T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI YÖNTEMLER İLE AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ İLE YAPILARIN KONTROLÜ

Pouya Mohammadi Khojasteh PAREH

DANIŞMAN
Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Aralık, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Pouya Mohammadi Khojasteh PAREH tarafından, **Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ** danışmanlığında hazırlanan **"FARKLI YÖNTEMLER İLE AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ İLE YAPILARIN KONTROLÜ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **15/12/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Serdar ÇARBAŞ Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Babam RAHIM PAREH'e ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

FARKLI YÖNTEMLER İLE AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ İLE YAPILARIN KONTROLÜ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek lisans programı kapsamında hazırlanan tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, tecrübe ve görüşleri ile beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ başta olmak üzere Doç. Dr. Sinan Melih NİGDELİ, Doç. Dr. Serdar CARBAŞ ve Doç. Dr. Barış SAYIN hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca akademik çalışmalarım boyunca, her zaman yanımda olan aileme sabırları, anlayışları ve destekleri için şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

Aralık 2022 Pouya Mohammadi Khojasteh

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiv**
ABSTRACT ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
2. YAPILAR **4**
2.1. GELENEKSEL YAPILAR 4
2.2. MODERN YAPILAR 8
3. DİNAMİK YÜKLER KARŞISINDA YAPILARIN DAVRANIŞ KONTROLÜ **10**
3.1. YAPISAL KONTROL 10
3.2. KONTROL SİSTEMLERİ 11
3.3. KONTROL ÇEŞİTLERİ 11
3.3.1. Pasif Kontrol 12
3.3.1.1. Pasif ayarlı kütle sönümleyici (PTMD) 12
3.3.1.2. Ayarlı Sıvı Sönümleyici (TLD) 13
3.3.1.3. Viskoelastik Sönümleyiciler 13
3.3.1.4. Viskoz Sıvı Sönümleyici 13
3.3.1.5. Metalik Sönümleyiciler 14
3.3.1.6. Sürtünmeli Sönümleyiciler 14
3.3.2. Aktif Kontrol 15
3.3.2.1. Aktif Kiriş Kontrolü 17
3.3.2.2. Aktif Kütle Sönümleyici 18

3.3.2.3. Yerçekimini Harekete Geçirici Sistem 19
3.3.2.4. Aktif Rijitlik Değiştirici (AVS) 20
3.3.2.5. Aktif Viskoz Sönümleyici (AVD) 21
3.3.2.6. Aktif Kontrolün Dezavantajları 22
3.3.3. Yarı Aktif Kontrol 24
3.3.3.1. Yarı Aktif Hidrolik Sönümleyici 25
3.3.3.2. Akışkan Kontrollü Sönümleyiciler 26
3.3.4. Karma Kontrol 27
3.3.4.1. Karma Kütle Sönümleyiciler 27
3.3.4.2. Karma Sismik İzolasyon 28
4. MALZEME VE YÖNTEM 29
4.1. YAPILARDA DİNAMİK HAREKET 29
4.1.1. Dinamik Kuvvet, Yapı ve TMD Özelliklerinin Belirlenmesi 29
4.1.2. Dinamik Modelleme Yaklaşımına Göre Yapıya Etkiyen Kuvvetler 31
4.2. OPTİMUM TMD PARAMETLERİNİN BELİRLENMESİ 35
4.2.1. Optimizasyon için Matrislerin Oluşturulması 45
4.3. TMD PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE ÇALIŞMALAR 46
4.4. OPTİMUM TMD PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRMASI ÜZERİNE ÖRNEK UYGULAMA 48
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR 64
KAYNAKLAR 66
EKLER 71
EK-1. Yapının katlarındaki kesme kuvvetleri'nin değerleri (ETABS). 71
EK-2. En üst katta ölçülen maksimum ve minimum deplasman değerleri. 75
EK-3. Farklı sistemlere göre yapının doğal frekansı. 77
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 79
ETİK KURUL İZİN YAZISI 80
KURUM İZNİ YAZILARI 81
ÖZGEÇMİŞ 82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Çift doğrultulu kuvvet- yer değiştirme ilişkisi (Okut, 2006). 6

Şekil 3.1: En üst katına PTMD yerleştirilmiş yapı. 12

Şekil 3.2: a) Viskoelastik sönümleyici (Shedbale ve Muley, 2017); (b) Viskoelastik sönümleyici detayı. 13

Şekil 3.3: Viskoz sıvı sönümleyici (Hüsem ve Yozgat, 2005). 14

Şekil 3.4: Sürtünme tipi sönümleyici ve kuvvet deplasman şeması (Lima ve diğ, 2014; Zahraei ve diğ, 2013). 15

Şekil 3.5: Aktif kontrol sisteminin şematik gösterimi (Okut 2006). 16

Şekil 3.6: Aktif kiriş kontrolü (Melik, 2002). 17

Şekil 3.7: Aktif kütle sönümleyici (AMD) (Okut, 2006). 18

Şekil 3.8: Aktif kütle sönümleyicisinin yapıda ilk kullanımı (Okut, 2006). 19

Şekil 3.9: Kütlelerin ivmelendirilmesi ile oluşan kuvvet çiftleri (Melik, 2002). 20

Şekil 3.10: Aktif rijitlik değiştirici (AVS) (Okut, 2006). 21

Şekil 3.11: Aktif viskoz sönümleyici (AVD) (Okut, 2006). 21

Şekil 3.12: Aktif viskoz sönümleyici (Okut, 2006). 22

Şekil 3.13: Yarı aktif hidrolik sönümleyici (Okut, 2006). 26

Şekil 3.14: MR doğrusal sönümleyici (Okut, 2006). 26

Şekil 3.15: Karma kütle sönümleyici (Okut, 2006). 28

Şekil 4.1: Tek serbestlik dereceli (SDOF) bir yapı üzerinde yer alan TMD gösterimi (Yücel ve diğ, 2019). 31

Şekil 4.2: Yapıyı etkileyen kuvvetler (Yücel ve diğ, 2019). 32

Şekil 4.3: TMD barındıran MDOF yapı sistemi (Bekdaş ve Niğdeli, 2013). 34

Şekil 4.4: Tasarlanan bina planı. 48

Şekil 4.5: SAP2000 yapısal analiz programının kütüphanesinde mevcut olan ALTADENA deprem kaydı. 49

Şekil 4.6: SAP2000 yapısal analiz programında deprem kaydının eklenmesi ve ayarlanması. 50

Şekil 4.7: Bina üst katında ayarlanmış kütle damper yüksekliğinin konumu. 51

Şekil 4.8: TMD sistem karşılaştırması yapılması için tasarlanan yapı. 51

Şekil 4.9: Uygulamada linklerin değerlerini girilmesi gereken bölüm. 52

Şekil 4.10: Meydana gelen kat kesme kuvvetleri. 54

Şekil 4.11: Meydana gelen taban kesme kuvvetleri. 55

Şekil 4.12: En üst katta ölçülen maksimum ve minimum deplasman değerleri. 56

Şekil 4.13: Deprem kaydı altında bina yapısının TMD sistemsiz davranışı. 57

Şekil 4.14: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının Den Hartog parametrelerine göre davranışı 58

Şekil 4.15: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının, Sadek ve diğ. (1997) tarafından belirtilen parametrelere göre davranışı. 58

Şekil 4.16: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının Warburton parametrelerine göre davranışı. 59

Şekil 4.17: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının Yapay Zekâ 1 doğrusal denklem parametrelerine göre davranışı. 60

Şekil 4.18: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının, Yapay Zekâ 2 polinom denklem parametrelerine göre davranışı. 60

Şekil 4.19: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının, Yapay Zekâ 3 üstel denklem parametrelerine göre davranışı. 61

Şekil 4.20: Devrilme momentlerin alansal gösterimi. 62

Şekil 4.21: Doğal frekans karşılaştırılması. 63

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Parametrelerin TMD ve yapı için gösterimi (Yücel ve diğ, 2019).....31

Tablo 4.2: Bina yapısı hakkında teknik bilgiler.....50

Tablo 4.3: TMD eklenen 4 katlı bina yapısı için optimum sonuçlar. 53

Tablo 5.1: TMD eklenen 4 katlı bina yapısı için optimum sonuçlar ve maksimum yapı tepkileri. 65

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: İvme
C	: Sönüm Matrisi
C_d	: TMD Sönüm Değeri
c	: Yapının Sönüm Değeri
Fi	: Atalet Kuvveti
F(t)	: Dış Uyarım
F_d	: Sönümleme Kuvveti
F_s	: Rijitlik Kuvveti
F_u	: Elemana Ait Kapasite Kuvvetini
FV	: Aday Çiçek Vektörleri
F_y	: Elastik Davranış Sınır Değeri
f	: Yapı Frekansı
f_d	: TMD Frekansı
f_{opt}	: Optimum Frekans Oranı
K	: Rijitlik Matrisi
k	: Yapı Rijitlik Katsayısı
k_d	: TMD Rijitlik Katsayısı
M	: Kütle Matrisi
m	: Yapı Kütlesi
m_d	: TMD Kütlesi
T_s	: Doğal Periyot
U_U	: F_u ya Karşı Gelen Maksimum Yer Değiştirme
U_y	: Elastik Davranışa Karşın Yer Değiştirme
x	: Yapının Yere Göre Yatay Deplasmanı
x_d	: TMD'nin Yere Göre Yatay Deplasmanı
$\dot{x}$	: Yapı Hızı
$\dot{x}_d$	: TMD'nin Hızı
$\ddot{x}$	: Yapı İvmesi

$\ddot{x}_d$: TMD'nin İvmesi

$\ddot{x}_t$: Yapının İvmesi

μ : Kütle Oranı

ξ : Yapının Sönüm Oranı

$\xi_{d,opt}$: Optimum TMD Sönüm Oranı

ξ_d : TMD'nin Sönüm Oranı

ω : Yapının Açısal Frekansı

ω_d : TMD'nin Açısal Frekansı

$\omega_{d,opt}$: TMD'nin Optimum Açısal Frekansı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI YÖNTEMLER İLE AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ İLE YAPILARIN KONTROLÜ

Pouya Mohammadi Khojasteh PAREH

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ

Yapılar tasarlanırken kullanılan yöntemlerin temelinde genellikle can güvenliği ve yapının amacına uygun ve istenilen nitelikte kullanılabilirliği yer alır. Bir yapının kullanım süresi boyunca birden fazla kez karşılaşmayacağı ve yapının ağır hasarlar alması, toptan göçmesi ve can kaybına neden olan kuvvetli dinamik etkilerle ilişkisi ile can güvenliği seviyesi ilişkilidir. Kullanılabilirlik durumuna da bakacak olursak, yapının birkaç kez karşılaşabileceği orta kuvvetli dinamik etkilerle ilişkilidir. Hizmet yükleri için, yapı kullanılabilirliğinin ötesine geçmemeli, aynı zamanda yapının iletmiş olduğu titreşimler yaşam konforunu ve yapı malzeme konforu limitlerini aşmamalıdır.

Can güvenliği, yapı elemanları dayanımının kuvvetli dinamik etkilerin talebinden daha fazla olması ile sağlanır. Öncelikle yapı gereken kapasiteyi sağlayacak şekilde boyutlandırılır. Sonrasında ise doğrusal davranış, rijitlik özellikleri gibi sınır değerlerin zorlamaları kontrol edilir. Bu yaklaşım, yapısal elemanların dayanım gereksinimine göre tasarlandığından beri kuvvet odaklı tasarımı temel almıştır.

Günümüzde birçok deprem yönetmeliğinin temelini kuvvet esaslı tasarım oluşturmaktadır. Bununla birlikte, son zamanlarda bu yaklaşımın verimliliğinin sınırlandığı gelişmeler görülmektedir. İlk olarak, uzun açıklıklı ve eğilimin yüksek olduğu yapılar gibi daha esnek yapılara yönelmesi ile daha büyük yer değiştirmeler meydana gelmektedir. İkinci olarak, nükleer tesisler ve uzay platformları gibi stratejik yapıların geleneksel yapılara kıyasla yer değiştirme sınırının az olmasıdır. Üçüncü olarak, malzeme ve mühendislik alanındaki

gelişmeler ile yapı malzemelerinin mukavemetinde ciddi bir artış olmaktadır; ancak aynı oranda elastisite modülleri artmamaktadır. Bundan dolayı yeni malzemeler ile yapılan yapılarda şiddetli yükler karşısında istenmeyen hareketler ile karşılaşılmaktadır. Dördüncü olarak, son depremlerden kazanılan tecrübelere göre, elastik olmayan yer değiştirmelerin getirdiği hasarların elastik yer değiştirmelerin getirdiği hasarlardan çok daha fazla olmasıdır. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda geleneksel tasarıma yaklaşımın azaldığı; yapıların dinamik yükler karşısındaki yanıtının enerji yutucu ve sönümleyici cihazlarla kontrol edilmesi durumu ortaya çıkmıştır. Hareket esaslı bu tasarım, alternatif bir tasarım olgusudur. Bu yaklaşımın asıl amacına bakacak olursak; yer değiştirme ve ivmeli hareketler gibi durumları kısıtlamaktır.

Bu tez çalışmasında deprem etkilerinin azaltılması için ayarlı kütle sönümleyicilerinin kullanılması gerçek boyutlu bir çerçeve üzerinde denenmiştir. Modellenen yapıda kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum değerleri klasik ve yapay zekâ denklemleri ile elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Aralık 2022, 99 sayfa.

Anahtar kelimeler: Ayarlı Kütle Sönümleyici, Optimum TMD Tasarımı, Sönümleyicilerin Kontrolü

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

CONTROL OF STRUCTURES WITH MASS DAMPERS TUNED BY DIFFERENT METHODS

Pouya Mohammadi Khojasteh PAREH

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ

The basis of the methods used while designing the buildings is generally the safety of life and the usability of the building in accordance with its purpose and in the desired quality. The level of life safety is related to the relationship that a structure will not encounter more than once during its lifetime, and that the structure receives heavy damage, collapses and is associated with strong dynamic effects that cause loss of life. If we also look at the usability situation, it is associated with moderately strong dynamic effects that the structure may encounter several times. For service loads, the structure should not go beyond its usability, and at the same time, the vibrations transmitted by the structure should not exceed the living comfort and building material comfort limits.

Life safety is ensured by the strength of building elements being higher than the demand of strong dynamic effects. First, the structure is sized to provide the required bearing capacity. Afterwards, the strains of limit values such as linear behavior and stiffness properties are checked. This approach is based on force-oriented design since structural members are designed according to the strength requirement.

Today, force-based design is the basis of many earthquake codes. However, there have been recent developments that limit the efficiency of this approach. First, greater displacements occur with increasing orientation to more flexible structures, such as long span structures and high slope structures. Second, strategic structures such as nuclear facilities and space platforms have less displacement than conventional structures. Thirdly, with the

developments in the field of materials and engineering, there is a serious increase in the strength of the building material; however, the modulus of elasticity does not increase at the same rate. For this reason, undesirable movements are encountered in the face of heavy loads in structures made with new materials. Fourth, according to the experience gained from recent earthquakes, the damage caused by inelastic displacements is much greater than the damage caused by elastic displacements. Considering these situations, the approach to traditional design has decreased; It has emerged that the response of structures to dynamic loads is controlled by energy absorbing and absorbing devices. This motion-based design is an alternative design phenomenon. If we look at the main purpose of this approach; is to limit conditions such as displacement and accelerated movements.

In this study, the use of tuned mass dampers to reduce earthquake effects has been tested on a full-size frame. The optimum design values of the tuned mass dampers used in the modeled structure were obtained and compared with the classical and artificial intelligence equations.

December 2022, 99 pages.

Keywords: Tuned Mass Damper, Optimum TMD Design, Control of Tuned Mass Dampers

1. GİRİŞ

Günümüz şartlarına gelene kadar uzun yıllardır mühendisler yapıların karşılaşabileceği tüm olumsuzlukları yok etmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu olumsuzluklar genellikle deprem yüklerinden rüzgâr yüklerinden ve benzeri kuvvetli dinamik yüklerden kaynaklanmaktadırlar. Tasarım esnasında, yapıya etkiyen bu yüklerin gerçek değerlerini tam anlamıyla saptamak mümkün değildir. Ancak belli başlı istatistiksel yöntemlerle bu yüklerin yakın değerinin, belirlenmiş bir sınır değeri aşma olasılığı ve oluşum sıklığı hesaplanabilir. Bu yöntemlerden elde edilen veriler bölgesel olarak değişiklik göstermektedir. Bunun nedeni yapının inşa edildiği coğrafi konumu sebebiyle deprem yüklerinden sıcaklığa, yağıştan kullanılan malzemeye değin farklılıkların ortaya çıkmasıdır göstermektedir. Bu olumsuzlukları gidermek adına (en çok olumsuzluk yaratan nokta depremlerdir ya da yapının deprem etkileri için doğru yöntemlerle tasarlanmamasıdır) deprem yönetmelikleri oluşturulmuştur. Ancak bir yönetmelik ne kadar çok düzenlensin yahut ne kadar çok test edilsin muhakkak tasarımcının yanılacağı noktalar da olacaktır. Bunun canlı örneği 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde görülmüştür. Sebebi ise deprem şiddetinin tahmin edilenden daha büyük gelebiliyor olmasıdır.

Yapıların karşılaşacakları kuvvetler karşısında hasar görmesini engellemek ya da hasarı en aza indirmek için imalat metotlarının yanında malzeme teknolojisi de gelişim göstermektedir. Bu gelişim ile malzemelerin mukavemeti artış gösterirken ne yazık ki elastisite modülleri aynı oranda artmamaktadır. Bunun sonucunda ise yapılan yeni yapılar daha sağlam olmakla birlikte gereğinden fazla esnek olmaktadırlar. Bu sebeple şiddetli yüklere maruz kalan yapılarda yer değiştirmeler çok fazla olmaktadır. Bu durum da yeni bir ihtiyacı doğurmuştur. Bu da yapı kontrolü düşüncesinin doğmasına neden olmuştur.

Yapısal kontrolün amacı yapıya dışarıdan etkiyen kuvvetler nedeniyle yapıya gelen enerji sonucunda oluşan kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri daha önceden belirlenmiş sınırlar içerisinde tutmak ve yapının bu etkiler karşısında zarar görmemesini veya en aza indirgenmiş şekilde zarar görmesini sağlamaya çalışmaktır. Bir nevi yapının korunmasını sağlamaktır. Yapının korunması için yapılan araştırmalar, testler ve deneyler sonucunda yapısal kontrol

sistemleri gelişimini sürdürmüştür ki günümüzde de hala gelişimini sürdürmeye ve devam etmektedir.

Yapısal kontrol sistemlerini dört ana başlık altında incelenebilirler inceleyeceğiz. Bunlar:

- Pasif Kontrol,
- Aktif Kontrol,
- Yarı Aktif Kontrol,
- Karma Kontrol

sistemleridir.

Pasif kontrol sistemleri genellikle yapının dışarıdan gelecek olan kuvvetlere karşı dayanımını arttırmak için geliştirilen; yapıya ilave olarak yerleştirilen, geliştirilmiş özel elemanlardır. Bu elemanlar faaliyete geçmek için dışarıdan herhangi bir aktifleştirme gücüne ihtiyaç duymazlar. Yapı ile bir bütün olarak dışarıdan gelen dinamik yüklere karşı hareket ederler (Okut, 2006).

Pasif kontrol sistemleri üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalara baktığımız zaman onları sismik yalıtma sistemleri ve pasif enerji sönümleyiciler başlıkları altında iki grupta incelemek mümkündür. Sismik yalıtma sistemleri; yapıya zeminden gelen titreşimleri izole etmek için geliştirilen cihazlardır. Bu nedenle yapı ile zemin arasına yerleştirilirler. Pasif enerji sönümleyiciler ise; sistemin içerisine ilave edilen cihazlar sayesinde sistemin dinamik yükleri absorbe eder (sönümler) ve yapının enerji yutma kapasitesini arttırır (Bakioğlu, 2005).

Aktif kontrol sistemleri faaliyete girebilmek için dış enerji kaynaklarına ihtiyaç duyar. Sistem dışarıdan gelebilecek her türlü etkiye karşı önceden kodlanır ve hangi yüke ne tepki vereceği belirlenir. Gelen bir yükte önceden belirlenen tüm yöntemleri kullanarak kontrolü sağlarlar. Dışarıdan gelen kuvvetler, sistemin enerjisini arttırdığı gibi sistemdeki enerjinin azalmasına da (ısı gibi başka enerji formlarına dönüşmesine) neden olur (Bakioğlu, 2005).

Yarı aktif kontrol elemanları, kontrol edilebilen pasif elemanlar olarak görülürler. Yapıların dışarıdan gelen dinamik yüklere karşı korunmasında aktif ve pasif kontrol

sistemlerinin bir araya getirilip en önemli özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşurlar. Yarı aktif kontrol sistemleri içeriğindeki özellikleri sebebi ile bir nevi aktif kontrol sistemleri olarak da değerlendirilebilir. Ancak aktifleşmek için ihtiyaç duyduğu dış enerjinin büyüklüğü, aktif kontrol sistemlerine kıyasla daha az olduğundan enerji açısından kullanımda fayda sağlar (Okut, 2006).

Karma kontrol sistemleri ise adından da anlaşılacağı üzere aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir arada karma olarak kullanılmasıyla oluşur. Dolayısı ile daha geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Aktif ve pasif kontrol sistemlerinin ayrı ayrı kullanıldığında oluşan dezavantajları birlikte kullanıldıklarında ortadan kaldırmaktadırlar (Okut, 2006).

2. YAPILAR

Yapı; barınma ya da günlük yaşamımızda gördüğümüz köprüler, tüneller, iş merkezleri, fabrikalar vb. gibi ihtiyaçlarımızı gidermek için yapılmış tüm mimari yapıtlardır. Hayatımızın tüm alanını kapsadığından dolayı yapılarda konfor ve güvenlik çok önem taşıyan iki unsurdur. Dolayısı ile bir yapı tasarlanırken hem hesaplı hem de kaliteli olmasına özen gösterilmelidir. Yapının ömrünün uzun olmasını sağlamak adına bazı tasarım metotları geliştirilmiştir. Bu metotlar yapı tasarlanırken kullanılacak malzemelerden tutunda yapıda hangi parçanın nereye konulacağına değin her şeyi kapsamaktadır.

Geçmişe baktığımızda bu metotların sağlamasını yapmak pek de kolay olmamaktaydı. Çünkü gerekli hesaplamaları bilgisayar ortamında yapmak gerekmekteydi ve teknolojinin çok da ilerlememiş olması sebebi ile basit bir statik analizi yapmak bile bazen günleri almakta iken günümüzde bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişmesi ile bir yapının analizi program işletilmeye başlatıldıktan kısa bir süre sonra çözümlenmektedir.

Teknolojinin bu denli gelişmesi statik yükleri hemen hesaplamakla kalmamış aynı zamanda daha karmaşık dinamik analiz metotlarının gelişmesine de neden olmuştur.

Son zamanlarda yapıların karşılaştıkları yükler karşısında verdikleri tepkiler araştırılıp türlü türlü metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmalar hız kesmeden, hatta hızına hız katarak devam etmektedir. Bu metotlar hakkında bilgi sahibi olabilmek adına geleneksel ve modern yapıları incelemek bizlere yardımcı olacaktır.

2.1. GELENEKSEL YAPILAR

Bir yapı tasarlanırken, kullanım amacına uygun ve ekonomik olmasına özen gösterilir. Bunun yanında binanın yeteri sağlamlıkta olmasına, çatlama ve yer değiştirmeler gibi unsurlar göz önüne alınarak tasarlanmasına ve malzeme seçimine dikkat edilmesi gerekir (Celep ve Kumbasar, 2004). Yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde deprem şiddetine karşı hasarsız olarak karşı koyabilecek; genellikle orta yükseklikte veya yüksek yapılar yapmak çok maliyet olduğundan dolayı neredeyse imkansızdır. Geleneksel yapı anlayışına göre elastik sınır değeri ötesi davranışlarda kontrollü hasar; deprem enerjisini sönümleme, göçme olasılığını azaltma

gibi faydalar sağlar. Bu yaklaşım birçok can kurtarmıştır. Ama yetersiz olduğundan dolayı binlerce yapının ağır hasarlar almasına hatta göçmesine engel olamamıştır. Bu facialar ekonomik ve sosyal hayata ağır darbe vurmaktadır.

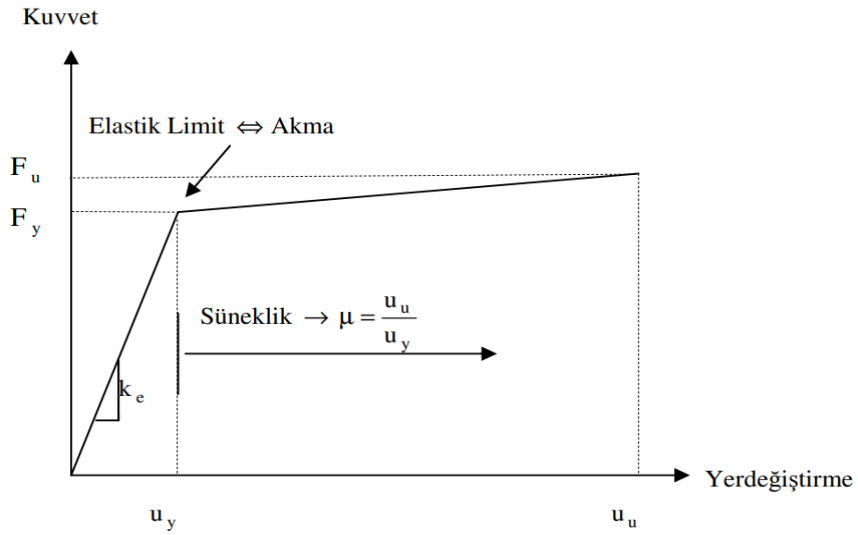
Geleneksel yapı tasarım anlayışının temelinde:

- Hafif şiddetli depremleri hasarsız olarak atlatma,
- Orta şiddetli depremleri onarılabilecek hasarlarla atlatma,
- Şiddetli depremleri de can kaybını önlemek amacı ile yapının göçmesine engel olarak atlatma (ABYYHY, 1998)

yatmaktadır.

Bu üç durum yapı ömrü ve/veya beklenen depremin beklenenden daha şiddetli olma olasılığıyla; depremin tekrarlanma periyoduyla kontrol edilmektedir.

Geleneksel tasarım anlayışının avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Şiddetli depreme karşı koyabilecek bir yapı yapmak mümkün fakat çok pahalıdır. Bundan dolayı şiddetli deprem etkisinin; yapının, elastik davranışından daha fazla şekil değiştirerek yapının hasar görmemesi öngörülür. Böyle bir durum neticesinde elastik olmayan davranış; yani süneklik önem kazanır. Bu durumda yönetmeliğin izin verdiği sınırlar doğrultusunda süneklik kullanılır. Süneklik; yapının elastik davranışının ötesindeki yer değiştirmeleri gerçekleştirebilme kapasitesinin ölçüsüdür. Elastiklik ve süneklik üzerine yapılan araştırmalar dahilinde aşağıdaki Şekil 2.1 oluşturulmuştur.



Şekil 2.1: Çift doğrultulu kuvvet- yer değiştirme ilişkisi (Okut, 2006).

Şekilde görüldüğü üzere elastik sınır aşıldığı zaman, en ufak bir kuvvet ile karşı karşıya kalan yapıda çok büyük yer değiştirmeler meydana gelir.

F_y = Elastik davranış sınır değeri (Akma başlangıcı)

u_y = Elastik davranışa karşın yer değiştirme

F_u = Elemana ait kapasite kuvvetini

u_u = F_u ya karşı gelen maksimum yer değiştirme

Elastik sınır değeri (F_y); yük etkisi ortadan kalktığı zaman eski haline dönülebilen sınır değeridir. Bu değer aşıldığı zaman sünek bölgeye geçiş olur. Bu bölge ise elemanda akmadan sonra kalıcı şekil değiştirmelerin oluşması anlamına gelmektedir. Bu durum yapının taşıma gücünün azaldığı, yüklere karşı dayanma kapasitesinin tükenmekte olduğu anlamına gelir (Kelly ve Trevor, 2001).

Depreme etkisi altında karşı yapıların ayakta kalabilmeleri veya hasar görmemeleri için deprem enerjisi tüketmeleri ya da deprem kuvvetine karşı daha güçlü olmaları gerekir. Bu amaçla kullanılan tasarım metotları mukavemeti yüksek malzemeler kullanmak, elastisitesi yüksek yapılar yapmak, daha sünek yapılar yapmak, daha alçak yükseklikte yapılar yapmak gibi olanaklar içerirler. Ancak bu metotların bazı dezavantajları mevcuttur. Bunlar; bazen

yüksek maliyet, bazen onarılamayacak hasarlar, bazen yüksek kat ivmelerine vb. sonuçları doğurur.

