14	7.172	0.000151
	DTMD'nin etkinliği	%35.835	%24.649	%46.018	%22.857	%1.686	%44.689
1923	TMD'siz	11590.050	18.069	0.000339	7493.39	7.129	0.000273
	DTMD'li	8101.120	14.922	0.000182	6163.86	7.129	0.000152
	DTMD'nin etkinliği	%30.103	%17.417	%46.313	%17.743	%0.000	%44.322

Çift TMD'nın, kritik olarak seçilen *x* ve *y* yönlerindeki deprem yer hareketleri etkisi altında, u_θ dönmesinde bir farklılık göstermemişken, a_x, a_y ivmesi ve u_x deplasman değerlerinde farklılık etkinlik göstermektedir.

Şekil 4.78 ve **Şekil 4.79**'lardan, kat yer değiştirmelerde DTMD'nin etkinliği *x* yönündeki deprem etkisi altında %27.60 çıkarken, *y* yönündeki deprem etkisi altında % 32.54 çıkmaktadır.

5.4.TEKLİ VE ÇİFT TMDLİ DURUMLARINDAKİ ETKİNLİĞİ

Kritik olarak seçilen deprem yer hareketleri etkisi altındaki, tekli TMD'li ve çift TMD'li analiz sonuçlarının karşılaştırılması EK bölümde şekiller ve tablolar halinde sunulmuş olup, sonuçlar **Tablo 5.6**'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Tekli ve çift TMD etkinliğinin karşılaştırılması.

Düğüm No	Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
		a_x (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	a_y (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
1773	TMD'siz	16286.47	25.603	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
	TMD'li	13306.55	21.341	0.000216	8508.490	12.158	0.000156
	DTMD'li	9693.95	18.345	0.000183	7928.820	8.360	0.000151
	TMD'nin etkinliği	%18.297	%16.646	%36.283	%4.023	%8.235	%42.857
	DTMD'nin etkinliği	%40.479	%28.348	%46.018	%10.562	%36.901	%44.689
1799	TMD'siz	12594.98	20.581	0.000339	8865.14	13.249	0.000273
	TMD'li	13191.99	21.631	0.000216	8508.49	10.688	0.000156
	DTMD'li	12600.02	16.055	0.000183	7928.82	8.36	0.000151
	TMD'nin etkinliği	%4.740	%5.102	%36.283	%4.023	%19.330	%42,857
	DTMD'nin etkinliği	%0.040	%21.991	%46.018	%10.562	%36.901	%44.689
1919	TMD'siz	13940.24	22.419	0.000339	7838.88	7.295	0.000273
	TMD'li	13233.92	18.971	0.000216	8220.35	5.103	0.000156
	DTMD'li	8944.78	21.916	0.000183	4217.19	4.463	0.000151
	TMD'nin etkinliği	%5.067	%15.380	%36.283	%4.866	%30.048	%42.857
	DTMD'nin etkinliği	%35.835	%2.244	%46.018	%46.202	%38.821	%44.689
1923	TMD'siz	11590.05	18.069	0.000339	7493.39	6.607	0.000273
	TMD'li	7866.37	15.733	0.000216	5233.76	6.22	0.000156
	DTMD'li	8095.73	14.91	0.000182	2139.59	2.022	0.000152
	TMD'nin etkinliği	%32.128	%12.928	%36.283	%30.155	%5.857	%42.857
	DTMD'nin etkinliği	%30.149	%17.483	%46.313	%71.447	%69.396	%44.322

Tablo sonuçlarından çift TMD'nin etkinliği, tekli TMD'ye göre etkili olduğunu görülmektedir. *x* ve *y* yönlerindeki kritik deprem uyarım altında, u_θ dönmesi dört köşe noktasında aynı etkinliği göstermektedir. Anacak, *x* yönündeki deprem uyarım altında, *y* yönündekine göre daha da etkili olmuştur.

5.5.ÖNERİLER

Planda düzensiz yapılarda uygulanan, tekli ve çift TMD'lerin etkilerinden yola çıkarak, TMD'nin kütlesi, rijitliği ve sönüm parametrelerinin optimum değerlerinin ve optimum konum yerlerinin optimize edilmesinin çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, tekli ve çoklu TMD'lerin, yapının plan şekline göre daha iyi optimum konum yerlerinin belirlenmesi farklı meta-sezgisel algoritmalar ve farklı yöntemler kullanılarak iyileştirme konusu üzerinde yoğun çalışmalar sürdürülebilir.

Tek ve çift TMD olarak en iyi optimum konum yerlerine yerleştirilen TMD'lerin etkinlik sonuçlarından, orta yükseklikteki perde-çerçeveli yapılarda *x*, *y* yönlerindeki öteleme ve θ yönündeki dönmelerde maksimum %30-50 civarlarında etkili olduğu görülmektedir. Uygulan kritik deprem yüklerine göre tekli ve çift TMD uygulamalarından, binanın taban kesme kuvvetlerini etkilediği görülmektedir. Bu tür orta yükseklikteki yapılardaki TMD etkinliği artırmak için gerek TMD optimum parametre değerleri olsun gerek optimum konum yerleri olsun Hibrit olarak geliştirilecek yeni sezgisel algoritmalar tanımlanabilir. Bunların yanında yapı-zemin etkileşimini dikkate alan optimum tasarım yöntemleri ile pratikte uygulamaya daha yakın yöntemler gelecekte uygulanabilir. Bina türü harici köprü ve kule tipi yapılarda gelecek uygulamaları arasında gösterilebilir.

Bu çalışma, planda düzensizlik bulun yeni yapıların pasif kontrol sistemleri ile tasarlanması ve mevcut eski yapıların güçlendirilmesinde referans olarak kullanılabilir. Çalışma kapsamında MTMD sistemlerin burulma düzensizliği olan yapıların kontrolü için incelenmiş ve optimizasyonu incelenmiştir. Ulaşılmak istenen amaç yapı tepkilerinin azaltılmasıdır ve yerdeğiştirme ve dönmelerin azaltılması ile dolayısıyla iç kuvvetlerin azalması da sağlanacaktır. Devamında yapılacak bir çalışma olarak yapının ilgili yönetmeliklerin kurallarına göre analiz edilip elemanlarının boyutlandırılması yapılması sonucunda önerilen pasif kontrol uygulamasının yapı maliyetinde ne kadar bir azaltıma katkı sağlayacağı hakkında bilgi edinilebilir. Bunların yanında farklı miktarda burulma düzensizliği bulunan yapılar için bir kıyaslama çalışması optimum TMD sistemleri için yapılabilir.

Bu tez kapsamında yapılan optimizasyon işlemleri oldukça uzun vakit almaktadır. Örneğin, 10 katlı bina örneğine iki sönümleyici için optimizasyon yapıldığında bu işlem Intel i3 8100 işlemci ile 150 saat sürmektedir. Bu uzun süreli optimizasyon işleminden kurtulmak için çok

sayıda basitleştirilmiş modeller için optimizasyon yapılarak ve sonrasında oluşacak optimum veri seti makine öğrenmesinde kullanılarak bir yapay zekâ tahmin modeli oluşturulabilir.

Bu çalışma sonucunda kütle sönümleyici sistemin konumunun da optimize edilmesiyle burulma düzensizliğine büyük ölçüde engel olduğu ve titreşimleri önemli düzeyde azaltıp yapının konfor ve güvenliğinin arttırmasında son derece faydalı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Agrawal, A.K. ve Yang, J.N., 1999, Optimal placement of passive sönümleyicis on seismic and wind excited building using combinational optimization, *Journal of intelligent materail systems and structures*, 10, 997-1013.

Ahsan, R., Rana, S., and Ghani, S.N., 2011, Cost optimization design of post tensioned I girder bridge using global optimization algorithm, *ASCE journal of structural engineering*.

Akyürek, O., Nakin, S., ve Go, T, H., 2019, Vibration control for torsionally irregular buildings by integrated control system, *Engineering structures* 201, 109775.

Aldemir, U., ve Bakioglu, M., 2001, Optimal control of lineer building under seismic excitations, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 30, 835-851.

Aldemir, U., ve Aydın, E., 2005, Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar, *THH-türkiye mühendislik haberleri sayı*, 435, 81-89.

Alka, Y.P., ve Jangid, R.S., 2014, Seismic response of multi-story structure with multiple tuned mass friction sönümleyicis, *International jouranl of advanced structural engineering*, 6(1), 1-13.

Almazán, J, L,. Espinoza, G,. ve Aguirre, J,J., 2010, Torional balance of asymmetric structures by means of tuned mass sönümleyicis, *Engineering structures* 42, 308-328.

Anwar, N., ve Aung, T.H., 2016, Smart systems for structural response control-an overvıew, *5th ASEP convention on concrete engineering practice and technology*, 19-20 May 2016 Manila, Philippines.