Bir yapının ivmeli hareketini ve yer değiştirmesini sınırlayan en önemli özellik enerji sönümlemesidir. Ancak klasik betonarme yapılarda sönüm oranı ne yazık ki %5'dir. Bu oranı yükseltmek için sönüm cihazlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bir binadan deprem karşısında istenilen etkiyi alabilmek adına bazen binanın periyodu (rijitliği), bazen sönümü bazen de her ikisini birden arttırmak gerekir. Sönümün ya da periyodun artması demek etkiyen deprem kuvvetinin azalması demektir. Bu sebeple en iyi performansı sağlamak adına ikisini birden arttırmak gerekmektedir.

Sönümleme türleri:

- Sürtünme türü sönümleyiciler,
- Viskoz sönümleyiciler,
- Ayarlı kütle sönümleyiciler

olarak ele alınabilir.

Sönümlemede kullanılan yollar ise:

- Deplasmana bağlı doğrusal olmayan davranış ile sönümleme
- Deplasmanın hızına bağlı sönümlemedir.

Özetlemek gerekirse; geleneksel yapı tasarım anlayışına göre yapılar zemin ile bir bütün olarak kabul edilir. Taşıyıcı sistem elemanları boyutlandırılırken ve kullanılacak malzeme seçimi yapılırken; yapı-zemin bütünlüğü göz önüne alınarak, yapılan yapısal çözümlemelerden elde edilen kesit etkileri dikkate alınır.

Bilindiği üzere yapılarda deprem ve benzeri dinamik yükler yapıya ve/veya yapı elemanlarına direkt etkimekte, yapı ve/veya yapısal elemanların da bu yüklere karşı koyması beklenmektedir. Bu dinamik kuvvet karşısında yapı ve/veya yapı elemanları ya tam sünek ya da tam rijit bir davranış göstererek dinamik kuvvet etkilerine karşı yapıyı güvenli bölgede tutmaktadır.

Günümüzde yapıların tam sünek veya tam rijit davranış göstererek inşa edilmeleri mümkün değildir. Bunun sebebi ideal sünek malzemelerin olmaması ve ekonomik sebeplerdir. Bu nedenle yapılar belli bir sünekliği ve rijitliği sağlayacak şekilde inşa edilir. Bu durum dinamik etkilerin yapıda hasara yol açmasının önüne geçemez. Bazen yapı kullanılmaz hale gelebilir; bu durumda yüksek maliyetler ortaya çıkar. Her zaman yapıyı onarmak mümkün olamaz; yıkılıp tekrar inşa edilmesi gerekebilir. Depremden dolayı karşılaşılan olumsuzluklar, yapılarda karşılaşılan hasarlar vb. gibi durumlar; yapı tasarımında daha farklı metotlar, farklı malzemeler, daha uygun çözümler gibi düşüncelerin oluşmasına ve arayışın devamını sağlamıştır.

2.2. MODERN YAPILAR

Deprem kuvvetlerine karşı koyabilecek yapı tasarlanırken, binanın dayanımını daha da arttırmak yerine etkiyen deprem kuvvetlerinin şiddetlerini azaltma metodu da uygulanabilmektedir. Bu metot uygulanırken özel olarak tasarlanmış yapı elemanlarına ihtiyaç duyulur. Burada amaç; oluşan titreşimleri absorbe etmektir. Bu absorbe işlemi deprem yalıtımı ve enerji sönümlemesi yolu izlenerek yapılır. Bu metot, şiddetli depremlere karşı koymayı daha az maliyetle ve daha mümkün kılmaktadır.

Yer kabuğunda farklı farklı sebeplerle önüne geçilemeyen yırtılma ve kırılmalar oluşmaktadır. Bu durum enerji hareketinin oluşmasına sebep olur. Bu enerjinin yapıya büyük hasarlar vermemesi için yapılar tasarlanırken bu tür dinamik etkilere karşı koyabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu hasarlar, bazen ufak maliyetler ile karşılanırken bazen çok büyük maliyetler gerektirmekle birlikte can kaybına yol açarlar. Bu durumları yaşamamak adına tasarım mühendisleri deprem vb. dinamik etkilere karşı daha dirençli yapılar tasarlamak adına yapısal kontrol sistemleri geliştirmiştir (Soong, 1997).

Günümüzde en yaygın kullanılan sistemlerin başında TMD yani Tuned Mass Damper (Ayarlı Kütle Sönümleyicileri) gelmektedir. TMD yapıya sonradan ilave edilir. TMD, bir sönümleyici, bir yay ve bir de kütleye sahiptir. Yapılarda TMD kullanılmasının amacı ise istenmeyen titreşimleri azaltmaktır. Genelde yapının en üst katına yerleştirilirler.

TMD'ler yapıya birebir bağlanır ve beraber hareket ederler. TMD kurulurken dikkat edilmesi gereken hususlar arasında; kütlesinin yapı kütlesine oranının uygun olması ve yay kütle siteminin frekansının, yapının birinci modunun frekansına ayarlanması yer alır.

Titreşim kontrolü kavramı ilk olarak 1909 yılında Frahm tarafından, gemi makinelerinin omurgasındaki titreşim sorunu için kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılan sistemlerin başında Tuned Mass Damper (TMD) yani Ayarlı Kütle Sönümleyicileri gelmektedir. TMD kullanımı üzerindeki çalışmaları başlatan kişi ise 1928'de Ormondroyd ve Den Hartog'dur (Soong, 1997). TMD yapıya sonradan ilave edilir. TMD, bir sönümleyici, bir yay ve bir de kütleye sahiptir. Yapılarda TMD kullanılmasının amacı istenmeyen titreşimleri azaltmaktır. TMD'ler genelde yapının en üst katına yerleştirilirler.

TMD'ler yapıya birebir bağlanır ve yapıyla beraber hareket ederler. TMD kurulurken dikkat edilmesi gereken hususlar arasında; kütlesinin yapı kütlesine oranının uygun olması ve yay kütle siteminin frekansının, yapının birinci modunun frekansına uygun olarak ayarlanması yer alır.

3. DİNAMİK YÜKLER KARŞISINDA YAPILARIN DAVRANIŞ KONTROLÜ

3.1. YAPISAL KONTROL

Yapılar tasarlanırken öncelikle etkiyen düşey yükler göz önüne alınır. Bu yükler sabittir ve değerlerini bulmak oldukça basittir. Bu yükler hesaplanırken zamana bağlı değişimi ihmal edilerek statik idealleştirme yapılır ve bu yöntem yaygın olarak kullanılır. Statik idealleştirme yapı tasarımında çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Geçmiş dönemlere bakacak olursak; bilimsel esasların gelişmemiş olduğu çağlarda tasarlanıp inşa edilen yapıların temelinde statik idealleştirme yatmaktadır.

Tasarımdan sonra yatay yükler göz önüne alınır. Bu yükleri hesaplamak için de statik idealleştirmeden faydalanılır. Bu durum hesaplanırken rüzgâr ve deprem yükleri yerine bu yüklere tekabül eden statik eş değer kuvvetler hesaba koyulur. Günümüze dek birçok yönetmelik bu yaklaşımı baz alarak oluşturulmuş ve bu yöntemle inşa edilen yapılar olumlu sonuçlar vermiştir.

Dinamik kuvvetler incelenerek, yapıları korumak adına günümüze dek pek çok teori öne sürülmüş, deneyler yapılmış ve olumlu sonuçlarda birçoğu pratiğe geçmiş; şu anda da hayatımızın birçok noktasında yer almaktadır ve her geçen gün gelişmeye devam etmektedir. En yaygın kullanılan yöntem; dış yüklerin yapı üzerindeki etkisini azaltmak için, yapıya eleman ilave etmektir. Bu konu ile ‘Yapısal Kontrol’ mühendislik dalı ilgilenmektedir.

Yapıya ek olarak ilave edilen elemanlar; yapıya etki eden deprem, rüzgâr, makine titreşimleri vb. gibi dış kuvvetlerin etkilerini sensörler ile algılayıp yapıya gerekli kuvveti uygulayarak rijitliğini sağlar ve yapının gelen dış yükler karşısında dayanımını arttırır. Bu durumu daha basit bir şekilde anlatmak gerekirse, otobüste ayakta giden bir yolcunun ani frenle verdiği refleks örnek olarak verebilir.

Yapı malzemeleri geliştirilirken, dayanımları artarken rijitliklerindeki artış ne yazık ki mukavemetindeki artıştan geri kalmaktadır. Dolayısı ile bu malzemeler ile inşa edilen yapılar, önceki yapılara göre daha esnek olmaktadır.

Bu gelişim ile malzeme dayanımları artmış; bu durum da daha yüksek yapıların inşa edilmesini sağlamıştır. Ancak yapı yükseldikçe üst katlardaki yer değiştirmeler de artış göstermektedir. Bu durum başka problemlerin de doğmasına sebep olmaktadır.

Bazı yapıların deprem karşısında en üst düzeyde korunması gerekmektedir. Bu yapılar hastaneler, afet kontrol merkezleri, haberleşme binaları, nükleer santraller, petrokimya tesisleri vb. gibi yapılardır. Sebebi ise depremden hemen sonra işlevlerini hemen yapması ve içindeki önemli aletlerin korunmasıdır.

Yapılarda akıllı elemanların kullanılması fikrini 100 yıl önce Japonya'da yaşamış olan Prof. John Milne ortaya atmıştır. Milne küçük bir ahşap evi depremden izole edebilmek için metal bilyeler üzerine kurmuştur (Aldemir, 1999; Okut, 2006). Akıllı elemanların kullanımının teorik temellerini ise 1972 yılında J. P. Yao ortaya atmıştır (Bakioğlu, 2005; Okut, 2006).

3.2. KONTROL SİSTEMLERİ

Sistem, bir işi yapmak için, bir araya getirilip bütünlük sağlanan eleman topluluğudur. Sistemler etki-tepki prensibine göre çalışırlar.

Sistemin çalışması için dış tesirlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Sistemin tepkisinin istenilen değerin dışına çıkması istenmez. Tepki de etkiye bağlı olduğundan etkiyi kontrol etmek gerekir (Okut, 2006). Kontrol, sisteme eleman eklenmesi ile gerçekleşir.

Yukarıda görülen sistemde işlemin oluşması için oluşturulan bütün matematik işlem dizilerine ve bütün elemanlara 'kontrol çevrimi' denir. Bu çevrimde, çıkışın girişe etkisi yoktur. Bu tür sistemlere 'açık çevrim' denir. Açık çevrim sistemleri pasif olarak kontrol etmektedir. Bu sistemlerde istenilen çıkış ile sistemin çıkışı birbirine eşit olmayabilir.

Bunun nedeni ise sistemdeki belirsizlikler, beklenmeyen bozucu etkiler, teoride kabul edilen değerler vb. gibi faktörlerdir.

3.3. KONTROL ÇEŞİTLERİ

Kontrol çeşitleri dört ana grupta toplanır;

- Pasif Kontrol

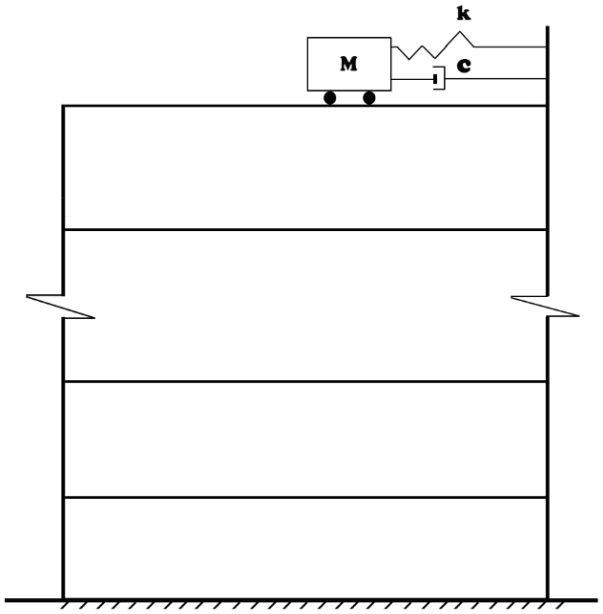
- Aktif Kontrol
- Yarı Aktif Kontrol
- Karma Kontrol

3.3.1. Pasif Kontrol

Bu sistemler; yapıya ek olarak yerleştirilen özel elemanlar yardımı ile deprem, rüzgâr vb. dinamik yükleri başka bir enerjiye dönüştürür veya absorbe ederler (Naimi ve Waheb, 2019; Öztürk, 2007). Amaç, yapının dış yüklere karşı dayanımını arttırmaktır. Bu sistemin hesabı kolay ve maliyeti diğer kontrol sistemlerine göre daha düşüktür. Bu sistemin aktive edilmesi için herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Dolayısı ile güç kesintilerinden etkilenmemektedirler. Bu sistemler yapıya gelen yüke tepki olarak karşı koyacak başka bir yük etkilerler.

3.3.1.1. Pasif ayarlı kütle sönümleyici (PTMD)

Şekil 3.1'de en üst katına PTMD yerleştirilmiş bir yapı yer almaktadır. Burada k, PTMD'nin rijitlik katsayısını; c, PTMD'nin sönüm katsayısını; m, PTMD'nin kütlesini ifade etmektedir. PTMD ve yapı aynı frekansta titreşerek enerjiyi sönümler. Genel dolarak PTMD'ler yapının birinci mod tepkilerini azaltmaya yönelik tasarlanırlar. Diğer modların tepkileri için ise aktif kontrol sistemlerine başvurulur.



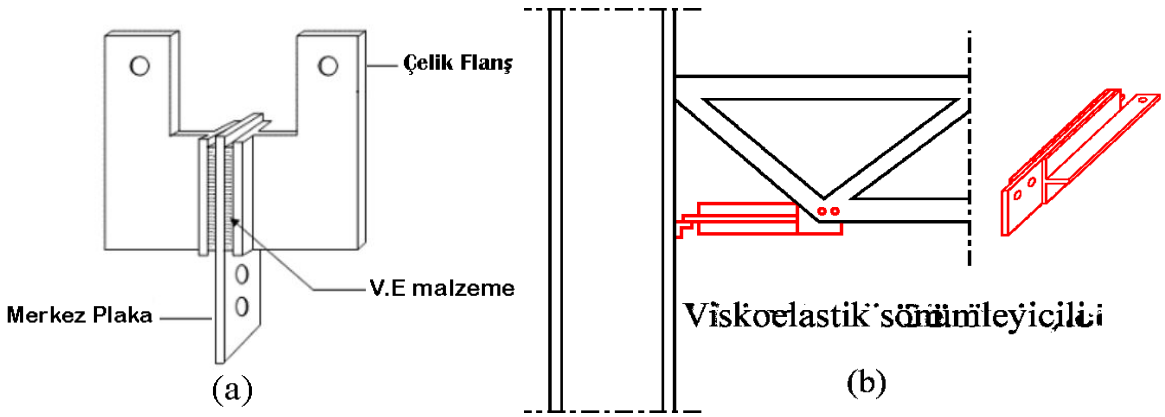
Şekil 3.1: En üst katına PTMD yerleştirilmiş yapı.

3.3.1.2. Ayarlı Sıvı Sönümleyici (TLD)

TLD'deler de TMD'ler ile aynı amacı güder yani yapısal titreşim enerjisini absorbe ederler. Genellikle yapının en üst katına yerleştirilirler. Bunun sebebi ise zeminden yükseklik arttıkça yapısal tepkiler de artmaktadır. Ayarlı sıvı sönümleyiciler, sıvı olarak su veya başka bir sıvı malzeme kullanabilmektedir. Deprem, rüzgâr vb. gibi dinamik etkilerin sebep olduğu titreşimler TLD'yi harekete geçirir ve bu hareket sonucunda hazne içerisindeki sıvı da harekete geçerek dinamik kuvvetlerin enerjisini sönümler (Hüsem ve Yozgat, 2005). Bu yöntem ilk olarak gemilerde kullanmaya başlanmış; 1980'lerde ise yapılarda kullanılmaya başlanmıştır (Moiseyev, 1952; Jamalabadi, 2020).

3.3.1.3. Viskoelastik Sönümleyiciler

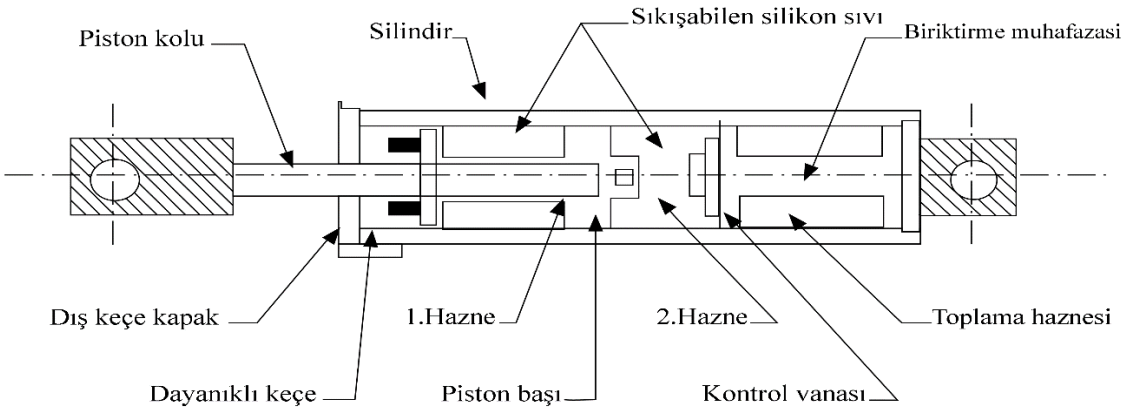
Bu sönümleyiciler; viskoelastik malzemelerin kesme şekil değiştirme yoluyla yapıya uygulanan titreşim enerjisini dağıtır. Titreşimden az etkilenen yapının verdiği tepki de az olur. Viskoelastik sönümleyicilerin avantajları; düşük maliyetle yüksek dayanım sağlayan, aynı zamanda imalatı kolay olan bir kontrol sitemi olmalarıdır. Fakat sıcaklıktan etkilenmesi gibi bir dezavantajları da mevcuttur. Dinamik yükler etkisi altında histerisis eğrisi elips olmasından dolayı enerji dağıtım kapasiteleri çok yüksektir (Chang ve diğ, 1994). Şekil 3.2'de viskoelastik sönümleyici ve detayını gösterilmiştir.



Şekil 3.2: a) Viskoelastik sönümleyici (Shedbale ve Muley, 2017); (b) Viskoelastik sönümleyici detayı.

3.3.1.4. Viskoz Sıvı Sönümleyici

Bu sönümleme sistemi çelik piston içerisindeki sıvı aracılığı ile çakışmaktadır. Bu sıvı akışkan silikon veya yağdır. Bu sönümleyicilerin yoğunluğu düşüktür, sıkıştırılamazlar, ısıya dayanıklıdırlar ve geniş frekans bandında çalışabilmektedirler. Bu durumlar yüksek avantaj sağlamaktadır. Genellikle askeri ve ağır sanayi alanlarında kullanılmaktadır (Kelly ve Trevor, 2001). Şekil 3.3'de viskoz sıvı sönümleyiciyi gösterilmiştir.



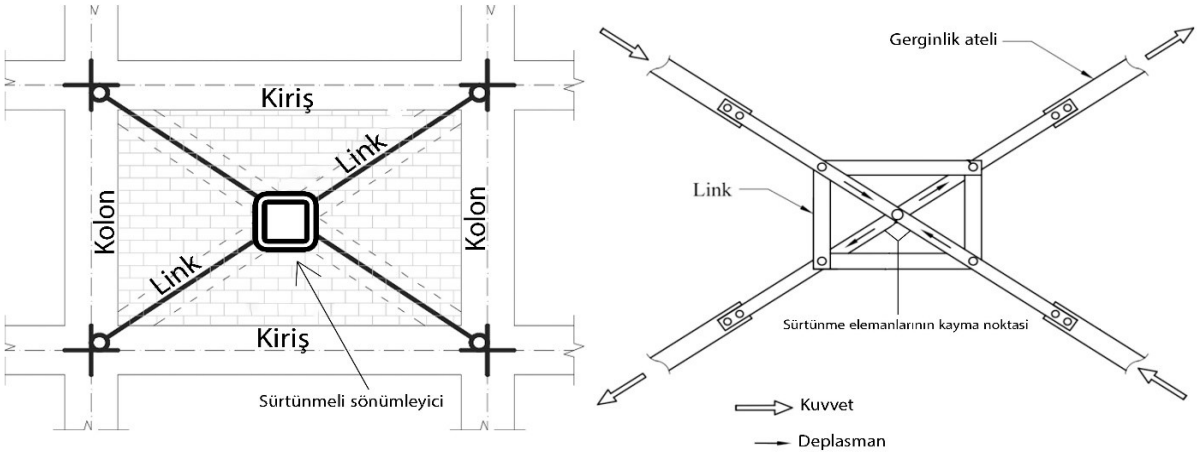
Şekil 3.3: Viskoz sıvı sönümleyici (Hüsem ve Yozgat, 2005).

3.3.1.5. Metalik Sönümleyiciler

Metalik sönümleyiciler, yapıya yerleştirildikten sonra elastik olmayan şekil değiştirmeler ile gelen enerjiyi dağıtırlar. Bu sönümleyicilerin çalışma prensibine bakacak olursak; gelen enerjinin belli bir noktada yoğunlaşması temeline dayanır. Bu yöntem ile taşıyıcıya kuvvet uygulanmadığından yapı zarar görmez. Ancak sönümleyici zarar görebilir. Bu durumda sönümleyici değiştirilebilir. Metelik sönümleyiciler; üçgen, dörtgen ve X şeklinde yumuşak çelik veya kurşundan tasarlanabilirler (Yetişken, 2016).

3.3.1.6. Sürtünmeli Sönümleyiciler

Yapı elemanları arasına yerleştirilerek kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürürler. Bu sönümleyicilerin çalışma sistemi sürtünme esaslıdır. Elemanlardaki kayma sürtünme kuvveti aracılığı ile sönüm sağlanır (Okut, 2006). En bilinen örneği X şeklindeki çubuklardan oluşan sürtünme prensibidir (Öztürk, 2007). Şekil 3.4'de görüldüğü gibi sisteme diyagonal değil de kirişlere paralel yerleştirilirler. Orta şiddetli rüzgâr ve deprem gibi dinamik yer hareketi etkilerinin sonucunda yapının kaymasına izin verilmeyecek şekilde tasarlanırlar. Sürtünmeli sönümleyiciler sıcaklık ve korozyondan etkilenirler. Sürtünmeli sönüm araçları, ucuz ve güvenilirlik değerinin yüksek olmasından dolayı yaygın olarak kullanılırlar.



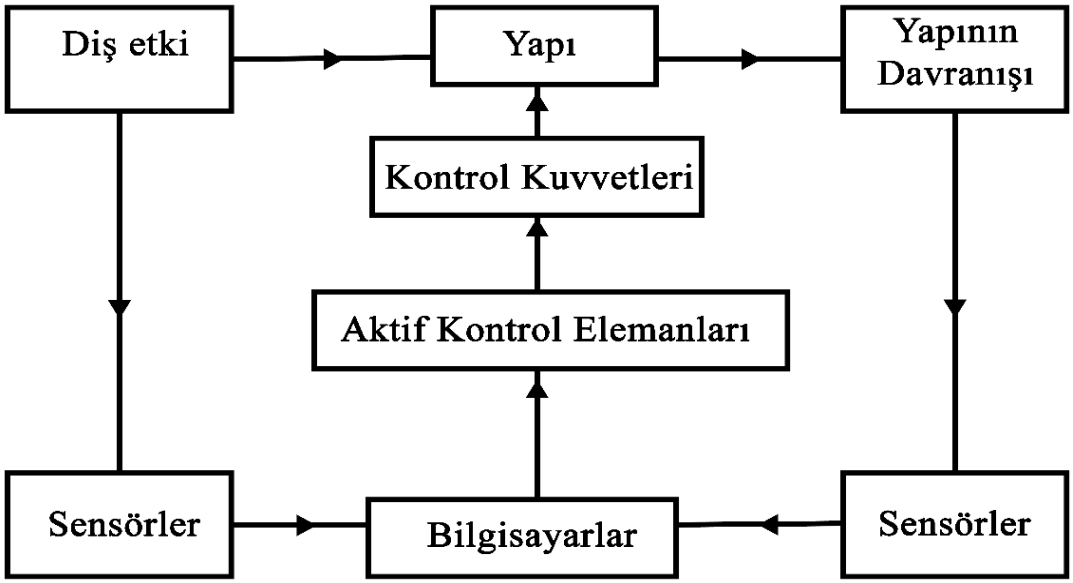
Şekil 3.4: Sürtünme tipi sönümleyici ve kuvvet deplasman şeması (Lima ve diğ, 2014; Zahraei ve diğ, 2013).

3.3.2. Aktif Kontrol

Aktif kontrol sistemleri, aktifleşebilmek için bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Dolayısı ile bu sistemleri aktive edebilmek için sistemde dış enerji kaynağı bulundurulmalıdır. Yapıya etkiyen dış kuvvetler, sisteme enerji aktaracağı gibi bazen de sistemdeki enerjiyi yutabilmektedir. Bu enerji yutma işlemi aslında yok etme değil de enerjiyi başka formlara çevirmedir.

Yapıya etkiyecek dış kuvvetler hiçbir zaman tam olarak bilinememektedir. Aktif kontrol sistemleri, yapıya etkiyen dış kuvvetlere karşın kontrol kuvvetlerini faaliyete geçirerek yapının dayanımını sağlar (Yao, 1972).

Aktif kontrol sistemlerin çalışma prensibi Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Aktif kontrol sisteminin şematik gösterimi (Okut 2006).

Aktif kontrol sisteminde ilk olarak dış etkileri ve yapı davranışını inceleyen sensörler bulunur. Bu sensörler mekanik sensörler, optik sensörler veya kimyasal sensörler olabilmektedirler. Ayrıca, bu sensörlerin uyarılarını değerlendiren elektronik cihazlar da bulunur. Bu cihazlar, önceden oluşturulan kontrol algoritmalarında sensörlerden gelen uyarıyı hesaplayarak uygulanacak olan kontrol kuvvetlerini belirler. Bu cihazlar genellikle bilgisayarlardır. Son olarak ise kontrol kuvvetlerini yapıya uygulayacak olan aktif kontrol elemanları devreye girerek yapının dengesini sağlayıp dayanımını arttırır.

Aktif kontrol sistemleri; yapıya etkiyen dış kuvvet olmadığı zaman faaliyete girmezler. Ne zaman ki dış kuvvetler yapıya etki ederse o zaman sensörler bu etkiye karşı oluşturulacak tepki kuvveti için ölçüm yapıp sisteme yollar. Özetle, bu kontrol sistemi ile yapının tepkisi her daim ölçülmekte, tepkiler ise kontrol kuvvetleri kullanılarak istenen değer aralığında tutulmaktadır. Kontrol sistemlerinde kullanılan algoritmalar, yapının rijitlik ve sönüm değerlerine göre her an değiştiği için, dış kuvvetlere karşın verilen tepki kuvveti yapıyı güvenli bölgede tutmaktadır (Bakioğlu ve Aldemir, 2001).

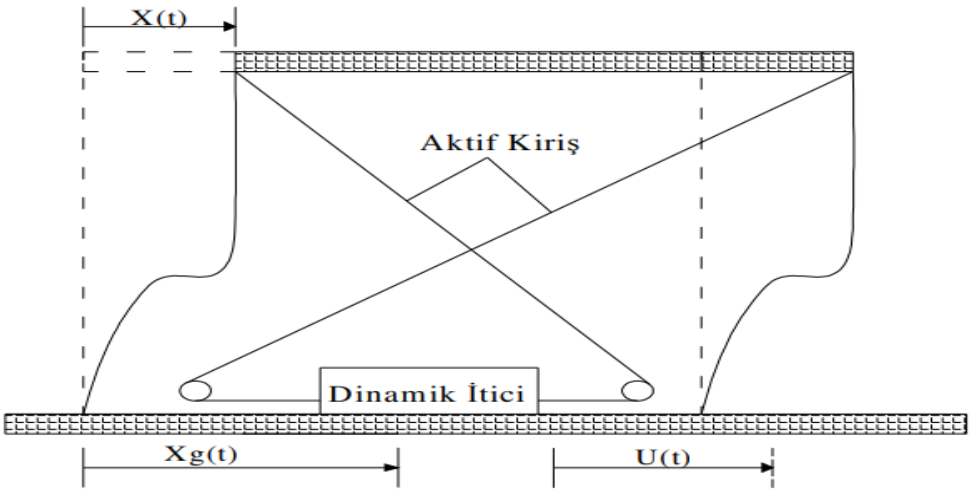
Günümüze dek yapıya etkiyen kuvvetler sonucunda belirlenen tepki kuvvetini uygulayacak birçok aktif kontrol sistemi geliştirilmiştir. En fazla kullanım alanına sahip olanları ise şunlardır:

- Aktif kiriş kontrolü

- Aktif kütle sönümleyicisi
- Yerçekimini harekete geçirici sistem
- Aktif rijitlik değiştirici
- Aktif viskoz sönümleyici

3.3.2.1. Aktif Kiriş Kontrolü

Aktif kiriş kontrol sistemi, elektro-hidrolik mekanizma tarafından gerilimi kontrol edilen yapılara bağlanmış, ön-germeli sistemlerden oluşmaktadır. Binanın çeşitli yerlerine sensörler yerleştirilir ve bu sensörler vasıtasıyla kontrol bilgisayarına sinyaller aktarılır. Bilgisayarda yüklü algoritmalar bu gelen sinyalleri değerlendirip gerekli tepki kuvvetini hesaplayarak dinamik iticiye sinyaller yardımı ile aktarır. Bu sinyalleri alan dinamik itici sinyaller doğrultusunda dışarıdan gelen etkiye karşı binaya tepki kuvvetleri uygulayarak binanın dayanımını sağlar. Bu kontrol sistemi binaya direkt olarak uygulanmaktadır. Şekil 3.6'de aktif kiriş kontrol sistemi verilmiştir.



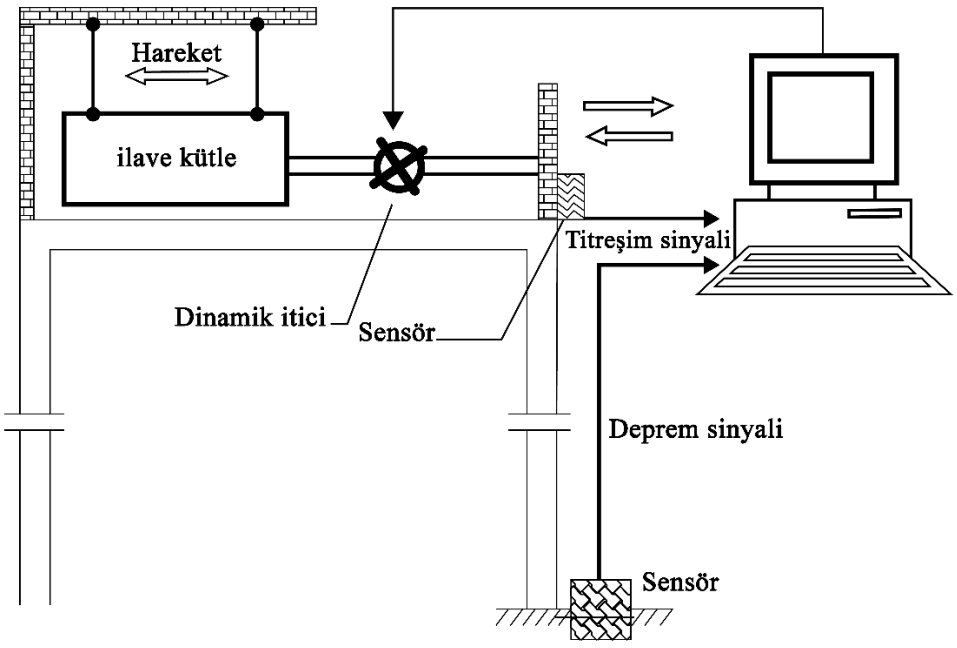
Şekil 3.6: Aktif kiriş kontrolü (Melik, 2002).

Bu kontrol sisteminin tercih edilmesinin sebeplerini ele alacak olursak; en önemlisi birçok binada var olmasıdır. Böylece ek olarak iyileştirme ve ek elemana ihtiyaç olmaz. Bu durum ise hem zamandan hem de maddiyattan tasarruf edilmesini sağlar. Bir diğer özelliği ise; sistem, hem devamlı-zaman hem de darbe modunda kullanılabilmektedir. Bundan dolayı sistem iki algoritmayı da içinde barındırır. Bu durum sürekli ve darbelere karşı yapıya koruma

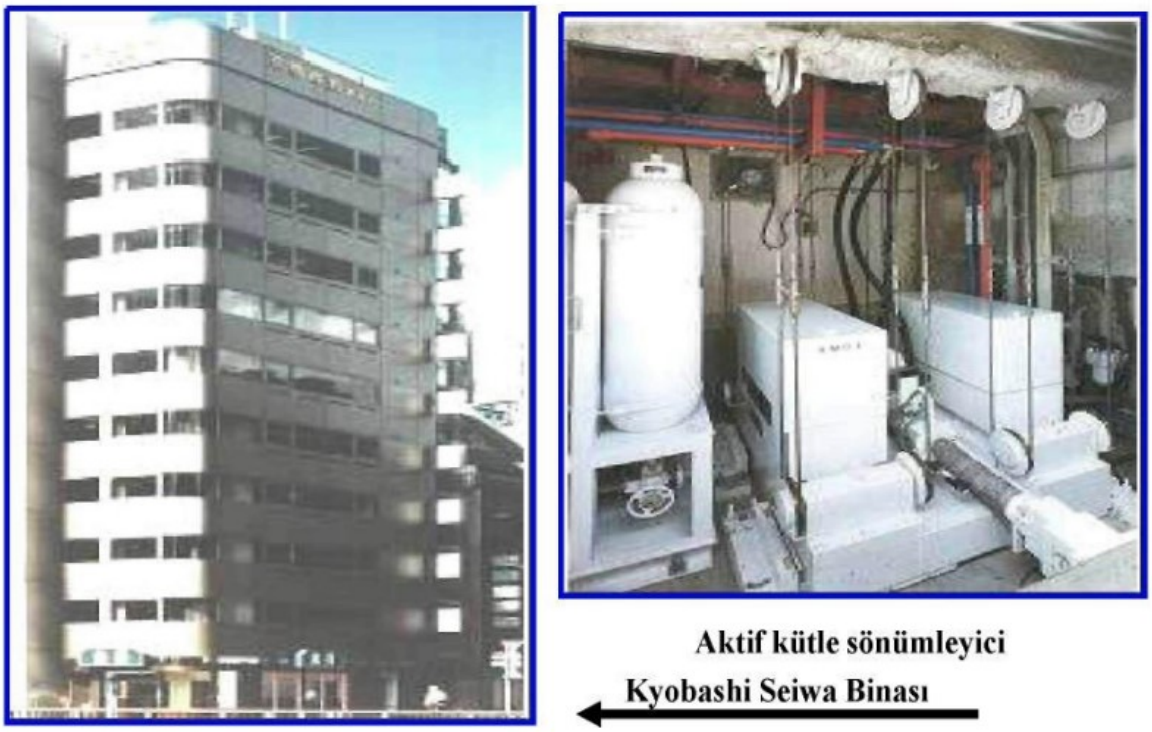
sağlar. Bu sistem narin yapılarda, yüksek yapılarda, deniz üstüne inşa edilen yapılarda, köprülerde vb. yerlerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Melik, 2002).

3.3.2.2. Aktif Kütle Sönümleyici

Aktif kütle sönümleyiciler çok sayıda farklı modlardaki dış etkiler için kullanılabilmektedir. Bu tür sistemler dinamik iticiler ve yardımcı kütlelerden oluşmaktadır. Yapıda farklı bölgelere sensörler yerleştirilir ve bu sensörler zemindeki ve yapıdaki titreşimleri algıladıkları an hesaplaması için kontrol cihazına gönderirler. Bu kontrol cihazları genellikle bilgisayar olmaktadır. Bu kontrol bilgisayarları ise gelen her sinyali inceler. Bu inceleme sonucunda ortaya çıkan analizler ile kontrol kuvvetleri belirlenir ve dinamik iticiye iletilir. Dinamik itici ise kontrol bilgisayarından aldığı değerleri baz alarak yardımcı kütleyi faaliyete geçirir. Bu şekilde hareket edilmesi sonucu yardımcı kütlede eylemsizlik kuvveti oluşur ve bu eylemsizlik kuvveti de yapıya etkiyen dış kuvvetlerin etkisini azaltır. Yardımcı kütleler yapı ağırlığının %1-%2'si kadar bir ağırlığa sahiptirler. Şekil 3.7'de aktif kütle sönümleyici sistemi verilmiştir. Şekil 3.8'de ise aktif kütle sönümleyicilerin yapısal bir sistemde ilk kez kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Aktif kütle sönümleyici (AMD) (Okut, 2006).

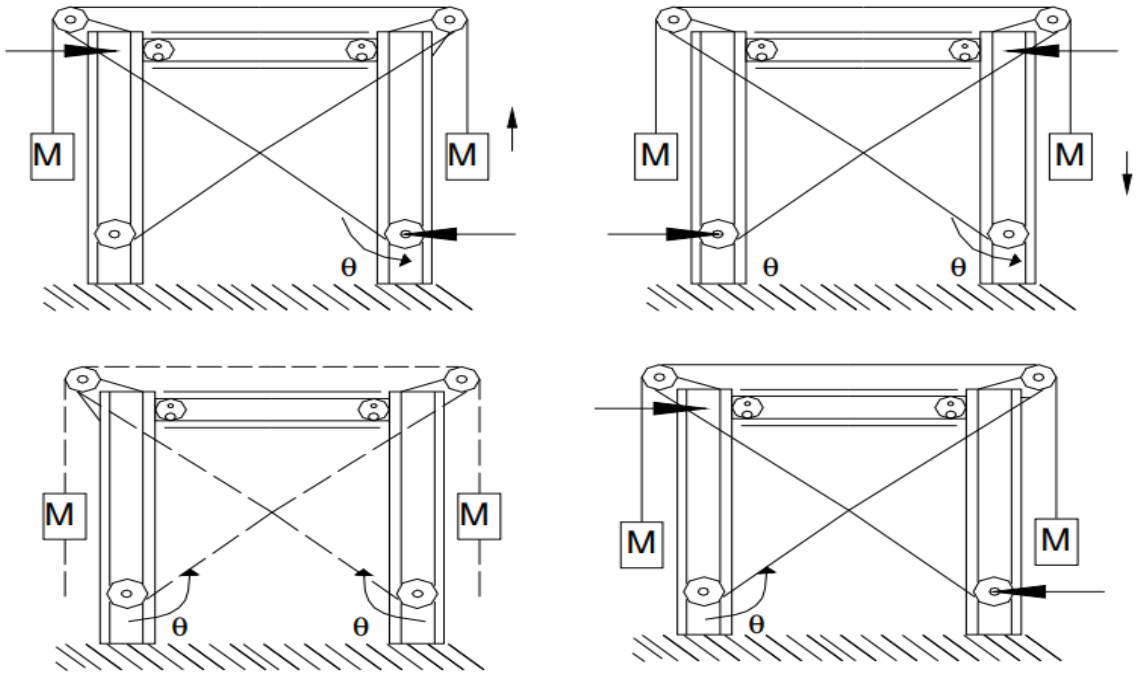


Şekil 3.8: Aktif kütle sönümleyicisinin yapıda ilk kullanımı (Okut, 2006).

Aktif kiriş kontrolünde, dinamik itici tarafından kontrol kuvveti direkt olarak uygulanırken; aktif kütle sönümleyicisinde, yardımcı kütlenin eylemsizlik kuvveti kontrol kuvveti olarak kullanılmaktadır. Bu iki sistemin benzer yönleri mevcuttur. İkisi de basit sistemlerdir ve çalıştırılmaları kolaydır. Fakat iki sistem de faaliyete geçebilmek için yapıda sürekli bulundurulması gereken dış enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu durum büyük yapılarda ve deprem şiddetinin yüksek olduğu anlarda sistemin faal olabilmesi için daha fazla dış enerjiye ihtiyaç olacağı anlamına gelmektedir. Bu ise büyük bir dezavantajdır (Melik, 2002).

3.3.2.3. Yerçekimini Harekete Geçirici Sistem

Bu kontrol sisteminin amacı yapıyı sismik etkiler karşısında minimum enerji kullanarak korumaktır. Bu sistemde bir adet dinamik itici ve iki adet de düşey yönde hareket eden yardımcı kütle mevcuttur. Sistemi kurarken kütleler elastik bir kablo ile bağlanır. Bu kablo üstte bulunan iki adet makaradan geçirildikten sonra altta bulunan makaralara bağlanmaktadır. Bu makaralarda, motor/fren ünitesi ve makaraya sarılmış kablo bulunur. Motor/fren ünitesi, makarayı harekete geçiren veya durdurabilen; yani yardımcı kütlenin hareketini kontrol eden ünitedir (Melik, 2002). Şekil 3.9'de kütlelerin ivmelendirilmesi ile oluşan kuvvet çiftleri gösterilmiştir.

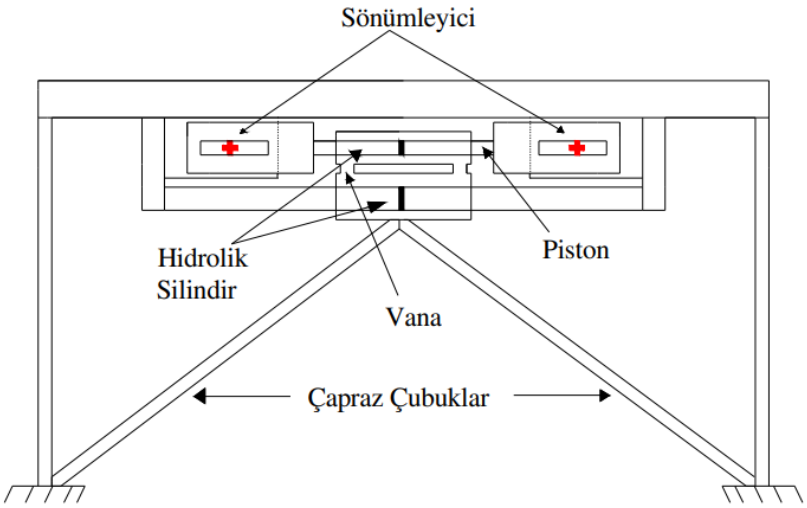


Şekil 3.9: Kütlelerin ivmelendirilmesi ile oluşan kuvvet çiftleri (Melik, 2002).

Burada, her iki yana yerleştirilen bu kütleler birbirine eşit olmalıdır ki kablolardaki gerilmeler de birbirine eşit olsun.

3.3.2.4. Aktif Rijitlik Değiştirici (AVS)

Aktif rijitlik değiştirici sisteminin rijitliği, depremin hareketine göre değişiklik göstermektedir. Bu yöntem ile yapı dış etkilere karşı korunur. Koruma sağlayabilmek için, kontrol bilgisayarından alınan komutları temel alarak bağ ve kirişler arasındaki bağlanma şartları değiştirilir. Şekil 3.10'da gösterildiği üzere yüksek teknoloji barındıran bu sistemde; çapraz ismindeki kollar ile desteklenen yapıda, kat kirişlerine ve kollar arasına paralel bir şekilde rijitliği değiştirmede kullanılan hidrolik aletler yerleştirilmektedir. Bu aletler bir kontrol vanasına bağlıdır ve bu kontrol vanasını açma/kapama işlemi kontrol bilgisayarı tarafından yönetilmektedir. Vananın açılıp kapanması ise kolların faaliyete geçirilmesi ve durdurulmasını sağlamaktadır. Vananın açılıp kolların faaliyete girmesi; yapıdaki rijitliğin ya da esnekliğin dengelenmesi için kullanılmaktadır. Bağ-kiriş arasındaki vananın açıklık/kapalılık durumu her kat için iki ayrı rijitlik değerinin oluşmasına neden olmaktadır (Tan ve diğ, 2010).

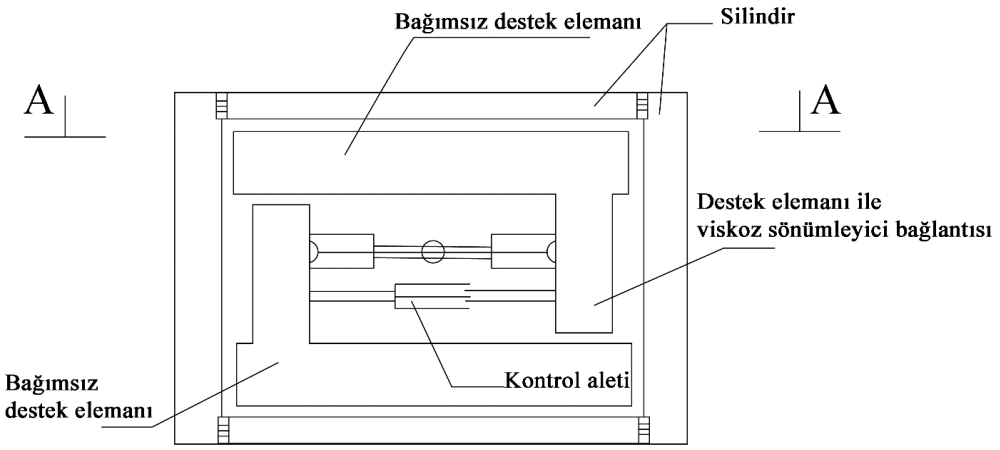


Şekil 3.10: Aktif rijitlik değiştirici (AVS) (Okut, 2006).

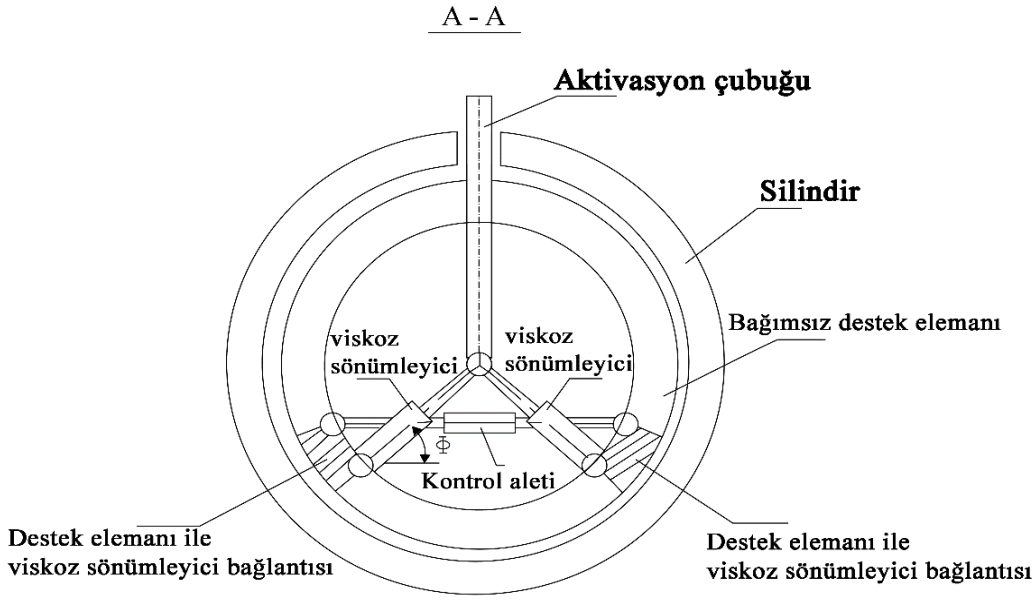
Vanaların faaliyete girebilmesi için 20W'lık bir elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Sensörlerin titreşimleri algılaması ile sistem hemen devreye girer. Bundan dolayı sistem normal zamanlarda elektriği kullanmamaktadır. Bu durum elektrik enerjisinden tasarruf etmemizi sağlar.

3.3.2.5. Aktif Viskoz Sönümleyici (AVD)

Aktif viskoz sönümleyici, sistemin rijitliğinde veya gücünde bir değişiklik yapmaksızın sönümü en etkin şekilde arttıran bir sistemdir. İstenilen büyüklükte sönüm kuvveti ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.11: Aktif viskoz sönümleyici (AVD) (Okut, 2006).



Şekil 3.12: Aktif viskoz sönümleyici (Okut, 2006).

Şekil 3.11 ve 3.12 incelendiği zaman görülmektedir ki bu kontrol sistemi; bir aktivasyon çubuğu, bir silindir, iki viskoz sönümleyici, iki bağımsız destek elemanı ve kontrol aracından oluşmaktadır. Aktif viskoz sönümleyiciler, bağlantı elemanları ile bir ucu destek elemanına, diğer ucu ise aktivasyon çubuğuna bağlanır. Kontrol çubuğu olarak, aktivasyon çubuğuna dik olan düzlem ile aktif viskoz sönümleyiciler arasındaki açıyı değiştirebilen pistonlar kullanılmaktadır. Bu sistem ile her an için sönüm değeri istenilen değerde tutulabilmektedir (Ribakov ve diğ, 2001).

3.3.2.6. Aktif Kontrolün Dezavantajları

Aktif kontrol sistemlerinin yapılar üzerindeki onlarca faydası bize umut verirken, bazı göz önünde bulundurulması gereken dezavantajları da mevcuttur. Bunlar:

- Yapılara etkiyen kuvvetler karşısında yeteri kadar tepki kuvveti oluşturulamaması,
- Aktif kontrol sistemlerinin aktive olabilmek için dış enerji kaynağına ihtiyaç duymaları. Ve bu enerji kaynağının her daim hazırda beklemesi sorunları,
- Bu tür sistemlerin kurulumundan bakımına değin çok maliyetli olması şeklinde özetlenebilir (Özpalanlar, 2005).

Bu tür dezavantajların yanında bu sistemler kurulurken karşılaşılan teknik sorunlar da mevcuttur. Bu sorunlar incelenecek olursa;

Modelleme Hataları: İnşaat mühendisliği yapılarına bakıldığında yayılı kütle sistemine sahip oldukları görülür. Bazı istisnai durumlar mevcut olsa da genellikle analitik olarak hesaplanan ve/veya kopyalama sistemi ile benzetilmiş kontrol mekanizmalarının sonuçları, genellikle basitleştirilmiş yapı modelleri incelenerek elde edilmektedir. Kontrol sistemlerinde binalar, yayılı kütleli sistemden, çok serbestlik dereceli sisteme indirgenir. Sonrasında ise yapılar, çok serbestlik dereceli olmaktan çıkarılıp daha az serbestlik dereceye sahip yapılara indirgenir. Kontrol sistemleri projelendirilirken de hesaplarda kolaylık sağlamak amacı ile yapılar az serbestlik dereceli olarak kabul edilmektedir.

Az serbestlik derecesine sahip sistemli yapılar için geliştirilmiş kontrol mekanizmalarında, teoriden pratiğe geçildiğinde gerçek yapılara uygulandıkları zaman, kontrol ve gözlem hataları olma ihtimali ile birlikte stabilize sorunları ile de karşı karşıya kalmak muhtemeldir. Bu teknik hatalar, kontrol sisteminde performans düşüklüğüne sebep olmaktadır. Bu performans düşüklükleri meydana gelmemesi adına öneyici çalışmalar ise proje aşamasında yapılmaktadır.

Teknik hataları en aza indirmek için, algılayıcı elemanları ve kontrol elemanlarını birinci mod dışındaki diğer modların sıfır olduğu yerlere koymak gerekmektedir. Bu elemanların yerlerinin belirlenmesi hiçte kolay değildir. Bu amaçla ele alınan diğer bir yöntem ise filtreleme işlemidir. Bu işlem; ikaz edici ve algılayıcı elemanların arasına, birinci mod dışındaki modlardan kurtulmak için filtre yerleştirilmesi işlemidir.

Zamanın Gecikmesi: Kontrol sistemlerinde, tüm işlemlerin aynı anda yapıldığı kabul edilmektedir. Oysaki yapılan her işlemde bir süre geçmektedir. Bu işlemler; dış kuvvetlerin ölçümü, ölçülen bu değerlerin kontrol bilgisayarında incelenmesi, inceleme sonucunda yapılan hesaplamalar ile kontrol kuvvetinin belirlenmesi, bu hesaplanan değerlerin kontrol elemanlarına iletilmesi ve sistemin faaliyete geçmesi gibi işlemlerdir. Yani bu işlemler yapılırken etkiye uygulanacak olan tepki kuvveti gecikmektedir. Bu gecikmeler kontrol sisteminin verimini düşürmekle birlikte sistemin stabilizesinde de bozulmalara neden olur. Bu bozulmalardan dolayı kontrol sisteminin uygulayacağı tepki kuvveti, yapının dayanımını arttıracağı yerde kötü etkilere neden olabilmektedir.

Yapının Lineer Olmaması: Aktif kontrol sistemlerinin çalışma prensibinde yapıların lineer olduğu kabulü yatmaktadır. Fakat gerçek hayatta ise yapılar, güçlü depremler karşısında

lineer olmayan davranışlar göstermekte ve çok fazla şekil değiştirmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmanın yolu ise hesabı zorlaştıran lineer olmayan davranışları hesaba katmaktır.

Yapı Parametrelerindeki Belirsizlikler: Aktif kontrol sistemleri algoritmalara sahiptirler. Bu algoritmalar ve yapının performansı kütle, rijitlik ve sönüm oranı gibi parametrelere bağlıdır. Kontrol sisteminin projelendirilme aşamasında birçok hesaplama yapılmaktadır. Bu hesaba koyulan parametrelerin değerleri ile yapı inşası bittikten sonraki gerçek değerler birbirine eşit olmamaktadırlar. Bu farklılıklar ise kontrol sisteminin yeteri performansı sağlayamamasına neden olur.

Algılayıcı ve Kontrol Elemanlarının Sınırlı Sayıda Olması: Aktif kontrol sistemleri bünyesinde sensörler ve kontrol elemanları barındırmaktadır. Bu elemanlar ne kadar artar ise tepki kuvveti o kadar erken ve gerekli noktalara gerekli miktarda uygulanır. Ancak bu elemanların yapıda uygulanması ve maliyet artışı sebebi ile sınırlı sayıdadır. Bu sebeple kontrol sistemi kurulurken kullanılacak eleman sayısı kişinin isteğine bağlıdır. Bu kararı veren kişi ise iki şeyi göz önünde bulundurmalıdır. Bunlar:

- Yapıyı tam olarak gözleyebilecek ve kontrol mekanizmasının verimli bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde kurulacak sistem için gerekli olan eleman sayısı,
- Minimum eleman sayısı ile maksimum verim elde edebilmek için hangi elemanın nereye yerleştirileceğidir.

Bu soruların cevabı sistemin algoritmasında yer almaktadır. Ancak pratikte algoritmada yer alan bu değerler yeterli değildir. Dolayısı ile daha fazla eleman yerleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

3.3.3. Yarı Aktif Kontrol

Yarı aktif kontrol sisteminin elemanları, kontrol altında tutulabilen pasif elemanlardır. Bu kontrol sistemi aktif ve pasif kontrol sistemlerinin özellikleri incelenerek, en çok önem arz edenlerin bir arada tutulması ile oluşturulmuştur. Yapıların dinamik yükler karşısında dayanımının sağlanmasında ise bu iki sistemden oluşturulan ortak özellikler rol almaktadır. Yarı aktif kontrol sistemleri de bir nevi aktif kontrol sistemleridir ve aktif kontrol sistemlerine nazaran, faaliyete geçebilmek için daha az kapasiteli dış enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. İhtiyaç duyulan dış enerji kaynağı o kadar düşüktür ki pil ile bile bu ihtiyaç

karşılanabilmektedir. Bu özellik ana enerji kaynağının zarar görmüş olabilme ihtimalleri düşünülürse çok önemli bir özelliktir (Symans ve Constantinou, 1997).

Bu kontrol sisteminin elemanları sisteme herhangi bir mekanik enerji yüklemesi yapmazlar. Bunun içindir ki sistemin giriş/çıkış kararlılıkları sabittir.

Yarı aktif kontrol sistem incelemeleri sonucunda pasif kontrol sistemlerine göre çok daha iyi olduğu, aktif kontrol sistemlerine de çok yakın değerler verdiği görülmüştür. Günümüzde birçok yarı aktif kontrol sistemleri mevcuttur. Bunlardan en önemlileri:

3.3.3.1. Yarı Aktif Hidrolik Sönümleyici

Bu kontrol sistemi içerisinde barındırdığı çok az miktardaki elektrik enerjisi ile çalışır. Geniş yapıların şiddetli depremler karşısında yapısal kontrolünü sağlayan hidrolik sönümleyiciler sayesinde bazı avantajlara sahiptirler.

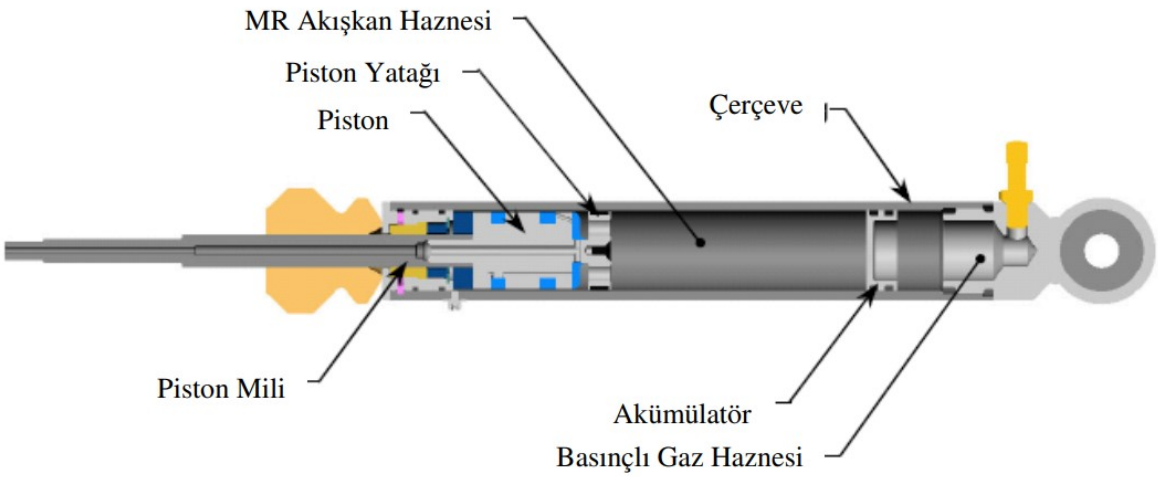
Yarı aktif hidrolik sönümleyiciler bir silindir ve iki yanında millerden oluşur. Bu sistem vidalar yardımı ile kuşaklamalara ve kolonun altına sabitlenmiş destek elemanlarına bağlıdır. Bu sistemin aktifleşmesi ve vananın açılıp sönüm kuvveti üretmesi için sadece 70 W elektrik enerjisine ihtiyaç duyulur. Sistemin istenen değerin üstünde sönüm kuvveti üretmesini engellemek adına akış kontrol vanasına paralel yardımcı bir vana da bulunur. Aynı zamanda güç kaynağının kesilmesi durumu ile karşı karşıya kalınması durumunda, emniyet amacı ile sistemde bulunan solenoid vanası devreye girer. Bu vana açıldığı zaman, orifisten geçen yağ yarı aktif hidrolik sönümleyicinin pasif sönümleyici olarak çalışmaya devam etmesini sağlar (Niwa ve diğ, 2000). Şekil 3.13'de yarı aktif hidrolik sönümleyici görülmektedir.