Asai, T., Ikago, K., ve Araki, Y., 2015, Outrigger tuned viscous mass damping system for high-rise buildings subject to earthquake loadings, *11th International workshop on advanced smart materials and smart structures technology*, 1-2 August 2015 United States, University of Illinois, Urbana-Champaign.

Aydoğdu, I., Akin, A., ve Saka, M.P., 2016, Design optimization of real size steel space frames using artificial bee colony algorithm with levy flight distribution. *Advances in engineering software*. 92, 1-14.

Belazi, A., 2018, A novel chaotic Jaya algorithm for unconstraıned numerical optimization, *Nonlinear dynamics*, 93, 1451-1480.

Bekdaş, G., ve Nigdeli, S.M., 2011, Değişik periyotlu yapılar için optimum pasif kütle sönümleyici özelliklerinin belirlenmesi, *1. Türkiye deprem mühendisliği ve sismoloji konferansı*, 1-8, 11-14 Ekim 2011, ODTÜ, ANKARA.

Bekdaş, G., ve Nigdeli, S.M., 2018, Mass ratio factor on optimum TMD design in frequency domain, *International journal of theoretical and applied mechanics*, vol.3.

Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., ve Yang, X.S., 2018, A novel bat algorithm based optimum tuning of mass sönümleyicis for improving the seismic safety of structures, *Engineering structures*, 159, 89-98.

Bishay-Girges, N.W., 2004, *Seismic protection of structures using passive control system*, Thesis (PhD), University of Canterbury Christchurch.

Chang, C.C., 1999, Mass sönümleyicis and their optimal designs for building vibration control, *Engineering structures*, 21(5), 454-463.

Chen, G., ve Wu, J.N., 2001, Optimal placement of multiple tune mass sönümleyicis for seismic structures, *Journal of structural engineering*, 127, 1054-1062.

Chey, M.H., 2007, *Depreme passive and semi-active tuned mass sönümleyici building system*, Thesis (PhD), University of Canterburyi Christchurch.

Chi, Ch.L., ve Jer, F.W., 2005, Seismic performance of multiple tuned mass sönümleyicis for soil-irregular building interaction systmes. *International journal of solids and structures*, 42, 5536–5554.

Chi, Ch.L., Chang, Ch.Ch., ve Jer, F.W., 2010, Active control of irregular buildings considering soil-structure interaction effects, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 30, 98-109.

Clark, A.J., 1998, Multiple passive tund mass sönümleyici for reducing earthquake induced building motion, *Proccedings of ninth world conference on earthuake engineering*, 2-9 August, 1998, Tokyo-Kyoto, Japan, 779-784.

Constantinou, M.C., and Tadjbakhsh, I.G., 1983, Optimum design of a first story damping system, *Computers & Structures*, 17 (2), 305–310.

Constantinou, M.C., Soong, T.T., ve Dargush. G.G., 1998, *Passive energy dissipation systems for structural design and retrfit*, Monograph1, Multidisciplinary center for earthquake engineering research, Buffalo, New york.

CSI Collections 20th Edition. CSI ETABS 2016 Ultimate 16.2 64 bit, Computers & Structures. INC.

CTBUH, 2018, World's tallest building with dampers, *International journal on tall buildings and urban habitat*, No.3, 48-49.

Curadelli, O., Martinez, C.A., ve Compagnoni, M.E., 2013, Optimal design of passive viscous damping systems for building under seismic excitation, *Journal of constructional steel research*, 90, 253-264.

Dai, J.Zh., Wu, Q.Y., ve Zhu, H.P., 2017, Performance-based passive control analysis of adjacent structures: Optimization of Maxwell sönümleyicis, *Journal of central south university*, 24 (9), 2180-2197.

Degertekin, O., ve Hayalioglu, S., 2013, Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization, *Computer structures*, 119, 177-188.

Demirtaş, F., ve Zengin, K., 2016, Guguk kuşu algoritmasının gezgin satıcı problemine uygulanması ve simülasyonu, *EEB 2016 Elektrik-elektronik ve bilgisayar sempozyumu*, 11-13 Mayıs 2016, Tokat TÜRKİYE.

Den Hartog, J.P., 1956, *Mechanical vibrations*. New York: McGraw-Hill. 492 p.

Deb, S.K., 2004, Seismic base isolation- An overview, *Current science association*, 87 (10), 1426-1430.

Desu, N.B., Deb, S.K., Dutta, A., 2006, Coupled tuned mass sönümleyicis for control of coupled vibrations in asymmetric buildings, *Structural control and health monitoring*, 13(5), 897–916.

Feng, M., ve Mita, A., 1995, Vibration control of tall buildings using mega sub-configuration. *Journal of engineering mechanics*, 121(10), 1082-1088.

Fister, I., Fister, Jr.I., Yang, X.SH., ve Brest, J., 2013, A comprehensive review of firefly algorithms, *Swarm and evolutionary computation*, 13(1), 34-46.

Fister, I., Yang, X.SH., Brest, J., ve Fister, Jr.I., 2013, Modified firefly algorithm using quaternion representation. *Expert systems with applications*, 40(18):7220-7230.

Fister, I.Jr, Fister, D., Fister, I., Brest, J., Yang, X.SH., ve Ljubiˇc, k., 2014, Towards the novel reasoning among particles in PSO by the use of RDF and SPARQL, *The scientific world journal*.

Frahm, H., 1911, Device for damping vibrations of bodies, U.S. Patent 0989958.

Franklin, Y.Ch., Jiang, H.P., ve Lou, K.Y., 2010, *Smart structures: innovative systems for seismic response control*, CRC Press, ISBN-13: 978-0849385322.

Fujino, Y., ve Abe, M., 1993, Design formulas for tuned mass sönümleyicis based on a perturbation technique, *Erthquake engineering and structural daynamics*, 22(10), 833-854.

Garg, H., 2004, Design Solving structural engineering design optimization problems using an artificial bee colony algorithm, *Journal of industrial and management optimization*, 10(3), 777-794.

Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan G.V., 2001, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, Simulation, 76(2), 60–68.

Geem, Z.W., 2008, Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables, *Application mathematics and computation*, 199(1), 223–230.

Glover, F., ve Kochenberger, G,A., 2003, *Handbook of metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, ISBN:1-4020-7263-5.

Greco, R., ve Morga, M., 2019, Optimum design of tuned mass sönümleyicis for different earthquake grond motion parametres and models, *The sreuctural design of tall and special buildings*, 28 (13), 1- 20.

Guo, Y.Q., ve Chen, W.Q., 2007, Dynamic analysis of space structures with multiple tuned mass sönümleyicis, *Engineering structures*, 29 (12), 3390-3403.

Gutierrez Soto, M., ve Adeli, H., 2014, Optimum tuning parameters of tund mass sönümleyicis for vibration control of irregular highrise building structures, *Journal of civil engineering and management*, 20 (5), 609-620.

Gurgoze, M., ve Muller, P.C., 1992, Optimum positioning of sönümleyicis in multi-body systems, *Journal of sound and vibration*, 158 (3), 517- 530.

Hadi, M.N.S., Arfiadi, Y., 1998, Optimum design of absorber for MDOF structures, *Journal of structural engineering (ASCE)*, 124 (11), 1272–1279.

Hadidi, A., ve Azad, S.K., 2010, Structural optimization using artificail bee colony algorithm, *Proceedings of 2nd international conference on engineering optimization*, 6-9 September, Lisbon, Portugal.

Hahn, G.D., and Sathiavageeswaran, K.R., 1992, Effects of added-sönümleyici distribution on the seismic response of buildings, *Computers & Structures*, 43 (5), 941–950.

Hanson, R.D., ve Soong, T.T., 2001, *Seismic design with supplemental energy dissipation devices*, EERI Monograph 8, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.

Hart, G.C., ve Wong, K., 1999, *Structural Dynamics for structural engineering*, John Wilev and Sons Inc, New York, USA.

Hejazi, F., Jaafar, M.S., ve Toloue, I., 2013, Optimization of earthquake energy dissipation system by genetic algorithm, *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 28, 796-810.

Hoang, N., Fujino, Y., ve Warnitchai, P., 2008, Optimal tuned mass sönümleyici for seismic applications and practical formulas, *Engineering structures*. 30 (3), 707-715.

Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., ve Yao, J.T.P., 1997, Structural control: present and future, *Journal of engineering mechanics*, 123 (9), 897-971.

Hsiang, Ch.T., ve Guan, Ch.L., 1993, Optimum tuned mass sönümleyicis for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems, *Erthquake engineering and structural daynamics*, 22, 957-973.

Huang, X.M., 2018, Evaluation of genetic algorithms for optimum distribution of viscous sönümleyicis in steel frames under strong earthquakes, *Earthquakes and structures*, 14 (3), 000-000.

Ikago, K., Inoue, N., ve Saito, K., 2012, Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass sönümleyici, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 41, 453-474.