Şekil 3.13: Yarı aktif hidrolik sönümleyici (Okut, 2006).

3.3.3.2. Akışkan Kontrollü Sönümleyiciler

Bu kontrol sisteminde, kontrol edilebilen sönümleyici cihazları dışında kalan kontrol cihazları, elektrik enerjisine ihtiyaç duyan mekanizmalar ile kontrol edilmektedir. Bu durum kontrol sisteminin verimini azaltmakta ve kontrolün sürekliliğini baltalamaktadır. Kontrol edilebilen sönümleyiciler ise pistonlu olmasından ve piston dışında hareket eden başka parçaların bulunmamasından dolayı büyük avantaj sağlamaktadır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: MR doğrusal sönümleyici (Okut, 2006).

Bu kontrol sisteminde kontrol edilebilen akışkanlar incelendiği zaman karşılaşılan en temel özellik; manyetik alana veya elektriğe maruz kaldıklarında saniyenin 1/1000 ‘i

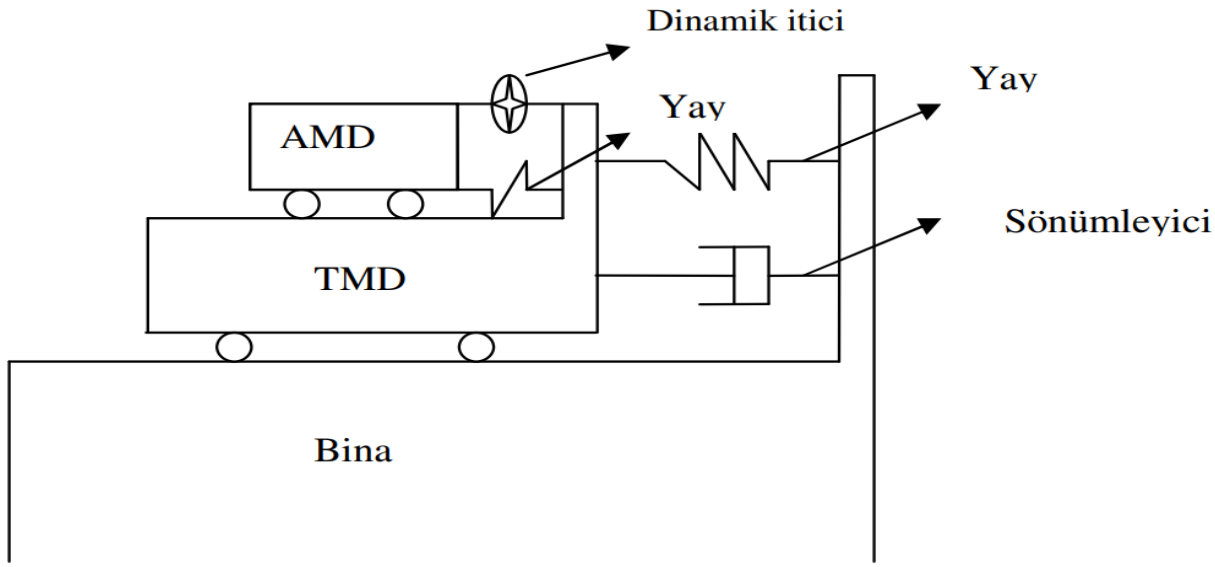
süresinde viskoz akışkandan, kontrol edilebilir akma dayanımı olan yarı katı bir malzemeye dönüşebilmektedir. Bu akışkanlar yapısı gereği elektrik alanında aktive olanlar (ER), manyetik alanda aktive olanlar (MR) olarak adlandırılırlar (Li ve diğ, 1999).

3.3.4. Karma Kontrol

Karma kontrol sistemleri diğer kontrol sistemleri ile kıyaslandığı zaman; daha avantajlı, daha pratik ve daha verimlidir. Bu kontrol sistemi de yarı aktif kontrol sistemleri gibi aktif ve pasif kontrol sistemlerin avantajlı özelliklerinin birleşmesi ile oluşmuş bir sistemdir. İki sistemin birleşmesinden oluştuğu için de daha geniş alanlarda uygulanabilmektedir. Bu kontrol sisteminde hem aktif hem de pasif sistemin bir arada olmasından dolayı, ayrı ayrı kullanıldıkları zamanki eksiklikler ve dezavantajlar ortadan kalkmaktadır. Bu da yapının ve kontrol sisteminin performansını arttırır. Bu kontrol sistemi diğer kontrol sistemlerine göre daha karmaşık bir yapıya sahipken; sistemin yapı üzerindeki etkisi de diğer kontrol sistemlerine nazaran daha güvenlidir. Bu kontrol sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar aşağıda belirtilmiş olan iki alt kontrol sistemi türetilmiştir:

3.3.4.1. Karma Kütle Sönümleyiciler

Karma kütle sönümleyiciler, aktif kontrol elemanları ile ayarlı kütle sönümleyicilerin bir arada kullanılması ile oluşurlar. Bu sönümleyiciler, inşaat mühendisliği projelerinde en fazla kullanılan sönümleyici sistemleridir. Sistem incelendiğinde, ayarlı kütle sönümleyicilerin yapmış olduğu hareketlerden dolayı yapının vermiş olduğu tepki azalmaktadır. Aktif kontrol sistemi ise karma kütle sönümleyicinin daha verimli çalışmasını ve yapının dinamik karakterinde istenmeyen bir durum gözlenir ise yapıyı güvenli bölgede tutmak için kullanılır. Karma kütle sönümleyici sistemini aktive edebilmek için gereken enerji aynı etkiyi gösterecek olan aktif kontrol sistemini aktive edebilmek için gereken enerjiden çok daha azdır (Niwa ve diğ, 2000). Şekil 3.15'de karma kütle sönümleyici sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Karma kütle sönümleyici (Okut, 2006).

3.3.4.2. Karma Sismik İzolasyon

Bu yalıtma sistemi, aktif kontrol sistemi ile pasif sismik izolasyonun bir araya getirilerek elde edilen bir sistemdir. Sismik yalıtkan sistemi yalnız başına kullanıldığında güvenilirliği yüksek, etkili ve basit bir sistemdir. Ama pasif kontrol sistemi ile birlikte kullanılmasından dolayı deprem etkilerine karşı adaptasyon düzeyi sınırlıdır. Bu durumda performansı yükseltmek adına bina taban izolasyonuna aktif kontrol mekanizması ilave edilir.

Bu sistemin etkinliğini test edebilmek için ufak çaplı birçok deney yapılmıştır. Reinhom ve Riley'nin 1994'te yapmış olduğu küçük ölçekli köprü modelinin deney çalışmaları yapılırken de kayıcı karma yalıtma sistemi kullanılmıştır. Kayıcı yüzey ve zemin arasına yerleştirilen dinamik itici vasıtasıyla taban yalıtma sisteminin performansı arttırılmıştır.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. YAPILARDA DİNAMİK HAREKET

Çeşitli dinamik etkiler sonucunda yapıda meydana gelen titreşimler, yer değiştirmeler vb. gibi durumlardan sonra meydana gelen can ve mal kayıplarını en aza indirmek önem arz eden bir konudur. Yapıya etkiyen dış kuvvetlerin belirsizliği sebebi ile yapıya etkiyen dinamik yükleri absorbe etmek amacı ile yapıya farklı kontrol sistemlerinin eklenmesi ihtiyacı doğmuştur.

Bu kontrol sistemlerinden biri olan ve pasif kontrol sistemi kategorisinde yer alan 'Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD)'leri yapıya etkiyen dinamik kuvvetleri azaltmakta etkin rol oynamaktadır. Genel olarak yapının en üst katına yerleştirilirler. Ancak ayarlı kütle sönümleyicilerin yapıda aktif bir şekilde çalışması ya da ayarlı kütle sönümleyicinin yapı üzerine ilave yük oluşturması vb. gibi istenmeyen durumların oluşmaması adına çeşitli parametreler ayarlanarak sistem performansı en üst düzeye çıkarılır.

4.1.1. Dinamik Kuvvet, Yapı ve TMD Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapıya her ne sebepten dolayı olursa uygulanan dinamik kuvvet sonucunda yapıda oluşan titreşimler neticesinde meydana gelen hız, ivme ve öteleme miktarı, yapısal özelliklere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Öte yandan bakılacak olursa bu özellikler, dinamik hareketler esnasında yapının hareketlerini belirleyen frekans, dönem vb. gibi dinamik faktörleri de etkilemektedir (Yücel ve diğ., 2019).

Yapı elemanlarını ve etkileyen kuvvetler tanımlamak istersek:

- **Kütle:** Atalet özelliklerini ve kütleyi gösterir
- **Rijitlik katsayısı:** Yapıda potansiyel enerji kapasitesi ve yapının elastik kuvvetini gösterir.
- **Sönüm katsayısı:** Yapının sürtünme özelliklerini ve yapıda meydana gelen enerji kaybını ifade eder.

- **Deprem ivmesi:** Yer hareketine sebep olan deprem kuvvetinin sahip olduğu ivme değeridir.

- **Doğal açısal frekans:** Bir birim zamanda meydana gelen titreşim sayısının radyan cinsinden karşılığıdır.

- **Yapının açısal frekansı:**

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4.1}$$

- **TMD'nin açısal frekansı:**

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4.2}$$

- **Frekans:** Bir birim zamanda (1 Sn. de) gerçekleşen titreşim sayısıdır.

- **Doğal periyot:** Yapının sönümsüz olarak bir kez titreşim yapması için gerekli olan süredir.

$$T_s = 2\,\pi f = \frac{2\pi}{\omega} \tag{4.3}$$

- **Sönüm oranı:** Yapıda hiç titreşim gerçekleşmediği zamandaki kritik sönüm miktarıdır. Yapının sönüm oranı:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \tag{4.4}$$

- **TMD'nin sönüm oranı:**

$$\xi_d = c_d / 2m_d\omega_d \tag{4.5}$$

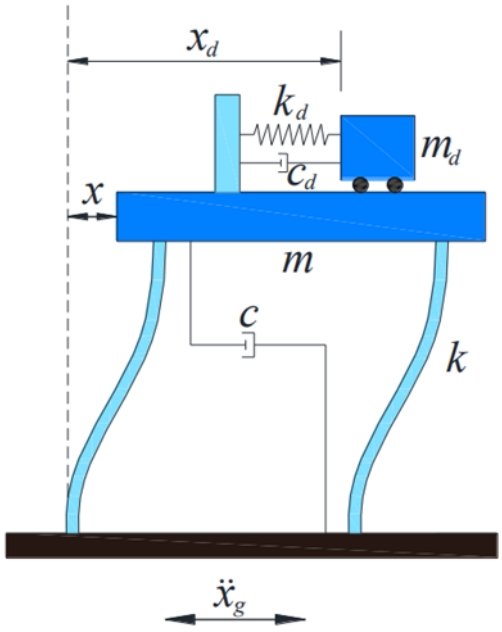
- **Yatay deplasman:** Yapıya uygulanan kuvvet ile yapının yatay yönde yaptığı öteleme miktarıdır.

- **Hız:** Yapıya uygulanan kuvvet sonucu oluşan yapının hareket hızıdır.

- **İvme:** Yapıya uygulanan kuvvet sonucu oluşan yapıda meydana gelen ivmedir.

Tablo 4.1: Parametrelerin TMD ve yapı için gösterimi (Yücel ve diğ, 2019).

Bileşen	Yapı	TMD	Deprem
Kütle (kg)	m	m_d	
Rijitlik katsayısı (N/m)	k	k_d	
Sönüm katsayısı (Ns/m)	c	c_d	
Deprem (yer) ivmesi (m/s^2 -g)			$\ddot{x}_g$
Doğal açısal frekans (rad/s)	ω	ω_d	
Frekans (1/s)	f	f_d	
Doğal periyot (s)	T_s	T_d	
Sönüm oranı	ξ	ξ_d	
Yatay deplasman (m)	x	x_d	
Hız (m/s)	$\dot{x}$	$\dot{x}_d$	
İvme (m/s^2)	$\ddot{x}$	$\ddot{x}_d$	

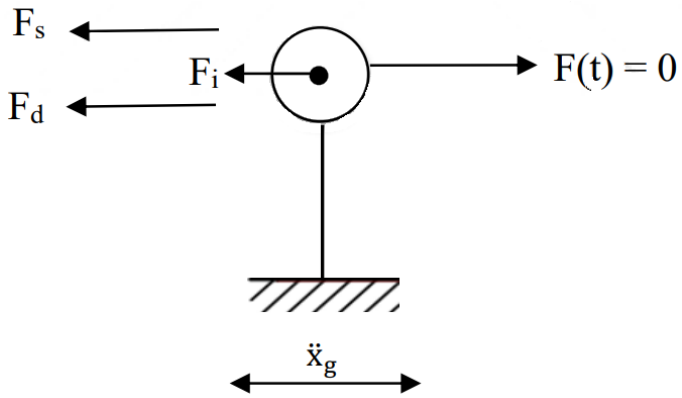


Şekil 4.1: Tek serbestlik dereceli (SDOF) bir yapı üzerinde yer alan TMD gösterimi (Yücel ve diğ, 2019).

4.1.2. Dinamik Modelleme Yaklaşımına Göre Yapıya Etkiyen Kuvvetler

Bu yaklaşıma göre tek serbestlik dereceli sistemlerde yapı kütlesinin bir noktada toplanmış gibi davranış gösterdiği bilinmektedir (Civelek ve Çatal, 2004). Bundan dolayıdır ki yapıda oluşan ivme hem kendi yükünden hem de dinamik etkilerden kaynaklanmaktadır.

Bu durum da üst yapıda ters yönlü bir kuvvet oluşmasını sağlamaktadır. Oluşan bu kuvvetlerin de yapıya etkime Şekil 4.2'deki gibidir:



Şekil 4.2: Yapıyı etkileyen kuvvetler (Yücel ve diğ, 2019).

- **Atalet kuvveti:** Kütlenin kendi konumunu ve yapısını koruma isteği ile ortaya çıkan kuvvettir. $\ddot{x}_t$, ortaya çıkan deplasmanların zamana bağlı olan ikinci türevi olan ivmeye ($\ddot{x}$) ek olarak diğer dinamik ivmelerin toplamını belirtmek için ortaya çıkan kuvvetin denklemi (Yücel ve diğ, 2019) :

$$F_i = ma = m\,\ddot{x}_t \tag{4.6}$$

- **Sönüm kuvveti:** Yapıya etkiyen kuvvetler sonucunda yapının hareketlenmesine engel olacak kuvvet olmak üzere $\dot{x}$, meydana gelen deplasmanların zamana bağlı birinci türevidir (Yücel ve diğ, 2019).

$$F_d = cv = c\dot{x} \tag{4.7}$$

- **Rijitlik kuvveti:** Yapı esnekliğini temsil eden kuvvettir. Yapının titreşim esnasında eğilme, dönme gibi durumlar karşısında direnç oluşturmaktadır. x, oluşan deplasman değerlerini ifade etmektedir (Yücel ve diğ, 2019).

$$F_s = kx \tag{4.8}$$

- **Depremin ivmesi:** $\ddot{x}_g$ her bir periyotta meydana gelen yer ivme değeridir.

Serbest titreşim esnasında yapıda görülen kuvvetleri ve hangi yönde etki ettiklerini gösterir. Yapının titreşimi ile birlikte meydana gelecek kuvvetlerin denkliği için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$F_i + F_d + F_s = F(t) \tag{4.9}$$

Kuvvetlerin karşılıklarını denklemde yerine yazarsak

$$m\ddot{x}t + c\dot{x} + kx = 0 \tag{4.10}$$

Denklemini elde ederiz. Bu denklemde yer alan ivme değeri ise yapıya etki eden ivme değeri olduğundan dolayı, hareket esnasında oluşacak olan ivmeye yer ivmesinin de eklenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda hareket edecek olursak

$$\ddot{x}_t = \ddot{x}_g + \ddot{x} \tag{4.11}$$

$$m\,(\ddot{x}_g + \ddot{x}) + c\dot{x} + kx = 0 \tag{4.12}$$

denklemi elde edilir.

SDOF bir yapı için hareket denkleminin son haline bakacak olursak şu denklem ile karşılaşırız:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \tag{4.13}$$

Çok serbestlik dereceli (MDOF) yapılar için bakacak olursak; hareket denkleminde bulunan yapının dinamik bileşenleri matris formundadır. MDOF yapılar baz alınarak oluşturulan hareket denklemi ve TMD bileşenlerini de içinde barındıran matris formları aşağıda yer almaktadır. (Matrislerde görülen N değeri, MDOF yapının serbestlik derecesidir.)

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M[1]\ddot{x}_g \tag{4.14}$$

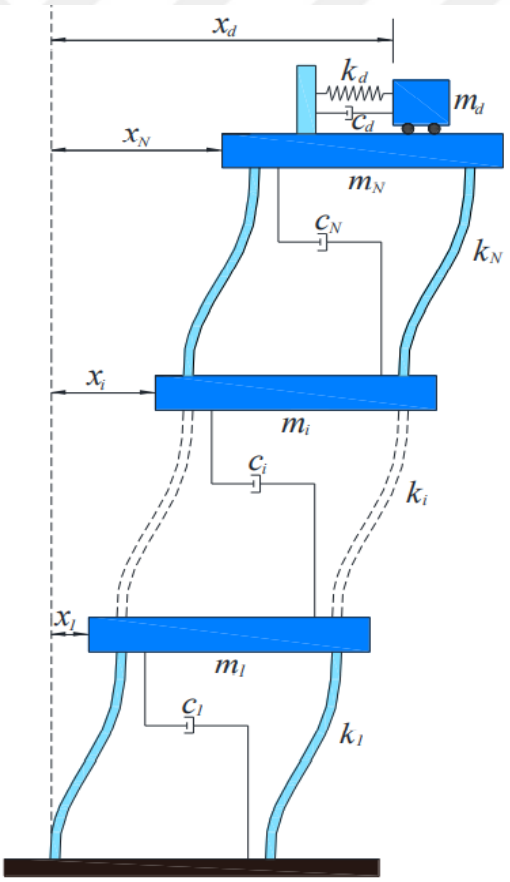
$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_d \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & \ddots & -c_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_N & c_N + c_d & -c_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & \ddots & -k_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_N & k_N + k_d & -k_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_N \\ x_d \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Çok serbestlik dereceli (MDOF) bir yapı üzerinde bulunan TMD için denklemlerde de görülen dinamik bileşenlerin gösterimi aşağıda şekil 4.3'de yer almaktadır.



Şekil 4.3: TMD barındıran MDOF yapı sistemi (Bekdaş ve Niğdeli, 2013).

4.2. OPTİMUM TMD PARAMETLERİNİN BELİRLENMESİ

Yapılar dinamik yükler karşısında sürekli tehdit altındadır. Kimi zaman bu tehdit boyutu hafif iken kimi zaman da ufak hasarları aşıp yıkıma kadar ilerlemektedir. Bu da can ve mal kaybını önlemek adına çalışmaların başlamasına sebep olmuştur. Yeryüzünün her noktasında bu durum gerçekleşmekte olduğu için her coğrafyada çalışmalar mevcuttur. Literatürde optimum TMD için oldukça fazla sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan bazı önemli çalışmalara dair özet bilgiler aşağıda verilmiştir:

Leung ve Zhang (2008) ayarlı kütle sönümleyiciler (TMD) konusunda çok önemli araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda, yeni bir evrimsel algoritma olarak parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması uygulanarak, viskoz sönümlü tek serbestlik dereceli bir ana sisteme bağlı TMD'nin optimum kütle oranı, sönümleyici (damper) sönümleme ve ayar frekansı dahil olmak üzere optimum parametreler incelenmiştir. Durağan olmayan uyarıma tabi olan sistem, maliyet fonksiyonu olarak yer değiştirme veya ivme ortalama kare yanıtı ve bunların kombinasyonu alındığında elde edilebilir. Durağan olmayan yer ivmesi modellerinin farklı türleri için üç sayısal örnek aracılığıyla, sonuçlar, PSO'nun sabit olmayan TMD sisteminin optimum kütle oranını, damper sönümünü ve ayar frekansını bulmak için kullanılabileceğini ve oldukça kolay olduğunu göstermektedir.

Viskoz olarak sönümlü tek serbestlik dereceli bir ana sisteme bağlı TMD sisteminin optimum parametreleri, bazı yanıt miktarlarını, örneğin farklı uyarma türlerinin çeşitli kombinasyonları altında ana sistemin ortalama kare yer değiştirme yanıtlarını ve yer değiştirme genliğini en aza indirerek elde edilir. Dikkate alınan uyarılar, Gauss beyaz-gürültü rastgele süreçleri olarak modellenen dış kuvvet ve taban ivmesini içerir. Frekans değişmez genliği ile harmonik taban ivmesi de dikkate alınır. PSO, TMD sisteminin optimum kütle oranını, sönümleme sönümünü ve ayar frekansını bulmak için kullanılabilir ve pratik mühendislik uygulamaları için kolayca programlanabilir.

Luu ve diğ. (2012) yapmış oldukları çalışmada, yüksek hızlı demiryolu köprülerinin çok rezonanslı dinamik yapısal tepkisini bastırmak için TMD sistemlerinin optimizasyonu ile ilgilenmişlerdir. Önceki yöntemlerden farklı olarak, sunulan yöntem, ilgili frekans aralıkları üzerinde aynı yükseklikte olan tüm tepe noktaları üzerindeki kısıtlamalarla birlikte H_2 normuna dayalı amaç fonksiyonunu seçer. Bu nedenle, TMD'lerin parametreleri,

TMD'leri daha etkili ve sağlam hale getirmek için çoklu rezonans tepe noktalarına önemli ölçüde katkıda bulunan farklı modlarda doğrudan ve eşzamanlı olarak optimize edilebilir.

Vellar ve diğ. (2019) titreşim kontrolü için Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin (TMD) ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin (MTMD) optimum tasarımı gibi popüler bir araştırma konusu üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

Bu çalışma, araç-köprü bağlantılı titreşim problemlerine uygulanan TMD ve MTMD'nin sağlam tasarım optimizasyonunun yeni bir uygulamasını sunmaktadır. TMD parametreleri, üstyapı düzensizlik modellerinin ve köprü-araç modellerinin rastgele değişkenleri olarak kabul edilir. Bu rastgele değişkenlerin olasılık dağılımlarını elde etmek için maksimum entropi ilkesi kullanılır. Optimizasyon problemi Firefly Algoritması ile çözülmüştür. Sonuçlar, MTMD'lerin kullanımının, tek TMD'li çözümlerle karşılaştırıldığında, merkezi köprü düğümünün maksimum dikey yer değiştirmesinin beklenen değerini ve varyansını azaltmaya izin verdiğini göstermektedir. Burada geliştirilen sayısal çözüm, Den Hartog ve Warburton'ın klasik teknikleri ile de karşılaştırılmıştır. Makale, klasik analitik tekniklerin, tekli TMD cihazlarının optimal tasarımında da başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Marano ve diğ. (2010) yapmış oldukları çalışmalarda, belirlenen model için ana sistem yer değiştirmesini veya atalet ivmesini en aza indiren iki farklı optimizasyon kriteri geliştirmişlerdir. Girdinin çeşitli karakterizasyonlarıyla tanımlanan farklı çevresel koşullar, durağan bir filtrelenmiş stokastik süreçle modellenmiştir. Sonuçlar, tasarım değişkeni olarak TMD'nin kütlesini de dikkate alarak elde edilen tüm çözümlerin, TMD'sizçözümlerle elde edilenlere kıyasla daha verimli olduğunu göstermektedir.

Zuo ve Nayfeh (2005) araştırmalarında TMD'lerin parametre optimizasyonunu, blok diyagonal geri besleme kazanç matrisinin TMD'lerin sertlik ve sönüm katsayılarından oluştuğu merkezi olmayan bir H2 kontrol problemi olarak formüle etmiştir. Tasarım parametrelerine göre ortalama kare kök yanıtının gradyanı açık bir şekilde değerlendirilir ve optimizasyon verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Kütle dağılımının etkileri, sönümleyici sayısı, kütle oranı ve sistem parametrelerindeki belirsizlikler incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, optimal tasarımların ne düzgün aralıklı ayar frekanslarına ne de özdeş sönümleme katsayılarına sahip olmadığını ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin (MTMD) sistemindeki bireysel parametrelerin optimizasyonunun performansta önemli bir gelişme sağladığını

göstermektedir. Ayrıca, sertlik ve sönümlemenin ayrı ayrı optimize edilebilmesi koşuluyla, TMD'ler arasındaki kütle dağılımının sistemin performansı üzerinde çok az etkisi olduğu tespit edilmiştir. Her birinin rijitliğini ve sönümünü doğrudan optimize etmek için verimli bir sayısal algoritma önerilmiştir.

Morga ve Marano (2014) çalışmalarında, ince yapılarda rüzgâr yükünün neden olduğu titreşimlerin azaltılması ile ilgilenmişlerdir. Yapı, tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiştir ve rüzgâr yükü ön filtreleme tekniği ile tahmin edilmektedir. Ayarlanmış Kütle Sönümleyicisinin (TMD) frekans ve sönüm oranının en iyi değerlerini hesaplamak için iki optimizasyon kriteri karşılaştırılmıştır. Birinci kriterin amacı yapının üst ucunun yer değiştirmesinin azaltılması, ikinci kriterin amacı ise yapının üst ucunun atalet ivmesinin azaltılmasıdır. İki kriterin karşılaştırılması, farklı çevre koşulları ve sistem konfigürasyonları için duyarlılık analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma, hızlanma kriterinin sadece bazı koşullar için daha çekici olduğunu göstermektedir (Benfratello ve diğ., 1996).

Yang ve diğ. (2010) yapmış oldukları çalışmalarda kesme derinliğinin, kararsızlığı nedeniyle işleme için zorlamalı titreşimlerden daha zararlı olduğunu gösterdiler. Bu makale, takım tezgahı yapılarının sertlik direncini artırmak için çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD'ler) tasarımını ve optimum ayarını sunar. Bir tezgâhın kritik kesme derinliği, takım-iş parçası arayüzündeki frekans yanıt fonksiyonunun (FRF) negatif gerçek kısmı ile ters orantılıdır. Büyüklüğün azaltılmasını hedeflemek yerine, tekli ve çoklu TMD sistemleri tasarlanarak makinenin FRF'sinin negatif reel kısmı azaltılır. TMD'ler eşit kütlelere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır ve sönümleme ve sertlik değerleri, minimax sayısal optimizasyon algoritması kullanılarak kesme direncini iyileştirmek için optimize edilmiştir. Önerilen ayarlı damper tasarımı ve optimizasyon stratejisi, kesme derinliğini artırmak için deneysel olarak gösterilmiştir.

Zuo ve Nayfeh (2004), tek serbestlik dereceli (SDOF) titreşimi sönümlemek için birçok soğurucu yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, genel viskoz veya histeriktik çok serbestlik dereceli (MDOF) ayarlı kütle sistemleri için öngörülen bir frekans aralığında modların minimum sönümünü en üst düzeye çıkarmak için iniş-alt gradyan yöntemine dayanan verimli bir sayısal yaklaşım önerilmiştir. Minimax yönteminin verimliliğini ve MDOF ayarlı kütle damperlerinin (TMD'ler) sönümleme potansiyelini göstermek için örnekler verilmiştir. Minimax, H_2 ve H_∞ performansı optimal TMD'ler için karşılaştırılmıştır. Son

olarak, serbest-serbest kirişin ilk iki eğilme modunu sönümlemek için 2-DOF TMD'nin optimize edildiği bir deneyin sonuçları sunulmuştur.

Kamgar ve Khatibinia (2019) araştırmalarında göre, genelde zemin-yapı etkileşimi (SSI) etkisi olmadan ayarlanmış kütle damper (TMD) sisteminin optimal tasarımına odaklanmışlardır. Bu nedenle SSI'nin etkisinin göz ardı edilmesi, istenmeyen ve gerçekçi olmayan bir TMD tasarımına yol açabilir. Bu çalışmanın temel amacı, yüksek katlı bir binada SSI'nin etkilerini göz önünde bulundurarak TMD sisteminin optimal tasarımı için farklı optimizasyon kriterlerini karşılaştırmaktır. Bu amaca ulaşmak için, 40 katlı bir kesme bina için optimal TMD, ilk olarak, yapısal tepkilerin azaltılması (yer değiştirme ve ivme dahil) ve TMD'nin ölçeklendirilmiş strokunun sınırlandırılması açısından amaç fonksiyonları ifade edilerek değerlendirilir. Ardından en iyi optimizasyon kriteri seçilir, bu da yapının titreşim kontrolü için en iyi performansı sağlar. Bu çalışmada, TMD sisteminin parametrelerini optimize etmek için balina optimizasyon algoritması (WOA) kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, üst yapı tipinin ve seçilen amaç fonksiyonunun TMD sisteminin optimal tasarımını verimli bir şekilde etkilediğini göstermektedir.

Zhang ve Li (2019) rahatsız edici yapısal titreşimleri azaltmak için, yüksek binalarda yaygın olarak sarkaç tipi ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sistemleri geliştirmişlerdir. Bu çalışma, Çin'de tayfun eğilimli bir bölgede bulunan 600 m yüksekliğindeki bir gökdelen için tasarlanmış çok aşamalı bir PTMD sisteminin performansı hakkında ayrıntılı bir değerlendirme çalışması sunmaktadır. Çok aşamalı PTMD sisteminin optimum tasarımı, çeşitli kütle ve sönüm oranları için PTMD sisteminin azaltma verimliliği incelenerek gerçekleştirilir. PTMD sistemindeki kütle sönümleyicilerin stroklarını kısıtlamak için iki bölümlü sönümleme stratejisi önerilmiştir. Değerlendirme sonuçları, iki bölümlü sönümlemeli çok kademeli PTMD sisteminin, dikey ve yatay yönlerde minimum yer kaplarken, gökdelenin aşırı titreşimlerini bastırmak için verimli bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir.

Pourzeynali ve diğ. (2013) tarafından yapılan araştırmaların temel amacı, depremlere karşı yapısal titreşimleri kontrol etmek için kullanılan cihazların genetik algoritmalar (GAs) kullanılarak, sağlam ve çok amaçlı optimizasyon tasarımının gerçekleştirilmesidir. TMD sisteminin performansını artırmak için kütle, sertlik ve sönüm oranı dâhil parametreleri, çok amaçlı genetik algoritmalar kullanılarak en uygun şekilde tasarlanmıştır. Bunu yapmak için, her katın maksimum yer değiştirmesi, maksimum hızı ve maksimum ivmesi gibi, aynı anda

minimize edilecek üç ölçülemeyen amaç fonksiyonu göz önünde bulundurulur. Bu amaçla, bir dizi Pareto-optimal çözümü bulmak için hızlı ve seçkin bir domine edilmeyen sıralama Genetik Algoritması (NSGA-II) yaklaşımı kullanılır. Ayrıca sistemde var olan belirsizlikleri hesaba katmak için sağlam bir tasarım optimizasyon prosedürü Hammersley dizi örnekleme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilir. Çalışmanın sayısal sonuçlarından, optimal TMD sisteminin binanın maksimum yer değiştirmesinde yaklaşık %28'lik bir azalma sağlayabildiği bulunmuştur.

Kaveh ve diğ. (2020) yazmış oldukları makalede, pasif ve aktif TMD'lerin serbest parametrelerinin optimum ayarı ile ilgilenmişlerdir. Bu amaçla, TMD sistemleri için optimal parametreleri belirlemek için Yeni Kaotik Optimizasyon Algoritması (COA) kullanılmıştır. Bu algoritma, güçlü sismik hareketler altında 10 katlı kesme tipi bir çerçeve üzerinde ve ayrıca 76 katlı betonarme (He, Jin, Xie, Cao, Lin ve Wang (2019) bir ofis kulesinin rüzgâr kaynaklı tepki kontrolü üzerinde test edilmiştir. Sayısal sonuçlar, optimum parametrelere sahip ayarlanmış kütle damperlerinin, farklı uyarılar altında yapısal sistemin tepkilerini azaltmada iyi bir yeteneğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bir direk tipi yüzer rüzgâr türbininin çok gövdeli dinamik modeli inşa edilmiştir. Rüzgâr türbininin 5-DOF'lu basitleştirilmiş bir matematiksel modeli oluşturulmuştur. AFSA'yı iyileştirmek için diferansiyel evrim algoritması kullanılmıştır. Rüzgâr türbininin yeni bir aero-hidro-servo-elastik bağlı modeli inşa edilmiştir. Rüzgar türbini titreşimi, optimum TMD tarafından büyük ölçüde bastırılmıştır.

Farshidianfar ve Soheili (2013) yapmış oldukları çalışmada, üst yapı özelliklerinin favori TMD parametrelerini büyük ölçüde etkilendiğini gösterdiler. Zemin tipi de yapıların zaman tepkisini ciddi şekilde etkiler. TMD'ler, yüksek katlı binaların deprem titreşimini azaltmak için avantajlı cihazlardır. Optimum TMD tasarımı için karınca kolonisi optimizasyonu (ACO)'nun nasıl kullanılabileceği açıklanmıştır. Üst yapıya etkileri göz önüne alındığında, TMD frekansını yapının ilk doğal frekansına yakın ayarlamak daha iyidir.

Miguel ve diğ. (2022) başka bir çalışmalarında katlanmış sarkaç ayarlı kütle sönümleyicilerin (FPTMD'ler) güvenilirliğe dayalı tasarım optimizasyonu ilk kez ele almışlardır. FPTMD'lerin optimum parametrelerinin yıllık hizmet hatası olasılıklarını en aza indirdiği bulunmuştur. PTMD'lerden daha küçük FPTMD'ler için hata olasılıkları tespit edilmiştir. Çoklu FPTMD'lerin, tekli FPTMD'lerden daha güvenilir oldukları belirlenmiştir.

Marano ve Greco (2011) çalışmalarında, lineer Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD) cihazları problemi için farklı optimizasyon kriterleri arasında karşılaştırmalı bir analiz yapmıştır. Optimal TMD mekanik parametreleri için durağan filtrelenmiş stokastik bir süreç olarak modellenen bir temel ivmeye tabi olan basit bir serbestlik dereceli sistem dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Yaygın TMD optimizasyon yöntemleri tasarım değişkenleri olarak sadece TMD frekansını ve sönüm oranını dikkate alırken, bu çalışmada tasarım değişkeni olarak TMD kütlesini de hesaba katan eksiksiz bir yaklaşım önerilmiştir. TMD stratejisinin etkinliğini değerlendirmek için girdi ve yapısal parametreler değiştirilerek çeşitli duyarlılık analizleri geliştirilmiştir.

Chen ve diğ. (2021) çalışmalarında, araştırma nesnesi olarak büyük ölçekli açık deniz rüzgar türbinleri için ayarlanmış kütle damperlerinin (TMD), çok gövdeli dinamik teorisi aracılığıyla, kazık-zemin bağlantısı ve temel bileşenlerin esnekliğini göz önünde bulundurarak, Blade-Nacelle-Tower-Foundation'a dayalı bir yöntem olan birleştirilmiş modelin TMD parametre optimizasyon modelini önermiştir. Yapay balık sürüsü algoritmasına (AFSA) göre, açık deniz rüzgâr türbininin dinamik tepkisi üzerinde gerçekleştirilen parametre optimizasyonu araştırması sonuçları, kazık-zemin birleşimi göz önüne alındığında, titreşim frekansının ön/sanat yönünde 0,26 Hz'den 0,235 Hz'ye düşürülebilir ve acil kapatma koşulu altında %68,77'lik bir bastırma oranı gerçekleştirilebilir olduğunu göstermiştir. Dikkate alınmayan kazık-zemin yapısı ile karşılaştırıldığında, bastırma verimi %7,08 oranında artırılmıştır.

Kayabekir ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada, aktif ayarlı kütle sönümleyicilerin (ATMD'ler) optimizasyonu için metasezgisel tabanlı bir ayar metodolojisi sunulmaktadır. Metodoloji, ATMD'lerin hem fiziksel parametrelerini hem de kontrol algoritmasının kontrolör parametrelerini dikkate alır. Kullanılan kontrol algoritması orantısal-integral-türev tipi bir kontrolördür. ATMD'ler yapılarda depremlerden kaynaklanan yapısal tepkilerin azaltılmasında kullanılmaktadır. Sürecin sonuçları, ATMD'lerin TMD'lere kıyasla yüksek değerli grev sınırlamaları için daha etkili olduğunu göstermiştir. Optimum kontrol yönteminin uygulanabilirliği ve etkinliği, tam boyutlu 76 katlı bir yapı üzerinde gösterilmektedir.

Lu ve Chen (2011) yaptıkları çalışmalarda ve araştırmalarda, 632 m yüksekliğe sahip olan Çin'in en yüksek binası olacak, Şanghay'ın Lujiazui semtinde bulunan Şanghay merkez

kulesi (SHC) için yapısal rüzgâr kaynaklı tepkiyi kontrol etmek amacıyla üst kısımda ayarlanmış bir kütle damperi (TMD) sistemi kurmuşlardır. Böylece, geleneksel sarkaç sistemlerinin geliştirilmiş bir şekli olan ikili sarkaç sistemlerinin teorik analizi ve formül türetilmesi gerçekleştirilmiş ve ikili sarkaç sistemlerinin temel tasarım yöntemi ve süreci önerilmiştir.

Zhang ve Xu (2022) araştırmalarında, konvansiyonel hedefin bazı eksikliklerinin üstesinden gelmek için kendinden heyecanlı dörtnala/çarpıntı kontrolü için yeni bir hedef belirlemiştir. Buna göre minimum TMD kütlesini belirlemek için doğrusal olmayan aeroelastik etkiyi içeren bir optimizasyon prosedürü yeni hedefi mümkün kılar. Yeni hedef, büyük kritik sonrası güvenlik yedekliliğine sahip bir yapı için daha ekonomik tasarım sonuçlarına yol açabilir. Yeni hedef, doğrusal kritik durumdan önce büyük genlikli titreşimler sergileyebilen bir yapı için daha güvenilirdir.

Tubino ve Piccardo (2015) çalışmalarında, hizmet verilebilirlik gereksinimlerini karşılamak için ayarlı kütle damperlerinin (TMD) tasarımının mevcut yaya köprülerinin tasarımında giderek daha yaygın hâle geldiğini göstermiştir. Bu makale, yaya kaynaklı titreşimlerin azaltılması için TMD tasarımını üç ana amaç ile analiz etmektedir. Optimum TMD parametreleri literatürde verilen klasik kriterler ile karşılaştırılmıştır. Köprünün maksimum dinamik tepkisinin azaltılması amacıyla standart sapmaya dayalı optimizasyonun geçerliliğini doğrulamak için Monte Carlo simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonunda gerçek bir yaya köprüsüne başvuru sunulmuştur.

Liu ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışma, GPU hızlandırma ve makine öğrenimi teknolojilerini kullanarak gerçek rüzgar dağılımına karşı uyanma etkileri altında rüzgar türbini TMD'sinin optimizasyonu hakkındadır. Bu çalışmaya göre GPU hızlandırmalı yöntemi, CPU sürümünden 2001 kat daha hızlı çalışabilir ve açılır. Kullanılan optimizasyon aracı, parametrik analize kıyasla daha iyi performans gösterir ve süreyi %45 azaltır. Rotor yarıçapının yaklaşık 2 katı aralıklı rüzgâr türbinleri için TMD'ler uygulanmalıdır. TMD, beyaz gürültü yerine gerçek rüzgâr dağılımı altında optimize edilmiştir ve uyanma etkileri karşılanmıştır.

Anajafi ve Medina (2018) çalışmalarında bir kısmi kütle izolasyonu (PMI) tekniği önermişlerdir. Bu yaklaşıma göre, farklı katlarda kütlelerin farklı kısımlarını izole ederek, fazladan kütle eklemeye gerek kalmadan birden fazla doğal titreşim bastırıcıya sahip bir bina

sağlayabilir. PMI sisteminin parametrelerinin optimizasyonu, Kanai-Tajimi filtreli Gauss beyaz gürültü uyarımları altında ortalama karekök-katlar arası sürüklenme tepkilerini en aza indirmek için 6, 12 ve 20 katlı referans yapısal modeller için yürütülürken, parametre kısıtlamaları yalıtılmış kontrol için belirtilir. Simülasyon sonuçları, %5 veya %90'lık aşırı izole kütle oranlarına sahip PMI sisteminin, sırasıyla eşdeğer bir TMD veya ideal bir BI sistemine eşdeğer dinamik davranışlar sergilediğini göstermektedir.

Matta (2018) yapmış olduğu çalışmada ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD'ler) elastik olmayan deformasyonlara maruz kalan yapılar üzerindeki sismik performansının, büyük ölçüde yer hareketi yoğunluğuna bağlı olabildiğini araştırmıştır. Bu çalışmada her bir sismik şiddetin gelecekteki sismik hasarların üst yapı maliyeti üzerindeki etkisini tahmin ederek, yaşam döngüsü maliyeti (LCC), TMD'lerin esnek olmayan yapılar üzerindeki faydalarını değerlendirmek için rasyonel bir ölçü olduğunu kanıtlar. Bu makale, birleşik bina-TMD sisteminin üst yapı sismik LCC'sini en aza indiren, esnek olmayan yapılar üzerinde TMD'lerin LCC-optimal tasarımı için bir metodoloji sunmaktadır. Metodoloji, LA, California'daki standart çelik moment dirençli çerçeve ofis binalarının temsilcisi olarak alınan SAC-LA karşılaştırmalı binalarının sismik iyileştirmesine uygulanmıştır. Sonuçlar, en yüksek yoğunluk seviyelerinde sınırlı performanslarına rağmen, LCC-optimal TMD'lerin, hem bina güvenlik açığına hem de TMD birim maliyetine bağlı olacak şekilde, LCC'yi önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Kamgar ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışma TMD'nin parametreleri yapıların sismik performansını önemli ölçüde etkileyebileceğinden, birçok araştırma optimum parametrelerin bulunmasına odaklanmıştır. Bu makalenin ana katkısı, bir yapının en şiddetli tepkisini üreten kritik bir depreme maruz kalan bir yapının sismik titreşim kontrolü için optimum TMD tasarımını sunmaktır. Bu amaca ulaşmak için, çatının maksimum yer değiştirmesini en aza indirerek TMD'nin parametreleri optimize edilmiştir. Sonuçlar, TMD'nin optimum tasarımlarının sadece çatı deplasmanını etkili bir şekilde azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda binanın sismik performansını da iyileştirdiğini göstermektedir.

Gu ve Xiang (1992) çalışmalarında uzun açıklıklı köprülerin çarpma tepkisini bastırmak için kullanılan TMD (ayarlı kütle damperi) parametrelerini optimize etmek için bir matematiksel model geliştirmiştir. Çin'in Şanghay kentinde yapımı devam eden Nanpu Askılı

Köprü'nün donatılması için önerilen TMD'nin parametreleri, yazarlar tarafından yönteme dayalı olarak yapılan bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Kleingesinds ve diğ. (2021) çalışmalarında yüksek binaların özellikle rüzgâr ve depremlerin neden olduğu hasar kapsamında olduğunu göstermişlerdir. Bunun yanı sıra uygulamada, sadece tek bir tehlikenin tasarıma hâkim olduğu varsayılır ve yapısal doğrulamalar için bu tehlike benimsenir. Bu makalede, hem rüzgara hem de depreme maruz kalan yüksek binalara bağlı çoklu TMD'lerin (MTMD'ler) çok amaçlı optimizasyon tabanlı tasarımı için bir metodoloji önerilmiştir.

Pourzeynali ve Estaki (2009) yaptıkları araştırmalarda esnek yapıların karmaşık dinamik davranış sergilediklerini göstermişlerdir. *Buna göre,* yapıların aşırı titreşimini azaltmak için kullanılan yöntemler arasında enerji yutucu sistemler daha umut vericidir. Bu makale, depremlerin düşey ivmelerine maruz kalan süspansiyon köprüsünün düşey tepkilerini bastırmak için parametrelerinin optimal değerlerini bulmak amacıylaTMD sisteminin parametrik çalışmalarını tartışmaktadır. Thomas süspansiyon köprüsü ABD, Los Angeles'ta bulunan bir örnek olay incelemesi olarak seçilmiş ve sayısal çalışmalarda dünya çapındaki 18 büyük depremin düşey ivme kayıtları kullanılmıştır. Yapısal analiz zaman-tanım alanında gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmaların sonuçları, önerilen sistemin köprünün maksimum düşey yer değiştirmesini oldukça düşük bir değere indirebildiğini göstermektedir.

Han ve diğ. (2020) tarafından yapılan araştırmalara göre dağıtılmış ayarlı kütle damperlerinin (DTMD'ler) optimum tasarımı, normalde ayarlı kütle damperlerinin (TMD'ler) konumu ve/veya kütle oranı gibi önceden tanımlanmış kısıtlamalara dayanır. Kontrol performansını daha da iyileştirmek için ücretsiz bir parametre optimizasyon yöntemi (FPOM) önerilmiştir. Tasarım parametrelerinin optimum değerlerini bulmak için geliştirilmiş bir melez genetik simülasyonlu tavlama algoritması (IHGSA) benimsenmiştir. FPOM'un kontrol verimliliğini tekli TMD, çoklu TMD'ler ve geleneksel yöntemlerle optimize edilmiş DTMD'ler gibi geleneksel kontrol senaryolarıyla karşılaştırmak için sayısal bir kıyaslama modeli benimsenmiştir. Sonuçlar, FPOM kullanılarak optimize edilen DTMDs sisteminin aynı kütle oranı değeri için diğer kontrol senaryolarından daha üstün olduğunu göstermektedir.

Soheili ve diğ. (2021) makalelerinde, Ayarlanmış Kütle Sönümleyici (TMD) cihazının, üç tip zemin içeren ve 16 uzak alan depremi yaşayan 40 katlı bir binanın tepkisi üzerindeki

etkilerini araştırmaktadır. Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) yöntemi, TMD değerleri için en iyi ayarları elde etmek için kullanılmıştır ve amaç, üst yapı-zemin etkileşimi (SSI) etkileri dikkate alınarak yapının maksimum sürüklenmesini azaltmaktır. Optimize edilmiş tasarımda, TMD cihazının kullanılmasının karını artıran sapmalarda önemli ölçüde azalma ile sonuçlandığı gösterilmiştir.

Tang ve diğ. (2016) araştırmalarında, optimize edildiğinde, ayarlanmış kütle damperlerinin (TMD'ler), yardımcı kütle-yay-sönümleyici sistemi tarafından ek rezonans ve sönümleme sağladığından, birincil yapının titreşimini etkili bir şekilde azaltabilir olduğunu göstermişlerdir. Birincil yapı ile taban arasına RLC rezonans devresi ile bir elektromanyetik dönüştürücü şönt yerleştirildiğinde, yardımcı kütle olmadan da benzer etki gerçekleştirilebilir. Bu makale, titreşim azaltma için RLC devrelerinin parametrelerini analitik olarak optimize etmek içindir.

Alizadeh ve Lavasani (2020) asma köprülerde yaptıkları çalışmalara göre, asma köprüler deprem gibi dinamik olaylara eğilimli hale getiren genişletilmiş plan konfigürasyonuna sahiptir. Bu da, asma köprülerin daha uzun açıklık, daha fazla esnekliğe ve daha ince olmalarına yol açar. Bu nedenle, kontrol sistemleri, asma köprüleriyer hareketi uyarımına karşı korumak için gerekli görmektedir. Metasezgisel optimizasyon algoritması, bu amaca ulaşmak için güçlü bir araçtır. Vincent Thomas, Tacoma Narrows ve Golden Gate asma köprüleri vaka çalışmaları olarak sırasıyla kısa, ortalama ve uzun açıklıklı olarak seçilmiştir. Sonuçlar, kullanılan TMD'lerin tüm durumlarının yanıt azalmasıyla sonuçlandığını ve TMD durumunun yakın ve uzak alan koşullarındaki köprüler için daha uygun olabileceğini göstermektedir.

Yukarıda belirtilen ve özetlenerek izah edilen literatür çalışmalarına göre, dinamik yüklerin yapılarda meydana getirdiği titreşimler sonucunda yapıda ivme, öteleme vb. gibi durumlar meydana gelmektedir. Ancak bu durumlar zamana bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yapı güvenliğinin sağlanması amacı ile optimum seviyede ayarlanmış TMD kullanımı gerekmektedir. Bu durumda oluşan tepkilerin frekansa bağlı olarak değişiklik gösteren (frequancy-domain) değerlerinden yararlanılmalıdır.

Yapılacak optimizasyona göre amaca uygun olarak TMD için istenilen parametreler optimum seviyelere getirilebilmektedir. Bu uygulamada, ele alınan örnek yapıların ivme transfer fonksiyonunun (TF) minimizasyonu amaçlandığından sönüm oranı (ξ_d) ve TMD

periyodu (T_d) gibi optimum TMD parametreleri aranmaktadır. Bu doğrultuda yapının doğal periyotunun (Ts) optimum değerleri, 0.1-5 sn aralığında değişkenlik gösteren periyotlara sahip SDOF yapıların farklı kütle oranlarına (μ) göre belirlenebilir.

Tek serbestlik dereceli sistemler (SDOF) bir kütle-yay-damper sistemidir ve yalnızca bir doğal frekanstitreşim moduna sahiptir, (SDOF) gerçek dünyadaki nesnelerde doğal frekansları anlamak için yararlı olan basitleştirilmiş bir sönümdür.

4.2.1. Optimizasyon için Matrislerin Oluşturulması

Optimizasyon sürecinde SDOF yapılar için amaç fonksiyonu olarak ivme transfer fonksiyonunun minimizasyonunu; MDOF yapılar içinse ek olarak çeşitli yapı tepkilerini azaltmak amacı ile optimum TMD parametrelerinin belirlenmesi için çiçek tozu algoritması (FPA) kullanılmıştır (Yücel ve diğ., 2019).

Bu amaçla, ilk olarak başlangıç matrisi oluşturulur. Bu matriste yer alacak olan sönüm oranı ve TMD parametreleri için belirlenen limitler şunlardır:

$$0.5\ T_s < T_d < 1.5\ T_s \tag{4.19}$$

$$0.05 < \xi_d < 0.5$$

$$T_d = 0.5\ T_s + \text{rand}\ (T_s) \tag{4.20}$$

$$\xi_d = 0.05 + \text{rand}\ (0.5 - 0.05) \tag{4.21}$$

Ayrıca matrisin son elemanı olan amaç fonksiyonu da belirlenir. Bunu belirlemek için transfer fonksiyonu (TF) için, yapıya etki eden dış kuvvetler ile yapıda oluşan titreşimlerin laplace dönüşümlerinin oranı olarak formül oluşturulmuştur. Bu durum değerlendirildiğinde, MDOF bir yapı için belirlenen hareket denklemin laplace dönüşümü alınarak ve denklemde ωj değeri gerekli yere yazılarak TF, dış kuvvetlerin uyarımlarına bağlı olmamaktadır. TMD'li bir yapı için belirlenen denklem aşağıdaki gibi elde edilir:

$$TF(\omega) = \begin{bmatrix} TF \\ TF_d \end{bmatrix} = [\ -M\ \omega^2 + C\omega j + K]^{-1} M\ \omega^2\ [1] \tag{4.22}$$

Bu optimizasyonda asıl amaç TF'nin tepe değerinin genliğinin minimizasyonudur. Yapıda oluşan gücü tanımlamak amacı ile kullanılan genliğin değerinin hesaplanabilmesi için

öncelikle birim fonksiyonun hesaplanması gerekmektedir. Bunun için desibel (dB) olarak belirlenen denklem aşağıda verilmiştir:

$$f(\mathrm{TF}) = 20\log_{10} \left| \text{maks}(\mathrm{TF}) \right| \tag{4.23}$$

Başlangıç aşamasında çiçek matrisi değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyon değerleri, vektörler (FV) şeklinde aday çiçek elemanlarında depolanırlar (Yücel ve diğ., 2019).

$$\mathrm{FM} = [\mathrm{FV}_1 \;\; \mathrm{FV}_2 \; \mathrm{FV}_3 \;\; \ldots \;\; \mathrm{FV}_{nf}] \tag{4.24}$$

Bundan dolayı vektör sayısı belirlenirken çiçek popülasyonu sayısına (nf) bakılır. Her aday vektör için (4.25) hesaplanır.

$$\mathrm{FV} = \begin{bmatrix} \mathrm{T_d} \\ \xi_d \\ minf(\mathrm{TF}) \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

4.3. TMD PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE ÇALIŞMALAR

Den Hartog (1947), yapıların tek serbestlik dereceli sistem olduğu varsayımıyla, sönümsüz ana sistemler için TMD'nin tasarım parametrelerini belirlemek amacıyla frekans oranı ve sönüm oranı için optimum ifadeler önermiştir.

$$\mathrm{f_{opt}} = \frac{1}{1+\mu}\,,\ \xi_{\mathrm{d,opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \tag{4.26}$$

Warburton (1982), TMD'ler için basitleştirilmiş ayar formülasyonu geliştirmiştir.

$$\mathrm{f_{opt}} = \frac{\sqrt{1-(\mu/2)}}{1+\mu}\,,\ \xi_{\mathrm{d,opt}} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \tag{4.27}$$

Sadek ve diğ. (1997), TMD'nin optimum parametrelerinin yapıların sismik yüklere karşı tepkilerini azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu doğrultuda, çeşitli sayıda TMD içeren tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli yapılar üzerinde farklı deprem uyarmaları sağlanarak ivme ve yer değiştirme tepkilerinde azalmalar gözlemlenmiştir.

$$\mathrm{f_{opt}} = \frac{1}{1+\mu}\left[1 - \xi\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right], \quad \xi_{\mathrm{d,opt}} = \frac{\xi}{\mu+1} + \sqrt{\frac{\mu}{(1+\mu)}} \tag{4.28}$$

Yücel ve diğ. (2019) tarafından yapılan yeni bir çalışmada, optimizasyon metodolojisi kullanmak yerine yapay sinir ağları gibi yapay zekâ araçlarıyla optimum sonuçların tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Yücel ve diğ. (2019) bu çalışmasında, yapay zekâ aracı olarak üç (3) farklı denklem kullanmıştır. Bunlardan birincisi doğrusal denklemdir ve bundan sonra bu tez kapsamında "Yapay Zekâ 1" olarak anılacaktır.

$$f_{opt} = -0.6438\mu + 0.9966 \tag{4.29}$$

$$\xi_{d,opt} = 0.5673\mu + 0.1235 \tag{4.30}$$

Ayrıca, daha iyi bir, eğri tanımlamak için polinom denklemleri geliştirmişlerdir. Bu ifadelerde bundan sonra bu tezde "Yapay Zekâ 2" olarak anılacaktır.

$$f_{opt} = -249.91\mu^5 + 400.09\mu^4 - 208.03\mu^3 + 43.801\mu^2 - 4.1453\mu + 1.0675 \tag{4.31}$$

$$\xi_{d,opt} = -54.673\mu^4 + 54.639\mu^3 - 19.274\mu^2 + 3.2302\mu + 0.0237 \tag{4.32}$$

Ayrıca, tüm denklemlerin performansını kontrol etmek için üstel denklemler de geliştirmişlerdir. Bu ifadelerde bundan sonra bu tezde "Yapay Zekâ 3" olarak anılacaktır.

$$f_{opt} = 1.0038\, e^{-0.747\mu} \tag{4.33}$$

$$\xi_{d,opt} = 0.1258\, e^{2.8573\mu} \tag{4.34}$$

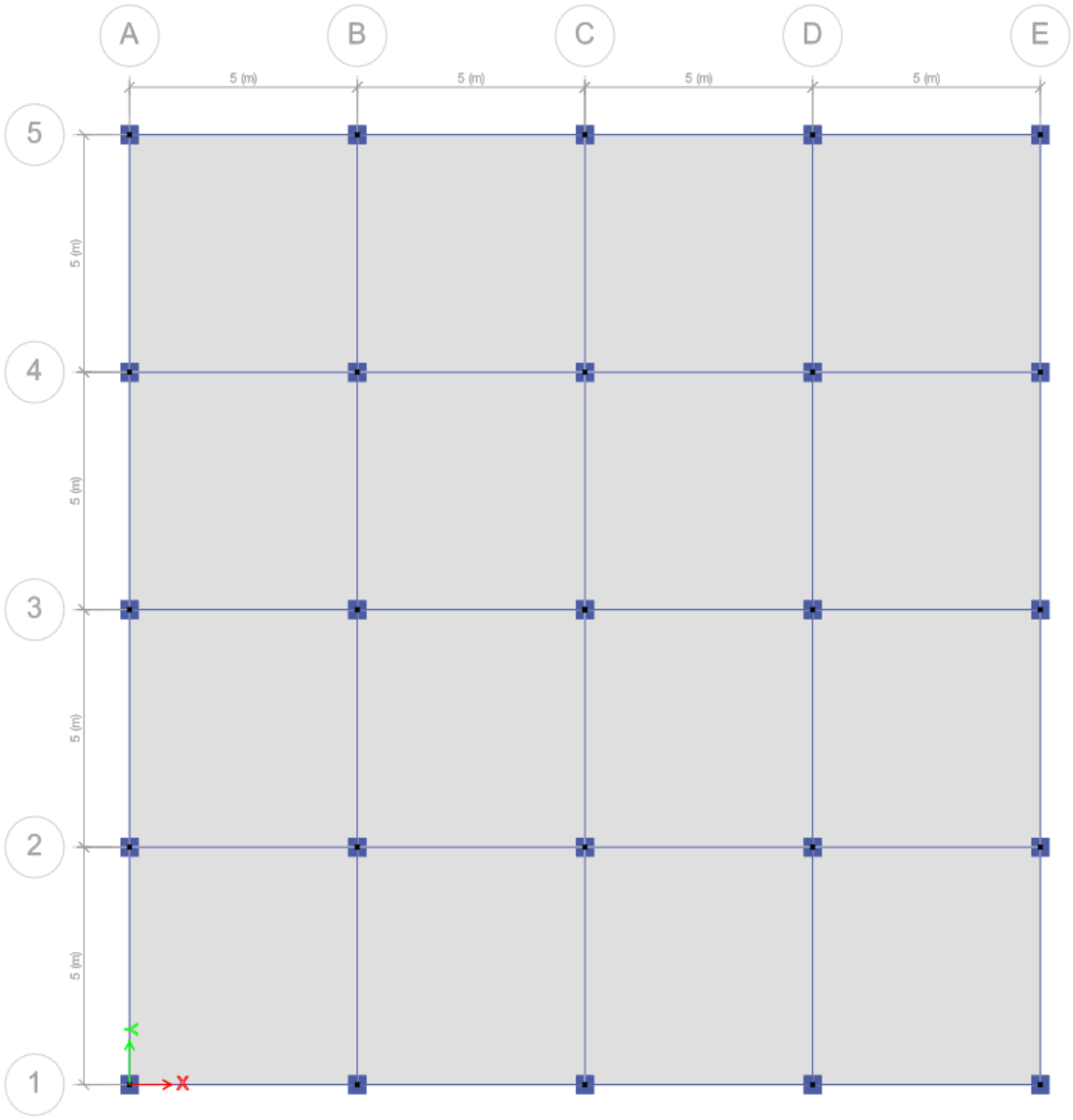
Yapay zeka ile eldi edilen denklemlerin çıkarımında, optimum TMD tasarımını ve transfer fonksiyonunu (TF) minimize etmek için çiçek tozlaşma yöntemi kullanılmakta olup sonrasında MATLAB uygulamasında yapay sinir ağları (YSA) araç kutusu yardımıyla geliştirilmektedir. Yapılan analizler sonucunda elde edildiği için hata payı daha düşüktür ve numerik optimizasyon yöntemlerine göre uygulaması daha kolay ve hızlıdır.