Islam, B., ve Ahsan, R., 2012, Optimization of tuned mass sönümleyici parameters using evolutionary operation algorithm, *15th World conference on earthquake engineering*, 24-28 September 2012, Lisbon, Portugal.

Izuru, T., 2009, *Building control with passive sönümleyicis: Optimal performance-based design for earthquakes*, John Wiley&Sons(Asia) Pte Ltd, ISBN: 978-0-470-82491-7.

Iwanami K, Seto K., 1984, Optimum design of dual tuned mass sönümleyicis and their effectiveness, Computer science, 50 (449), 44–52.

Jangid R.S., ve Datta T.K., 1997, Performance of multiple tuned mass sönümleyicis for torsionally coupled system, *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 26, 307-317.

Jimeno-Morenilla, A., Sánchez-Romero, J. L., Migallón, H., ve Mora-Mora, H., 2019, Jaya optimization algorithm with GPU acceleration, *Journal of supercomput*, 75, 1094-1106.

Jyothi, Y., ve Kangali, K.B., 2017, Parametric study of viscous sönümleyicis for seismic application, *International reaearch journal of engineering and technology*, 4 (5), 1091-1094.

Kamgar, R., Samea, P., ve Khatibinia, M., 2017, Optimizing parameters of tuned mass sönümleyici subjected to critical earthquake, *Structural design tall special buildings*, 27 (7).

Kamrava, A., 2015, Seismic isolators and their types, *Current world environment*, 10 (1), 27-32.

Kennedy, J., ve Eberhart, R.C., 1995, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE international conference on netural networks*, Piscataway,NJ, pp 1942-1948.

Krenk, S., Hogsberg, J., 2008, Tuned mass absorbers on damped structures under random load, *Probabilistic engineering mechanics*, 23 (4), 408-415.

Kwon, S.D., ve Park, K.S., 2004, Suppression of bridge flutter using tuned mass sönümleyicis based on robust performance design, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92 (11), 919-934.

Lee, K.S., ve Geem, Z.W., 2005, A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice, *Computer methods application mechanics engineering*, 194, 3902–13933.

Lee, K.S., Geem, Z.W., Lee, S.H., ve Bae, K.W., 2005, The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization, *Engineering optimization*, 37, 663–684.

Lee, C.L., Chen, Y.T., Chung, L.L., Wang, Y.P., 2006, Optimal design theories and applications of tuned mass sönümleyicis, *Engineering structures* 28, 43-53.

Leung, A.Y.T., Zhang, H., Cheng, C.C., Lee, Y.Y., 2008, Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake, *Earthquake engineering and structural Dynamics*, 37 (9), 1223–1246.

Leung, A.Y.T., Zhang, H., 2009, Particle swarm optimization of tuned mass sönümleyicis. *Engineering Structures*, 31 (3), 715–728.

Li, C.X., 2000, Performance of multiple tuned mass sönümleyicis for attenuating undesirable oscillations of strucutres under the ground acceleration, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 29, 1405-1421.

Li, C., ve Liu, Y., 2002, Further characteristics for multiple tuned mass sönümleyicis, *Journal of structural engineering*, 128 (10), 1362-1365.

Li, Ch.X., 2005, 多重调谐质量阻尼器控制单层非对称结构扭转振动的设计参数, *Journal of vibration and shock*, 24 (1).

Li, Ch.X., ve Qu, W.Y., 2006, Optimum properties of multiple tuned mass sönümleyici for reduction of translational and torsional response of structures subject to ground acceleration, *Engineering structures*, 28 (4), 472-494.

Li, C., ve Qu, W., 2006, Optimum Properties of Multiple Tuned Mass Sönümleyicis for Reduction of Translational and Torsional Response of Structures Subject To Ground Acceleration, *Engineering structures*, 28 (4), 472-494.

Lin C., Ueng J., Huang T., 1999, Seismic response reduction of irregular buildings using passive tuned mass sönümleyicis, *Engineering Structures*, 22, 513-524.

Lin C.C., Chang C.C., ve Wang, J., 2010, Active control of irregular buildings considering soil-structure interaction effects, *Soil Dynamics and Earthquke Engineering*, 30, 98-109.

Marano, G.C., Greco, R., ve Chiaia, B., 2010, A comparison between different optimization criteria for tuned mass sönümleyicis design, *Journal of sound and vibration*, 329, 4880-4890.

Marko, J., 2006, *Influence of dampıng systems on building structures subject to seismic effects*, Thesis(PhD), Queensland University of Technology.

Matrinez-Romero, E., 1993, Experiences on the use of supplemental energy dissipators on building structures, *Earthquake spectra*, 9 (3), 581-624.

The Math Works, Matlab R2018a. (2018)., Natick, MA.

Mevada, S.V., ve Jangid, RS., 2012, Seismic response of asymmetric systems with linear and non linear viscous sönümleyicis, *International journal of advanced structural engineering*, 4, 1-20.

Moon, S.J., Bergman, L.A., ve Voulgaris, P.G., 2003, Sliding mode control of cable-stayed bridge subjected to seismic excitation, *Journal of engineering mechanics*, 129 (1), 71-78.

Muralidhara, G.B., Naranagowda ve Swathi Rani, K.S., 2015, Seismic vibration control of a MDOF building connected with viscous and SAVFD sönümleyicis, *International journal of scientific and research publications*, 5 (7).

Nam, H., ve Pennung, W., 2005, Design of multiple tuned mass sönümleyicis by using a numerical optimizer, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 34 (2), 125-144.

Nigdeli, S.M., ve Bekdaş, G., 2011, Optimum pasif kütle sönümleyicilerinin belirsiz özellikli yapılardaki etkileri, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 11-14 Ekim 2011 ODTÜ, ANKARA, 1-7.

Nigdeli, S.M., ve Boduroglu, M.H., 2013, Active tendon control of torsionally irregular structures under near-fault ground motion excitation, *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 28, 718-736.

Nikos, D.L., ve Manolis, P., 2015, *Engineering and applied sciences optimization*, Springer International Publishing Seitzerland, ISBN: 978-3-319-18320-6. pp 129-143.

Ormondroyd, J., ve Den Hartog, J.P., 1928, The theory of dynamic vibration absorber, T. ASME, 50, 9–22.

Özpalanlar, C.G., 2004, *Depreme dayanıklı yapı tasarımında sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Pavlyukevich, I., 2007, Lévy flights, non-local search and simulated annealing, *Journal of computer physics.* 226 (12), 1830–1844.

Pourzeynali, S., Lavasani, H. H., Modarayi, A.H., 2007, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, *Engineering structures.* 29 (3), 346–357.

Pourzeynali, S., ve Bahar, A., 2007, Vertical vibration control of suspension bridges subjected to earthquake by semi-active MR dampers, *Scientia Iranica*, 24 (2), 439–451.

Rahmani, H.R., ve Könke, C., 2019, Seismic control of tall buildings using distributed multiple tuned mas sönümleyicis, *Advances in civil engineering*, 1, 1-19.

Ramsey, J.R., ve Wierschem, N.E., 2017, Passive Control of the vibration of flooring systems using a gravity compensated non-lineer energy sink, *13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, 22-23 Julay 2017, The university of Tokyo, Japan.

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.

Rao, V.R, 2019, Jaya: *An advanced Optimization Algorithm and its Engineering Applications*, Springer International Publishing AG, ISBN: 978-3-319-78921-7.

Rudinger, F., 2006, Optimal absorber with nonlinear viscous power law damping and white noise excitaiton, *Journal of engineering mechanics*, ASCE 132 (1), 46-53.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., ve Chung, R.M., 1997, A method of estimating the parameters o tuned mass sönümleyicis for seismic applications, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 26 (6), 617-635.

Sadek, F., Mohraz, B., ve Lew, H.S., 1998, Single and multiple tuned liquid column sönümleyicis for seismic applications, *Erthquake engineering and structural daynamics*, 27, 439-463.

Saaed, T.E., 2015, *Structural control and identification of civil engineering structures*, Thesis (PhD), Lulea University of Technology.

Said, E., ve Vasant, M., 2014, Distributed multiple tuned mass sönümleyicis for wind vibration response control of high-rise building, *Jounal of engineering*, 1-11.

Septimiu, L., ve Cristian, P., 2007, Recent applications for some active control systems to civil engineering structures, *Bulletin of the polytechnic institute of jassy, construction, architecture section*.

Soong, T.T., ve Dargush, G.F., 1997, *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, John Wiley, Chichester and New York, ISBN:0-9656682-1-5.

Soong, T.T., ve Dargush, G.F., 1999, *Passive energy dissipation and active control, Structural Engineering Handbook*, CRC Press LLC, Boca Raton.

Soong, T.T., ve Costantinou, M.C., 1994, Passive and active structural vibration control in civil engineering, Buffalo, New York, ISBN:978-3-211-82615-7.