Bu yöntemin %1 ve %40 arasındaki kütle oranında daha etkili olması MDOF yapılarda ilk katın maksimum transfer fonksiyonu ivmesini azalttığını göstermektedir. Küçük kütle oranı için yapay zekâ 2 yönteminin ve %20 kütle oranı için yapay zekâ 3 yönteminin örneklerle uygun olduğu gösterilmiştir. Bu tarz yapay zekâ yöntemlerinin TMD tasarımında

daha pratik olduğu ve ilk 2 transfer fonksiyonunda yapı ve TMD'de tepkileri azalttığı görülmektedir (Yücel ve diğ., 2019).

4.4. OPTİMUM TMD PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRMASI ÜZERİNE ÖRNEK UYGULAMA

Optimize edilmiş TMD parametrelerinin etkisini gözlemlemek üzere, 5 metre aralıklarla akslar kullanılarak, zemin artı dört katlı bir yapı, her kat 3 metre yüksekliğinde olarak, ETABS yapısal analiz programında modellenmiştir. Tasarlanan binanın planı ve detayları Şekil 4.4'de verilmektedir:



Şekil 4.4: Tasarlanan bina planı.

Bina Yapısının geometrik parametreleri:

Bina Tipi: Konut Binası

Kat Yüksekliği: 3m

Yapısal Tip: RCR Çerçeveli Yapı

Deprem Davranış Katsayısı: 8

Bina Önem Katsayısı: 1

Dayanım Fazlalığı Katsayısı: 3

İki Yönlü Döşeme Kalınlığı: 140mm

Beton Yoğunluğu: 25kN/m^3

Kolon Boyutu: 400*400mm

Kiriş Boyutu: 250*500mm

Beton Sınıfı: C30/37

İnşaat Çeliği Sınıfı: S420

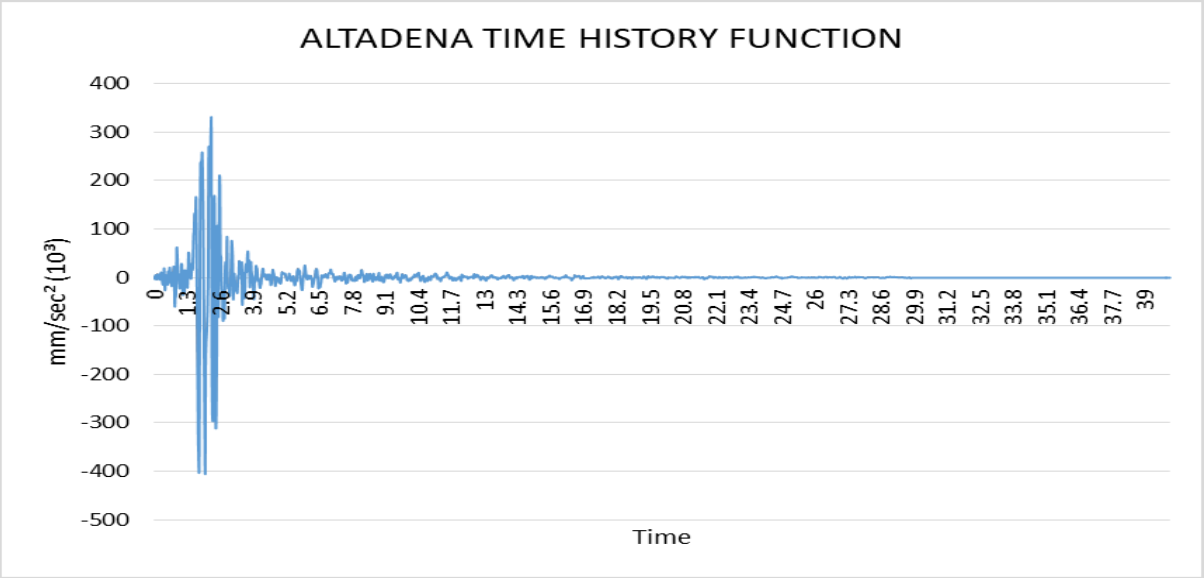
Duvar Malzemesi: Tuğla

Zemin Kaplaması: 1.5 kN/m^2

Hareketli Yük: 2 kN/m^2

Zemin Türü: ZC (orta)

Bu bina yapısının doğrusal zaman-tanım alanında hesap ile analiz edilmesi için, 1999 yılında (7.13MW) büyüklüğünde ALTADENA kaydedilmiş olan deprem kaydının uygulanmıştır 40 saniye süren ve en çok ilk 10 saniyede etkinliğini gösteren bu deprem kaydı Şekil 4.5'de ivme-zaman grafiği olarak gözükmektedir. Ayrıyeten Şekil 4.6'da bu deprem kaydının SAP2000 yapısal analiz programında nasıl uygulandığı ve ayarlandığı gösterilmiştir.



Şekil 4.5: SAP2000 yapısal analiz programının kütüphanesinde mevcut olan ALTADENA deprem kaydı.

Tablo 4.2: Bina yapısı hakkında teknik bilgiler.

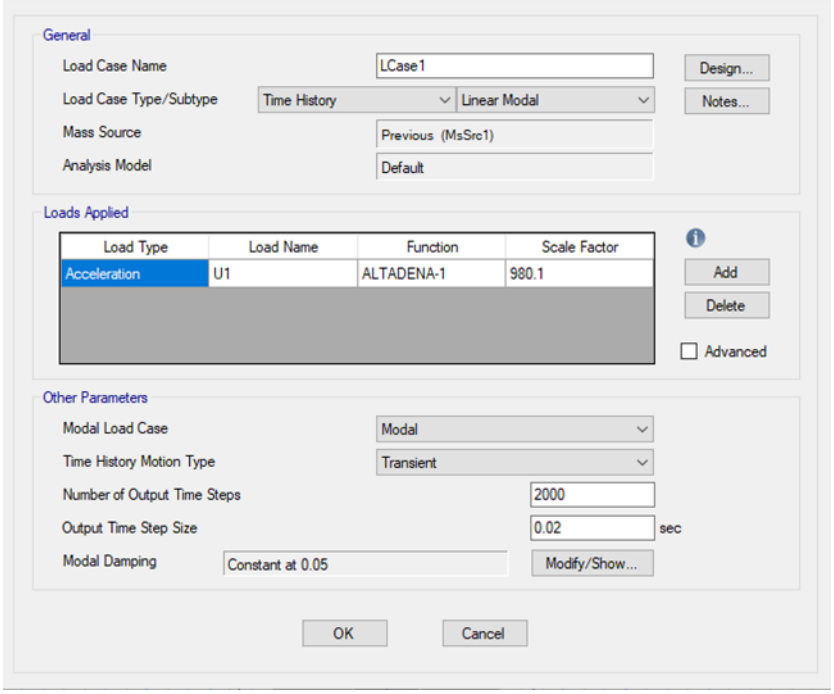
Hâkim Periyot (sn) - T1	0.865
Yapı Kütle Katılım Oranı	0.7484
Yapı Modal Ağırlık (kN)	15361.6853
Mod Tepe Deplasman (m) - φ	0.0112
Mod Katılım Çarpanı (kN,m) - Γ	34
Açısal Frekans (1/sn) - ω1	7.264
Yapı Üst Kütle (kNs^2/m)	1565.921

Tablo 4.2'de görüldüğü üzere yapının hâkim periyodu, yapının kütle katılım oranı, yapı modal ağırlığı ve mod katılım çarpanı bina yapısının geometrik parametrelerinden ve ETABS uygulamasından elde edilmektedir.

Yapının açısal frekansı ve yapı üst kütlesi aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir.

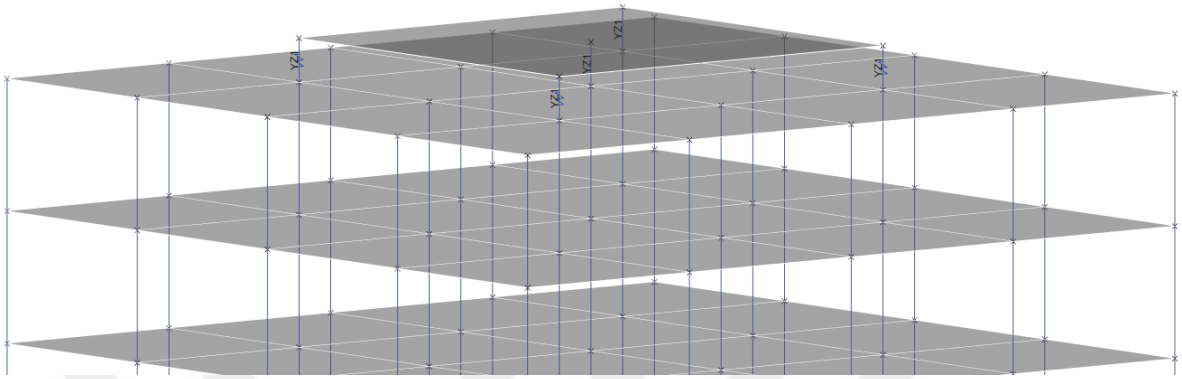
$$\text{Açısal frekansı} = \frac{2\pi}{\textbf{Hâkim Periyot}} \tag{4.35}$$

$$\text{Yapı üst kütle } (kNs^2/m) = \frac{\textbf{Yapı Modal Ağırlık (kN)}}{\textbf{9.81}} \tag{4.36}$$



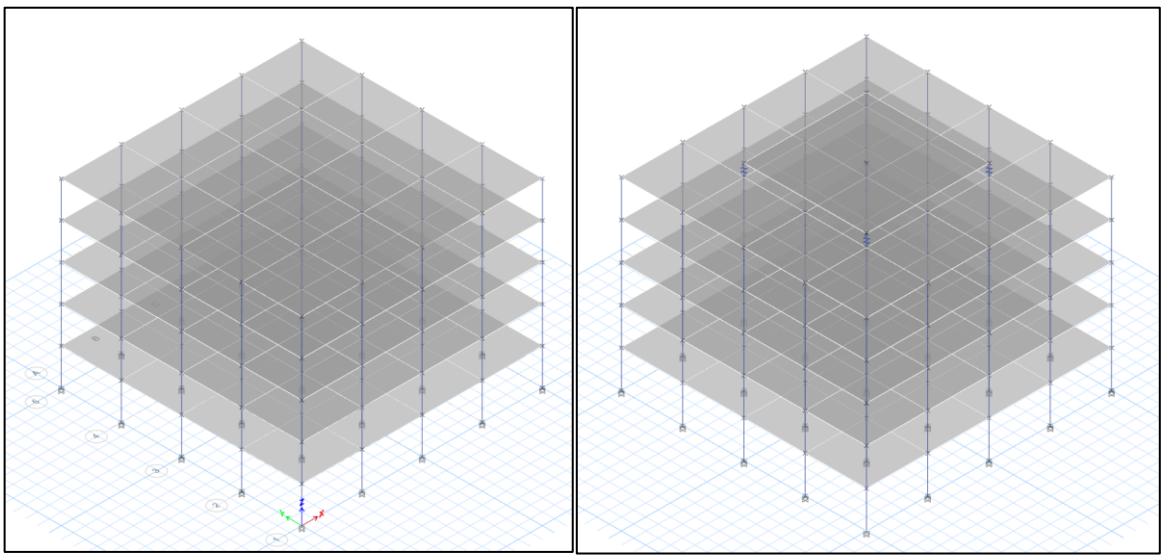
Şekil 4.6: SAP2000 yapısal analiz programında deprem kaydının eklenmesi ve ayarlanması.

Bina yapısında TMD sistemsiz ve TMD sistemli modeli karşılaştırmak için, binanın en üst katına Şekil 4.7'de gözüktüğü gibi, bir plak TMD kütlesi olarak linkler vasıtasıyla eklenmiştir.



Şekil 4.7: Bina üst katında ayarlanmış kütle damper yüksekliğinin konumu.

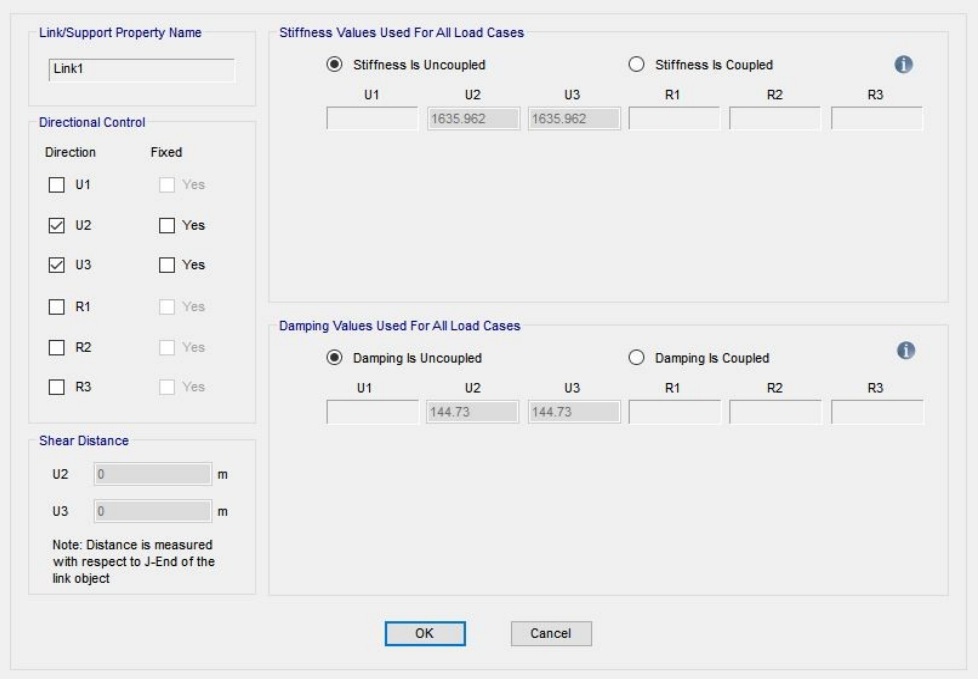
Binanın sismik performansını artırmak için en üst katta TMD ilave edilmiştir ve rijitlik merkezi nedeniyle TMD kütlesi binanın en üst katın ortasında tasarlanmıştır. Sonrasında ise TMD sistemsiz karkas yapı ile TMD sistemli yapı Şekil 4.8'de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 4.8: TMD sistem karşılaştırması yapılması için tasarlanan yapı.

Linklerin değerini uygulamaya geçirmek için; Den Hartog (Denklem 4.26), Warburton (Denklem 4.27), Sadek (Denklem 4.28), Yapay Zekâ 1, 2 ve 3 denklemleri kullanılarak, Şekil 4.9'da göründüğü gibi k_d rijitlik için elde edilen değerler Stiffness Values olarak U2 ve U3

olarak girilmiştir ve benzer şekilde, c_d sönüm için elde edilen değerler Damping Values olarak U2 ve U3 olarak girilmiştir.



Şekil 4.9: Uygulamada linklerin değerlerini girilmesi gereken bölüm.

TMD optimizasyonu için kütle oranı %5 seçilmiştir. Kütle oranı, kütle sönümleyicisinin kütlesinin yapının kendi kütlesine oranıdır. TMD sistemlerinde, kütle oranının artırılması genellikle titreşim azaltıcı etkiyi artırır. Ancak aynı zamanda sistemin tasarımını düşey doğrultuda daha zor hâle de getirebilir. Bu nedenle, TMD sistemlerinin tasarımı sırasında kütle oranının seçimi önemlidir. Bu seçimin nedenleri sistemin spesifik amaçlarına, tasarım kısıtlarına göre değişebilir. Örneğin, sistemin tasarım kısıtları nedeniyle daha düşük bir kütle oranı seçilebilir veya sistemin kapasitesi uygun ise performansını iyileştirme amacıyla daha yüksek bir kütle oranı seçilebilir. Daha fazla kütle taşıyacak olan TMD sistemde daha büyük bir yer kaplar ve daha fazla malzeme gerektirir. Bu durumda yapının inşası daha maliyetli olur.

Kütle oranı ile birlikte, optimizasyon çalışmaları sonucu bulunan denklemler aracılığıyla, yapıda kullanılacak TMD sistemleri için parametreler belirlenmiştir.

Tablo 4.3'te görüleceği üzere, bulunan değerler birbirine çok yakın olmakla beraber yapı üzerindeki etkilerini gözlemlemek üzere sonuçlar tablolar halinde karşılaştırılmış olup tezin ileri kısımlarında tartışılmak üzere eklenmiştir.

Tablo 4.3: TMD eklenen 4 katlı bina yapısı için optimum sonuçlar.

	Den Hartog	Warburton	Sadek	Yapay Zekâ 1	Yapay Zekâ 2	Yapay Zekâ 3
Kütle Oranı	5%	5%	5%	5%	5%	5%
$\mathbf{f_{opt}}$	0.9524	0.9404	0.9419	0.9644	0.9462	0.9669
$\boldsymbol{\xi_{d.opt}}$	0.1336	0.1098	0.2660	0.1519	0.1435	0.1451
Kütle m_d	78.2961	78.2961	78.2961	78.2961	78.2961	78.2961
Frekans$_d$	6.9180	6.8309	6.8418	7.0053	6.8727	7.0234
Periyod T_d	1.1010	1.0872	1.0889	1.1149	1.0938	1.1178
Rijitlik k_d	1635.962	1677.980	1672.639	1595.470	1657.625	1587.263
Sönüm C_d	144.7303	117.4488	284.9837	166.5916	154.4501	159.5815

Optimum frekans oranı (f_{opt}), yapının frekansına daha yakın olduğu zaman yapının sismik hareketleri azaltılır ve yapının dayanıklılığı yükseltir. Bu nedenle Yapay Zekâ 1 ve 3 yöntemleri diğer yöntemlere nazaran daha iyi sonuç vermiştir.

TMD sönüm oranı ($\xi_{d,opt}$), yapının frekansı ile TMD frekansı arasındaki farkın büyüklüğüne göre değişir. Bu nedenle, TMD sönüm oranının belirlenmesinde yapının frekansı ve TMD frekansı önemli rol oynar. Bu oranının çok yüksek olması, yapının sismik hareketlerini azaltır ancak yapının dayanıklılığını en yüksek seviyede tutamayabilir. Bu nedenle, yapının frekansı ve TMD frekansı gibi yapı özellikleri dikkate alınır ve optimizasyon çalışmaları yapılır.

Sonuçlara göre Warburton yöntemi en düşük TMD sönüm oranı ve Sadek yöntemi ile en yüksek miktar olarak elde edilmiştir. Buna göre Sadek yöntemi TMD sönüm oranı konusunda yapının sismik hareketlerini azaltmaya yönelik daha iyi bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

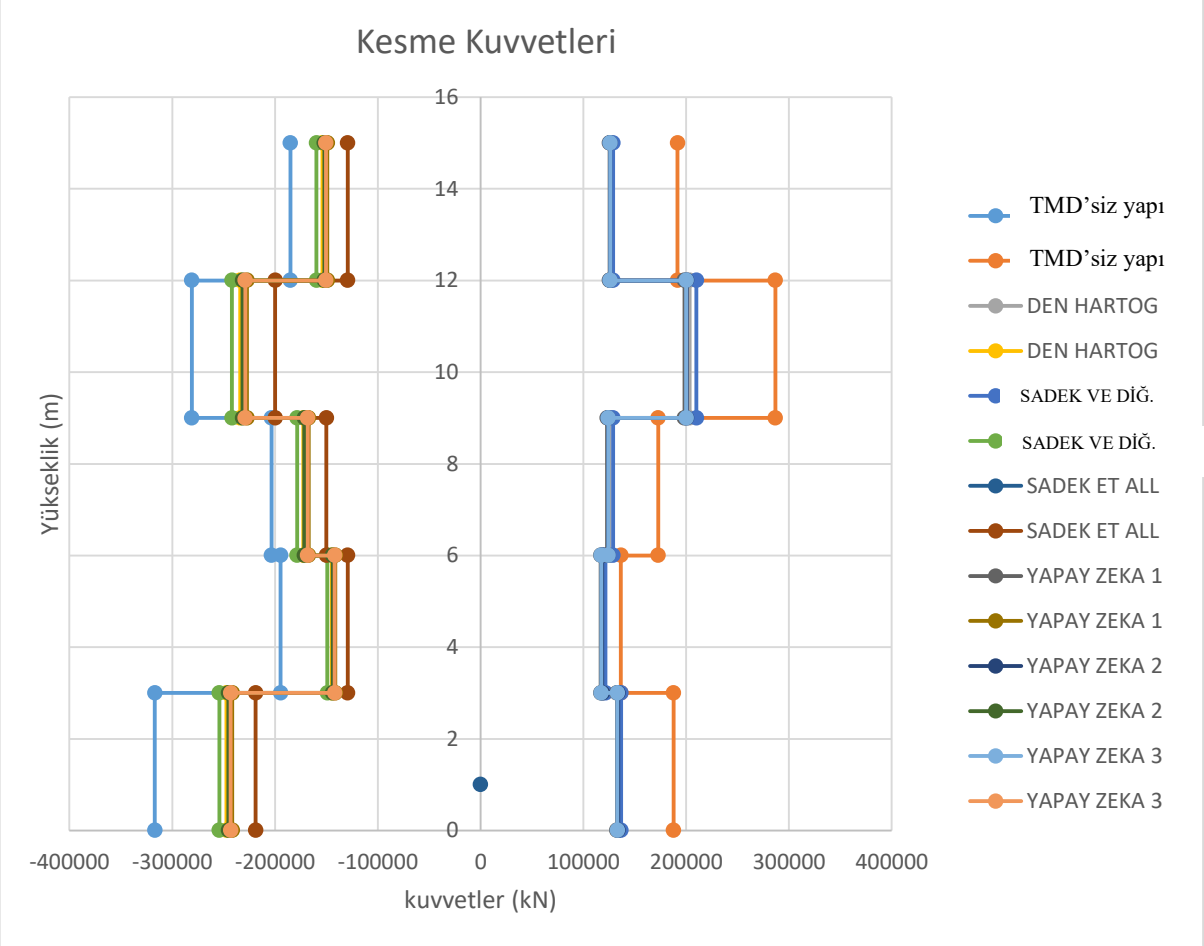
Yüksek rijitlikli (Rijitlik: k_d) bir TMD sistemi, hareket ettiğinde daha az hareket edecektir ve hareket etmeye daha az yatkındır. Az hareket eden TMD sistemi de daha az enerji sönümler. Bu nedenle daha az rijitliği olan TMD sistemi daha iyi sonuçlar verir. Sonuçlara göre bu yapıda Yapay Zekâ 1 yöntemi diğer yöntemlere nazaran daha iyi bir sonuç vermiştir.

Sadek yöntemi diğer yöntemlere nazaran daha yüksek sönümleme sağladığı için deprem sırasında kütle sönümleyicinin daha az hareket edeceğini göstermektedir.

Yapay sinir ağları tabanlı denklemler olan Yapay Zekâ 1, Yapay Zekâ 2, Yapay Zekâ 3, iterasyonlara dayanan ve dinamik analizler sonucunda ilde edilmiş optimum sonuçlar sonucunda oluşturulduğundan, bu denklemler ile tekrar optimizasyon sürecine gerek kalmaksızın daha pratik ve hızlı sonuçlar elde edilmekte ve hatanın payı daha çalışmada karşılaştırılan diğer yöntemler göre düşük çıkmaktadır.

Daha sonra, TMD sistemli yapı için, Daha önce bahsedilen çalışmalardan elde edilen değerler ile analizler yapılmış ve bulgular karşılaştırılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, bulunan kat kesme kuvvetleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir;

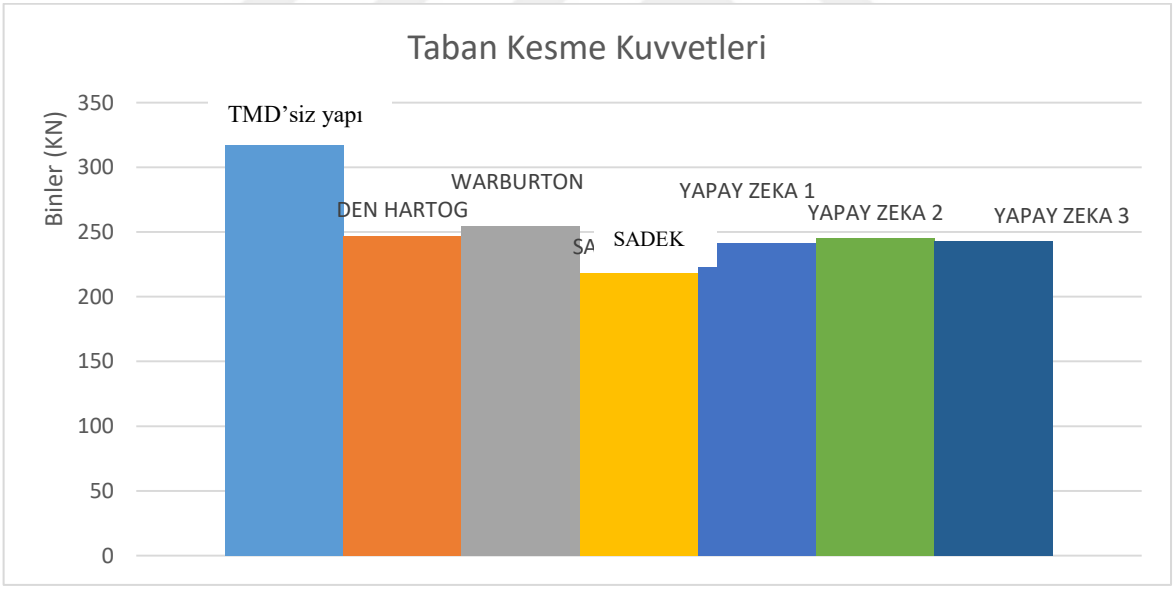


Şekil 4.10: Meydana gelen kat kesme kuvvetleri.