Soong, T.T., 2007, Review of principles of passive supplemental damping and seismic isolation by C.Christopoulos and A. Filiatrault, *Journal of structural engineering*, 133 (8), 1192.

Sonmez, M., 2011, Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm, *Structural and multidisciplinary optimization*, 43 (1), 85–97.

Singh, M.P., Singh, S., Moreschi, L.M., 2002, Tuned mass sönümleyicis for response control of torsional buildings, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 31 (4), 749–769.

Saaed, T.E., 2015, *Structural control and identification of civil engineering structures*, Thesis (PhD), Lulea University of Technology.

Soto, G.M., 2012, *Investigation of passive control of irregular building structures using bidirectional tuned mass sönümleyici*, Thesis (MSc), The Ohio State University.

Stanikzai, M.H., Elias, S., Matsagar, V.A., ve Jain, A.K., 2019, Seismic response control of base-isolated buildings using tuned mass sönümleyici, *Australian journal of structural engineering*, 21 (1), 310-321.

Su, R.H., Liang, B., ve Song, W.Y., 2001, Research on optimal parameters of structure-TMD system to suppress seismic response of structures, *Journal of vibration and shock*, 20 (4).

Tarek, E.S., 2015, *Structural control and identification of civil engineering strustures*, Thesis(PhD), Lulea University of Technology.

Togan, V., 2012, Design of planar steel frames using teaching-learning-based optimization, *Engineering structure*, 34, 225–232.

Togan, V., 2013, Design of pin jointed structures using teaching-learning-based optimization. *Structural engineering mechanics*, 47 (2), 209–225.

Tsuji, M., and Nakamura, T., 1996, Optimum viscous sönümleyicis for stiffness design of shear buildings, *Journal of the structural design of tall buildings*, 5, 217–234.

T.Rakicevic, Z., Bogdanovic, A., Jurukovski, D., ve Nawrotzki, P., 2012, Effectiveness of tune mass sönümleyici in the reduction of the seismic rseponse of the structure, *Bull earthquake engineering*, 10, 1049-1073.

Tuan, A.Y., ve Shang, G.Q., 2014, Vibration control in a 101-Story building using a tuned mass dapmer, *Journal of Applied and Engineering*, 17 (2), 144-156.

Taha, A.E., Jain, K.A., Matsagar, V., ve Elias, S., 2019, Seismic response control of asymmetric buildings using tuned mass sönümleyicis, *Structural design tall special building*, 28, 1673.

Villaverde, R., 1985, Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorbers, *Erthquake engineering and structural daynamics*, 13 (1), 33-42.

Ueng, J.M., Chi-Chang, L., ve Wang, J.F., 2008, Practical design issues of tuned mass sönümleyicis for torsionally coupled building under earthquakes loadings, *Structural design tall special building*, 17(133).

Warburton, G.B., 1982, Optimum absorber parametres for various combinations of response and excitation parameters, *Erthquake engineering and structural daynamics*, 10 (3), 381-401.

Warburton, G.B., ve Ayorinde, E.O., 1980, Optimum absorber parametres for simple systems, *Erthquake engineering and structural daynamics*, 8, 197-217.

Wei, W.H., Qu, W.L., ve Chen, Zh.H., 1999, Viscoelastic sönümleyici in control of earthquake responses of nonlinear buldings, *Earthquake engineering and engineering vibration*, 19 (4), 95-101.

Xu, Y.L., Chen J., Ng, C.L., ve Qu, L., 2005, Semiactive seismic response control of building with podium structure, *Journal of structural engineering*, 131 (6), 890-899.

Xu, Y.L., ve He, J., 2017, *Smart civil structures*, Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, ISBN:9781315368917.

Yan,A.Zh.,veWang,D.D.,2014,地震作用下高层框架厂房的多钟调谐质量阻尼器扭转振动控制, *Industrial Construction*, 44 (1), School of Civil Engineering，Henan Polytechnic University，China.

Yang, X.SH., ve Deb, S., 2009, Cuckoo search via Lévy flights, *Proceeings of world congress onnature biologically inspired computing (NaBIC 2009)*, IEEE Publications, USA.

Yang, X.SH., ve Deb, S., 2010, Engineering optimization by cuckoo search, *International journale of math model numer optimization*, 1 (4), 330-343.

Yang, X.SH., Deb, S., ve Fong, S., 2011, Accelerated particle swarm optimization and support vector machine for business optimization and applications, *Commun comput information science*, 136, 53-66.

Yang, X.SH., 2011, Bat algorithm for multi-objective optimization, *International journal of bio-inspired computation*, 3 (5), 267-274.

Yang, X.SH., 2012, Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization, *Engineering computation*, 29 (5), 1-18.

Yang, X.SH., ve Deb, S., 2013, Cuckoo search: recent advances and applications, *Natural computer application*, 24 (1), 169-174.

Yang, X.SH., 2014, *Nature-Inspired optimization algorithms*, Elsevier, London, ISBN:978-0-12-416743-8.

Yang, X.SH., Bekdaş, G., ve Nigdeli, S.M., 2016, *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*, Springer International Publishing Switzerland, ISBN: 978-3-319-26243-7.

Ying, Zh., Zheng, L., ve Yuan, L., 2018, Experimental and numerical study on vibration control effects of a compound mass sönümleyici, *The structurel design of tall and special buildings*, 27 (15), 1-11.

Yücel, M., 2019, *Metasezgisel algorithmlarla optimum ayarlı kütle sönümleyicisi tasarımı ve yapay zeka tabanlı tahmin modeli,* Yüksek Lisans Tezi, İsatanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa.

Zhang, R.H., and Soong, T.T., 1992, Seismic design of viscoelastic sönümleyicis for structural applications, *Journal of structural engineering*, 118 (5), 1375–1392.

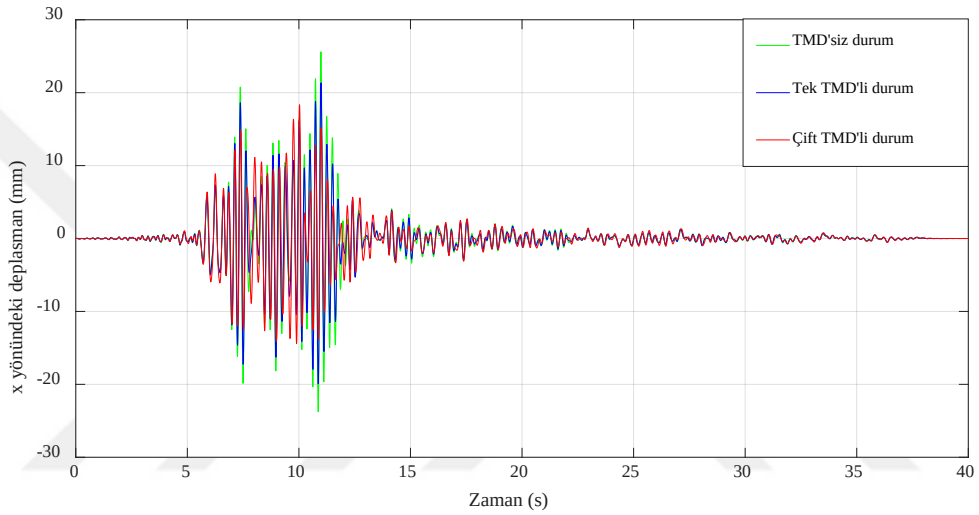
Zhang, H.Y., ve Zhang, L.J., 2017, Tuned mass sönümleyici system of high-rise intake towers optimized by improved harmony search algorithm, *Engineering structures*, 138, 270-282.

Zhen, L., ve diğ., 2019, Analysis on vibration control of a large-span pedestrain suspention bridge based on a multiple tuned mass sönümleyici system, *Noise and vibration worldwide*, 50 (2), 56-63.

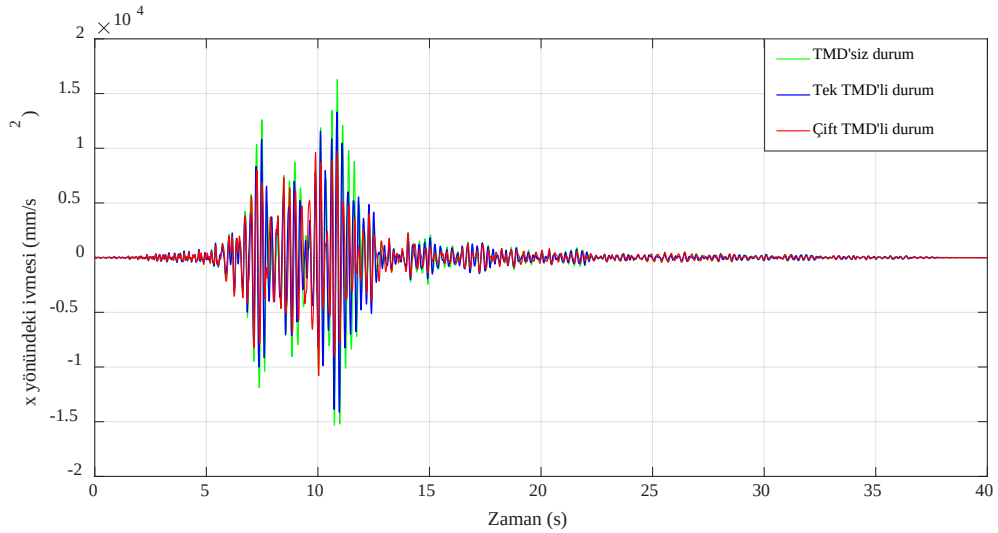
FEMA P-695, Quantification of building seismic performance factors, Federal emergency management agency, Washington DC, 2009.

EKLER

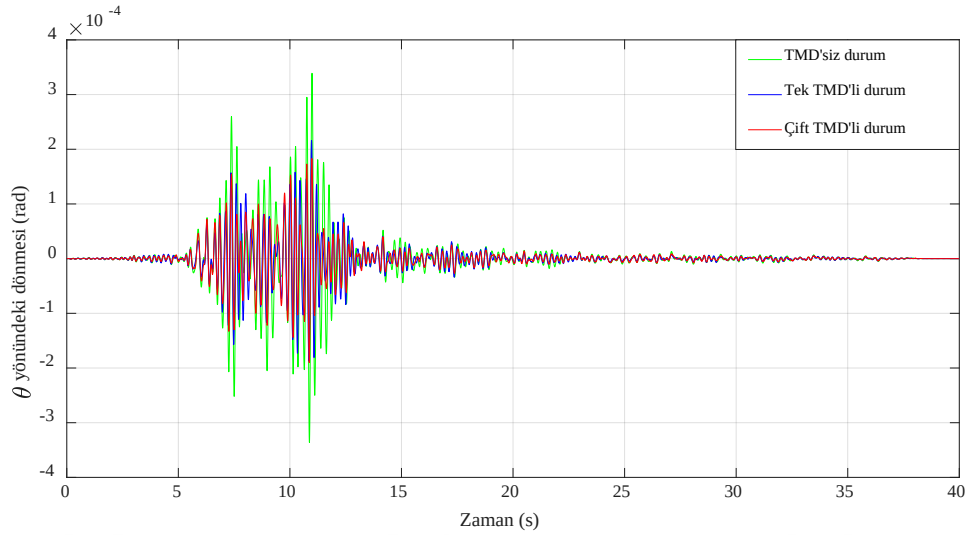
EK.1 Yapının en üst katındaki dört köşe düğüm noktalarının x, y yönünde seçilen kritik deprem uyarım etkisi altında, TMD' siz, TMD' li ve DTMD' li durumundaki, ux, uy ötelemeleri ve θ yönündeki u_θ dönmesi aşağıdaki şekillerde, TMD'lerin etkinlik yüzdeleri ise tablolarda verilmiştir.



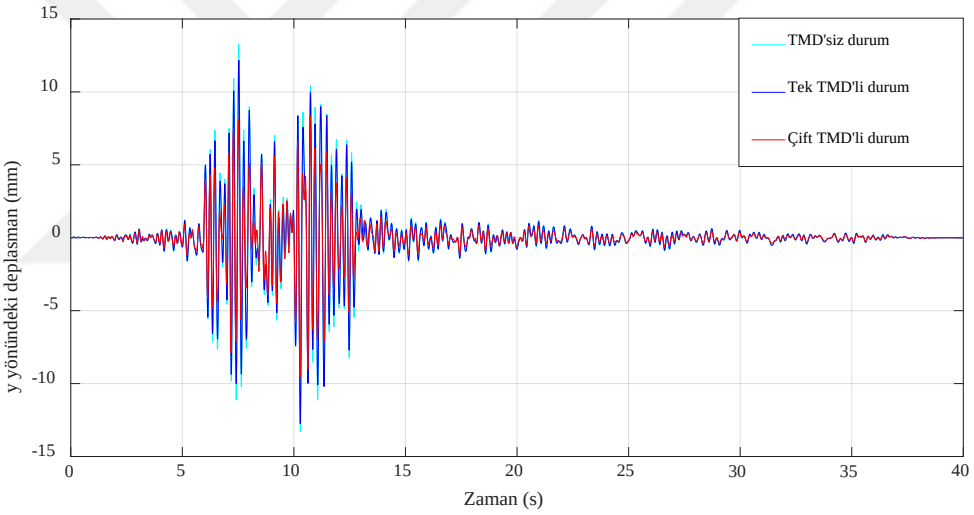
1773 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.



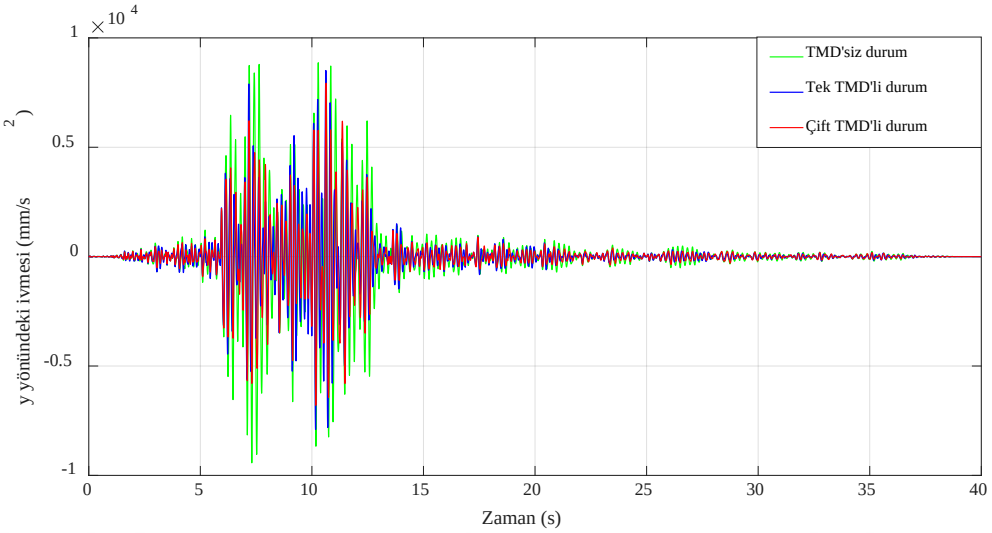
1773 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.



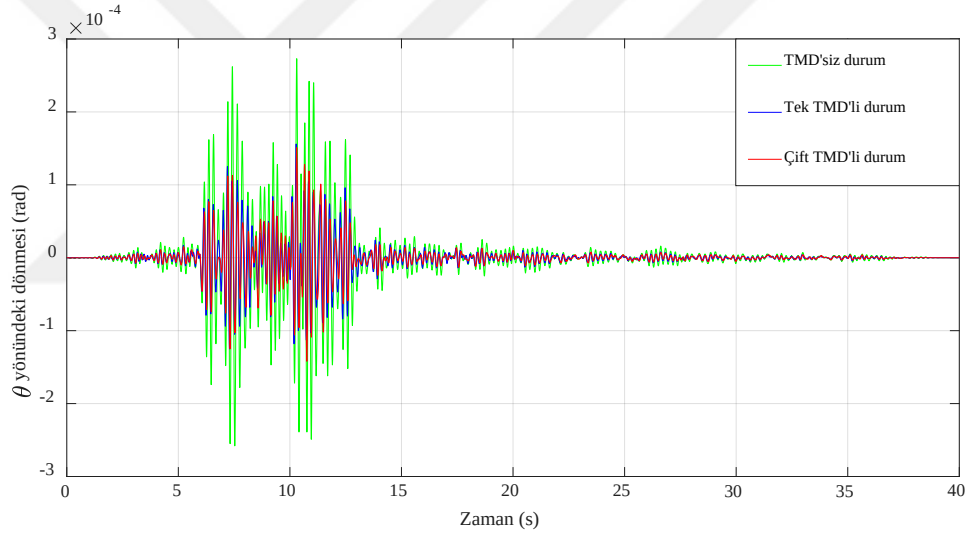
1773 noktasısın x yöndeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.



1773 noktasısın y yöndeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.



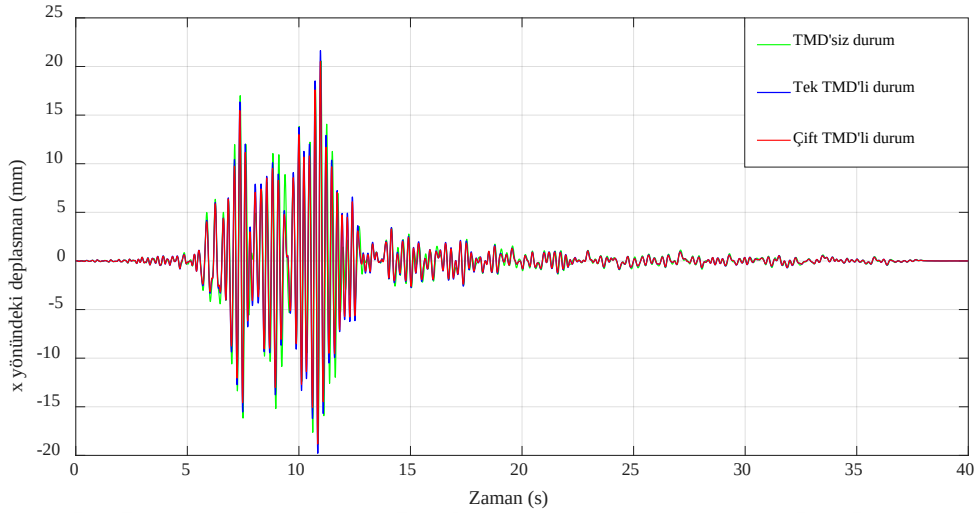
1773 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.



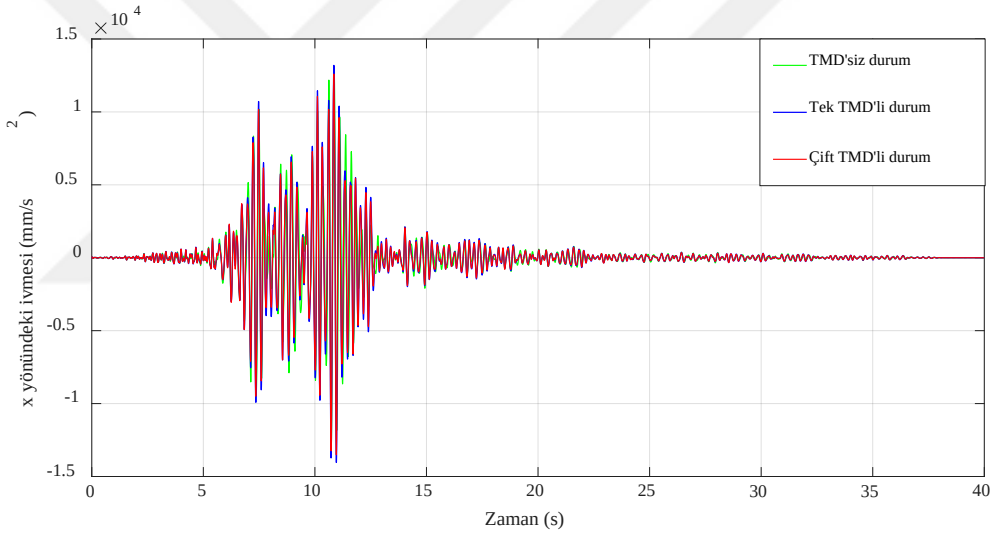
1773 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki u_θ dönmesi.

Kritik olarak seçilen deprem etkisi altında 1773 noktasının TMD ve DTMD etkinliği.

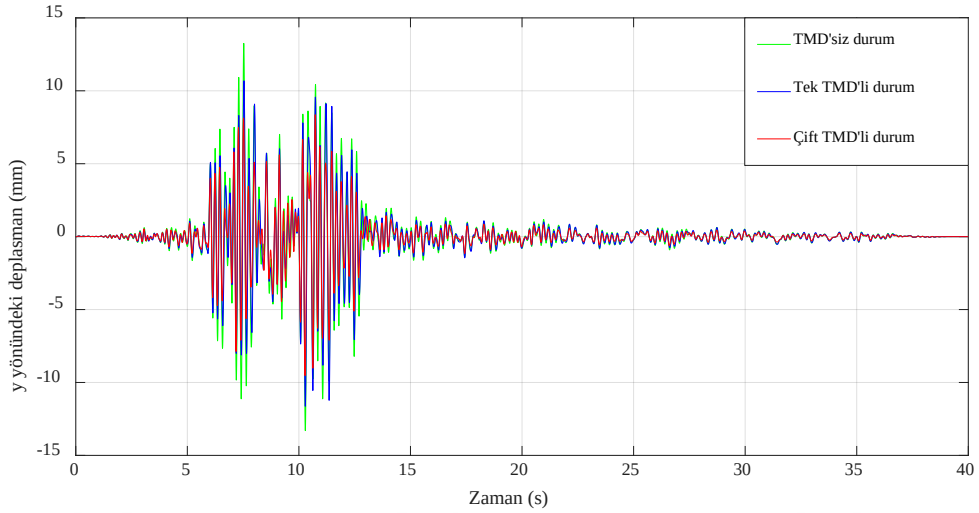
Parametreler / TMD durum	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	16286.47	25.603	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
TMD'li	13306.55	21.341	0.000216	8508.490	12.158	0.000156
DTMD'li	9693.95	18.345	0.000183	7928.820	8.360	0.000151
TMD'nin etkinliği	%18.297	%16.646	%36.283	%4.023	%8.235	%42.857
DTMD'nin etkinliği	%40.479	%28.348	%46.018	%10.562	%36.901	%44.689



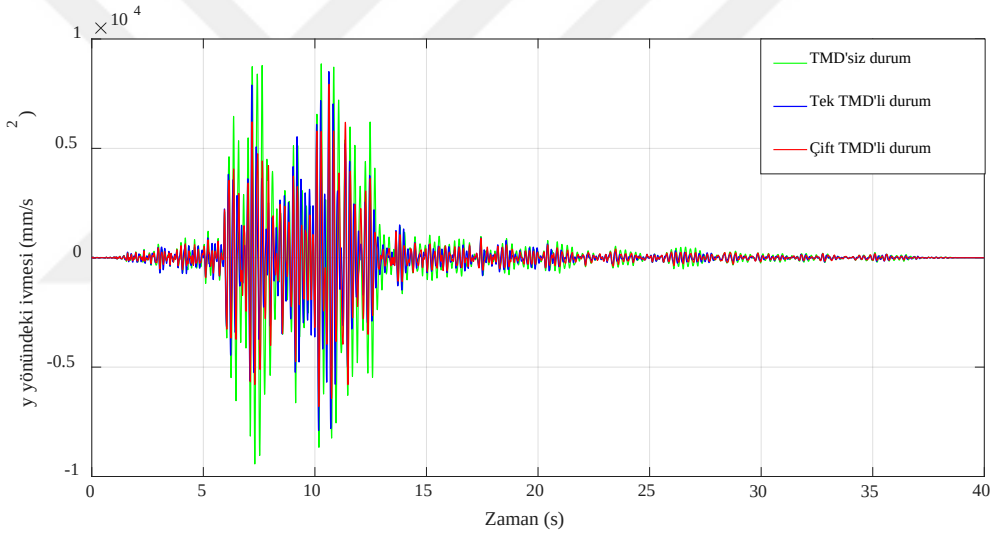
1799 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.



1799 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.



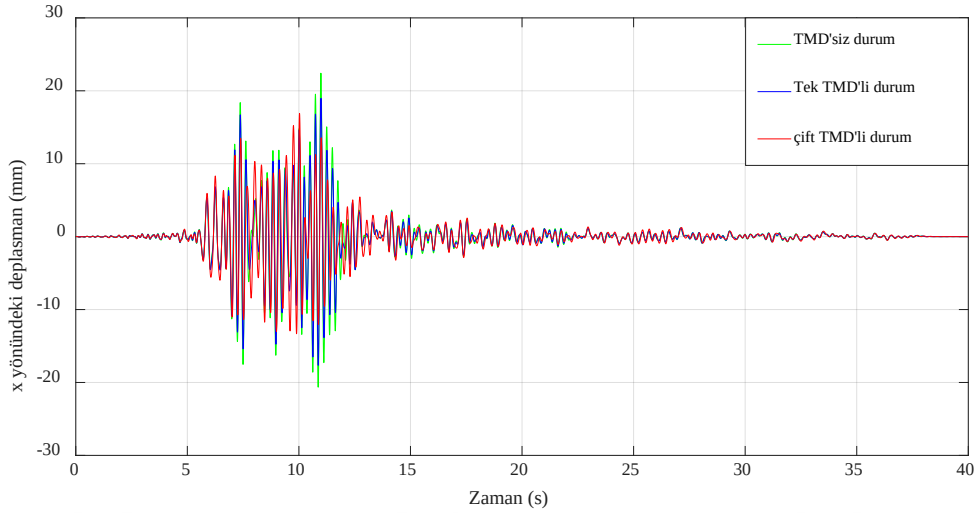
1799 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.



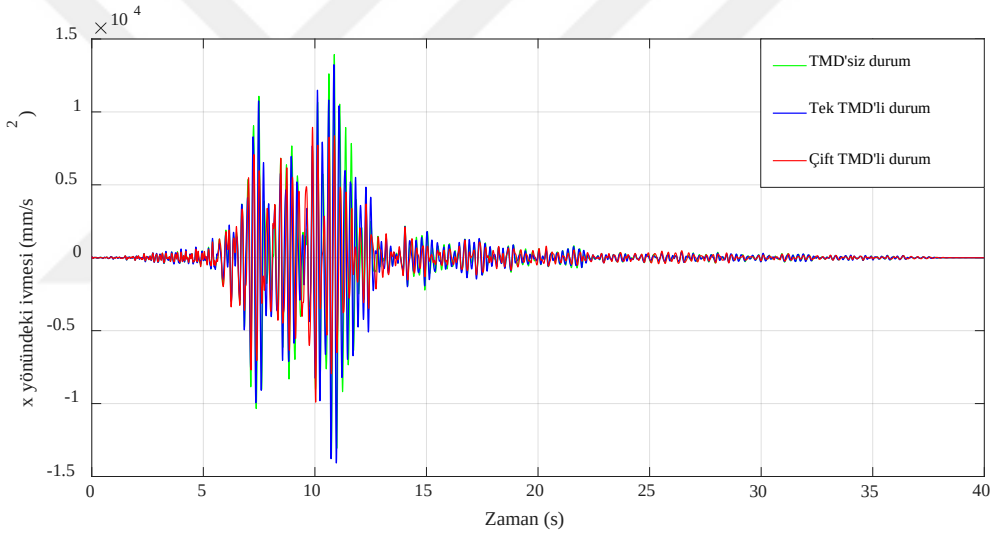
1799 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

Kritik olarak seçilen deprem etkisi altında 1773 noktasının TMD ve DTMD etkinliği.

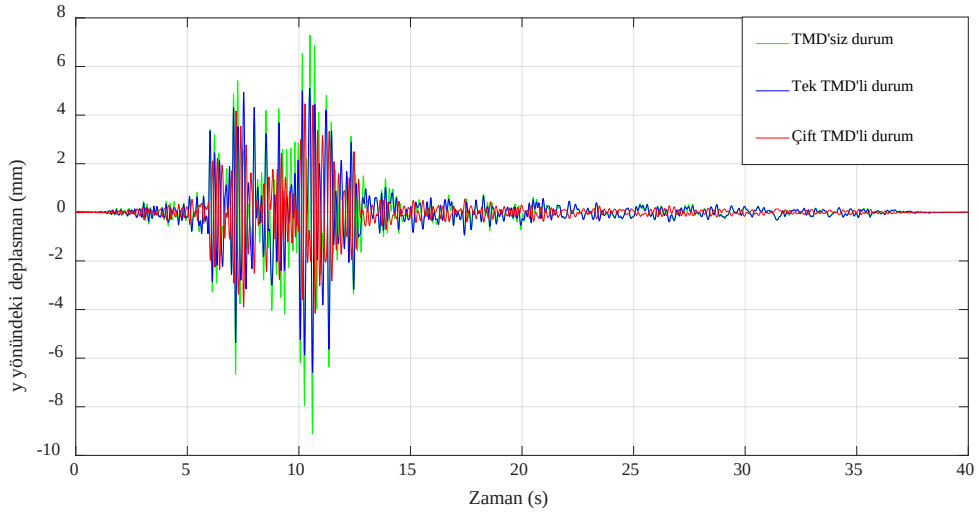
Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	12594.98	20.581	0.000339	8865.140	13.249	0.000273
TMD'li	13191.99	21.631	0.000216	8508.490	10.688	0.000156
DTMD'li	12600.02	16.055	0.000183	7928.820	8.360	0.000151
TMD'nin etkinliği	%4.740	%5.102	%36.283	%4.023	%19.330	%42.857
DTMD'nin etkinliği	%0.040	%21.991	%46.018	%10.562	%36.901	%44.689



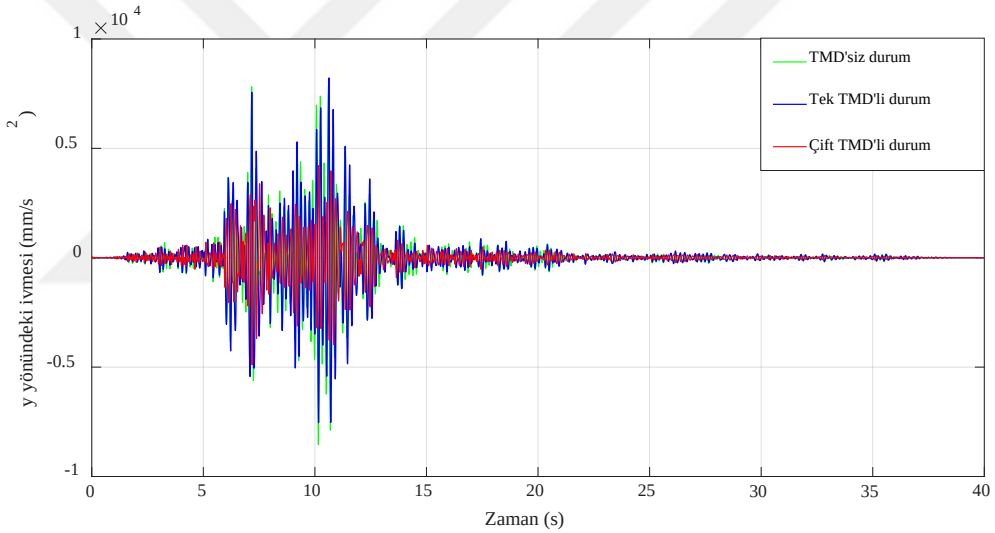
1919 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.



1919 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.



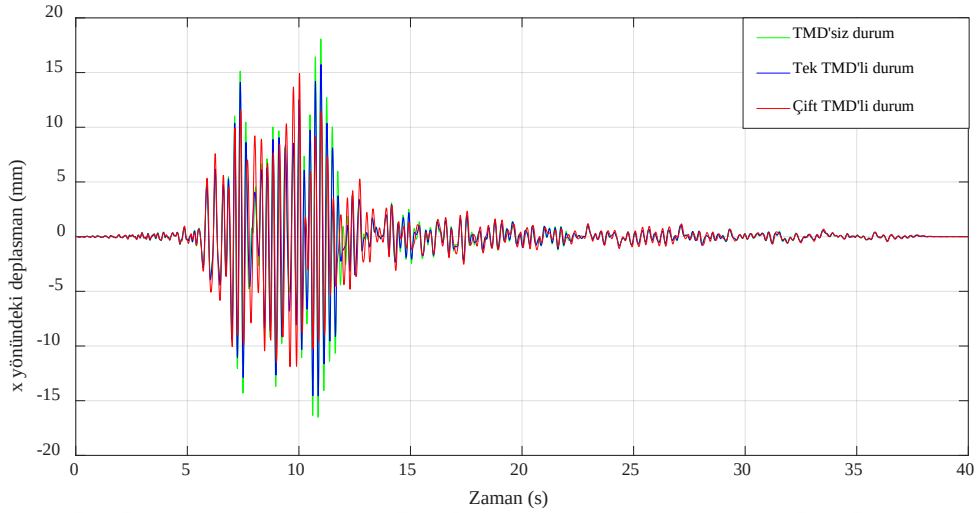
1919 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.



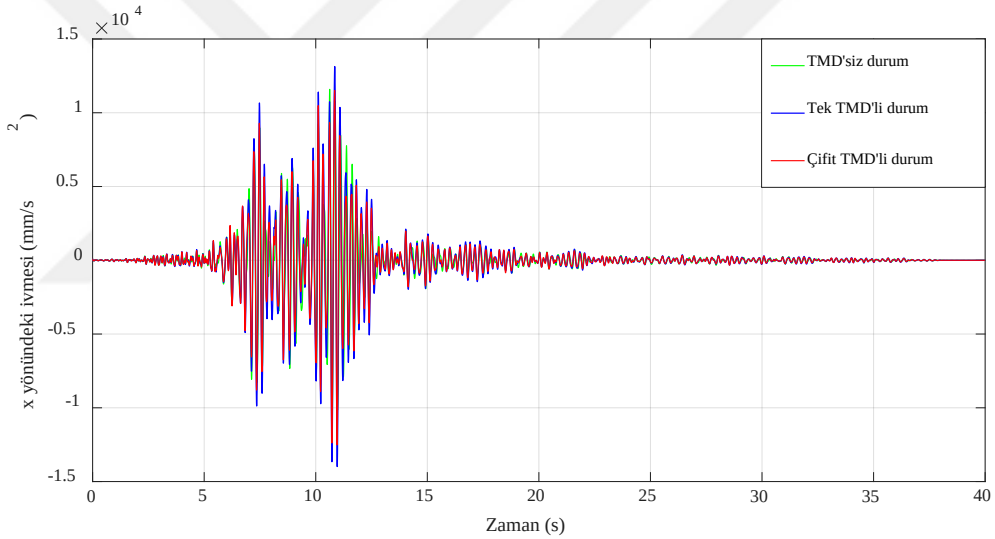
1919 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

Kritik olarak seçilen deprem etkisi altında 1919 noktasının TMD ve DTMD etkinliği.

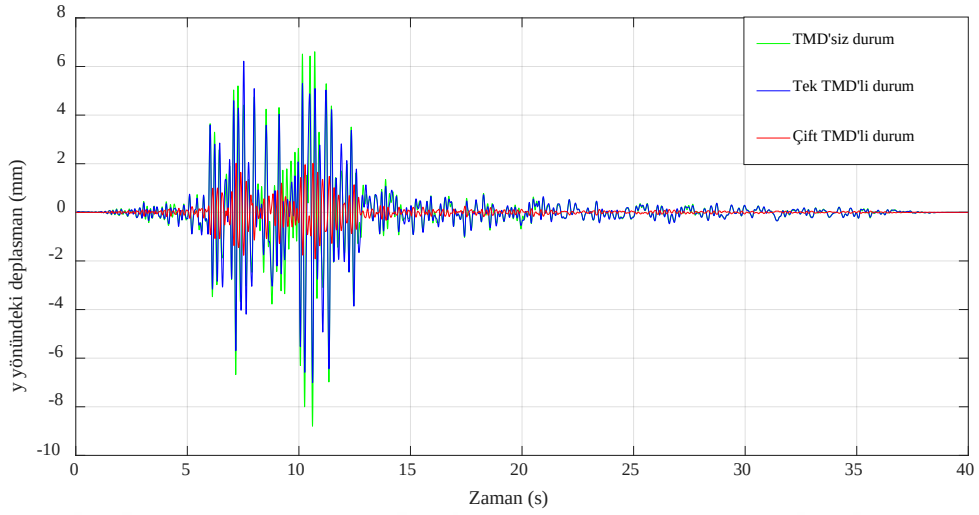
Parametreler / DMT durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	13940.24	22.419	0.000339	7838.880	7.295	0.000273
TMD'li	13233.92	18.971	0.000216	8220.350	5.103	0.000156
DTMD'li	8944.78	21.916	0.000183	4217.190	4.463	0.000151
TMD'nin etkinliği	%5.067	%15.380	%36.283	%4.866	%30.048	%42.857
DTMD'nin etkinliği	%35.835	%2.244	%46.018	%46.202	%38.821	%44.689



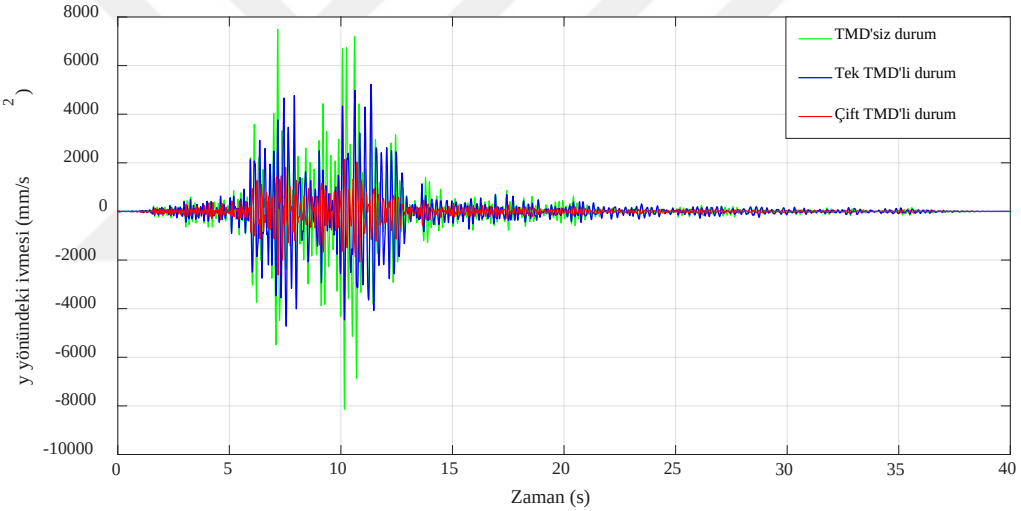
1923 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki u_x deplasmanı.



1923 noktasısın *x* yöndeki deprem etkisi altındaki a_x ivmesi.



1923 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki u_y deplasmanı.

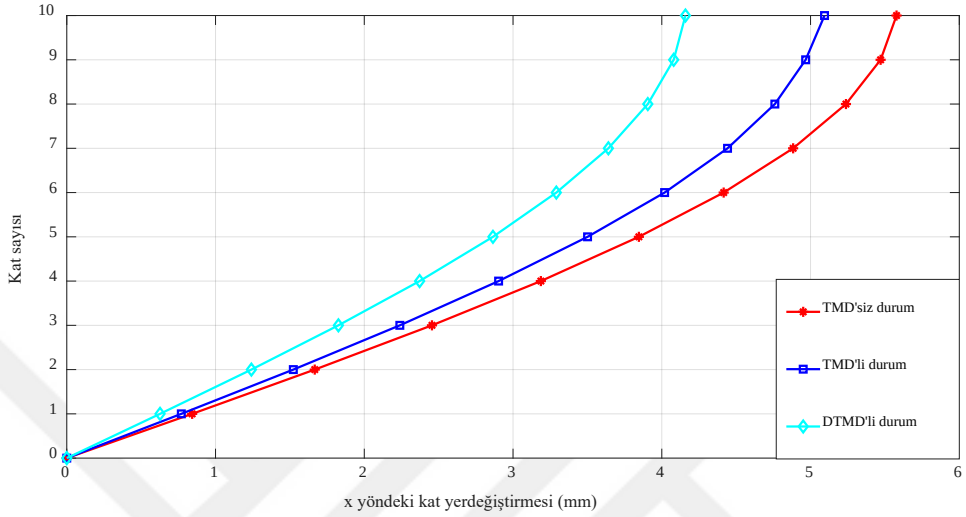


1923 noktasısın *y* yöndeki deprem etkisi altındaki a_y ivmesi.

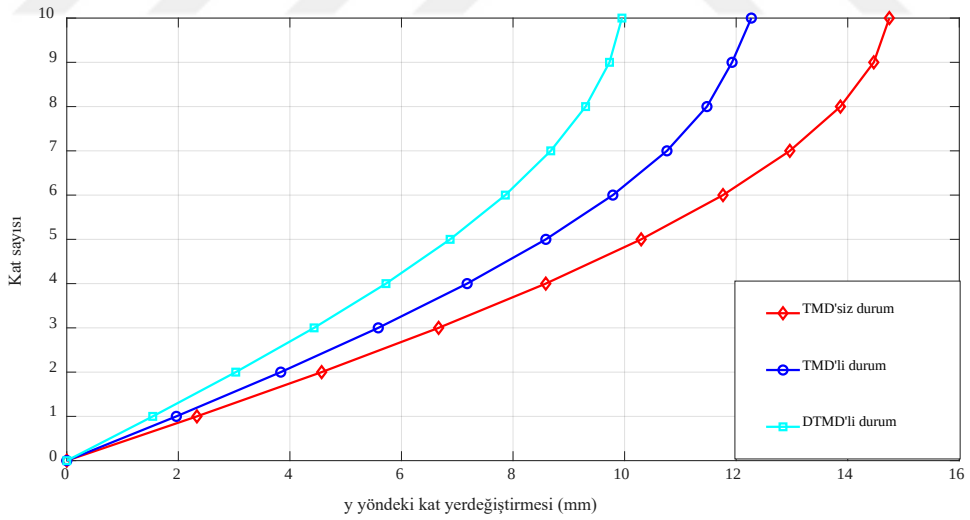
Kritik olarak seçilen deprem etkisi altında 1923 noktasının TMD ve DTMD etkinliği.

Parametreler / TMD durumu	*x* yönündeki deprem etkisi			*y* yönündeki deprem etkisi		
	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_x (mm)	u_θ (rad)	$\ddot{u}_g$ (mm/s^2)	u_y (mm)	u_θ (rad)
TMD'siz	11590.05	18.069	0.000339	7493.390	6.607	0.000273
TMD'li	7866.37	15.733	0.000216	5233.760	6.220	0.000156
DTMD'li	8095.73	14.91	0.000182	2139.590	2.022	0.000152
TMD'nin etkinliği	%32.128	%12.928	%36.283	%30.155	%5.857	%42.857
DTMD'nin etkinliği	%30.149	%17.483	%46.313	%71.447	%69.396	%44.322

EK.2 Kritik olarak seçilen *x* ve *y* yönünde deprem yer hareketleri etkisi altında, yapının *x* ve *y* yönlerindeki kat yer değiştirmeleri TMD'siz, TMD'li ve DTMD'li olarak aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



x yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *x* yönündeki kat yerdeğiştirmesi



y yönündeki kritik deprem etkisi altındaki *x* yönündeki kat yerdeğiştirmesi.