Deprem kaydının etkimesi sonucu oluşan ivmelenme, TMD sönüm sistemi olmayan yapıda daha fazla olacağından kütle ile çarpılması sonucu kat kesme kuvvetleri daha yüksek çıkmıştır. Şekilden de görüleceği üzere TMD'li sistemlerde, TMD olmayan sistemlere göre kat kesme kuvvetlerinde azalım görülmüştür.

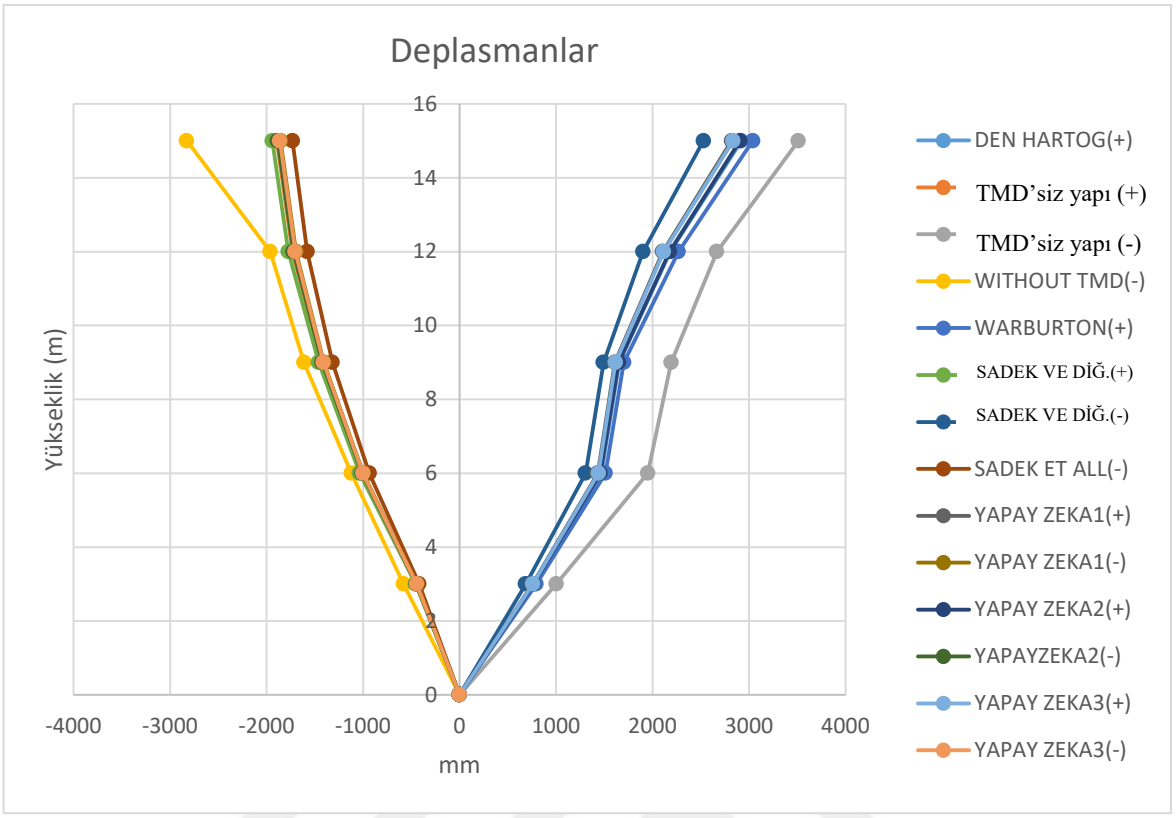
TMD'siz yapı ilk ve üst katlarda eksi 300.000 KN ve artı 290.000 KN kesme kuvvetinden etkilenmiştir. Sadek yöntemi sönüm oranı yüksek olduğu için kesme kuvveti karşısında daha iyi performans göstermektedir. Bunun yanı sıra daha fazla maliyet ve malzeme gerektirir. Sadek yöntemi performansına yakın olan diğer yöntem Yapay Zekâ 1 yöntemidir.

Şekil 4.11'deki grafikten görüldüğü üzere, TMD sistemi bulunmayan yapıya göre, TMD sistemli binalarda taban kesme kuvvetleri azalmıştır. Bu durum, bina tasarımının çoğu denkleminde kullanılan deprem kesme kuvveti parametrelerinde düşüşe neden olacaktır ve dolayısıyla tasarımda da olumlu etki gösterecektir.



Şekil 4.11: Meydana gelen taban kesme kuvvetleri.

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere taban kesme kuvvetinde Sadek yöntemi, sönüm oranı yüksek olduğu için daha iyi bir sonuç vermektedir. Sadek yöntemine en yakın olan diğer yöntem ise Yapay Zekâ 1 yöntemidir. Yapay Zekâ 2, Yapay Zekâ 3 ve Den Hartog yöntemi çok yakın sonuçlar vermiş bulunmaktadır. Ancak Warburton yöntemi TMD sönüm oranı düşük olduğu için en düşük performansı göstermektedir.



Şekil 4.12: En üst katta ölçülen maksimum ve minimum deplasman değerleri.

Şekil 4.12'de TMD'siz yapıda deplasmanlar eksi 3000 mm ve artı 3500 mm'dir ancak TMD sistemleri kullanıldığı zaman bu değerler düşmekte ve yapıda deplasmanlara karşı dayanıklılık göstermektedir.

Sadek yöntemi ile elde edilen değerler sönüm oranı yüksek olduğu için en üst kattaki deplasman değeri diğer yöntemlere nazaran daha düşüktür. Ona yakın olan diğer yöntem ise Yapay Zekâ 1 yöntemidir.

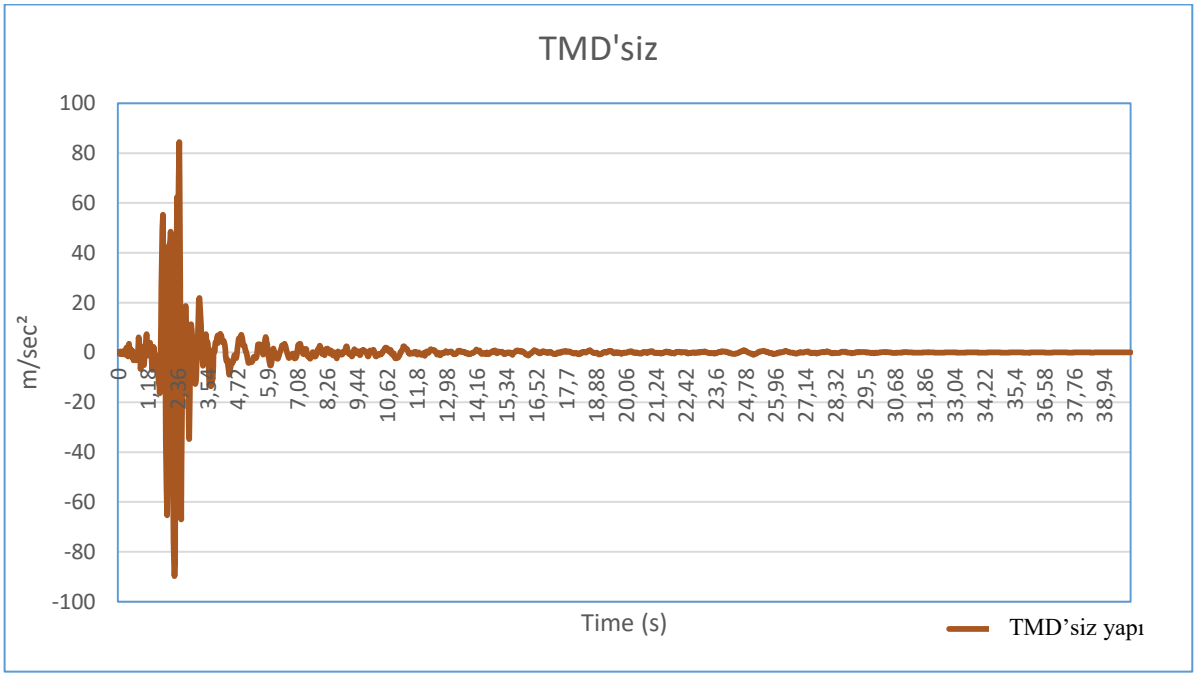
Şekil 4.12'de Yapay Zekâ 1, Yapay Zekâ 2, Yapay Zekâ 3 ve Den Hartog yöntemleri yapıdaki deplasmana karşı birbirlerine çok yakın sönümler sağlamıştır.

Yapay Zekâ 1 yönteminden elde edilen sönüm oranı, Sadek yöntemi hariç diğer yöntemlere yakın olsa da TMD'de rijitliği düşük olduğu için dinamik güçlere karşı yapıda daha iyi dayanıklılık katmaktadır.

Maksimum ve minimum deplasman değerlerine göre Warburton yöntemi TMD Rijitlik (k_d) değeri fazla olduğu için yapıda deplasmana karşı en düşük dayanıklılığı sağlamaktadır.

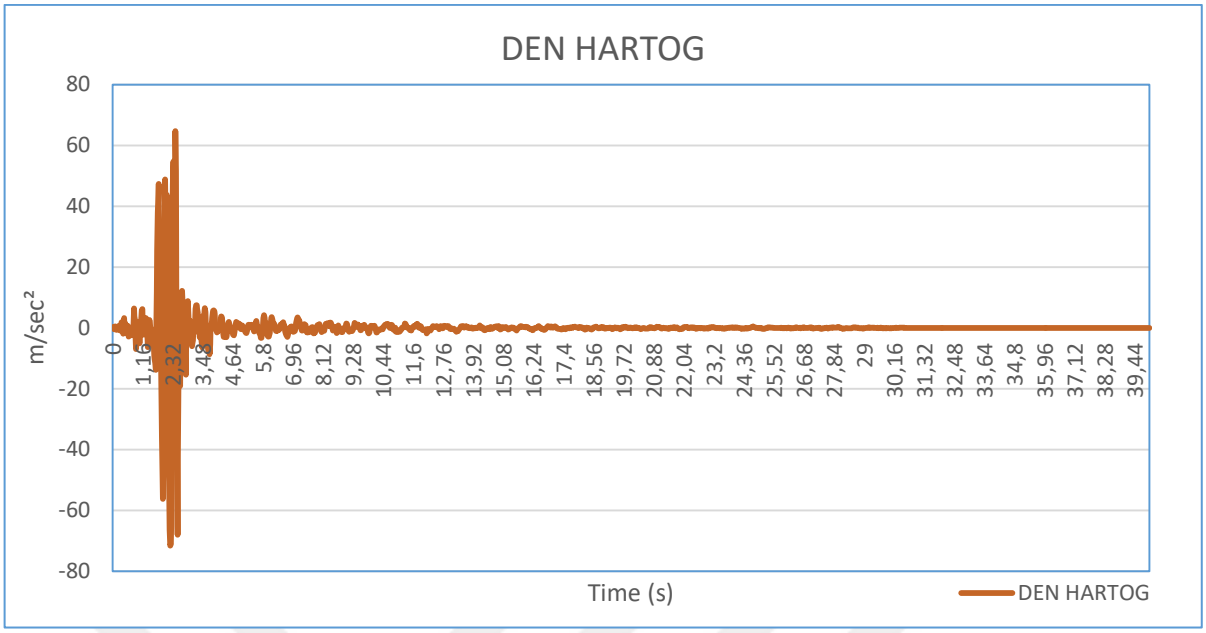
Çalışmamızda bu bina yapısının doğrusal zaman-tanım alanında hesap ile analiz edilmesi için ALTANEDA depreminin kaydını ETABS uygulamasına girilmiştir. Yaklaşık 40 saniye süren bu depremin ilk 5 saniyesinin daha etkili olduğu görülmektedir. Uygulamadan aldığımız verilerle bu deprem kaydının altındaki yapıda TMD'siz ve TMD'li sistemlerin ivme-zaman tepkilerini karşılaştırılmıştır.

İvme-zaman grafiği, yapının zamana göre hızının nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu grafik, x ekseninde zamanı, y ekseninde ise ivmeyi göstermektedir.



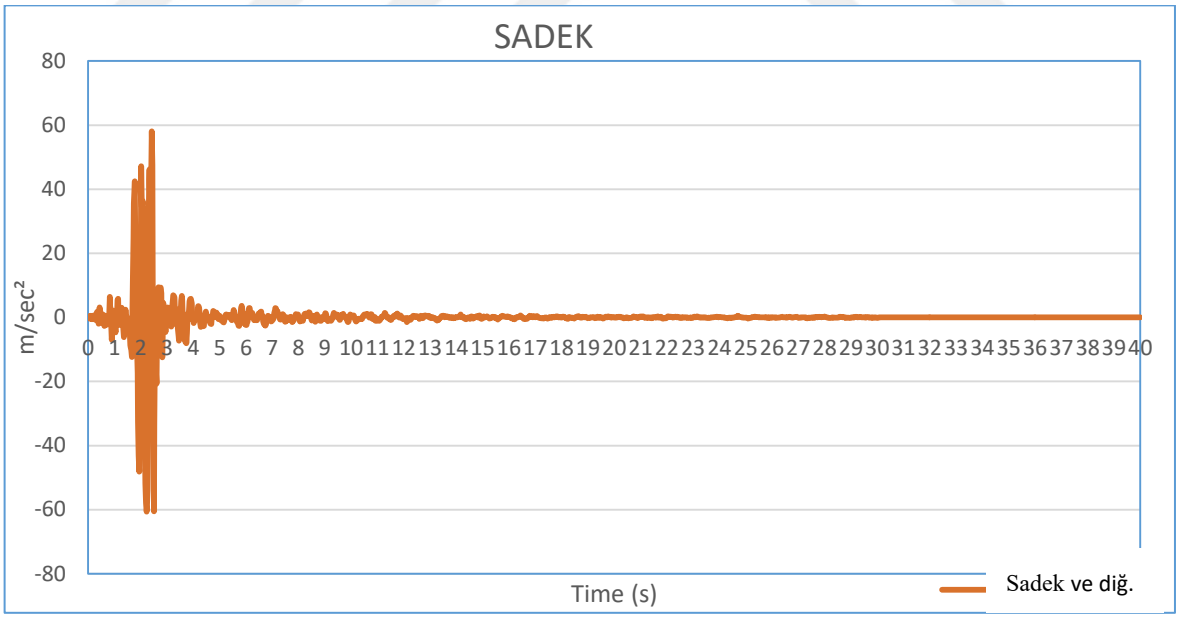
Şekil 4.13: Deprem kaydı altında bina yapısının TMD sistemsiz davranışı.

Şekil 4.13'te uygulamadan aldığımız verilere göre yapının TMD'siz durumunda ilk 5 saniyede yapı, maksimum ivmeye maruz kalmaktadır. Yapıyı etkileyen maksimum ivme - 87 m/s^2 ve + 85 m/s^2 olarak elde edilmiştir.



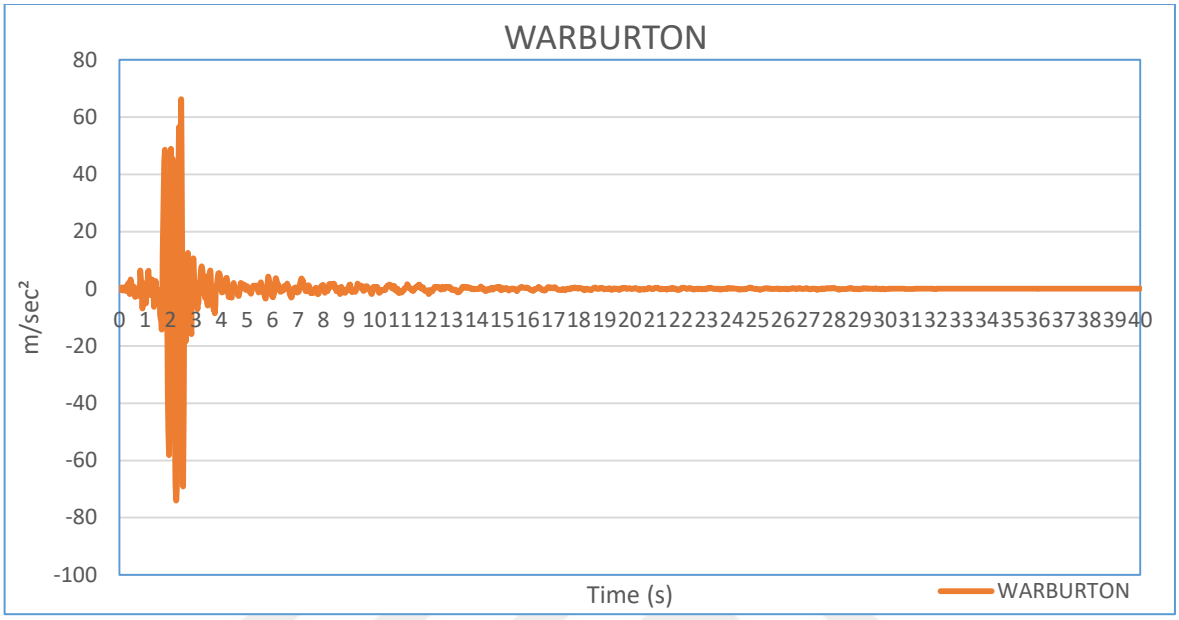
Şekil 4.14: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının Den Hartog parametrelerine göre davranışı.

Şekil 4.14'te Den Hartog yöntemi ile uygulamadan elde ettiğimiz verilere göre maksimum ivme miktarı TMD'siz sisteme göre - 72 m/s^2 ve + $65 m/s^2$'ye kadar azalmıştır.



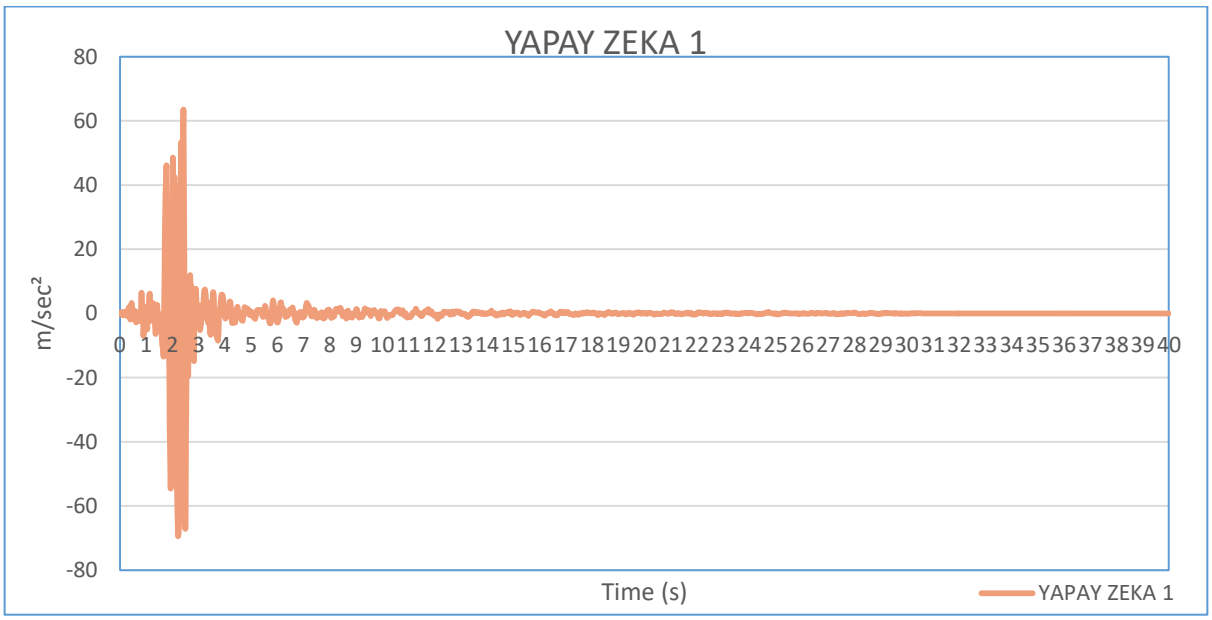
Şekil 4.15: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının, Sadek ve diğ. (1997) tarafından belirtilen parametrelere göre davranışı.

Şekil 4.15'te Sadek yöntemi ile uygulamadan elde ettiğimiz verilere göre maksimum ivme miktarının TMD'siz sisteme göre - 61 m/s^2 ve + 58 m/s^2'ye kadar azaldığı görülmüştür.



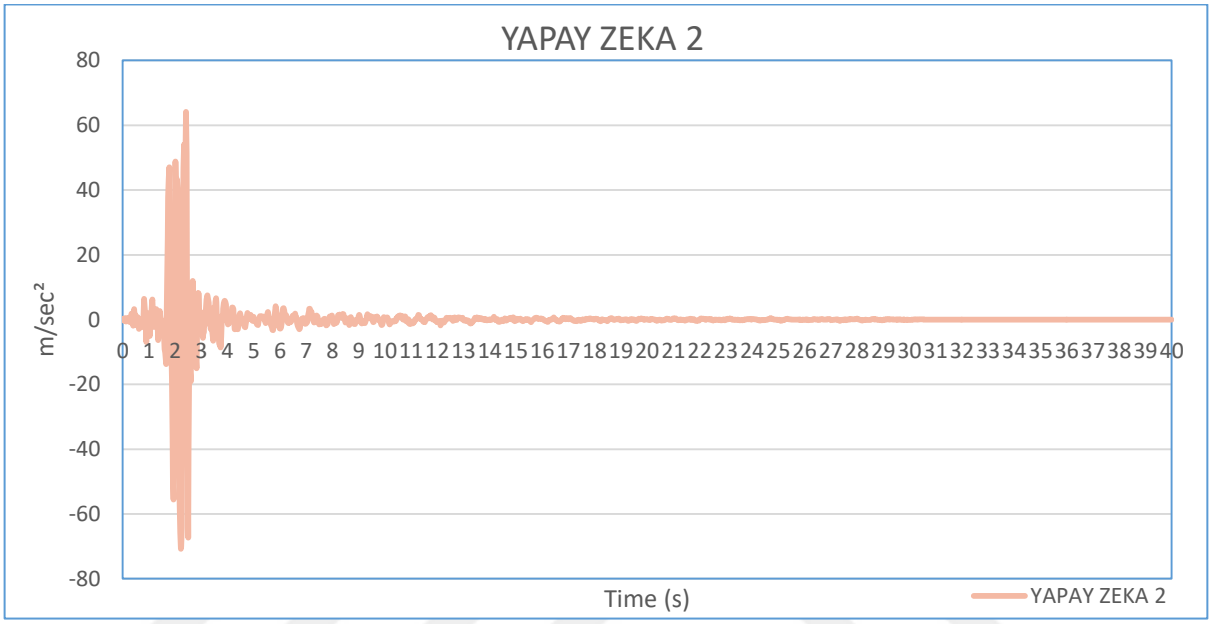
Şekil 4.16: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının Warburton parametrelerine göre davranışı.

Şekil 4.16'da Warburton yöntemi ile uygulamadan elde ettiğimiz verilere göre maksimum ivme miktarının TMD'siz sisteme göre - 74 m/s^2 ve + 66 m/s^2'ye kadar azaldığı görülmüştür.



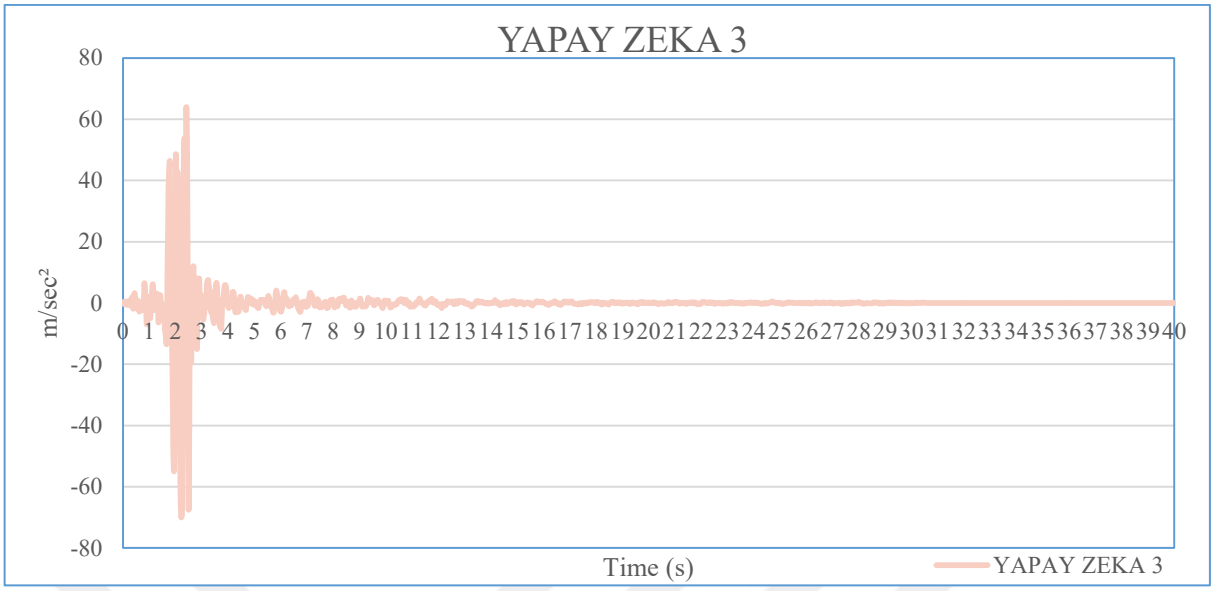
Şekil 4.17: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının Yapay Zekâ 1 doğrusal denklem parametrelerine göre davranışı.

Şekil 4.17'de Yapay Zekâ 1 yöntemi ile uygulamadan elde ettiğimiz verilere göre maksimum ivme miktarının TMD'siz sisteme göre - 70 m/s^2 ve + 64 m/s^2'ye kadar azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.18: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının, Yapay Zekâ 2 polinom denklem parametrelerine göre davranışı.

Şekil 4.18'de Yapay Zekâ 2 yöntemi ile uygulamadan elde ettiğimiz verilere göre maksimum ivme miktarının TMD'siz sisteme göre - 70 m/s^2 ve + 65 m/s^2 'ye kadar azaldığı görülmüştür.



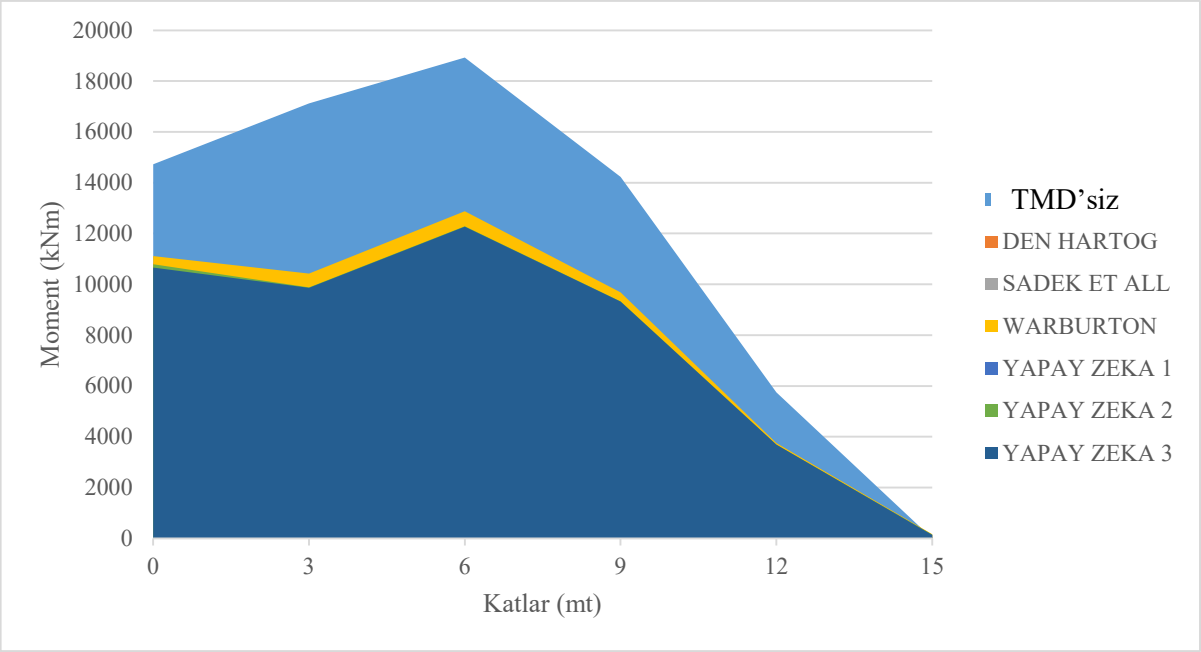
Şekil 4.19: Deprem kaydı altında TMD'li bina yapısının, Yapay Zekâ 3 üstel denklem parametrelerine göre davranışı.

Şekil 4.19'da Yapay Zekâ 3 yöntemi ile uygulamadan elde ettiğimiz verilere göre maksimum ivme miktarının TMD'siz sisteme göre - 70 m/s^2 ve + 63 m/s^2 'ye kadar azaldığı görülmüştür.

Bölüm 4.3'te belirtilen optimizasyon üzerine yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen denklemlere göre bulunan değerlerle yapılan bu çalışmanın neticesi en net ivme-zaman grafiklerinde gözlemlenmiştir. Her bir optimizasyon çalışmasının sonucunun karşılaştırılması için verilen grafiklerden bu durum kolayca görülebilir (Şekil 4.10 – 4.19).

Örneğin; Sadek ve diğ. Tarafından bulunan denklemler sonucu elde edilen parametrelerin kullanılmasıyla TMD sistemli yapıda oluşan ivme-zaman grafiğinde ciddi düşüşler görülmüştür.

Yücel ve diğ. (2019) tarafından bulunan yapay zekâ denklemlerinde ise en uygun davranışı gösteren Yapay Zekâ 2 olarak isimlendirilen polinomal eğri denklemi olarak görülmüştür.

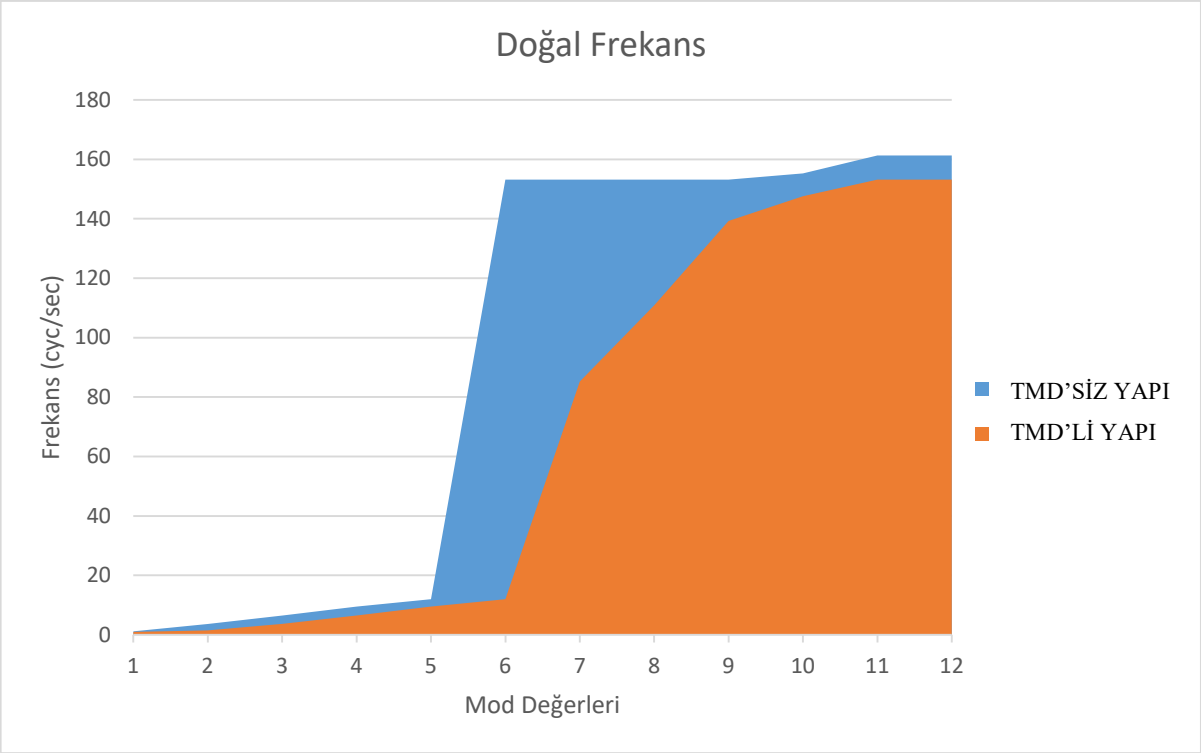


Şekil 4.20: Devrilme momentlerin alansal gösterimi.

Şekil 4.20'de yapı devrilme moment değerleri farklı optimizasyon denklemlerine göre belirlenmiştir. Kesme kuvvetlerinde görülen düşüş sayesinde, yapının çokça tasarım denkleminde kullanılan devrilme moment değerlerinde de düşüşler yaşanmıştır.

Şekil 4.20'de göründüğü üzere deprem kaydının altında yapının maksimum momentinin TMD'siz yapıda 19.000 (kNm) iken, bu miktar TMD'li sistemlerin etkisiyle 11.000 (kNm)'ye kadar azalmıştır.

Warburton yöntemi diğer yöntemlere nazaran daha az sönüm miktarına sahip olduğu için momentinin diğer yöntemlere göre çok olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21: Doğal frekans karşılaştırılması.

Şekil 4.21'de mod değerlerine karşılık gelen frekans değerlerine göre doğal frekans karşılaştırılması yapılmıştır. TMD olmayan bina ile Den Hartog optimizasyon denklemleri sonucu bulunan TMD'li sistem parametrelerinin etki edildiği binanın frekans değerlerine bakıldığında, frekans değerlerindeki değişim görülecektir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında başlıca amaç hayatımızın bir parçası olan depremin olumsuz etkisini en aza indirmek için gerekli çalışmalarda bulunmaktır. Deprem coğrafi özelliklere göre farklı etkiler gösterse de en hafif haliyle bile etki gösterdiğinde can ve mal kaybı yaratabilir. Bu durumu en aza indirmek amacıyla her geçen gün yeni çalışmalar yapılmaktadır. Bu tezde ayarlı kütle sönümleyicileri hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bir bina yapısının TMD'li ve TMD'siz olarak deprem karşısındaki tepkisi karşılaştırılmıştır.

Bölüm 4.3 kapsamında, optimum TMD parametrelerinin bulunması üzerine daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmiş, bu kapsamda, Den Hartog (1947), Warburton (1982), Sadek ve diğ, (1997), Yücel ve diğ, (2019) tarafından bulunan denklemler gösterilmiştir. Yıldan yıla geliştirilen denklemler, yapı tepkilerinin azaltılmasında etkili olmuştur.

Sadek yöntemi sönümü yüksek olduğu için iyi bir yöntem olduğu görülmektedir. Ancak bu tür sönümü yüksek yapıların yapılması maliyet ve zaman konusunda ciddi sıkıntılar yaşatabilmektedir.

Den Hartog yöntemi ise genellikle sönümsüz yapılarda kullanılan bir yöntem olup bu nedenle bu yöntemde daha basit sonuçlar elde edilebilmektedir. Warburton yönteminin de kısıtlı etkisi vardır.

Daha modern ve pratik olarak bakılabilecek yapay zekâ denklemlerinin hata payı düşüktür. Dolayısıyla geleneksel denklemlere göre uygulamada kullanmak üzere fark yaratmış durumdadır.

Bölüm 4.4 kapsamında, Bölüm 4.3'de bahsi geçen optimizasyon çalışmaları neticesinde bulunan denklemler ile elde edilen parametre değerleri, literatürde çokça görülebilecek bir bina yapısı üzerine eklenen TMD kontrol sisteminde kullanılmıştır. Daha sonra bina yapısı, ALTENEDA deprem etkileri altında incelenmiş ve çıkan sonuçlar çeşitli tasarım parametresi şeklinde karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.1: TMD eklenen 4 katlı bina yapısı için optimum sonuçlar ve maksimum yapı tepkileri.

	Den Hartog	Warburton	Sadek	Yapay Zekâ 1	Yapay Zekâ 2	Yapay Zekâ 3
Kütle Oranı	5%	5%	5%	5%	5%	5%
f_{opt}	0.9524	0.9404	0.9419	0.9644	0.9462	0.9669
$\xi_{\delta,o\pi\tau}$	0.1336	0.1098	0.2660	0.1519	0.1435	0.1451
Kütle m_d	78.2961	78.2961	78.2961	78.2961	78.2961	78.2961
Frekans$_d$	6.9180	6.8309	6.8418	7.0053	6.8727	7.0234
PeriyodT_d	1.1010	1.0872	1.0889	1.1149	1.0938	1.1178
Rijitlik k_d	1635.9623	1677.9801	1672.6399	1595.470004	1657.6253	1587.2631
Sönüm C_d	144.7303	117.4488	284.9837	166.5916	154.4501	159.5815

Bu adımda, optimum TMD tasarımına yönelik, kritik deprem kaydında verilen tepkilerin azaltılması amacıyla, 6 adet farklı denklemden türetilmiş %5 kütle oranıyla TMD sistemleri 4 katlı yapıya eklenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen maksimum yapı tepkileri ve optimum TMD parametrelerinin değerleri, Tablo 5.1'de yer almaktadır. Sadek ve diğ. tarafından bulunan denklemlerde sönüm oranının yüksek olmasından dolayı, tepkilerde düşüşler gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, gelişen teknolojiyle beraber optimizasyon çalışmalarında da gelişmeler yaşanmıştır. Günümüzde bir yapının optimum şekilde inşa edilmesi için literatürde çokça çalışmalar bulunmaktadır. TMD konusunda da kullanması gereken yöntem farklı yapılara ve farklı özelliklere göre seçilmektedir.

Verdiğimiz örnek yapıda en uygun olan yöntem Sadek yöntemidir ancak bu yöntem sönümün sınırlandırılmasının gerekli olduğu durumlarda uygun olmayacaktır. Diğer yandan bakıldığında ise Yapay Zekâ 1 yöntemi Sadek yöntemine en çok yakın olan diğer bir yöntemdir. Sönüm oranı Sadek yönteminden daha düşük olduğundan üstün yanları da mevcuttur.

KAYNAKLAR

ABYYHY, 1998, *Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Aldemir, Ü., 1999, *Yapıların optimal kontrolü*, Tez (Doktora), İstanbul Teknik Üniversitesi.

Alizadeh, H. and Lavasani, H.H., 2020, TMD parameters optimization in different-length suspension bridges using OTLBO algorithm under near and far-field ground motions, *Earthquakes and Structures*, 18 (5), 625-635.

Anajafi, H. and Medina, R.A., 2018. Comparison of the seismic performance of a partial mass isolation technique with conventional TMD and base-isolation systems under broad-band and narrow-band excitations. *Engineering Structures*, 158, 110-123.

Bakioğlu, M., 2005, *Yapılarda aktif pasif kontrol yöntemleri ders notları*, İ.T.Ü., İstanbul.

Bakioğlu, M. and Aldemir, U., 2001, A new numerical algorithm for sub-optimal control of earthquake excited linear structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* 50 (12), 2601-2616.

Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M., 2013, *Optimization of tuned mass damper with harmony search*, Metaheuristic applications in structures and ınfrastructures. In: Gandomi, A.H., Yang, X.S., Alavi, A.H., Talatahari, S. (ed.), Elsevier, Londra, 345-372.

Benfratello, S., Falsone, G. and Muscolino, G., 1996, Influence of the quadratic term in the alongwind stochastic response of SDOF structures, *Engineering Structures*, 18(9), 685-695.

Celep, Z. and Kumbasar, N., 2004, Introduction to earthquake engineering, *Beta Publishing,* 22, 23-24.

Chang, K.C., Soong, T.T., Oh, S.T. and Lai M.T., 1994, Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 121 (10), 1418-1426.

Chen, Y., Jin, X., Liu, H., Li, F. and Luo, M., 2021, Large scale wind turbine TMD optimization based on Blade-Nacelle-Tower-Foundation coupled model. *Ocean Engineering*, 239, 109764.

Civalek, Ö. and Çatal, H.H., 2004, Çok serbestlik dereceli sistemlerin lineer olmayan titreşimi: Genelleştirilmiş diferansiyel quadrature yaklaşımı, *Mühendis ve Makine*, 45 (535), 47-57.

Den Hartog, J.P., 1947, *Mechanical vibrations*, 3 ed., McGraw-Hill, New York.

EC 8, 2002, *Common unified rules for structures in seismic reigons*, Brussels.

Farshidianfar, A. and Soheili, S., 2013, Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51, 14-22.

FEMA-356, 2000, *Prestandart and commentary for seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington.

Gu, M. and Xiang, H., 1992, Optimization of TMD for suppressing buffeting response of long-span bridges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 42(1-3), 1383-1392.

Han, Q., Zhang, X., Xu, K. and Du, X., (2020). Free parameter optimization of DTMDs based on improved hybrid genetic-simulated annealing algorithm, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(3), 2050031.

He, J., Jin, X., Xie, S. Y., Cao, L., Lin, Y. and Wang, N., 2019, Multi-body dynamics modeling and TMD optimization based on the improved AFSA for floating wind turbines, *Renewable Energy*, 141, 305-321.

Hüsem, M. ve Yozgat, E., 2005, *Depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılabilinen yapı kontrol sistemleri*, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, 20, 121.

Jamalabadi, M.Y.A., 2020, Frequency analysis and control of sloshing coupled by elastic walls and foundation with smoothed particle hydrodynamics method, *Journal of Sound and Vibration*, 476, 115310.

Kamgar, R. and Khatibinia, M., 2019, Optimization criteria for design of tuned mass dampers including soil–structure interaction effect, *Iran University of Science & Technology*, 9(2), 213-232.

Kamgar, R., Samea, P. and Khatibinia, M., 2018, Optimizing parameters of tuned mass damper subjected to critical earthquake, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(7), e1460.

Kaveh, A., Javadi, S. M. and Moghanni, R. M., 2020, Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm, *Structures,* 28, 2704-2713.

Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M. and Bekdaş, G., 2022, A hybrid metaheuristic method for optimization of active tuned mass dampers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37 (8), 1027-1043.

Kelly, T.E., 2001, In-structure damping and energy dissipation, *Design guidelines. Holmes Consulting Group*, 2 (3).

Kleingesinds, S., Lavan, O. and Venanzi, I., 2021, Life-cycle cost-based optimization of MTMDs for tall buildings under multiple hazards, *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(7), 921-940.

Kobori, T., 1994, Future direction on research and development of seismic response controlled structure, *Proc. 1st World Conf. on Structur Control*, Panel: 19–31.

Leung, A.Y., Zhang, H., Cheng, C.C. and Lee, Y.Y., 2008, Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* 37(9), 1223-1246.

Li, W.H., Yao, G.Z., Chen G., Yeo S.H. and Yap, F.F., 2000, Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading, *Smart Mater. Struct*, 9(1), 95-102.

Lima, C., De Stefano, G. and Martinelli, E., 2014, Seismic response of masonry infilled RC frames: Practice-oriented models and open issues, *Earthquakes and Structures*, 6(4), 409-436.

Liu, Z., Wang, Y., Hua, X., Zhu, H. and Zhu, Z., 2021, Optimization of wind turbine TMD under real wind distribution countering wake effects using GPU acceleration and machine learning Technologies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 208, 104436.

Lu, X. and Chen, J., 2011, Parameter optimization and structural design of tuned mass damper for Shanghai centre tower, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(4), 453-471.

Luu, M., Zabel, V. and Könke, C., 2012, An optimization method of multi-resonant response of high-speed train bridges using TMDs, *Finite Elements in Analysis and Design*, 53, 13-23.

Marano, G. C. and Greco, R., 2011, Optimization criteria for tuned mass dampers for structural vibration control under stochastic excitation, *Journal of Vibration and Control*, 17(5), 679-688.

Marano, G.C., Greco, R. and Chiaia, B., 2010, A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design, *Journal of Sound and Vibration*, 329(23), 4880-4890.

Matta, E., 2018, Lifecycle cost optimization of tuned mass dampers for the seismic improvement of inelastic structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(3), 714-737.

Melik, M., 2002, *Deprem etkisindeki yapıların aktif kütle sönümleyici ve aktif kiriş kontrol sistemleri ile korunması,* Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi.

Miguel, L.F.F., Lopez, R.H., Torii, A.J. and Beck, A.T., 2022, Reliability-based optimization of multiple folded pendulum TMDs through efficient global optimization, *Engineering Structures*, 266, 114524.

Moiseyev, N.N., 1952, Dynamics of a ship having a liquid load, *Izv Akad Nauk SSSR Old Tekhn Naud,* 7, 27-45.

Morga, M. and Marano, G.C., 2014, Optimization criteria of TMD to reduce vibrations generated by the wind in a slender structure, *Journal of Vibration and Control*, 20(16), 2404-2416.

Naimi, S. ve Waheb, M.H., 2019, Deprem etkisindeki yapıların sismik taban izolasyonu ve çoklu ayarlı kütle sönümleyici sistemleri ile karma korunması, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 12(1), 499-516.

Niwa, N., Kobori, T., Takahashi, M., Midorikawa, H., Kurata, N. and Mizuno, T., 2000, Dynamic loading test and simulation analysis of full-scale semi-active hydraulic damper for structural control, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(6), 789-812.

Okut, O., 2006, *Ayarlı kütle sönümleyicilerin sismik etkiler altındaki betonarme yapılarda performansının incelenmesi,* Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özpalanlar, C.G., 2005, *Depreme dayanıklı yapı tasarımında sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler,* Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi.

Öztürk, B.K., 2007, *Yapısal kontrol sistemlerinin değerlendirilmesi ve taban izolatörlerinin betonarme bir binaya uygulanması,* Tez (Yüksek Lisans), Selçuk Üniversitesi.

Pourzeynali, S. and Estaki, S., 2009, Optimization of the TMD parameters to suppress the vertical vibrations of suspension bridges subjected to earthquake excitations, *IJE Transactions B: Applications,* 22(1), 23-34.

Pourzeynali, S., Salimi, S. and Kalesar, H.E., 2013, Robust multi-objective optimization design of TMD control device to reduce tall building responses against earthquake excitations using genetic algorithms, *Scientia Iranica*, 20(2), 207-221.

Ribakov, Y., Gluck J. and Reinhorn, A. M., 2001, Active viscous damping system for control of MDOF structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 195-212.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M., 1997, A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.,* 26, 617-635.

Shedbale, N. and Muley, P.V., 2017, Review on viscoelastic materials used in viscoelastic dampers, *Int. Res. J. Eng. Technol.(IRJET)*, 4(7), 3375-3381.

Soheili, S., Zoka, H. and Abachizadeh, M., 2021, Tuned mass dampers for the drift reduction of structures with soil effects using ant colony optimization, *Advances in Structural Engineering*, 24(4), 771-783.

Soong, T.T., 1997, *Paasive energy dissipation system in structural engineering*, John Wiley & Sons, New York.

Symans, M. and Constantinou, M., 1997, Seismic testing of a building structure with a semi active fluid damper comelikntrol system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* 26(7), 759-777.

Tan, P., Zhou, F. and Yan, W., 2010, A semi-active variable stiffness and damping system for vibration control of civil engineering structures, *2004 ANCEER Annual Meeting*.

Tang, X., Liu, Y., Cui, W. and Zuo, L., 2016, Analytical solutions to H2 and H∞ optimizations of resonant shunted electromagnetic tuned mass damper and vibration energy harvester, *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(1).

Tubino, F. and Piccardo, G., 2015, Tuned mass damper optimization for the mitigation of human-induced vibrations of pedestrian bridges, *Meccanica*, 50(3), 809-824.

Vellar, L.S., Ontiveros-Pérez, S.P., Miguel, L.F.F. and Fadel Miguel, L.F., 2019, Robust optimum design of multiple tuned mass dampers for vibration control in buildings subjected to seismic excitation, *Shock and Vibration*, 2019.

Warburton, G.B., 1982, Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.,* 10, 381-401.

Yang, Y., Munoa, J. and Altintas, Y., 2010, Optimization of multiple tuned mass dampers to suppress machine tool chatter, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(9), 834-842.

Yao, J. T., 1972, Concept of structural control, *Journal of the Structural Division*, 98(7), 1567-1574.

Yetişken, A., 2016, *Sıvı sönümleyici sistemlerin yapıların sönüm kapasitelerine etkisinin sarsma masası kullanılarak incelenmesi*, Tez (Yüksek Lisans), Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Yücel, M., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M. and Sevgen, S., 2019, Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning, *Journal of Building Engineering*, 26, 100847.

Zahraei, S. M., Moradi, A. and Moradi, M., 2013, *Using pall friction dampers for seismic retrofit of a 4-story steel building in Iran*, Topics in Dynamics of Civil Structures, Vol. 4 (101-107), Springe, New York, NY.

Zhang, J.W. and Li, Q.S., 2019, Mitigation of wind-induced vibration of a 600 m high skyscraper. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(2), 1950015.

Zhang, M. and Xu, F., 2022, Tuned mass damper for self-excited vibration control: Optimization involving nonlinear aeroelastic effect. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 220, 104836.

Zuo, L. and Nayfeh, S.A., 2004, Minimax optimization of multi-degree-of-freedom tuned-mass dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), 893-908.

Zuo, L. and Nayfeh, S.A., 2005, Optimization of the individual stiffness and damping parameters in multiple-tuned-mass-damper systems. *J. Vib. Acoust.*, 127(1), 77-83.

EKLER

EK-1. Yapının katlarındaki kesme kuvvetleri'nin değerleri (ETABS).

TMD'SİZ

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	191586.7	0	-185081	0
	12	Alt	191586.7	0	-185081	0
4	12	Üst	286718.7	0	-281000	0
	9	Alt	286718.7	0	-281000	0
3	9	Üst	172841.6	0	-203407	0
	6	Alt	172841.6	0	-203407	0
2	6	Üst	136496.6	0	-194496	0
	3	Alt	136496.6	0	-194496	0
1	3	Üst	187681.3	0	-316917	0
	0	Alt	187681.3	0	-316917	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					316917.3	

DEN HARTOG

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	126999.4	0	-153802	0
	12	Alt	126999.4	0	-153802	0
4	12	Üst	203244	0	-233838	0
	9	Alt	203244	0	-233838	0
3	9	Üst	125537.9	0	-172474	0
	6	Alt	125537.9	0	-172474	0
2	6	Üst	118985.1	0	-144762	0
	3	Alt	118985.1	0	-144762	0
1	3	Üst	134457.7	0	-247214	0
	0	Alt	134457.7	0	-247214	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					247214	

WARBURTON

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	128901	0	-159667	0
	12	Alt	128901	0	-159667	0
4	12	Üst	209984.6	0	-241894	0
	9	Alt	209984.6	0	-241894	0
3	9	Üst	128940.2	0	-178482	0
	6	Alt	128940.2	0	-178482	0
2	6	Üst	121530.1	0	-149009	0
	3	Alt	121530.1	0	-149009	0
1	3	Üst	136662.2	0	-254178	0
	0	Alt	136662.2	0	-254178	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					254177.8	

SADEK ET ALL

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	116323.4	0	-129339	0
	12	Alt	116323.4	0	-129339	0
4	12	Üst	171799.5	0	-199781	0
	9	Alt	171799.5	0	-199781	0
3	9	Üst	110449	0	-149912	0
	6	Alt	110449	0	-149912	0
2	6	Üst	109752	0	-129252	0
	3	Alt	109752	0	-129252	0
1	3	Üst	125634.7	0	-218725	0
	0	Alt	125634.7	0	-218725	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					218724.5	

YAPAY ZEKÂ 1

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	125493.1	0	-149115	0
	12	Alt	125493.1	0	-149115	0
4	12	Üst	198271.3	0	-227252	0
	9	Alt	198271.3	0	-227252	0
3	9	Üst	123199.7	0	-167196	0
	6	Alt	123199.7	0	-167196	0
2	6	Üst	116819.3	0	-141192	0
	3	Alt	116819.3	0	-141192	0
1	3	Üst	132621.4	0	-241564	0
	0	Alt	132621.4	0	-241564	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					241564.4	

YAPAY ZEKÂ 2

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	126137.8	0	-152077	0
	12	Alt	126137.8	0	-152077	0
4	12	Üst	200515.7	0	-231560	0
	9	Alt	200515.7	0	-231560	0
3	9	Üst	124092.7	0	-171427	0
	6	Alt	124092.7	0	-171427	0
2	6	Üst	118404.9	0	-143867	0
	3	Alt	118404.9	0	-143867	0
1	3	Üst	133843.9	0	-245290	0
	0	Alt	133843.9	0	-245290	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					245290.5	

YAPAY ZEKÂ 3

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	126082.7	0	-150392	0
	12	Alt	126082.7	0	-150392	0
4	12	Üst	200105.6	0	-228986	0
	9	Alt	200105.6	0	-228986	0
3	9	Üst	124144.5	0	-168192	0
	6	Alt	124144.5	0	-168192	0
2	6	Üst	117307.1	0	-141952	0
	3	Alt	117307.1	0	-141952	0
1	3	Üst	133099	0	-243034	0
	0	Alt	133099	0	-243034	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0
		Alt	0	0	0	0
					243034.4	

EK-2. En üst katta ölçülen maksimum ve minimum deplasman değerleri.

TMD'SİZ

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	3512.713	0	-2827.74	0
4	12	Üst	2666.484	0	-1961.04	0
3	9	Üst	2194.485	0	-1611.52	0
2	6	Üst	1950.999	0	-1120.14	0
1	3	Üst	1002.378	0	-579.098	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

DEN HARTOG

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	2921.438	0	-1893.94	0
4	12	Üst	2184.141	0	-1731.26	0
3	9	Üst	1654.658	0	-1431.01	0
2	6	Üst	1468.97	0	-1015.3	0
1	3	Üst	773.626	0	-448.569	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

WARBURTON

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	3040.637	0	-1939.58	0
4	12	Üst	2268.537	0	-1773.74	0
3	9	Üst	1703.14	0	-1461.33	0
2	6	Üst	1512.338	0	-1036.53	0
1	3	Üst	795.699	0	-456.147	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

SADEK ET ALL

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	2529.663	0	-1731.05	0
4	12	Üst	1901.307	0	-1578.87	0
3	9	Üst	1492.598	0	-1317.31	0
2	6	Üst	1306.566	0	-934.501	0
1	3	Üst	685.646	0	-418.395	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

YAPAY ZEKÂ 1

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	2820.143	0	-1854	0
4	12	Üst	2105.482	0	-1694.53	0
3	9	Üst	1609.811	0	-1405.15	0
2	6	Üst	1432.83	0	-997.37	0
1	3	Üst	755.569	0	-442.234	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

YAPAY ZEKÂ 2

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	2907.407	0	-1884.59	0
4	12	Üst	2176.948	0	-1722.16	0
3	9	Üst	1650.018	0	-1423.68	0
2	6	Üst	1459.225	0	-1009.96	0
1	3	Üst	767.875	0	-446.478	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

YAPAY ZEKÂ 3

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	2836.131	0	-1862.34	0
4	12	Üst	2116.072	0	-1702.44	0
3	9	Üst	1616.116	0	-1411.21	0
2	6	Üst	1440.889	0	-1001.69	0
1	3	Üst	760.059	0	-443.869	0
ZEMİN	0	Üst	0	0	0	0

EK-3. Farklı sistemlere göre yapının doğal frekansı.

TMD'SİZ

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	0	0	0
4	12	Üst	0	574760.0888	0	-555242.5352
3	9	Üst	0	1422937.365	0	-1398242
2	6	Üst	0	1892804.543	0	-1964226
1	3	Üst	0	1712210.645	0	-2058496
ZEMİN	0	Üst	0	1472632.885	0	-1822157

DEN HARTOG

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	14681.1001	0	-19638.438
4	12	Üst	0	370925.6221	0	-466643.3591
3	9	Üst	0	943462.3446	0	-1161238
2	6	Üst	0	1245913.429	0	-1658508
1	3	Üst	0	1003511.236	0	-1733251
ZEMİN	0	Üst	0	1084518.548	0	-1504993

SADEK ET ALL

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	10649.043	0	-12201.7774
4	12	Üst	0	344184.418	0	-393396.3351
3	9	Üst	0	819333.4145	0	-982848.4008
2	6	Üst	0	1048652.926	0	-1414600
1	3	Üst	0	874505.7165	0	-1485329
ZEMİN	0	Üst	0	989051.1152	0	-1304321

WARBURTON

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	16479.3967	0	-21956.7341
4	12	Üst	0	375206.7434	0	-484575.9532
3	9	Üst	0	968296.8835	0	-1203652
2	6	Üst	0	1287760.878	0	-1719295
1	3	Üst	0	1042311.094	0	-1798933
ZEMİN	0	Üst	0	1111244.542	0	-1564394

YAPAY ZEKÂ 1

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	13220.6277	0	-17922.9147
4	12	Üst	0	367375.2831	0	-452337.7108
3	9	Üst	0	924769.2336	0	-1127007
2	6	Üst	0	1215224.935	0	-1608026
1	3	Üst	0	975602.0572	0	-1676460
ZEMİN	0	Üst	0	1061110.448	0	-1450423

YAPAY ZEKÂ 2

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	14692.7367	0	-19040.9971
4	12	Üst	0	368932.5039	0	-461439.0358
3	9	Üst	0	932798.6827	0	-1148773
2	6	Üst	0	1228511.964	0	-1643513
1	3	Üst	0	987786.743	0	-1720628
ZEMİN	0	Üst	0	1079048.9	0	-1498965

YAPAY ZEKÂ 3

KAT	Yükseklik M	Konum	X-Dir kN	Y-Dir kN	X-Dir in kN	Y-Dir Min kN
5	15	Üst	0	13318.1897	0	-18356.6956
4	12	Üst	0	368768.1487	0	-456186.7129
3	9	Üst	0	931942.2174	0	-1136296
2	6	Üst	0	1226871.293	0	-1620021
1	3	Üst	0	986137.7033	0	-1687812
ZEMİN	0	Üst	0	1065991.33	0	-1458251

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI