



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİNAMİK ETKİLER ALTINDAKİ YAPILARDA ÇOKLU AYARLI KÜTLE
SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMUM YERLEŞİMİ

HÜSEYİN ÇETİN

Ocak 2020

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİNAMİK ETKİLER ALTINDAKİ YAPILARDA ÇOKLU AYARLI KÜTLE
SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMUM YERLEŞİMİ

HÜSEYİN ÇETİN

Doktora Tezi

Danışman

Doç. Dr. Ersin AYDIN

Ocak 2020

Hüseyin ÇETİN tarafından Doç. Dr. Ersin AYDIN danışmanlığında hazırlanan “Dinamik Etkiler Altındaki Yapılarda Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimum Yerleşimi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ersin AYDIN  Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Hakan ERDEM  Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Metin Hakan SEVERCAN  Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK  Hacettepe Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Turan KARABÖRK  Aksaray Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hüseyin ÇETİN



ÖZET

DİNAMİK ETKİLER ALTINDAKİ YAPILARDA ÇOKLU AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMUM YERLEŞİMİ

ÇETİN, Hüseyin

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Ersin AYDIN

Ocak 2020, 149 sayfa

Pasif kontrol sistemlerinin bir sınıfı olan ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD) özellikle yüksek yapılarda hem deprem hem de rüzgâr etkilerine karşı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, deprem etkisi altındaki kayma çerçevesi olarak modellenen bina tipi yapı katlarına yerleştirilen çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin (MTMD) optimum tasarımı araştırılmıştır. Her bir kata bir adet olarak yerleştirilen çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin optimum parametrelerini bulmak amacıyla özgün bir yöntem geliştirilmiştir. MTMD'leri kapsayan yapı hareket denklemi türetilmiş ve bu denkleme Fourier Dönüşümü uygulanarak yapı davranışını tanımlayan denklemler frekans uzayında transfer fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Dış etki rastgele titreşimler teorisi kullanılarak beyaz gürültü olarak kabul edilmiştir. Her bir kata bir adet olmak üzere yerleştirilen TMD'lerin kütle, rijitlik ve sönüm katsayıları tasarım değişkenleri olarak seçilmiş ve bu parametrelerin alt ve üst kısıtları da kullanılarak, transfer fonksiyonları ile ifade edilen farklı amaç fonksiyonları için optimum tasarımlar “Differential Evolution (DE)” algoritması ile bulunmuştur. Önerilen yöntem, tekli ve çoklu TMD'lerin tasarımında kullanılmış ve bulunan optimum tasarımların deprem performansı incelenmiştir. Nümerik sonuçlar göstermiştir ki, önerilen optimum TMD tasarım yöntemi tekli ve çoklu TMD'lerin tasarımında oldukça etkilidir.

Anahtar Sözcükler: Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD), Çoklu Ayarlı Kütle sönümleyiciler (MTMD), optimum tasarım, transfer fonksiyonu, pasif kontrol, deprem, titreşim kontrolü.

SUMMARY

OPTIMAL PLACEMENT OF MULTIPLE TUNED MASS DAMPERS IN STRUCTURES UNDER DYNAMIC EXCITATIONS

ÇETİN, Hüseyin

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Ersin AYDIN

January, 2020, 149 pages

As a class of passive control systems, tuned mass dampers (TMD) are used against both earthquake and wind effects especially in high buildings. In this study, the optimum design of multiple tuned mass dampers (MTMD) placed in shear frames under earthquake effect was investigated. A new method has been developed in order to find the optimum parameters of MTMD placed on each floor. The equation of motion including multiple TMDs parameters was derived and the equations defining the structural behavior by applying Fourier Transform were expressed by transfer functions in frequency domain. The external disturbance was considered white noise using random vibrations theory. The mass, stiffness and damping coefficient of the TMDs placed on each floor were chosen as design variables and the optimum designs for different objective functions expressed by transfer functions using the upper and lower constraints of these parameters was found with “Differential Evolution (DE)” algorithm. The proposed method was used in the design of single and multiple TMDs and the seismic performance of the optimum designs was investigated. Numerical results have shown that the proposed optimal TMD design method is highly effective in the design of single and multiple TMDs.

Keywords: Tuned Mass Damper (TMD), Multiple Tuned Mass Damper (MTMD) location, transfer function, random vibration theory, passive control, earthquake vibration control

ÖN SÖZ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı, post modern dönemin sonucu olarak yapısal kontrol sistemlerinden biri olan pasif ayarlı kütle sönümleyicilerin optimum olarak tasarlanması kaçınılmazdır. Özellikle yüksek yapılarda deprem ve rüzgâr titreşimlerine karşı yapının tepesine tek olarak yerleştirilen bu sönümleyiciler genellikle yapının 1. moduna göre tasarlanırlar. Çoklu kullanılması halinde problem daha karmaşık olmakla birlikte, MTMD'lerin optimum tasarımları daha önemli hale gelmektedir. Bilgisayar teknolojilerinin gelişimi ve buna bağlı olarak direk optimizasyon yöntemlerindeki gelişmeler, karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünü kolaylaştırmıştır. TMD tasarımı genellikle TMD kütlesi tasarımcı tarafından bina kütlesinin belirli bir yüzdesi olarak makul bir seviyede seçilir. Diğer parametrelerin buna bağlı olarak optimum değerleri hesaplanır. Tekli TMD tasarımı bunu yapmak mümkünken çoklu TMD tasarımı böyle bir seçim yapmak tasarımcıyı oldukça kısıtlayacaktır. Bu amaçla TMD'lerin bütün parametrelerinin tasarım değişkeni olarak alındığı bir optimizasyon problemi burada kurulmuş ve çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Deprem bölgelerindeki yapılarda gelecekte daha da yaygınlaşacağı bilinen ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımı için burada geliştirilen yeni yöntemin tasarımcılara faydalı olacağı düşünülmektedir.

Tez çalışmasının yürütülmesi sürecinde bilgisi ve tecrübesiyle her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Ersin AYDIN' a en içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez çalışmam esnasında beni destekleyen ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK'e ve değerli hocam Prof. Dr. Hakan ERDEM'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezi hazırlama süreci içinde bana verdiği desteğinden dolayı iş yerimdeki yardımcım sayın Yusuf Bulut'a teşekkür ederim.

Bu tezi bütün hayatım boyunca manevi koruyuculuğumu üstlenen ve beni destekleyen annem Naciye ÇETİN ve babam Emrullah ÇETİN' e, ayrıca kardeşim Zeynep Alev ÇETİN ve yeğenim Defne PINARBAŞI'na ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xviii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Tezin Önemi.....	3
1.3 Materyal ve Yöntem.....	4
1.4 Tez Çalışmasının Ana Hatları.....	5
1.5 Literatür Özeti.....	6
1.6 Yapı Kontrol Sistemleri.....	17
1.6.1 Pasif kontrol sistemleri.....	19
1.6.2 Taban izolasyonu (sismik yalıtım).....	19
1.6.3 Aktif, yarı aktif ve hibrit kontrol sistemleri.....	20
1.7 Yapıların Rastgele Titreşimler Altındaki Davranışı.....	21
1.7.1 Rastgele değişkenli fonksiyonlar.....	22
1.7.2 Stasyonier rastgele işlem ve otokorelasyon fonksiyonu.....	24
1.7.3 Ergodik işlem.....	27
1.7.4 Spektral Güç Yoğunluk Fonksiyonu.....	28
1.7.5 Rasgele yükler altındaki kayma çerçevesi modeli ve beklenen değer.....	29
BÖLÜM II AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ.....	33
2.1.Giriş.....	33
2.2 TMD Davranışının Genel Prensipleri.....	33
2.2.1 Den Hartog'un çözümü.....	35
2.3 TMD'nin Optimizasyon Kriterleri.....	39
2.4 Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde Optimum TMD Tasarımında Klasik Çözüm.....	39

2.5 Optimum TMD Tasarımında Önerilen Çözüm Yöntemi.....	41
2.5.1 Problemin formülasyonu.....	42
2.5.2 Optimizasyon problemi ve yöntem.....	47
2.6 TMD Optimizasyonu İçin “Differential Evolution (DE)” Algoritması.....	49
2.7 Sayısal Örnekler.....	52
2.7.1 Örnek 1: 4 katlı düzenli kayma çerçevesi modeli için TMD tasarımı.....	52
2.7.1.1 TMD’nin temel yöntemlere göre tasarımı.....	55
2.7.1.2 Önerilen yöntem için elde edilen sonuçlar.....	56
2.7.2 Örnek 2: 4 katlı düzensiz kayma çerçevesi modeli için TMD tasarımı.....	64
2.7.3 Örnek 3: 10 katlı kayma çerçevesi modeli için TMD tasarımı.....	71
BÖLÜM III ÇOKLU AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ.....	77
3.1 Giriş.....	77
3.2 Deprem Etkisi Altındaki Kayma Çerçevesi İçin Optimum MTMD Tasarımı.....	78
3.3 Problemin Formülasyonu.....	80
3.4 Tasarım İçin Kritik Etki Yöntemi.....	85
3.5 İvme ve Deplasman Kontrolü İçin Optimizasyon.....	86
3.6 Sayısal Örnek.....	87
BÖLÜM IV SONUÇLAR.....	103
KAYNAKLAR.....	106
EKLER.....	119
ÖZGEÇMİŞ.....	148
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER.....	149

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması.....	18
Çizelge 2.1. Yakın fay depremleri ve özellikleri.....	53
Çizelge 2.2. Uzak fay depremleri ve özellikleri.....	54
Çizelge 2.3. Kullanılan depremlerin yakın bölge ivme kayıtları için farklı frekans aralıklarındaki Arias yoğunluğunun % oranları.....	54
Çizelge 2.4. Optimum TMD parametreleri.....	57
Çizelge 2.5. Dört katlı kayma çerçevesinde, El Centro (NS) yakın fay deprem kaydı için önerilen yöntemin sonuçları ve literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanması.....	63
Çizelge 2.6. 4 Katlı kayma çerçevesinde uzak fay depremleri için mevcut çalışmanın sonuçlarının literatürdeki çalışmalarla kıyaslanması.....	63
Çizelge 2.7. Düzensiz kayma çerçevesi için optimum TMD parametreleri.....	66
Çizelge 2.8. Düzensiz kayma çerçevesinde El Centro (NS) depremi için önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması.....	70
Çizelge 2.9. 10 katlı model için hesaplanan TMD parametreleri.....	74
Çizelge 2.10. 10 katlı kayma çerçevesinde önerilen yöntemden elde edilen sonuçlarla literatürdeki yöntemlerden elde edilen sonuçların kıyaslanması.....	74
Çizelge 3.1. MTMD parametreleri ve katlara yerleşimi.....	90
Çizelge 3.2. Zaman tanım alanında hesap sonuçları ve karşılaştırmalar.....	92
Çizelge A.1. Cape Mendocino (Petroli NS) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.....	126
Çizelge A.2. Düzce (Bolu istasyonu NS) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.....	126
Çizelge A.3. Kobe (NS) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.....	127
Çizelge A.4. Kocaeli (Sakarya EW) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.....	127
Çizelge A.5. Loma Prieta (LGP 000) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.....	130

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Gauss dağılımı.....	23
Şekil 1.2. Gauss dağılımının standart sapmaya göre değişimi.....	24
Şekil 1.3. Rastgele titreşim (a) ve onun otokorelasyon fonksiyonu (b).....	25
Şekil 1.4. Sabit $x(t)$ (a) ve onun sabit otokorelasyon fonksiyonu $R(\tau)$ (b).....	26
Şekil 1.5. Tipik bir otokorelasyon fonksiyonu	27
Şekil 1.6. Tipik bir spektral güç yoğunluk fonksiyonu.....	28
Şekil 2.1. TMD ile kontrol edilen tek serbestlik dereceli sistem.....	34
Şekil 2.2. Frekans oranı $\alpha = 1$ için ζ_d 'nin çeşitli değerlerinde DMF değerinin zorlanmış frekans oranına göre değişimi.....	37
Şekil 2.3. Optimum Frekans oranı $\alpha_{opt}=0.96$ için ζ_d 'nin çeşitli değerlerinde DMF değerinin zorlanmış frekans oranına göre değişimi.....	37
Şekil 2.4. TMD eklenmiş kayma çerçevesi.....	44
Şekil 2.5. Klasik DE algoritması.....	52
Şekil 2.6. TMD eklenmiş 4 katlı kayma çerçevesi modeli.....	53
Şekil 2.7. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 'ün (c) tasarım adımlarına göre değişimi ve optimal değere yakınsaması.....	59
Şekil 2.8 f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları için en üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nin değişimi.....	60
Şekil 2.9. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat deplasmanlarının değişimindeki etkisi.....	60
Şekil 2.10. Dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nün dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	61
Şekil 2.11. Dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nün dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	61
Şekil 2.12. Dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nün dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	62
Şekil 2.13. Düzensiz kayma çerçevesinde amaç fonksiyonları f_1 , (a), f_2 , (b), f_3 'ün (c) tasarım adımlarına göre değişimi.....	66

Şekil 2.14. Düzensiz kayma çerçevesinde amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), f_3 (c) için hesaplanan TMD kütlelerinin tasarım adımlarına göre değişimi.....	67
Şekil 2.15. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b), f_3 (c) amaç fonksiyonları için en üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nin değişimi.....	68
Şekil 2.16. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b), f_3 (c) amaç fonksiyonları için pik mutlak kat deplasmanları ve literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanması.....	68
Şekil 2.17. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nün dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	69
Şekil 2.18. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nün dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	69
Şekil 2.19. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA4} $ 'nün dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	70
Şekil 2.20. TMD eklenmiş 10 katlı yapı modeli.....	72
Şekil 2.21. 10. Katın ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{AA10} $ (a), transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D10} $ (b) ve birinci katın rölatif deplasmanının büyüklüğü $ H_{\delta 1} $ 'nün frekans ile değişimi.....	73
Şekil 3.1. MTMD'li yapı.....	79
Şekil 3.2. El Centro (NS) depremi için kritik bir bant sınırlı beyaz gürültü etkisi.....	86
Şekil 3.3. Kritik etkinin birkaç bant sınırlı aralıkta tanımlanması.....	86
Şekil 3.4. TMD'li üç katlı kayma çerçevesi modeli.....	89
Şekil 3.5. f_1 (a) ve f_2 (b) amaç fonksiyonlarının optimizasyon esnasındaki tasarım adımlarına göre değişimi.....	90
Şekil 3.6. En üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğünün $ H_{AA3}(\omega) $ frekans davranışı (a) En üst katın deplasmanının transfer fonksiyonunun $ H_{D3}(\omega) $ frekans davranışı (b) 1. kat görelî deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğünün $ H_{\delta 1}(\omega) $ frekans davranışı (c).....	91
Şekil 3.7 El Centro (NS) deprem kaydı için 3. kat deplasmanının zamana göre değişimi (a) 3. kat ivmesinin zamana göre değişimi (b).....	92

Şekil 3.8. El Centro (NS) depremi için pik kat deplasmanları (a), pik mutlak kat ivmeleri (b) pik kat (IDR)'leri (c), deplasmanların karesel ortalamalarını kare kökleri (RMSD) (d) mutlak İvmelerin karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSA) (e).....	93
Şekil 3.9 f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	94
Şekil 3.10. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	95
Şekil 3.11. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	95
Şekil 3.12. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	95
Şekil 3.13. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $ H_{AA3}(\omega) $ 'ün TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	96
Şekil 3.14. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	96
Şekil 3.15. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	96
Şekil 3.16. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $ H_{AA3}(\omega) $ 'ün TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	97
Şekil 3.17. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $ H_{AA3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	97
Şekil 3.18. $ H_{AA3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. Katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısına ve kütlesine (b) TMD'nin sönüm katsayısına ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	98
Şekil 3.19. $ H_{AA3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	98
Şekil 3.20. $ H_{AA3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	99
Şekil 3.21. $ H_{AA3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	99

Şekil 3.22. $ H_{AA3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine (b) TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	99
Şekil 3.23. $ H_{AA3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	100
Şekil 3.24. $ H_{AA3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	100
Şekil 3.25. $ H_{AA3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	100
Şekil A.1. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 (c) için, TMD kütlesi m_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi.....	119
Şekil A.2. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 (c) için, TMD kütle parametresi k_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi.....	119
Şekil A.3. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 (c) için, TMD'nin kütle parametresi c_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi.....	120
Şekil A.4. f_1 , f_2 ve f_3 transfer fonksiyonları için dördüncü katın deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nin değişimi.....	120
Şekil A.5. f_1 , f_2 ve f_3 transfer fonksiyonları için en alt katın görel deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta 1} $ 'nin değişimi.....	121
Şekil A.6. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat ivmelerinin etkisi	121
Şekil A.7. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların katlar arası görel deplasman oranlarının (IDR) değişimindeki etkisi.....	122
Şekil A.8. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat deplasmanlarının karesel ortalamalarının karekökü üzerindeki etkisi.....	122
Şekil A.9. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat ivmelerinin karesel ortalamalarının karekökü üzerindeki etkisi.....	123
Şekil A.10. Dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	123
Şekil A.11. Dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	124
Şekil A.12. Dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	124

Şekil A.13. Birinci kat rölatif deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta 1} $ 'nün dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	124
Şekil A.14. Birinci kat rölatif deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta 1} $ 'nün dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	125
Şekil A.15. Birinci kat rölatif deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta 1} $ 'nün dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	125
Şekil A.16. El Centro (NS) deprem kaydı için son katın deplasmanının zamana göre değişimi.....	128
Şekil A.17. El Centro (NS) deprem kaydı için son katın ivmesinin zamana göre değişimi.....	129
Şekil B.1. Düzensiz kayma çerçevesinde $f_1(a)$, $f_2(b)$ ve $f_3(c)$ amaç fonksiyonları için TMD'nin rijitlik katsayısı k_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi.....	131
Şekil B.2. Düzensiz kayma çerçevesinde $f_1(a)$, $f_2(b)$ ve $f_3(c)$ amaç fonksiyonları için TMD'nin sönüm katsayısı c_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi.....	131
Şekil B.3. Düzensiz kayma çerçevesinde $f_1(a)$, $f_2(b)$ ve $f_3(c)$ amaç fonksiyonları için 4. katın deplasmanının transfer fonksiyonu büyüklüğü $ H_{D4} $ 'ün TMD'li ve TMD'siz durum için değişimi.....	132
Şekil B.4. Düzensiz kayma çerçevesinde $f_1(a)$, $f_2(b)$ ve $f_3(c)$ amaç fonksiyonları için için 1. katın rölatif deplasmanının transfer fonksiyonu büyüklüğü $ H_{\delta 1} $ 'ün TMD'li ve TMD'siz durum için değişimi.....	132
Şekil B.5. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların kat ivmelerinin değişimindeki etkisi.....	133
Şekil B.6. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimumtasarımların IDR'lere etkisi.....	133
Şekil B.7. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların deplasman RMS'lere etkisi.....	133
Şekil B.8. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların ivme RMS'lere etkisi.....	134
Şekil B.9. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nün dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine.....	134

Şekil B.10. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nün dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	135
Şekil B.11. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{D4} $ 'nün dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	135
Şekil B.12. Düzensiz kayma çerçevesinde birinci kat rölatif deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta i} $ 'nün dış etki frekansı ve m_d kütle göre 3 boyutlu değişimi.....	136
Şekil B.13. Düzensiz kayma çerçevesinde birinci kat rölatif deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta i} $ 'nün dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	136
Şekil B.14. Düzensiz kayma çerçevesinde birinci kat rölatif deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $ H_{\delta i} $ 'nün dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi.....	137
Şekil C.1. Optimum MTMD parametreleri ve dağılımları, Rana ve Soong (1998) (a), Frans ve Arfiadi (2015) (b), mevcut çalışma (Min f_1) (c) mevcut çalışma (Min f_2).....	138
Şekil C.2. MTMD'li yapıda Kobe (NS) depremi ivme kaydı için 3. kat deplasmanının zamana göre değişimi (a) 3. kat ivmesinin zamana göre değişimi (b).....	139
Şekil C.3. Loma Prieta (LGP000) depremi kaydı için 3. kat deplasmanının zamana göre değişimi (a) 3. kat ivmesinin zamana göre değişimi (b).....	139
Şekil C.4. MTMD'li yapıda Kobe (NS) depremi için pik kat deplasmanları (a) pik mutlak kat ivmeleri (b) pik kat (IDR)'leri (c), deplasmanların karesel ortalamalarını kare kökleri (RMSD) (d) ivmelerin karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSA) (e).....	140
Şekil C.5. Loma Prieta (LGP000) depremi için pik kat deplasmanları (a) pik mutlak kat ivmeleri (b) pik kat (IDR)'leri (c), deplasmanların karesel ortalamalarını kare kökleri (RMSD) (d) ivmelerin karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSA)(e).....	141
Şekil C.6. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	141

Şekil C.7. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	142
Şekil C.8. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	142
Şekil C.9. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	142
Şekil C.10. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	143
Şekil C.11. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	143
Şekil C.12. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun TMD'nin TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	143
Şekil C.13. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi.....	144
Şekil C.14. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $ H_{D3}(\omega) $ transfer fonksiyonunun fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi....	144
Şekil C.15. $ H_{D3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine (b) TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	144
Şekil C.16. $ H_{D3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	145
Şekil C.17. $ H_{D3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	145
Şekil C.18. $ H_{D3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	145
Şekil C.19. $ H_{D3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi (b).....	146
Şekil C.20. $ H_{D3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi.....	146

Şekil C.21. $ H_{D3}(\omega_2) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütleline göre üç boyutlu değişimi.....	146
Şekil C.22. $ H_{D3}(\omega_1) $ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi.....	147



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Katsayı matrisi
B	Kütle ve etki vektörünün çarpımından oluşan katsayı vektörü
C	Sönümleyici eklenmiş sistemin sönüm matrisi
$C(t_1, t_2, \dots, t_n)$	Korelasyon fonksiyonu
c_d	TMD sönümü
c_{di}	i . kattaki TMD'nin viskoz sönümü
$\bar{c}_d$	TMD sönüm katsayısının üst sınırı
C_{eq}	Eşdeğer sönüm değeri
C_r	DE' da çaprazlama oranı
C_s	Sönüm matrisi
C_s	Yapının sönümü
C_{TMD}	TMD'nin sönüm matrisi
D	Optimizasyon problemin boyutu
$E[.], \langle . \rangle$	Beklenen değer (expected value)
F	DE' da Ölçek faktörü
f	Amaç fonksiyonu
$f_d(t)$	TMD'ye gelen dış kuvvet
$f_s(t)$	Dış Kuvvet vektörü
$F_s(\omega)$	Dış Kuvvet vektörünün Fourier transformu
$f_s(t)$	Yapıya gelen dış kuvvet
F_0	Harmonik dış kuvvetin amplitütü
f_1	En üst katın deplasmanlarının karesel ortalamasının için amaç fonksiyonu
f_2	En üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması için amaç fonksiyonu
f_3	Katlar arası göreceli deplasmanlarının karesel ortalamalarının toplamı için amaç fonksiyonu

g	Differential evolution algoritmasındaki jenerasyon
$\mathbf{H}_{AA}$	ivme vektörünün transfer fonksiyonu vektörü
H_{AAi}	i. Katın mutlak ivmelerinin transfer fonksiyonu
$ H_{AAi} $	i. Katın mutlak ivmelerinin transfer fonksiyonun
büyüklüğü	
$\mathbf{H}_D$	Deplasman vektörünün transfer fonksiyonu vektörü
H_{Di}	katın mutlak deplasmanları transfer fonksiyonu
$\mathbf{H}_\delta$	Görelî deplasmanının transfer fonksiyonu vektörü
$H_{\delta i}$	i. Katın görelî deplasmanının transfer fonksiyonu
$ H_{Di} $	i. Katın Deplasmanlarının karesel ortalamasının transfer fonksiyonunun büyüklüğü
$ H_{\delta i} $	i. kat için katın katlar arası görelî deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü
H2	H2 Optimizasyonunu
$\mathcal{H}_s(\omega)$	Transfer fonksiyonu matrisi
i	$\sqrt{-1}$
$\mathbf{K}$	Sönümleyici eklenmiş sistemin rijitlik matrisi
k_d	TMD rijitliği
$\bar{k}_d$	TMD rijitlik katsayısının üst sınırı
k_{di}	i. kattaki TMD'nin rijitliği
k_i	Yapının i. katının rijitliği
$\mathbf{K}_s$	Yapının rijitlik matrisi
K_s	Yapının rijitlik
$\mathbf{K}_{TMD}$	TMD'nin rijitlik matrisi
m	Kütle, Kısıtların sayısı
$\mathbf{M}$	Sönümleyici eklenmiş sistemin kütle matrisi
m_d	TMD kütlesi
$\bar{m}_d$	TMD kütlelerinin üst sınırı
m_{di}	i. kattaki TMD'nin kütlesi
m_i	Yapının i. katının kütlesi
$\mathbf{M}_s$	Yapının kütle matrisi
M_s	Yapının kütlesi
$\tilde{M}_1$	1. Moda ait modal kütle

$\mathbf{M}_{TMD}$	TMD'nin kütle matrisi
$p(x(t))$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere
$p(x(t), y(t))$	Olasılık topunluk yoğunluk fonksiyonu
$\mathbf{R}_{FF}(\tau)$	Dış kuvvetin otokorelasyon fonksiyonu matrisi
N	Sistemin toplam serbestlik derecesi
$R(t_1, t_2), R(\tau)$	Otokorelasyon fonksiyonu
$\mathbf{r}$	Etki vektörü
$S(\omega)$	Stasyonel Spektral Güç Yoğunluk Fonksiyonu
$\bar{S}$	Girdi varyansını temsil eden PSD fonksiyonu altındaki alanın üst sınırı olan enerji limit değeri
$\mathbf{S}_{xx}$	$\mathbf{X}_s(\omega)$ 'nin Spektral yoğunluk fonksiyonu matrisi
$\mathbf{S}_{\ddot{x}\ddot{x}}$	$\ddot{\mathbf{X}}_s(\omega)$ 'nin Spektral yoğunluk fonksiyonu matrisi
$\mathbf{S}_{FF}(\omega)$	Dış kuvvetin spektral yoğunluk fonksiyonu matrisi
$\bar{S}$	Amplitüt limiti (PSD fonksiyonun yoğunluğu)
$\bar{S}$	Girdi varyansını temsil eden PSD fonksiyonun altındaki alanın üst sınırı olan enerji limit değeri
$\bar{S}$	PSD amplitüt limiti (PSD fonksiyonun yoğunluğu)
$S_g(\omega)$	Spektral yoğunluk fonksiyonu
S_0	Sismik yoğunluk
t	Zaman
T	Periyot
$\mathbf{T}$	Rölatif deplasman dönüşüm matrisi
T_{si}	Yapının i. modu için doğal periyodu
$\bar{\mathbf{U}}_i^g$	DE'de sinama vektörü
$\bar{\mathbf{U}}_i^g$	Sinama vektörü
x_i	Kat deplasmanları
$\ddot{x}_g(\omega)$	Yer hareketinin Fourier transformu
$\mathbf{X}(\omega)$	Kat deplasmanlarının Fourier transformu
$\ddot{\mathbf{X}}(\omega)$	İvme matrisinin Fourier transformu
$\ddot{\mathbf{X}}_A(\omega)$	Mutlak İvme matrisinin Fourier transformu
$\bar{\mathbf{X}}_i^g$	g . jenerasyondaki i . amaç vektörü
$x_{j,Low}$	DE'da amaç vektöründeki j . bileşenin en alt limiti

$x_{j,up}$	DE’da amaç vektöründeki j . bileşenin en üst limiti
$\mathbf{X}_s(\omega)$	Deplasman vektörünün Fourier transformu
$\mathbf{x}_s(t)$	Deplasman vektörü
$x_s(t)$	Yapının deplasmanı
$x_d(t)$	TMD’nin yapıya göre deplasmanı
$\dot{x}_d$	TMD’nin yapıya göre hızı
$\ddot{x}_d$	TMD’nin yapıya göre ivmesi maksimum değeri
x_{st}	Statik uzama miktarı
$\vec{V}_i^g$	DE’da döner vektörü
α	TMD için frekans oranı
α_{opt}	TMD için optimum frekans oranı
β	Zorlanmış frekans oranı
$\Delta(\omega)$	Katlar arası rölatif deplasman vektörünün Fourier transformu
σ_{AAi}^2	i . katın ivenin karesel ortalaması
$\sigma_{x(t)}^2$	$x(t)$ ’nin varyansı
$\sigma_{x(t)y(t)}$	$x(t)$ ve $y(t)$ ’nin kovaryansı
$\sigma_{xi}^2(t)$	Yapının i . katındaki deplasmanının karesel ortalamalarının varyansı
$\sigma_{\ddot{x}i}^2(t)$	Yapının i . katındaki ivmelerin karesel ortalamalarının varyansı
σ_{AAi}^2	i . katın mutlak ivmelerinin karesel ortalaması
σ_{DN}^2	i . katın deplasmanlarının karesel ortalaması
$\sigma_{\delta i}^2$	i . katın rölatif deplasmanlarının karesel ortalaması
$\delta(\omega)$	Katlar arası rölatif deplasmanın Fourier transformu
ξ_1	Yapının birinci moduna ait doğal sönüm oranı
ξ_2	Yapının ikinci moduna ait doğal sönüm oranı
ξ_i	i . mod için yapının doğal sönüm oranı
ζ_d	TMD sönüm oranı
ζ_{opt}	TMD’nin optimum sönüm oranı
ζ_s	Yapının sönüm oranı
$\rho_{x(t)y(t)}$	Korelasyon katsayısı (normalize edilmiş kovaryans)

τ	Zaman değişimi
μ_1	1. Moda ait modal kütle oranı
μ	Kütle oranı
$\mu_{x(t)}$	$x(t)$ 'nin Ortalama değeri
$\phi_{n,1}$	1. Moda karşılık gelen normalize edilmiş mod vektörü
ϕ_{ij}	Yapının i . modu ve TMD'nin j . kata yelleştirildiği durum için katkı faktörü
ϕ_1	1. Moda ait mod vektrd
ω	Dış etki frekansı
ω_u	Bant genişliğinin frekans aralığı üst sınırı
ω_L	Bant genişliğinin frekans aralığı alt sınırları
ω_d	TMD'nin frekansı
ω_s	Yapının doğal frekansı
ω_1	Yapının birinci moduna ait doğal frekansı olsun
ω_2	Yapının ikinci moduna ait doğal frekansı
ω_g	Zeminnin karakteristik frekans
ω_{si}	Yapının i . modu için doğal frekansı
Ω	Bir bant sınırlı beyaz gürültüde bant genişliği
$()^*$	Kompleks eşlenik

Kısaltmalar

Açıklama

AMTMD	Aktif oklu Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin
DE	“Differential Evolution” Algoritması
DMF	Dinamik Büyütme Faktörü
DMF_{opt}	Optimum Dinamik Büyütme Faktörü
ID	Katlar Arası Rölatif (Greli) Deplasman
IDR	Katlar Arası Rölatif (Greli) Deplasman Oranı
MHS	Sezgisel Harmoni Arama Algoritması
MTMD	oklu Ayarlı Kütle Sönümleyicisi
NP	Popülasyon Sayısı
NTTMD	Geleneksel Olmayan Ayarlı Kütle Sönümleyicisi

PSD	Spektral Güç Yoğunluk Fonksiyonu
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
PTMD	Parçacık Ayarlı Kütle Sönümleyicisi
RIDTMD	Potasyonel Ataletli İkili Ayarlı Kütle Sönümleyici
RMSA	Kat Mutlak İvmelerinin Karesel Ortalamasının Karekökü
RMSA	İvmelerin Karesel Ortalamalarının Karekökü
RMSD	Deplasmanların Karesel Ortalamalarının Karekökü
SMTMD	Yarı Aktif Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyicileri
SQP	Sequential Quadratic Programming
STMD	Yarı Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyicileri
TMD	Ayarlı Kütle Sönümleyicisi
TVMD	Vida Mekanizmalı Ayarlı Viskoz Kütle Sönümleyicileri
VD	Viskoz Sönümleyici

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Klasik yapı tasarımıda deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkiler altındaki yapılar, enerjiyi iç kuvvet-deformasyon davranışıyla sönümlemeye çalışırlar. Deprem veya diğer dinamik dış etkiler altında yapı malzemesi akma sınırına ulaştıktan sonra enerji lineer olmayan davranış ve yerel hasarlarla sönümlenir. Depreme dayanıklı yapı tasarımının klasik ve modern döneminde yapı büyük dış etkilere karşı kendi bünyesinde deformasyonlar yaparak enerjiyi tüketirken, post modern dönemde yapıya eklenen aktif, pasif, yarı aktif ve karma kontrol sistemleri ile enerji teknolojik elemanlar bünyesinde sönümlenirler. Yapısal davranışları iyileştirdiği bilinen pasif kontrol sistemlerinden biri olan ayarlı kütle sönümleyicilerin deprem ve rüzgar gibi dinamik dış etkiler altında yapı titreşimlerini azalttığı bilinmektedir. Bu sönümleyiciler doğru tasarlandıklarında, titreşim etkisindeki yapıların hasar görmesini veya göçmesini engellemede son derece etkili olmuşlardır.

Ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD) yapıların genellikle tepe bölgesine yerleştirilen bir kütle, bu kütleyi ana yapıya bağlayan yay ve sönüm elemanından ibaret olup, yapının yer değiştirmesinin tersi yönünde hareket ederek titreşimi, dolayısıyla yapısal deformasyonları ve hasarı azaltmaktadır. Tekli olarak yapının genellikle tepesine yerleştirilen bir TMD'nin optimum tasarımı aşamasında, yapının hakim modu dikkate alınarak ve kütlesi yapının kütlelerinin belli bir yüzdesi olarak seçildikten sonra, TMD'yi yapıya bağlayan mekanizmanın sönüm ve rijitlik özelliklerinin optimum değerlerinin hesaplanması yapılmaktadır. Ayarlı kütle sönümleyici parametreleri uygun bir şekilde seçilerek yapının istenen titreşim moduna ayarlandığı takdirde genellikle o moddaki tepkiyi azaltmaktadır. Tek bir TMD kullanılması, kütlelerin seçimi, tek bir ayırık modun dikkate alınması ve genellikle ortaya konulan yöntemlerde yapının tek serbestlik dereceli bir sisteme indirgenmesi problemi basitleştirmekle birlikte tasarımda kısıtlamalara sebep olmaktadır. Daha gerçekçi bir TMD tasarımında, sönümleyici kütlelerinin de optimize edilecek bir tasarım parametresi olması, hakim modla beraber diğer etkin modların etkisi, çoklu TMD'lerin kullanımı gibi gereksinimlerinde karşılanması gerekmektedir. Bu konudaki bilinen pek çok çalışmada yukarıda bahsedilen gereksinimler

karşılanamamaktadır. Optimum TMD yerleşimi problemini basit ve kolay hale getirmek için yapılan bu kabuller, tasarımcıları daha gerçekçi tasarımlardan uzaklaştırmakla birlikte, çoklu TMD durumlarında tasarımcıya yol gösterememektedirler. TMD'lerin çoklu kullanımı, yapının davranışının daha geniş bir frekans bandında dikkate alınma gerekliliği ve sönümleyici kütlesinin de optimize edilmesi ihtiyacı yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen gereksinimleri karşılamak amacıyla hem tekli hem de çoklu TMD'leri tasarlamak amacıyla bir yöntem geliştirmek gerekmektedir. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler beraberinde sayısal optimizasyon yöntemlerinde de büyük gelişmelere yol açmıştır. Daha önceden belli kabuller altında ve basitleştirilerek yapılan TMD tasarımları daha gerçekçi ve daha sofistike yöntemlerle yapılabilir. Burada geliştirilen optimum TMD tasarımı yöntemi ile çoklu TMD'lerin tasarlanması, kütlelerin de tasarım parametreleri olarak ele alınması ve istenilen geniş bir frekans bandı dikkate alınarak daha yüksek modların etkilerinin de tasarıma dahil edilmesi mümkün olmaktadır.

Tek serbestlik dereceli ve sadece tek bir TMD ile tasarlanan sistem çok karmaşık olmadığından optimizasyonu ve tasarımı oldukça kolaydır. Çok serbestlik dereceli yapılarda TMD ve MTMD tasarımı son derece karmaşıktır. Bu sebeple, sayısal çözümler kaçınılmazdır. Klasik yöntemlerde çok serbestlik dereceli sistem ayrıklaştırılarak tek serbestlik dereceli eşdeğeri haline getirilir. Rüzgar etkileri deprem gibi geniş bant frekans içeriğine sahip olmadığından TMD'lerin rüzgar etkisinde daha iyi performans gösterdikleri bilinmektedir. Ayarlı kütle sönümleyici tasarımını yaparken geniş bant frekans içeriğinin probleme dahil edilmesi, yüksek modların da etkisini dikkate almayı gerektirir. Bu çalışmada sistem tek serbestlik dereceli sisteme indirgenmeden modellenecek, optimizasyonda rastgele titreşimler teorisi kullanılarak geniş bir frekans bandında analizler yapılacaktır. Deprem veya rüzgar etkilerinin rastgele olması yapının tepkilerinin de rastgele olmasına sebep olacağından bu durumun tasarım aşamasında dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bundan dolayı rastgele olan bu dış etkilerin tanımlanması amacıyla deterministik olmayan yollar ile tasarıma dahil edilmesi için rastgele titreşimler teorisi kullanılması uygun bir yol olacaktır.

Dinamik titreşim probleminde yapısal davranışları tanımlamak için zaman veya frekans tanım alanı kullanılmaktadır. Zaman tanım alanında formüle edilen titreşim problemi

Fourier Dönüşümü ile frekans tanım alanına dönüştürülerek davranış parametreleri belirli bir frekans değerinde veya belirli bir frekans bandında tanımlanabilir. Tanımlanan bu davranış parametreleri bir optimizasyon probleminin amaç fonksiyonları olarak kullanılabilir. Tasarım değişkenlerine bağlı olarak tanımlanan bu amaç fonksiyonları çeşitli optimizasyon yöntemleri ile minimize edilebilir. Bu çalışmada tekli ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımları araştırılmıştır. Optimum tasarımları bulmak amacıyla her bir kata yerleştirilen bir adet TMD'nin tasarım parametrelerine bağlı ve frekans uzayında tanımlanan deplasman ve ivmelere bağlı amaç fonksiyonları minimize edilmiştir. Sayısal optimizasyon aşamasında bir direk optimizasyon yöntemi olan “Differential Evolution” algoritması kullanılmıştır. DE algoritması için Wolfram Mathematica (2016) programının içerisinde yer alan optimizasyon paketinden yararlanılmıştır. Farklı titreşim modlarının etkisini azaltmak amacıyla çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri (MTMD) kullanılarak ve bunların yapıya optimum yerleşimleri sağlanarak deplasmanlar ve ivmeler düşürülebilecektir.

Literatürde MTMD'lerle ilgili çalışmalar ve optimum yerleşimiyle ilgili çalışmaları son derece sınırlı ve yetersizdir. Bu tez çalışmasında dinamik etki altındaki yapılarda MTMD'lerin parametreleri optimize edilip katlara en uygun yerleşimi araştırılmıştır.

1.2 Tezin Önemi

Yapıların depreme karşı dayanımlarının artırılması konusunda, geleneksel yöntemlere ek olarak, yapılara eklenecek teknolojik malzemelerle yeni yöntemler geliştirilmektedir. Bunlar, ilk olarak pasif sönümleyicilerle ortaya çıkmıştır. Pasif sönümleyiciler deprem veya rüzgâr gibi dinamik etkilerden kaynaklı titreşimleri kendi iç bünyesinde sönümlemektedir. Bu bazen metallerin elastik olmayan davranışları ile sağlanırken, bazen de visko-elastik sönümleyicilerde olduğu gibi visko-elastik elemanların kayma deformasyonları ile sağlanmaktadır. Bu elemanlar, özellikle ABD ve Japonya da son 25 yıldır yapıların pasif kontrolünde kullanılmaktadır. Pasif sönümleyicilerin dışardan bir enerjiye ihtiyaç duymaması aktif kontrole göre bir avantajdır. Bu nedenle kullanımları çok daha yaygındır. Diğer sönüm elemanlarının çoğunda olduğu gibi, ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD) ülkemizde bir uygulaması yoktur. Özellikle İstanbul gibi şiddetli bir depremin olma olasılığının her gün arttığı bir metropolde yoğun nüfusun yaşaması, arsa maliyetlerinin artması ve buna bağlı olarak yüksek yapıların sayısındaki

artış, Türkiye'nin sanayi üretiminin büyük bir kısmının bu şehirde olması, eski binaların kentsel dönüşümünün maliyetinin yüksek olması ve uzun zaman alması göz önünde bulundurulduğunda yeni yapılan binalarda ve eski binaların rehabilitasyonunda sönümleyicilerin ve TMD'lerin kullanımı son derece pratik, hızlı ve ekonomik bir alternatiftir. Ayarlı kütle sönümleyicileri parametreleri uygun bir şekilde seçilerek yapının istenen titreşim moduna ayarlandığı takdirde sadece o moddaki tepkiyi azaltırken, çeşitli katlara optimum olarak yerleştirilmiş ilave ayarlı kütle sönümleyicileri diğer etkin doğal modlar için faydalı olabilir (Chen, 1996). Tekli TMD tasarımı yapılarak kabuller, genellikle tek modun kontrolü, sadece rijitlik ve sönüm parametrelerinin optimizasyonu ve çoklu TMD kullanımında yol gösterici tasarım esaslarındaki eksiklikler yeni yol ve yöntemler geliştirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Yapılan bu doktora çalışması özellikle çoklu TMD'lerin tasarımı hususunda mühendis ve uygulamacılara yol gösterebilecektir.

1.3 Materyal ve Yöntem

Tekli veya çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri bünyesinde bulunduran bir yapı modelinde, dinamik etki altındaki sistem lineer kabul edilerek hareket denklemleri oluşturulur. Toplu kütleli olarak tasarlanan yapı modelinde her kata teorik olarak TMD yerleştirildiği düşünülür. Bu denklemler Fourier Dönüşüm ile zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürülür. Dış etki rastgele titreşimler teorisi kullanılarak frekansa bağlı olarak tanımlanır. Burada tanımlanan frekans bandı tasarımcının seçimine bağlıdır. Tasarımcı dikkate almak istediği modları kapsayacak şekilde frekans bandının genişliğini seçebilir. Yapının deplasman ve ivme davranışları frekansa bağlı olarak transfer fonksiyonlarıyla ifade edilir. Bu davranış fonksiyonları kullanılarak TMD optimizasyon probleminin amaç fonksiyonları oluşturulur. Belli bir frekans bandında tanımlanan bu fonksiyonlar integral formundadır. Bu tanımlanan integral formları transfer fonksiyonlarını ve spektral güç yoğunluk fonksiyonunu içerir. Rastgele titreşim teorisi kullanılarak yer hareketinin ivmesi bant sınırlı beyaz gürültü olarak ele alınmıştır. Bu sebeple Spektral Güç Yoğunluğu (PSD) fonksiyonu sabit bir değer olarak belirli bant genişliğinde veya kritik etki altında değerlendirilmiştir. Belli bir frekans bandındaki deplasman ve ivme davranışını karakterize eden ve minimize edilecek olan integral formundaki bu fonksiyonlar tasarım değişkenlerine bağlı olup, bu tasarım değişkenlerinin kısıtlarının da tanımlanması ile optimizasyon problemi ortaya koyulmuş olur. Optimizasyon aşamasında global optimizasyon tekniklerinde olan "Differential Evolution" (DE) algoritması

kullanılır. Bu algoritma genetik algoritma tabanlı olup sayısal bir direk optimizasyon yöntemi olup global optimuma ulaşmada oldukça güçlüdür. Bu tür optimizasyon yöntemlerine pek çok yazılım dilleri ve paket programlar vasıtasıyla ulaşmak mümkündür. Dahası türev hesaplamaları içermeyen bu yöntemleri programlamak oldukça kolaydır.

Bulunan optimum TMD tasarımları deprem etkileri altında zaman tanım alanında hesaplar yapılarak test edilmiştir. Farklı karakteristiklere sahip depremler kullanılarak, tasarlanan TMD'lerin performansları bulunmuş ve literatürdeki diğer yöntemler ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar hem zaman hem de frekans davranışları dikkate alınarak yapılmıştır. Sayısal sonuçlar önerilen yöntemlerin oldukça etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Önerilen yöntemlerin tekli veya çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin tasarımı için uygulamacı ve mühendisler için kullanışlı bir araç olacağı düşünülmektedir.

1.4 Tez Çalışmasının Ana Hatları

Tez çalışmasının ilk bölümünde tezin amacından ve öneminden bahsedilmiş, kullanılacak materyal ve yöntemler anlatılmıştır. TMD ve MTMD'lerden kısaca bahsedilerek bunlarla ilgili literatür özetleri verilmiştir. Devamında yapı kontrol sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu bölümde son olarak rastgele titreşimler teorisinin ana hatlarından ve yapıların rastgele titreşimler etkisindeki davranışından bahsedilmiş, yapıların rastgele titreşimler altındaki davranışı konusundaki teorik bilgiler ve formülasyonlar verilmiştir. Ayrıca olasılık yoğunluk fonksiyonu, ortalama değer ve standart sapma, stasyonier rastgele proses, otokorelasyon fonksiyonu, ergodik proses, spektral güç yoğunluk fonksiyonu, rasgele yükler altındaki kayma çerçevesi modeli ve beklenen değerlerinin hesaplanması konularına açıklık gerilmiştir.

İkinci bölümde tekli ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD) performansı ve tasarımı konusunda incelemeler yapılmış ve tekli TMD tasarımı için bir yöntem sunulmuştur. Bu bölümde TMD davranışının genel prensiplerinden bahsedilmiş, TMD'nin optimizasyonu için çeşitli kriterler ortaya konmuştur. Daha sonrasında çok serbestlik dereceli sistemlerde optimum TMD tasarımı için klasik çözüm yöntemlerinden bahsedilmiş, devamında da önerilen optimum çözüm yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntemde TMD eklenmiş yapının tasarımı, formülasyonları, optimizasyon problemi ve yöntemi sunulmuştur. TMD

optimizasyonu için kullanılan differential evolution (DE) algoritmasından bahsedilerek geliştirilen yöntemin kullanıldığı üç adet örnek problem sunulmuştur. Birinci örnekte 4 katlı düzenli kayma çerçevesi için TMD tasarımı yapılmıştır. Söz konusu bu örnekte yakın fay ve uzak fay depremleri kullanılmıştır. Temel yöntemlere göre tasarımı yapılan TMD ile, bu tez çalışmasında önerilen yöntemle tasarlanan TMD'nin performansları karşılaştırılmıştır. İkinci örnekte yakın fay deprem kayıtları kullanılarak önerilen yöntemle ilgili olarak 4 katlı düzensiz kayma çerçevesi için TMD tasarımı yapılmış, sonuçlar klasik yöntemle kıyaslanmıştır. Üçüncü örnekte geliştirilen yöntem 10 katlı bir kayma çerçevesi için uygulanmış, çeşitli yakın fay depremleri için testler yapılmıştır. En son olarak bu bölümdeki yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin katlara optimum yerleşimi; parametreleri ve lokasyon optimizasyonu ile ilgili bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu bölümde, ilk olarak MTMD eklenmiş deprem etkisindeki kayma çerçevesinin optimum tasarımı için genel bilgiler verilmiş, geliştirilen tasarım yönteminden bahsedilmiştir. Tasarım için kullanılan kritik etki yöntemi anlatılarak, ivme kontrolü için optimizasyonun nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Bu bölümde verilen sayısal örnekte geliştirilen yöntemle ilgili analizler yapılmış, literatürdeki başka çalışmalarla kıyaslanmıştır. En son olarak, geliştirilen tasarım yöntemiyle ilgili yapılan analizler sonucunda, elde edilen çıkarımlardan bahsedilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

1.5 Literatür Özeti

Deprem ve rüzgâr yükleri yapı tasarımında kullanılan diğer birçok yüklere göre farklılık gösteren stokastik yüklerdir. Deprem etkisi durağan olmayan kuvvetli bir karaktere sahiptir. Birçok durumda yer hareketinin ivmesinin en yüksek değeri ilk birkaç saniyede gerçekleşirken, bazen yüksek ivme değerleri daha uzun sürelerde etki etmektedir. Klasik yapı tasarımı döneminde sadece düşey yüklerin kullanılması, modern dönemde yatay deprem yüklerinin statik veya dinamik olarak etki ettirilmesi ve post modern dönemde sönümleyicilerin eklenmesi ile yapılar tasarlanmaktadır. Son dönemde yapısal kontrol sistemleri olarak tanımlanan aktif, pasif, yarı aktif veya karma sistemler ile yapılar yüksek güvenlik seviyelerine ulaşabilmektedirler. Pasif sistemlerin bir sınıfı olan ayarlı kütle

sönümleyicileri özellikle yüksek yapılar olmak üzere pek çok yapı türünde ve pek çok mühendislik alanında kullanılmaktadırlar. Bu tür sönümleyicilerin tasarımında en önemli mevzu en iyi tasarıma ulaşma gereksinimidir. Bundan dolayı pek çok araştırma TMD'lerin optimizasyonuna odaklanmıştır.

Ayarlı kütle sönümleyicileri özellikle rüzgar etkilerine karşı yaygın olarak kullanılmakla birlikte, onların sismik performansı ile ilgili farklı görüşler ortaya konmuştur. Bazı çalışmalar TMD'lerin deprem etkisini azaltmada az etkili olduğunu belirtirken, diğer bazı çalışmalar onların kuvvetli depremlerin etkilerini azaltmada son derece etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu farklı görüşlerin sebebi büyük oranda TMD parametrelerinin seçimlerindeki farklı depremlerin kullanılması sebebiyle sismik girdilerin frekans karakterlerindeki farklılıklardır (Wu, 2000). Ayarlı kütle sönümleyici kavramı ilk olarak Hermann Frahm tarafından gemi makinelerinin gemi omurgasında yarattığı titreşim tehlikesini ortadan kaldırmaya yönelik olarak 1909 yılında ortaya atılmıştır. Frahm 1911 yılında patentini aldığı bu sisteme o yıllarda ayarlı titreşim sönümleyici adını vermiştir. Frahm tarafından ortaya konan bu titreşim kontrol aletinin teorik olarak hiçbir doğal sönüme sahip olmadığı varsayılmıştır. Bu titreşim aleti sadece, ayarlı kütlenin doğal frekansı ile dış etki frekansının birbirine çok yakın olduğu durumda etkili olmaktadır (Rana ve Soong, 1998). Ayarlı kütle sönümleyicilerle ilgili ilk teorik çalışma 1928 yılında Ormondroyd ve Den Hartog (1928) tarafından ortaya konmuş ve daha sonra yayınlanmıştır. Den Hartog (1956) "Mekanik Titreşimler" adlı kitabında optimum sönüm parametrelerini geliştirmiş, sistemin ana kütlelerinde sönüm olmadığını ve TMD' nin sönüm içerdiğini varsaymıştır. Daha sonra Bishop ve Welbourn (1952) ana kütlede sönüm içerdiğini varsayarak çeşitli analizler yapmışlar ve çalışmalarını geliştirmişlerdir. Falcon vd., (1967) ana sisteme belli miktar sönümleyici ekleyerek sistemi optimize etmeyi planlamışlardır. Ioi ve Ikeda (1978) sönüm parametreleri için çeşitli düzeltme faktörü fonksiyonları eklemişlerdir. Warburton ve Ayorinde (1980) kütle oranı ve ana kütlede sönüm oranlarının optimum değerlerini tablo haline getirmişlerdir. Thompson (1981), sönümsüz tek serbestlik dereceli sistemlerde optimum TMD parametrelerini geliştirmiştir. Vickery vd. (1983) ana kütlede %5 sönüm oranı ile çalışmalar yapmış ve TMD' ye eklenmesi gereken optimum sönüm oranını hesaplamışlardır. Tsai ve Lin (1993) harmonik hareket yapan sistemin optimum parametrelerini bulmuşlar ve ampirik denklemler türetmişlerdir. Villaverde ve Koyama (1993) 1985 yılında meydana gelen Mexico City Depremi ivme kaydını kullanarak, TMD'nin 10 katlı bir bina üzerindeki

etkilerini incelemişlerdir. Belirli bir bant genişliğinde ve uzun süreli deprem kayıtlarında binanın tepesine yerleştirilen 0.042 kütle oranına sahip TMD'nin binanın tepe deplasmanını % 40 oranında azalttığını ölçmüşlerdir. Soto-Brito ve Ruiz (1999) yüksek şiddetli depremlerin meydana getirmiş olduğu etkileri incelemek için 22 katlı lineer olmayan bir kayma çerçevesinde deprem etkisi altında TMD davranışını incelemişlerdir. Onlar bu çalışmalarında, hafif ve orta şiddetli deprem etkisi altındaki lineer olmayan yapılardaki pik tepkilerin azaltılmasında TMD'nin etkili olduğunu göstermişlerdir.

Yamaguchi ve Harnpornchai (1993) MTMD'lerin temel karakteristiklerini incelemiş, onların etkinliğini ve gücünü araştırmışlardır. Ayrıca, aynı kütle miktarına sahip tekli TMD ve MTMD'leri kıyaslamışlardır. Tekli ayarlı kütle sönümleyiciler ile çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin karşılaştırılması neticesinde çoklu olanları meydana getiren TMD'lerin hepsinin ayrı ayrı bir optimum sönüm oranı ve frekans aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Igusa ve Xu (1994) yapının doğal frekanslarıyla uyumlu olarak belirli bir frekans aralığında çalışan MTMD'leri incelemişlerdir. Çalışmalarında asimtotik teknikler ile empedans için bir integral formu geliştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda, belli bir bant frekansındaki rüzgar etkilerine maruz kalan MTMD'lerin titreşim kontrol kapasiteleri hesaplanmıştır. Yapılan optimizasyonda TMD'lerin toplam kütle miktarı bir kısıt olarak ele alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu optimizasyon neticesinde MTMD'lerin TMD'lere göre daha etkili ve güçlü oldukları sonucuna ulaşılmıştır. Abe ve Fujino (1994) MTMD'lerin modal karakteristikleri ve etkinliklerini analitik olarak araştırmışlardır. Harmonik yüke maruz MTMD'lerin etkinliğini tahmin etmek için açık bir formülasyon türetilmiştir. Onların çalışmasında görülmüştür ki çoklu TMD'yi oluşturan sönümleyicilerden en az biri yapının herhangi bir moduna göre ayarlandığında çoklu TMD etkili olmaktadır. Jangid (1995), yer hareketi etkisi altındaki bir yapının dinamik tepkisini azaltmak için MTMD'lerin etkinliğini birinci mod için araştırmıştır. Çalışmasında MTMD ile kontrol edilmeyen yapıyla 1. modun kontrolüne göre tasarlanmış MTMD'lerin kıyaslaması yapılarak etkinlikleri araştırılmıştır. Bu kıyaslamada yapının kat deplasmanının karesel ortalamalarının karekökleri baz alınmıştır. Yer hareketinin frekans içeriği geniş bant sabit stasyonier rastgele işlemi ile tanımlanmıştır. Uniform olarak dağıtılan doğal frekanslı çoklu TMD'ler bu amaç için ele alınmıştır. Yapılan tasarımda MTMD'lerin sönüm, kütle oranı, sayısı, ayar frekans oranı, sönümleyicilerin frekans aralıkları ve yer hareketinin frekans içeriği göz önüne alınmıştır. Bu çalışma neticesinde MTMD'lerin, onların toplam

kütlesine eşit bir kütle ve sönüme sahip tek bir TMD'ye göre daha etkili ve daha dayanıklı oldukları gösterilmiştir. Joshi ve Jangid (1997) çalışmalarında, yer hareketine maruz dinamik etkileri azaltmak için çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum parametrelerini bulmak için bir yöntem göstermişlerdir. Yer hareketi stasyonere bir beyaz gürültü olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon için amaç fonksiyonu ana yapının deplasmanlarının karelerinin karekökü olarak seçilmiştir. Rana ve Soong (1998) TMD ve MTMD parametreleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Onların çalışmasında optimum olarak ayarlanmayan TMD etkisi de incelenmiştir. Çalışmalarında dış yük olarak hem harmonik etkileri hem de El-Centro ve Meksiko depremlerinin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Jangid (1999), harmonik yer hareketi etkisindeki sönümsüz sistem için sayısal bir teknik kullanarak MTMD'nin optimum parametrelerini araştırmıştır. Yapının deplasman tepkisi minimize edilmek üzere amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Onun bu çalışmasında MTMD'nin optimize edilen parametreleri; sönüm oranı, bant genişliği ve ayar frekansı için geliştirilen formüller eğri uydurma yöntemiyle türetilmiştir. Ayrıca açık formüldeki hata miktarı belirlenerek hata oranının ihmal edilebilir düzeye çekilmesi sağlanmıştır. MTMD'li sistemin parametrelerinin optimum değerleri, farklı kütle oranı ve sönümleyici miktarı için incelenmiştir. Takewaki (2000a), zemin yapı etkileşimini dikkate alarak yapıya yerleştirilmiş ayarlı kütle sönümleyicilerinin viskoz sönümleyicilerle birlikte optimum kullanımının yapı davranışını iyileştirmede son derece etkili olduğunu göstermiştir. Chen ve Wu (2001) sismik etki altındaki 6 katlı bir yapıda, tekli TMD'nin modal etkileri azaltmadaki yetersizliğini ortaya koymuşlardır. Ardından çok aşamalı ve birden çok modu kontrol eden MTMD'leri ele almışlar, sezgisel muhakemeye dayalı olarak birkaç optimal lokasyon indeksi tanımlayarak MTMD'lerin yerleşimi ve tasarımı için pratik öneriler sunmuşlardır. Önerilen yöntemlerin, maksimum ivmeleri azaltmadaki etkinliğini, rastgele yükler ve 13 adet farklı deprem kaydı altında nümerik olarak test etmişlerdir. Çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin maksimum ivmeleri azaltmadaki etkinliği tekli TMD'lere göre %10-%25 kadar daha fazla olmuştur. Zaman tanımlı alanda yapılan analizler neticesinde %3 kütle oranına sahip MTMD'lerin kat ivmelerini % 40'a kadar azalttığını göstermişlerdir. Bunlara ilaveten MTMD'lerle eşit kütle ve sönüm oranına sahip tekli TMD'nin darbe etkilerine karşı aynı etkiyi gösteremediğini ortaya koymuşlardır. Li (2002), yer hareketi etkisindeki bir yapıda zararlı titreşim etkilerini azaltmak amacıyla, deplasmanın dinamik büyütme faktörünün maksimum değeri (DDMF) ve ivmenin dinamik büyütme faktörünün maksimum değerini (ADMF) minimize ederek, yapının doğal frekanslarına göre düzenli olarak dağıtılmış birçok

TMD'den oluşturulan MTMD'lerin tasarımını incelemiştir. Çalışmalarını daha iyi performans gösteren çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri seçerek farklı yay rijitliği, kütle miktarı, sönüm katsayısına sahip çeşitli kombinasyonları içeren beş MTMD modeliyle (MTMD-1-MTMD-5 gibi) gerçekleştirmiştir. Li ve Liu (2002a) çalışmalarında spesifik modları kontrol etmek amacıyla sekiz adet yeni MTMD modelini ele almışlardır. Maksimum dinamik büyütme faktörünün (DMF) minimum değerinin minimizasyonu ile bu sekiz farklı MTMD parametrelerini belirlemişlerdir. Li ve Liu (2002b) çalışmalarında optimum dinamik büyütme faktörünün minimum değerinin minimize ederek aktif çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin (AMTMD) etkinliğini araştırmışlardır. Chen ve Wu (2003) 1/4 ölçekli bir yapıda sismik etkileri azaltmak için MTMD'leri kullanarak serbest titreşim ve zorlanmış titreşim deneyleri yapmışlardır. Deneyde optimum olmayan MTMD'lerin tekli TMD'lere kıyasla üstün bir performans sergidekileri görülmüştür. Ayrıca deneysel sonuçlar sayısal sonuçlar ile test edilerek kıyaslama yapılmış ve birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Pinkaew vd. (2003), ana yapı akma dayanımını aştıktan sonra TMD'lerin pik deplasmanları azaltmada etkili olmasa bile hasarın azalması ve binanın göçmesini önlemede son derece etkili olduklarını göstermişlerdir.

Yang vd. (2004) Avusturalya Melbourne'deki 76 katlı betonarme bir binada belirli optimizasyon kısıtları altında lineer karesel Gaussian tekniğini uygulayarak rüzgâr etkilerini incelemiştir. Söz konusu yapı Sydney Üniversitesinde modellenerek rüzgâr tüneli testine tabi tutulmuş, rüzgâr etkisini azaltmak için aktif, yarı aktif ve pasif kontrol sistemleri kullanılmıştır. En üst kata ayarlı aktif kütle sönümleyiciler yerleştirilirken, pasif veya yarı aktif olan viskoz sönümleyiciler, visko-elastik sönümleyiciler, elektroeolojik sönümleyiciler, magnetoeolojik sönümleyiciler seçilen katlara yerleştirilmiştir.

Wang ve Lin (2005) burulma etkisindeki düzensiz yapılarda zemin yapı etkileşimini dikkate alarak çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin etkinliğini araştırmışlardır. Özellikle burulma etkisindeki düzensiz yapılarda bina yüksekliği ve temel yüksekliği oranındaki artış ve zemin rijitliğindeki azalma, hem zemin yapı etkileşimini artırmış hem de binadaki çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin ayarını bozmuştur. Fakat daha geniş frekans bandında tasarlanan çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri bu bozucu etkiden daha az etkilenmiştir. Ayrıca zemin yapı etkileşimin daha çok olduğu durumlarda MTMD'lerin, tekli TMD'lere göre çok daha etkili oldukları görülmüştür.

Zuo ve Nayfeh (2005) çalışmalarında çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerde kütle dağılım etkisini, sönümleyici sayısını ve toplam kütle oranı etkisini incelemişlerdir. Bu incelemede sistemdeki belirsizlikleri göz önüne almışlardır. Her bir tekli ayarlı kütle sönümleyicisinin rijitlik ve sönüm katsayılarının optimize edilmesinde direk bir optimizasyon algoritması önermişlerdir.

Lee vd. (2006), frekans alanında tanımlanan bir performans indeksini minimize ederek TMD'nin sönüm ve rijitlik parametrelerini hesaplamışlardır.

Li ve Qu (2006), iki serbestlik dereceli bir sistemde aynı sönüm ve aynı yay katsayısına sahip çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerini farklı kütle durumları için inceleyerek onların ötelenmeye ve dönmeye olan etkilerini araştırmışlardır.

Carneiro vd. (2006), çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanıldığı yirmi katlı kayma çerçevesinde modal süperpozisyon yöntemini uygulayarak yapı sistemini tek serbestlik dereceli sisteme indirgemişler ve min-max prosedürünü kullanarak hem birbirlerine bağlanmış hem de birbirinden ayrık olan çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin etkilerini incelemişlerdir.

Warnitchai ve Hoang (2006), kirişlerde ve döşemelerde çoklu ayarlı kütle sönümleyicisinin etkisini ve yerleşimini araştırmışlardır. Geniş bir frekans aralığında sayısal optimizasyon yapmışlardır. İlk olarak basit bir kirişteki titreşim kontrolü için 10 adet TMD kullanmışlardır. Her bir titreşim moduna tek serbestlik dereceli sistem gibi yaklaşılarak geniş frekans aralığında analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda en etkili MTMD'lerin ana yapının iki doğal frekansı arasında seçilenler ve düşük sönüm oranına sahip olanlar olduğu görülmüştür. Son olarak gerçek bir kat döşemesinde titreşim etkilerini azaltmak için beş tane yakın frekans aralığını kontrol eden on adet ayarlı kütle sönümleyicisi kullanmış, kullanılan ayarlı kütle sönümleyicilerin etkin ve güçlü oldukları görülmüştür.

Li ve Ni (2007), düzenli olmayan çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimizasyonunda bir grandyan tabanlı optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin dinamik karakteristiklerini, güçlerini, etkinliklerini, gerekli veya gereksiz olup olmadıklarını detaylı olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının neticesinde,

çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin geleneksel ve düzenli olarak tasarlanan çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerine göre daha etkin olduklarını ortaya koymuşlardır.

Nagarajaiah ve Sonmez (2007), kısa süreli Fourier Dönüşümü kullanarak bir yarı aktif kontrol algoritması geliştirmişlerdir. Bu algoritma ile beş serbestlik dereceli bir sistemde değişken yay sabitine sahip yarı aktif tekli ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin (STMD/SMTMD) performanslarını incelemişlerdir. Dış yük olarak harmonik, stasyonier olan ve olmayan etkileri kullanmışlardır. Kuvvet ve yer hareketi etkisindeki yarı aktif tekli ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin pasif emsallerine göre daha etkili olduklarını göstermişlerdir. Yapının hasar görmesi neticesinde doğal frekanslarında değişiklik meydana gelmesi neticesinde, TMD'nin ayar frekansının etkinliği son derece azaldığından ve değişken yay sabitine sahip yarı aktif ayarlı kütle sönümleyicileri dış etki frekansına daima ayarlanabildiğinden pasif emsallerine göre çok daha güçlü olduğu ortaya konulmuştur.

Guo ve Chen (2007) çoklu ayarlı kütle sönümleyicisi eklenmiş üç boyutlu yapılar için dinamik analizler yapmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin yapının doğal frekanslarını değiştirdiği ve geçici tepkileri azalttığı gösterilmiştir.

Leung vd. (2008), tek serbestlik dereceli bir sistemde parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanarak stasyonier olmayan dış kuvvetler altında ayarlı kütle sönümleyicisinin kütle oranı, sönüm ve ayar frekanslarını optimize etmişlerdir.

Wong ve Johnson (2009) bir tür kuvvet anolojisi yöntemiyle modelledikleri elastik olmayan deprem etkisindeki bir yapıda çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin etkinliğini araştırmışlardır. Ayarlı kütle sönümleyicilerinin hem yapının enerji sönüm kapasitesini artırdığını, hem de plastik enerji talebini azaltarak yapıda meydana gelecek hasarı azalttığını göstermişlerdir. Daha önemlisi TMD'ler plastik enerji dağılımını alt katlardan üst katlara doğru daha düzenli dağılmasını sağlamışlardır. Bu özellikle alt katlarda üst katlardan daha fazla zarar görecektir yapılar için faydalıdır. Ayrıca ayarlı kütle sönümleyicilerin zayıf olan yukarı katlara yerleştirilmesinin sakıncalı olduğunu belirtmişlerdir.

Lewandowski ve Grzymislawka (2009), çalışmalarında çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerini kullanarak yapıya etkiyen kuvvetli rüzgâr etkisini azaltmayı hedeflemişlerdir. MTMD etkinliğini dikkate alınarak buldukları sonuçları formüle etmişlerdir.

Lin vd. (2010), sürtünme tipi ayarlı kütle sönümleyicilerinin sürtünmeden kaynaklı aktive olamamalarının önüne geçebilmek için yarı aktif sürtünme tipi ayarlı kütle sönümleyicilerini kullanmışlardır. Şiddetli depremler esnasında aynı performansı sergilemesi hedeflendiğinde, yerleşim açısından sürtünme tipi yarı aktif ayarlı kütle sönümleyicilerin sürtünme tipi pasif ayarlı kütle sönümleyicilere göre çok daha az yer kapladıkları sonucuna ulaşmışlardır. Düşük şiddetli depremlerde ise sürtünme tipi pasif ayarlı kütle sönümleyicilerinin sürtünmeden dolayı aktive olamamaları sebebiyle yarı aktif sürtünme ayarlı kütle sönümleyicilerin çok daha etkin olduklarını belirtmişlerdir.

Moon (2010) rüzgâr etkisindeki yüksek binalarda tepe noktasına yakın katlara yerleştirilen ayarlı kütle sönümleyicilerin performanslarını incelemiştir. Geleneksel olarak tasarlanan çoklu ayarlı kütle sönümleyicilere kıyasla, hem aynı performansı göstermişler hem de ayrı ayrı katlara yerleştirilmesi sebebiyle kapladıkları alan ve yerleşimleri açısından avantajlar sağlamışlardır.

Sgobba ve Marano (2010), elastik olmayan yapıların depreme karşı korunmasında lineer ayarlı kütle sönümleyicilerini yer değiştirme, sönümlenen enerji ve hasara bağlı bir takım amaç fonksiyonları kullanarak tasarlamışlardır.

Marano vd. (2010), tek serbestlik dereceli bir sistemde filtre edilmiş stasyoner yükler altında ana sistemin deplasman veya ivmesini minimize etmek için ayarlı kütle sönümleyicisinin parametrelerini ve kütlelerini optimize etmişlerdir.

Almazan vd. (2012) bir veya iki adet ayarlı kütle sönümleyicisi ile kontrol edilen iki veya tek yönlü deprem etkisi altındaki, lineer ve lineer olmayan, simetrik olmayan bir yapının davranışını incelemişlerdir. Yapının davranışının TMD'nin frekansı ve pozisyonuna göre çok duyarlı olduğu rapor edilmiştir.

Farshidianfar ve Soheili (2013) yüksek yapılarda pik deplasman ve ivmeleri minimize etmek için karınca koloni optimizasyon algoritması kullanarak ayarlı kütle sönümleyicilerin kütle sönüm ve yay rijitliği parametrelerini optimize etmişlerdir. Bu optimizasyonu zemin yapı etkileşimini dikkate alarak yapmışlardır. Ayarlı kütle sönümleyici parametreleri farklı zeminlerde farklı değerler almıştır.

Mohebbi vd. (2013) tarafından on katlı bir lineer kayma çerçevesi için filtre edilmiş beyaz gürültü etkisi altındaki yapının maksimum deplasmanı, genetik algoritma kullanarak belirli kısıtlar altında minimize edilerek çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum parametreleri bulunmuştur. Çalışmalarında kütle oranının çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin performanslarını artırdığı ve sayısının artırılmasının performansı çok fazla etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır. Tasarladıkları çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin performansını hem uzak fay hem de yakın fay depremleri altında test etmişlerdir. Bu test neticesinde çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin performansının depremin özelliklerinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Yüksek modların etkisi de dikkate alınarak yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

Daniel ve Lavan (2014), çoklu ayarlı kütle sönümleyicisi ile kontrol edilen sismik etki altındaki üç boyutlu düzensiz bir yapıda çoklu modun kontrolü için grandyan tabanlı geleneksel bir optimizasyon metodolojisi ortaya koymuşlardır. Bu optimizasyonda tüm ayarlı kütle sönümleyicilerinin kütlelerinin toplamı, ivme ve katlar arası göreceli deplasman değerleri için verilen kısıtlar altında minimize edilmiştir. Çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin uygun tasarlanması durumunda yapısal ve yapısal olmayan hasarları azalttığı ortaya konmuştur.

Frans ve Arfiadi (2015) çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin tasarım parametrelerini bulmak ve optimum yerleşimini sağlamak için hibrit kodlanmış genetik algoritma (HCGA) kullanmışlardır. Buldukları sonuçları zaman tanım alanında deprem etkisi altında test ederek literatürdeki başka çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin deprem etkisine karşı oldukça etkili oldukları sonucuna varmışlardır.

Cheung and Wong., (2011), rastgele yükler altındaki tek serbestlik dereceli bir sistemdeki geleneksel olmayan ayarlı kütle sönümleyicilerin parametrelerini H2 optimizasyonunu

kullanarak optimize etmişlerdir. Ardından optimum olarak tasarlanmış geleneksel ayarlı kütle sönümleyicilerinin performansı ile karşılaştırmış, önerilen ayarlı kütle sönümleyicilerin geleneksel olanlara göre çok daha iyi performans sergilediklerini belirtmişlerdir.

Lin vd., (2011) iki yönlü sismik etki altındaki üç serbestlik dereceli iki yönlü asimetrik olmayan bir yapı modelinde deprem etkisini azaltmak için iki yönlü çalışan bir ayarlı kütle sönümleyicisi önermişlerdir. Önerdikleri bu ayarlı kütle sönümleyicisinin hem elastik hem de elastik olmayan asimetrik planlı yapıların sismik davranışını kontrol edebilmek için etkili olduğu gösterilmiştir.

Arfiadi ve Hadi (2011), çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin parametrelerini ve yerleşimlerini belirlemek için H2 performans indeksini genetik algoritma kullanarak minimize etmişlerdir. Tasarladıkları ayarlı kütle sönümleyicilerini deprem etkisi altında test ederek literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmış ve daha iyi performans sergilediklerini rapor etmişlerdir.

Bekdas ve Nigdeli (2011), sezgisel harmoni arama (MHS) algoritmasını kullanarak sismik etki altındaki yapılar için optimum ayarlı kütle sönümleyicisi parametrelerini belirleyerek literatürdeki birçok çalışmalarla kıyaslamışlardır. Bu kıyaslama neticesinde deprem etkisini azaltmada tasarladıkları ayarlı kütle sönümleyicilerin emsallerine göre çok daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir. Bir başka çalışmalarında (Bekdaş ve Nigdeli, 2013) ise ayarlı kütle sönümleyicileri için kütle oranı etkilerini araştırmışlardır.

Ikago vd. (2012) bilyeli vida mekanizmalı ayarlı viskoz kütle sönümleyicileri (TVMD) olarak isimlendirilen yeni bir sismik kontrol aletini geliştirmişlerdir. Söz konusu bu kontrol aletinin deprem karşısındaki etkinliği yapılan analizlerle ve sarsma tablası testleriyle gösterilmiştir.

Moutinho (2012), yapılara kayda değer miktarda sönüm katma amacıyla büyük kütle oranlı TMD'ler önermiştir. Önerilen yöntemin temel özelliği, yapının ilk iki titreşim modunun sönüm oranları ile kabul edilen kütle oranı arasında doğrudan bir orantı oluşturmaktır. Sistemin ana titreşim modlarına ait sönüm oranlarını eşitleyerek, bu

yöntem ile aynı zamanda tepki spektrumuna dayanan modal analiz gibi basitleştirilmiş yöntemlerin kullanımını kolaylaştıracağı belirtilmiştir.

Tigli (2012) rasgele yüklerin etkisindeki lineer sönümlü bir sistemde optimum ayarlı kütle sönümleyici parametrelerini belirlemek için deplasman, hız ve ivmelerin varyanslarını minimize etmiştir.

Cheung vd. (2013) stasyonier rastgele yükler altındaki tek serbestlik dereceli bir sistemin tepkisini azaltmak için kullanılan bir hibrit kütle sönümleyicisini (HVD) optimize etmişlerdir. Tasarladıkları hibrit kütle sönümleyicisinin performansını pasif kütle sönümleyicinin performansı ile karşılaştırmışlardır.

Garrido vd. (2013) tek serbestlik dereceli bir sistemde harmonik yükleri azaltmak için bir dönme ataletine sahip ikili tipteki ayarlı kütle sönümleyicisini (RIDTMD) önermişlerdir. Önerilen bu aletin performansını aynı miktardaki kütle oranına sahip klasik ayarlı kütle sönümleyicilerinin performansı ile kıyaslamışlardır. Bu kıyaslama sonucunda titreşim aletinin performansı geniş frekans bandı ve özellikle yapının rezonans frekansına yakın olduğu durumlarda çok daha etkili olmuştur.

Xiang ve Nishitani (2015) yapıya etkiyen sismik etkileri azaltmak için geleneksel olmayan ayarlı kütle sönümleyicisi (NTTMD) olarak isimlendirdikleri bir titreşim kontrol aletini önermişlerdir. Önerilen sönümleyici, klasik ayarlı kütle sönümleyicilerine kıyasla daha az yer kaplamakla beraber, hem deprem etkilerini azaltmada hem de yüksek yapıların güçlendirilmesinde etkili olduklarını belirtmişlerdir.

Poh'sie vd. (2016) yüksek katlı çapraz lamine ahşap yapılarda sismik ivmeleri azaltmak amacıyla genetik algoritma kullanarak ayarlı kütle sönümleyicisi parametrelerini hesaplamışlardır. Tasarlanan ayarlı kütle sönümleyicisinin performansı yedi katlı bir yapı modeli için sarsma tablası testiyle sınanmıştır. Bulunan sonuçlar neticesinde farklı ayarlı kütle sönümleyicisi konfigürasyonlarının yapıya gelen deprem ivmesini azaltmada son derece etkili olduklarını belirtmişlerdir.

Çetin vd., (2017), sismik etki altındaki bir ayarlı kütle sönümleyicisi eklenmiş ve viskoz sönümleyicilerle donatılmış bir kayma çerçevesinde, viskoz sönümleyici katsayılarını

bulmak için bir optimizasyon yöntemi sunmuşlardır.

Lu vd. (2017), parçacık ayarlı kütle sönümleyicisi (PTMD) olarak isimlendirdikleri bir titreşim kontrol aleti üzerinde deneysel ve analitik olarak çalışmışlardır.

Hussan vd. (2018) “Response Surface Methodology (RSM)” olarak isimlendirilen optimizasyon yöntemi kullanarak açık denizdeki tribün yapılarının tepesindeki MTMD’leri çoklu mod kontrol stratejisine göre optimize etmişlerdir.

Wen vd., (2018) porselen elektrik ekipmanlardan olan potansiyel transformatörlerini (PT) deprem etkisine karşı korumak için yenilikçi ayarlı kütle sönümleyicilerini önermişler ve bunların etkinliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda çoklu ayarlı kütle sönümleyicileri ile kontrol edilen potansiyel transformatörleri ayarlı kütle sönümleyicileri ile kontrol edilmeyenlerinkine göre %30 kadar daha iyi performans sergilemiştir. Önerilen MTMD’lerin elektrik ekipmanlarının hasarını azaltmada etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Kim vd. (2018), alan sınırlaması, taşıma ve kullanım kolaylığı gibi pratik nedenlerle çok sayıda küçük boyutlu ayarlı kütle sönümleyicilerinin uygulamalarını araştırmışlardır. Altı adet pratik konfigürasyon geliştirilmiş ve karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. İki farklı optimizasyon tekniği uygulanmıştır.

1.6 Yapı Kontrol Sistemleri

Yapı sistemine etkileyen deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkilerden kaynaklı titreşim enerjileri yapının kendi bünyesindeki yapısal ve yapısal olmayan malzemelerle sönümlenmeye çalışılır. Yapıya uygun şekilde tasarlanmış ilave enerji sönümleyicileri eklenirse enerjinin büyük bir kısmı bu sayede sönümlenebilir. Böylece yapının kendi bünyesindeki sönümlemesi gereken enerji miktarı azaltılarak yapının hasar görmesi veya göçmesinin önüne geçilmiş olur. Söz konusu bu sistemler, yapıların dinamik etkilere karşı rehabilitasyonunu sağlamak, zemin yapı etkileşiminden kaynaklı etkileri azaltmak, titreşim etkilerine karşı yapı konforunu artırmak, yapısal ve yapısal olmayan elemanların zarar görmesini önlemek gibi fonksiyonları da vardır. Yapı kontrol sistemleri, sismik yalıtım, pasif kontrol, aktif, yarı aktif kontrol ve karma kontrol sistemleri olarak

sınıflandırılabilir. Çizelge 1.1’de yapı kontrol sistemleri ve alt türleri görülmektedir (Aydın, 2005). Özellikle deprem ve rüzgar gibi dinamik dış etkilerin baskın olduğu bölgelerde inşa edilecek olan yapıların geleneksel yöntemler ile titreşimlerinin kontrolü yapılarda belli bir hasarın ve zararlı titreşimlerin kabulünü beraberinde getirir. Geleneksel olarak bahsedilen yapı tasarımında, bu dış dinamik etkiler altında titreşimin azaltılması için yapı elemanları kendi bünyelerinde yaptıkları deformasyonlar ve doğrusal olmayan davranışları ile enerjiyi sönmölemektedirler. Modern dönemde ortaya çıkan dinamik analizler ve tasarım ilkeleri halen geçerli iken, post modern dönem olarak ifade edilen dönemde yapılar, artık dinamik etkilere karşı yukarıda bahsedilen teknolojik araç ve yöntemler ile daha güvenli tasarlanmaktadır.

Post modern dönemin getirdiği bu kontrol sistemlerinin bazıları enerjiyi kendi bünyelerinde, metallerin elastik olmayan davranışları, akışkanların viskoz hareketleri, visko elastik malzeme davranışları, sürtünme kuvvetleri, kütle hareketleri ve rijitlikleri ile sönmölemektedirler. Pasif sistemler bu sönmöleme özelliğini sağlamak için dış bir enerjiye ihtiyaç duymazlar. Aktif sistemler, değişken dış etkiler altında kendini adapte edebilen ve dış enerjiye ihtiyaç duyan sistemlerdir. Özellikle deprem gibi kuvvetli dış etkiler altında bu dış enerji ihtiyacını karşılamak zor olabilir. Yarı aktif sistemler değişken kuvvetleri oluşturabilirken, büyük enerji ihtiyacını da azaltarak piller gibi elemanlar kullanarak kontrolü sağlayabilmektedirler. Pasif sistemler dış etki altında adapte olabilen özelliklere sahip olmadıkları bilinmekle beraber herhangi bir dış enerjiye ihtiyaç duymamaktadırlar. Bu elemanların yapısal titreşimleri azalttığı ve buna bağlı hasarları en aza indirdiği de bilinmektedir. Gerek maliyet gerekse yapısal titreşimlerin en aza indirilmesi için bu kontrol sistemlerinin optimum olarak tasarlanması gerekmektedir.

Çizelge 1.1. Yapı kontrol sistemlerinin sınıflandırılması (Aydın, 2005)

Pasif kontrol sistemleri	Taban izolasyonu (Sismik yalıtım)	Aktif kontrol sistemleri, yarı aktif ve hibrit sönmöleyiciler
• Viskoz akışkan sönmöleyiciler • Metalik sönmöleyiciler • Visko-elastik sönmöleyiciler • Ayarlı akışkan sönmöleyiciler • Ayarlı kütle sönmöleyiciler • Sürtünme tipindeki sönmöleyiciler	• Sentetik kauçuk izolatörler • Kurşunlu kauçuk izolatörler • Sürtünme tipi sarkaç izolatörler	• Aktif tendonlu sistemler • Aktif kütleli sistemler • Aktif kuvvet veren hidrolik sistemler • Değişken rijitlik ve sönmö veren sistemler • Hibrit kütle sönmöleyici • Akıllı malzemeler

1.6.1 Pasif kontrol sistemleri

Pasif kontrol sistemleri yapının aktivasyonu ile çalışan sistemlerdir. Hareket esnasında yapıya gelen titreşim enerjisi bu sistemler vasıtasıyla sönümlenir. Söz konusu bu sistemler dışarıdan herhangi bir enerjiye de ihtiyaç duymazlar. Aktif sistemlerle kıyaslandığında dışarıdan herhangi bir enerjiye ihtiyaç duymamaları, tasarımlarının basit ve yerleşimlerinin kolay oluşu ve maliyetlerinin çok daha ekonomik olması pasif sistemlerin üstünlükleridir. Yapının sönümünü artırarak sistemin daha çok enerji sönümlemesini sağlarlar. Pasif sönümleme genellikle hareket eden sistemin sürtünmesinden, metallerin akmasından, metallerin faz değiştirmesinden, visko-elastik malzemelerin deformasyonundan, akışkanların viskoz hareketinden ve kütle hareketlerinden meydana gelir (Soong ve Dargush, 1997).

1.6.2 Taban izolasyonu (sismik yalıtım)

Taban yalıtım malzemeleri uzun zamandır yaygın olarak kullanılan kontrol elemanlarıdır. Esnek bir tabakayla yapıyı zeminden ayırarak depreme karşı korurlar. Bu malzemeler sayesinde ana yapının periyodu önemli ölçüde artırılarak yer hareketinin ivmesini ve depremden kaynaklı kuvvetin etkisi azaltmış olur (Chopra, 2007).

Yirminci yüzyılın başlarındaki 1906 San Francisco Depremi ve yirminci yüzyılın sonlarındaki 1999 Kocaeli depremi gibi büyük depremler, bir çok can kaybı ve milyonlarca dolara mal olan hasarlara neden olmuştur. Deprem bilinci gelişmiş ülkelerde orta büyüklükteki binalara “Sismik izolasyon” diye adlandırılan yeni bir teknoloji uygulanmaktadır. Bu teknoloji, yapıyı temelinden ayırma prensibine dayanmakla birlikte, yapıya gelen deprem yer hareketini büyük ölçüde azaltarak yüksek deprem güvenliği sağlamaktadır. Tecrübe edilmiş, etkin bir sismik izolasyon sistemi kauçuk ve çelik sönümleyiciler ile kurşun çekirdekten oluşmaktadır. Bu sismik izolasyon elemanları, her kolonun alt noktası ile kolon temeli arasına yerleştirilebilir ve zeminden yapıya gelen deprem hareketlerini bu seviyede absorbe ederler. Binaya daha az kuvvetler gelir ve bina bir rijit cisim hareketi yapar. Bunun sonucunda bina içindeki eşya ve hassas cihazlar bu titreşimlerden zarar görmez. Sonuç olarak bina kontrollü bir hareket yapar ve hasarlar en alt seviyeye düşer. Sismik izolasyon, bir depremden sonra iş kaybını minimumda tutarken, insan hayatını da korur ve ekonomik kayıpları en aza indirir. Geleneksel

inşaatlarda deprem esnasında rölatif kat deplasmanları özellikle alt katlarda olmak üzere ve ivmeler üst katlarda olmak üzere yüksek değerler alabilmektedir. İvmeler üst katlarda artarak büyür ve zararlı titreşimler oluşur. Katlar arası yerdeğiştirmeler kalıcı olabilir. Deprem esnasında izolatörlü bir yapıda büyük yer değiştirmeler izolatör seviyesinde olup, katlar arası yer değiştirmeler ve kat ivmeleri çok düşüktür; bina, içinde yaşayanlar ve eşyalar güvenliktedir.

Günümüzde, deprem izolasyonu genellikle şiddetli depremlerde kısmen de olsa hasarın istenmediği, önem derecesi yüksek yapılarda uygulanmaktadır. Hastane, okul, acil yardım merkezleri, itfaiye, emniyet ve askeri birimlere ait binalar, haberleşme ve enerji dağıtım merkezleri gibi kuvvetli bir depremden sonra ayakta kalması zaruri yapılar ile nükleer enerji santralleri gibi yüksek güvenliklı yapılması gereken yapılar veya tarihi değeri yüksek olan müze ve benzeri yapılar bu sistemin en yaygın uygulandığı yapılardır.

Sismik izolasyon sistemlerinin kullanıldığı diğer yapı türlerinden birisi de yeterli sünekliliğe sahip olmayan gevrek yapılardır. Eklemeler yapılarak güçlendirmenin veya onarımın zor olduğu tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde sismik izolasyon uygulamaları büyük bir başarıyla uygulanmaktadır. Buna ek olarak, sismik yalıtım yaklaşımı deprem riski yüksek bölgelerdeki bulunan pek çok yapı tipine uygulanabilir. Kullanılması uygun olmayan durumlar aşağıda belirtilmiştir.

- İzolasyon sistemleri yapıların periyotlarını uzattığı için yumuşak zeminler üzerine inşaa edilmiş yapılar için zararlıdır. Yumuşak zeminlerde deprem izolatörleri konularak yapı periyodunun artırılması durumunda yapıya gelecek deprem yükü artacaktır.
- Ayrıca bitişik nizam yapılarda sismik izolasyon uygulaması uygun değildir.

1.6.3 Aktif, yarı aktif ve hibrit kontrol sistemleri

Aktif sistemlerinde, dinamik yüklerde ve yapının davranışı sensörler yardımıyla ölçülerek yapıya hareketinin tersi yönünde kontrol kuvvetleri uygulanmaktadır. Aktif kütleli sönümleyiciler, aktif hidrolik sönümleyicileri ve aktif halatlı sönümleyiciler aktif kontrol sistemlerine örnek olarak söylenebilir.

Yarı aktif kontrol sistemlerinin bünyesindeki yay ve sönüm elemanları yapıya gelen

dinamik kuvvetlere göre kendilerini adapte ederek titreşim enerjisini sönümlerler. Yarı aktif kontrol sistemleri, aktif kontrol sistemleri gibi büyük bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Aktif kontrol sistemlerine kıyasla çok daha stabildirler. Ayrıca yapı tepkisini azaltmada pasif kontrol sistemlerine kıyasla daha iyi performans sergilerler. Yarı aktif sistemlere örnek olarak değişken vana açıklıklı akışkan sönümleyiciler, sürtünmesi değişebilen sistemler, rijitliği değişen sistemler, akıllı ayarlı kütle sönümleyiciler, akıllı ayarlı sıvı sönümleyiciler ve akışkanlığı değişebilen sönümleyiciler örnek olarak verilebilir (Sonmez, 2009).

Hibrit kontrol sistemleri pasif ve aktif kontrol sistemlerinin karma olarak kullanıldığı sistemlerdir. Aktif kontrol sistemlerine göre çok daha güvenilirler fakat daha karmaşık sistemlerdir. Hibrit kontrol sistemlerine örnek olarak hibrit kütle sönümleyicileri verilebilir. Hibrit kütle sönümleyicilerinde ayarlı kütle sönümleyicileri ve aktif bir kontrol motoru birleştirilmiştir.

1.7 Yapıların Rastgele Titreşimler Altındaki Davranışı

Yapılara etkiyen rüzgar ve deprem gibi dinamik dış etkilerin doğası gereği deterministik olmadıkları bilinmektedir. Rastgele olan bu etkilerin yapıdaki çıktıları da deterministik değildir. Dolayısıyla mühendislik tasarımlarının rasgele etkiye cevabı yine rastgele olacaktır. Rastgele etkilerin nasıl olacağı ön görülemez. Örneğin depremin başlangıç noktası kesin olarak belirlenemez, sismik dalgaların tam olarak nasıl ve ne şekilde yayılacağı tam olarak anlaşılamaz. Yapıya gelen rüzgar yükü, rüzgârın hızı, havanın yoğunluğu, rüzgarın yönü, yapının geometrisi ve dinamik özellikleri gibi birçok parametreden etkilenen bir hadisedir (Kelly, 2012; Celep 2014). Rastgele titreşimlerin birçoğu düzensiz bir karaktere sahip olsalar da, istatistiksel olarak belli bir düzene sahip olabilirler.

Rastgele dinamik etkilere karşı sistemin cevabının da rastgele olması nedeniyle, yapıların analizinde bu rastgele dinamik etkiler tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır. Rastgele girdiler istatistiksel nicelikler ile çıktılar ise olasılıklara çevrilerek bazı yapısal davranışların karesel ortalama değerleri ile ifade edilebilir. Rastgele değişken, tanımlı bir değere sahip olmasa da olasılıklara göre ifade edilebilir. Deterministik olmayan titreşimleri daha iyi tahmin etmek amacıyla, rastgele değişkenlerin istatistiksel bir analizi olan aritmetik ortalaması, standart sapması ve olasılık dağılımları gibi matematiksel

fonksiyonlar geliştirilmiştir. Otokorelasyon fonksiyonlarını değerlendirmek amacıyla ortak olasılık dağılımını tanımlayan fonksiyonlar geliştirilmiştir. Sistemin transfer fonksiyonunu türetmek ve güç spektral yoğunluğunu belirlemek ve otokorelasyon fonksiyonu ile ilişkilendirmek için Fourier dönüşümleri yapılır (Kelly, 2012).

1.7.1 Rastgele değişkenli fonksiyonlar

Bir stasyonör işlemde veri gruplarının beklenen değerleri (genel ortalamaları) gibi istatistiksel özellikleri zaman içinde değişmez. Yani stasyonör işleyişte olasılık dağılımı zaman değişse de sabit kalır. Stasyonör olmayan işleyişlerde ise bazı veri toplulukların beklenen değerleri zamana bağlıdır (Clough ve Penzien, 1993).

$p(x(t))$ Olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere,

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x(t)) dx = 1 \quad (1.1)$$

şeklinde dir. $E[.]$ veya $\langle . \rangle$ ifadesi beklenen değeri (genel ortalama değerini) ifade etmek üzere herhangi bir $t = t_1$ anındaki rastgele süreç için, $x(t)$ tek bir rastgele değişkenin istatistiksel ifadeleri aşağıdaki gibi belirtilebilir,

$$E[x(t)] = \mu_{x(t)} = \bar{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) p(x(t)) dx \quad (\text{Aritmetik Ortalama}) \quad (1.2)$$

$$E[x(t)^2] = \overline{x^2}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2 p(x(t)) dx \quad (\text{Karesel Ortalama}) \quad (1.3)$$

$$E[(x(t) - \bar{x}(t))^2] = E[x(t)^2] - (E[x(t)])^2 = \sigma_{x(t)}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \bar{x}(t))^2 p(x(t)) dx = \overline{x^2}(t) - (\bar{x}(t))^2 \quad (\text{Varyans}) \quad (1.4)$$

İki veya daha fazla değişken ele alındığında, bunların müşterek davranışları ortak dağılım fonksiyonuyla açıklanabilir. $p(x(t), y(t))$ olasılık yoğunluk fonksiyonları için,

$$\sigma_{x(t)}^2 = E[(x(t) - \mu_{x(t)})^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \mu_{x(t)})^2 p(x(t)) dx \quad (1.5)$$

$$\sigma_{y(t)}^2 = E \left[(y(t) - \mu_{y(t)})^2 \right] = \int_{-\infty}^{\infty} (y(t) - \mu_{y(t)})^2 p(y(t)) dy \quad (1.6)$$

olmak üzere, standart sapma aşağıdaki gibi varyansın pozitif karekök değeridir.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (1.7)$$

$x(t)$ ve $y(t)$ 'nin kovaryansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

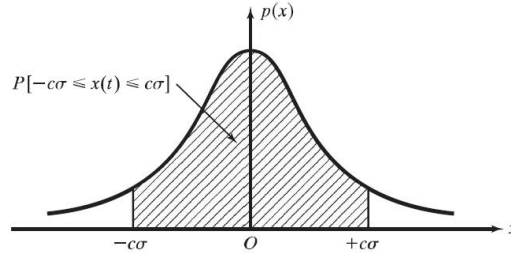
$$\sigma_{x(t)y(t)} = E[(x(t) - \mu_{x(t)})(y(t) - \mu_{y(t)})] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \mu_{x(t)})(y(t) - \mu_{y(t)}) p(x(t)y(t)) dx dy = E[x(t)y(t)] - \mu_{x(t)}\mu_{y(t)} \quad (1.8)$$

$-1 \leq \rho_{x(t)y(t)} \leq 1$ aralığındaki $x(t)$ ve $y(t)$ arasındaki korelasyon katsayısı normalize edilmiş kovaryans olarak belirtilir (Rao, 2011).

$$\rho_{x(t)y(t)} = \frac{\sigma_{x(t)y(t)}}{\sigma_{x(t)}\sigma_{y(t)}} \quad (1.9)$$

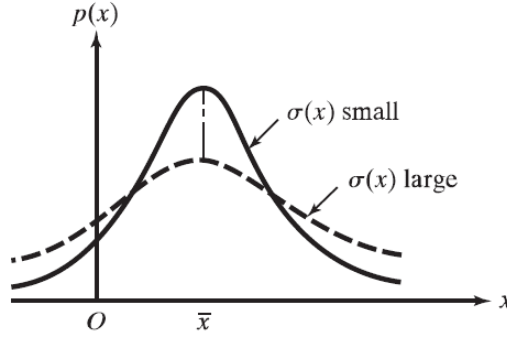
Fiziksel rastgele süreçlerin olasılık dağılımları daha çok normal dağılım (Gauss dağılımı) ile modellenmektedir. Şekil 1.1'de görülen Gauss dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$p(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{x(t)}} e^{-\frac{(x(t) - \bar{x}(t))^2}{2\sigma_{x(t)}^2}} \quad (1.10)$$



Şekil 1.1. Gauss dağılımı (Rao, 2011)

olarak formüle edilebilir. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi $\sigma_{x(t)}$ arttıkça olasılık dağılım fonksiyonu yayvanlaşır, azaldıkça tepe noktası sivrilir.



Şekil 1.2. Gauss dağılımının standart sapmaya göre değişimi (Rao, 2011)

1.7.2 Stasyonær rastgele işlem ve otokorelasyon fonksiyonu

Belirli bir t_i anı için $i=1,2,3,\dots, n$ ve $x_i=x(t_i)$ zamana baēlı olan rastgele deēişkenler birbirinden farklı olup, bu farklı zamanlardaki rastgele deēişkenlerin birbirleriyle olan istatistiksel baēlantısını ifade eden korelasyon fonksiyonu aēaēıdaki şekilde tanımlanabilir (Rao, 2011),

$$C(t_1, t_2, \dots, t_n) = E[x(t_1)x(t_2) \dots x(t_n)] \quad (1.11)$$

Eēer korelasyon fonksiyonu $C(t_1, t_2)$ şeklinde iki deēişkene baēlıysa otokorelasyon fonksiyonu $R(t_1, t_2)$ olarak isimlendirilir. Şöyle ki,

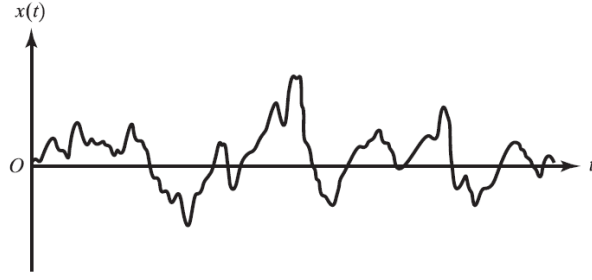
$$R(t_1, t_2) = E[x(t_1)x(t_2)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t)p(x_1(t), x_2(t)) dx_1 dx_2 \quad (1.12)$$

i. örnek fonksiyonda otokorelasyon fonksiyonu $x_i(t_1)$ ve $x_i(t_2)$ 'nin çarpımlarının ortalaması olarak hesaplanabilir. N adet ayırık verinin otokorelasyon fonksiyonu aēaēıdaki şekildedir.

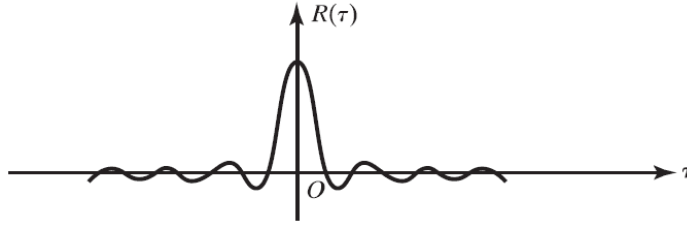
$$R(t_1, t_2) = E[x(t_1)x(t_2)] = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i(t_1) x_i(t_2) \quad (1.13)$$

$t_1 = t$ ve $t_2 = t + \tau$ için otokorelasyon fonksiyonu:

$$R(t_1, t_2) = R(t, t + \tau) = E[x(t)x(t + \tau)] = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i(t) x_i(t + \tau) \quad (1.14)$$



a



b

Şekil 1.3. Rastgele titreşim (a) ve onun otokorelasyon fonksiyonu (b) (Rao, 2011)

Stasyonier rastgele süreçte ortak yoğunluk fonksiyonu zamandan bağımsızdır ve sabittir. Bu sebeple stasyonier rastgele süreçte otokorelasyon fonksiyonu mutlak zamandan bağımsız olup, aşağıdaki gibi sadece zamanın değişimine bağlıdır.

$$R(t_1, t_2) = R(t, t + \tau) = E[x(t)x(t + \tau)] = R(\tau) \quad (1.15)$$

Stasyonier rastgele süreçte otokorelasyon fonksiyonunun özellikler şu şekilde sıralanabilir (Newland, 1975; Yang, 1986; Rao, 2011),

(1) $\tau = 0$ olursa,

$$R(0) = E[x^2] \quad (1.16)$$

şeklinde olur.

(2) $x(t)$ verisindeki ortalama değer sıfır ve veri oldukça düzensiz ise $\tau = 0$ değeri haricinde $R(\tau)$ değeri oldukça küçüktür.

(3) $x(t) \cong x(t + \tau)$ şeklinde ise, otokorelasyon $R(\tau)$ fonksiyonu da yaklaşık sabit bir değerde seyreder (Şekil 1.4).

(4) Eğer $x(t)$ stasyonier ise, ortalama ve standart sapma değerleri aşağıdaki gibi t değerinden bağımsız olacaktır.

$$E[x(t)] = E[x(t + \tau)] = \mu_{x(t)} \quad (1.17)$$

$$\sigma_{x(t)} = \sigma_{x(t+\tau)} = \sigma \quad (1.18)$$

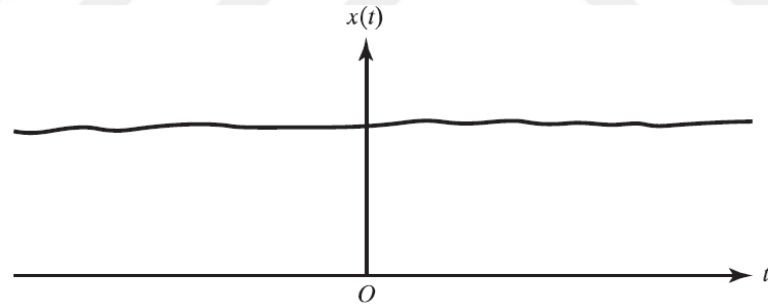
$$\rho_{x(t)x(t+\tau)} = \frac{R(\tau) - \mu_{x(t)}^2}{\sigma_{x(t)}^2} \quad (1.19)$$

Burada $R(\tau) = \rho_{x(t)x(t+\tau)}\sigma_{x(t)}^2 + \mu_{x(t)}^2$ şeklindedir. $|\rho_{x(t)x(t+\tau)}| \leq 1$ olduğunda, $R(\tau)$ denklemi aşağıdaki hale dönüşür.

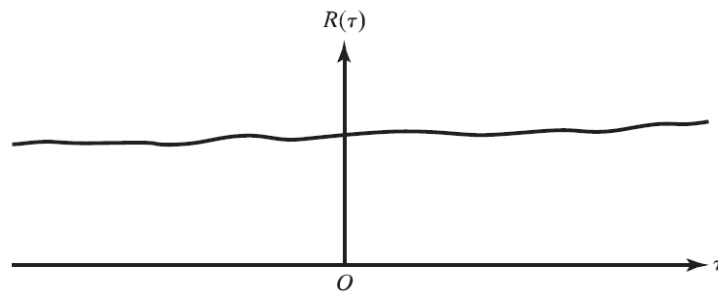
$$-\sigma_{x(t)}^2 + \mu_{x(t)}^2 \leq R(\tau) \leq \sigma_{x(t)}^2 + \mu_{x(t)}^2 \quad (1.20)$$

Bu durumda otokorelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilen karesel ortalamadan daha büyük olmayacaktır.

$$E[x(t)^2] = \sigma_{x(t)}^2 + \mu_{x(t)}^2 \quad (1.21)$$



a



b

Şekil 1.4. Sabit $x(t)$ (a) ve onun sabit otokorelasyon fonksiyonu $R(\tau)$ (b) (Rao, 2011)
(5) $R(\tau)$ mutlak zaman t ye değil, sadece zamanın değişimi τ 'ya bağlıysa, stasyonier olan

bu durum için,

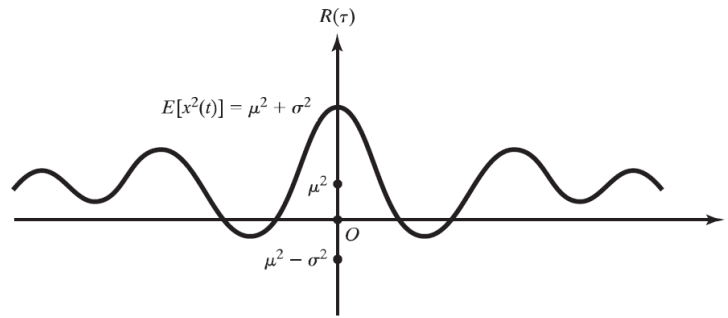
$$R(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] = E[x(t)x(t - \tau)] = R(-\tau) \quad (1.22)$$

şeklinde olacaktır. Bu sebeple $R(\tau)$, τ 'nın bir çift fonksiyonudur.

(6) τ çok büyük olduğunda ($\tau \rightarrow \infty$), $x(t)$ ve $x(t + \tau)$ arasında uyumlu bir ilişki olmayacaktır. Bu sebeple korelasyon $\rho_{x(t)x(t+\tau)} \rightarrow 0$ ve $R(\tau)$ denklemi aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

$$R(\tau \rightarrow \infty) \rightarrow \mu_{x(t)}^2 \quad (1.23)$$

Tipik bir otokorelasyonun grafiği Şekil 1.5'de görülmektedir.



Şekil 1.5. Tipik bir otokorelasyon fonksiyonu (Rao, 2011)

1.7.3 Ergodik işlem

Eğer bir rastgele proses stasyoner ise, ayrıca i. örneklemin ortalama değerleri, i. otokorelasyon fonksiyonu ve benzer şekilde hesaplanacak daha yüksek mertebeden ortalamalar bu işlemdeki her $x_i(t)$ zaman fonksiyonu için aynı ise, bu rastgele işlem ergodik olarak ifade edilir. Bu sebeple eğer işleyiş ergodik ise incelenen rastgele süreç için sadece bir tek örneklemini almak yeterli olacaktır. Ergodik proses için $x_i(t)$ örnek fonksiyonun T süresi boyunca zamana bağlı ortalaması şu şekildedir (Rao, 2011):

$$E[x] = \langle x(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) dt \quad (1.24)$$

$$E[x^2] = \langle x(t)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t)^2 dt \quad (1.25)$$

$$R(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t)x_i(t+\tau) dt \quad (1.26)$$

Burada $T \rightarrow \infty$ ifadesi T değerinin olabildiğince büyük bir değer almasını ifade eder. Belirli bir deprem için deprem kayıtlarının sınırlı olması sebebiyle işleyiş ergodik olarak varsayılarak bir tek kayıt ele alınarak rastgele işlem bununla temsil edilir.

1.7.4 Spektral Güç Yoğunluk Fonksiyonu

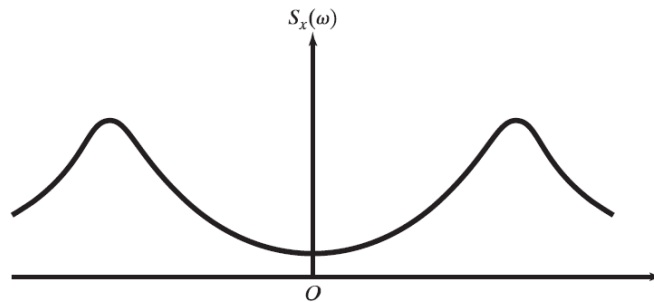
Denklem 1.27’de görüleceği gibi, stasyonier rastgele bir işleyişte spektral güç yoğunluk fonksiyonu $S(\omega)$, otokorelasyon fonksiyonunun 2π ’ye bölünmüş halinin Fourier dönüşümüdür (Rao, 2011).

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1.27)$$

Burada otokorelasyon fonksiyonu,

$$R(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t)x_i(t+\tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (1.28)$$

şeklinde ifade edilir. Ortalama değer sıfır ise yukarıdaki ifade aynı zamanda $x(t)$ ’nin varyansıdır. Eğer $x(t)$ deplasmanı ifade ederse $R(0)$ ifadesi ortalama enerjiyi ifade eder. Bu sebeple $S(\omega)$ ifadesi sistemdeki enerjinin spektral dağılımını ifade etmektedir. Otokorelasyon fonksiyonu bir çift fonksiyon olduğu için, Şekil 1.6’da bir örneği gösterilen spektral güç yoğunluk fonksiyonu da bir çift fonksiyondur.



Şekil 1.6. Tipik bir spektral güç yoğunluk fonksiyonu (Rao, 2011)

1.7.5 Rasgele yükler altındaki kayma çerçevesi modeli ve beklenen değer

Yerdeğiştirmeye bağlı olarak korole edilmiş ergodik proses olarak sıfır ortalamaya sahip, başlangıç deplasmanı ve başlangıç hızı sıfır olan stasyoner vektörel yükü altındaki; $\mathbf{M}_s$, $\mathbf{K}_s$, $\mathbf{C}_s$ kütle, rijitlik ve sönüm matrisine sahip çok serbestlik dereceli bir kayma çerçevesinde spektral güç yoğunluk fonksiyonun hesaplanması aşağıda açıklanmıştır (Clough ve Penzien, 1993; Soong ve Grigoriu, 1993; Sakar ve Manohar, 1997; Kelly, 2012). Kuvveti ifade eden $\mathbf{f}_s(t)$ altındaki çok serbestlik dereceli bir sistemde genel hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t) = \mathbf{f}_s(t) \quad (1.29)$$

Burada $\mathbf{x}_s(t)$ yerdeğiştirme, $\dot{\mathbf{x}}_s(t)$ hız ve $\ddot{\mathbf{x}}_s(t)$ ivme vektörlerini göstermektedir. $\mathbf{f}_s(t)$ vektörünün beklenen değeri (ortalama değeri) sıfırdır. Dış kuvvetin otokorelasyon fonksiyonu matrisi $\mathbf{R}_{FF}(\tau)$ ve spektral yoğunluk fonksiyonu ($N \times N$) boyutunda bir matris olmak üzere:

$$\mathbf{R}_{FF}(\tau) = \langle \mathbf{f}_s(t) \mathbf{f}_s^T(t) \rangle \quad (1.30)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (1.29)'a Fourier dönüşümü uygulanırsa,

$$(\mathbf{K}_s + i\omega \mathbf{C}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s) \mathbf{X}_s(\omega) = \mathbf{F}_s(\omega) \quad (1.31)$$

şeklinde olur. Burada,

$$\mathbf{A}_s = \mathbf{K}_s + i\omega \mathbf{C}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s \quad (1.32)$$

olarak ifade edilir. Denklemi (1.31) göz önüne alınarak, her iki tarafı $\mathbf{A}_s^{-1}$ ile soldan çarpılırsa ifade aşağıdaki gibi olur.

$$\mathbf{X}_s(\omega) = \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{F}_s(\omega) \quad (1.33)$$

Burada $\mathbf{A}_s^{-1}$ terimi,

$$\mathbf{A}_s^{-1} = (\mathbf{K}_s + i\omega\mathbf{C}_s - \omega^2\mathbf{M}_s)^{-1} \equiv \mathbf{H}_s(\omega) \quad (1.34)$$

olarak ifade edilebilir. $\mathbf{H}_s(\omega)$ $N \times N$ boyutunda bir matristir. $\mathbf{X}_s(\omega)$ ifadesi,

$$\mathbf{X}_s(\omega) = \mathbf{H}_s(\omega) \mathbf{F}_s(\omega) \quad (1.35)$$

şekilde yazılabilir. Spektral yoğunluk fonksiyonu matrisi $\mathbf{S}_{xx}$ aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{S}_{xx} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \langle \mathbf{X}_s(\omega) \mathbf{X}_s^{*T}(\omega) \rangle \quad (1.36)$$

(*) ifadesi belirtilen terimin karmaşık eşleniğini gösterir. Denklem (1.35) denklem (1.36)'da yazılırsa,

$$\mathbf{S}_{xx} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \langle \mathbf{H}_s(\omega) \mathbf{F}_s(\omega) \mathbf{F}_s^{*T}(\omega) \mathbf{H}_s^{*}(\omega) \rangle \quad (1.37)$$

şeklinde olur. $\mathbf{H}_s(\omega)$ ve $\mathbf{H}_s^{*}(\omega)$ ifadeleri sabit bir matris olduğu için dışarı alınıp denklem düzenlenirse,

$$\mathbf{S}_{xx} = \mathbf{H}_s(\omega) \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \langle \mathbf{F}_s(\omega) \mathbf{F}_s^{*T}(\omega) \rangle \mathbf{H}_s^{*}(\omega) \quad (1.38)$$

$$\mathbf{S}_{xx} = \mathbf{H}_s(\omega) \mathbf{S}_{FF} \mathbf{H}_s^{*}(\omega) \quad (1.39)$$

haline gelir. Benzer şekilde ivmenin spektral güç yoğunluk fonksiyonu,

$$\mathbf{S}_{\ddot{x}\ddot{x}} = \omega^4 \mathbf{S}_{xx} \quad (1.40)$$

olarak belirtilir. Bir yapıda i katın deplasmanının karesel ortalamalarının veya ivmenin karesel ortalamalarının tepkisinin (sıfır ortalama değerine sahip Gauss dağılımı için varyansı) beklenen değeri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_{xi}^2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}_{xx} d\omega \quad (1.41)$$

$$\sigma_{\ddot{x}i}^2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\ddot{x}\ddot{x}} d\omega \quad (1.42)$$

Burada S_{xx} terimi,

$$S_{xx} = \text{diag} [S_{xx}] \quad (1.43)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yer hareketi etkisindeki bir yapıda dış kuvvet,

$$\mathbf{f}_s(t) = -\mathbf{M}_s \mathbf{r} \quad (1.44)$$

şeklindedir. Buradaki etki vektörü $\mathbf{r}$, (1xN) boyutunda ve $\mathbf{r} = \mathbf{1} = \{1, 1, \dots, 1\}^T$ olarak tanımlanır. Yapı modeline etkiyen sıfır ortalamaya sahip stasyonier rastgele yer ivmesi $\ddot{u}_g$ olmak üzere, deprem kuvveti $\mathbf{f}_s(t)$ 'nin Fourier dönüşümü aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{F}_s(\omega) = -\mathbf{M}_s \mathbf{r} \ddot{U}_g \quad (1.45)$$

Söz konusu dış kuvvetin spektral yoğunluk fonksiyonu (beklenen değeri) ise,

$$S_{FF}(\omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \langle \mathbf{F}_s(\omega) \mathbf{F}_s^{*T}(\omega) \rangle \quad (1.46)$$

$$\mathbf{S}_{FF}(\omega) = \mathbf{M}_s \mathbf{r} \langle \ddot{U}_s(\omega) \ddot{U}_s^{*T}(\omega) \rangle \mathbf{r}^T \mathbf{M}_s \quad (1.47)$$

olarak yazılabilir. Burada dış kuvvetin ivmesinin spektral güç yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega) = \langle \ddot{X}_s(\omega) \ddot{X}_s^{*T}(\omega) \rangle \quad (1.48)$$

Yeni bir terim olarak, $S_{FF}(\omega)$, $\mathbf{S}_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega)$ 'ye göre ifade edilirse,

$$S_{FF}(\omega) = \mathbf{M}_s \mathbf{r} \mathbf{S}_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega) \mathbf{r}^T \mathbf{M}_s \quad (1.49)$$

şeklinde olur. Yapının tepkisinin spektral güç yoğunluk fonksiyonu,

$$\mathbf{S}_{xx} = \mathbf{H}_s(\omega) S_{FF} \mathbf{H}_s^{*T}(\omega) \quad (1.50)$$

$$\mathbf{S}_{xx} = \mathcal{H}_s(\omega) \mathbf{M}_s \mathbf{r} \mathbf{S}_{\ddot{x}\ddot{x}} \mathbf{r}^T \mathbf{M}_s \mathcal{H}_s^{*T}(\omega) \quad (1.51)$$

şeklinde ifade edilebilir.



BÖLÜM II

AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ

2.1 Giriş

Ayarlı Kütle Sönümleyicileri (TMD) kütle hareketlerinden faydalanan pasif sönümleyicilerdir. En basit TMD modeli yay, sönümleyici ve kütleden oluşur. Buradaki yay ve sönümleyici birbirine paralel olarak bağlıdır. TMD yapıyla ters fazda hareket ederek atalet kuvvetleri sayesinde enerjiyi sönümler. Ana yapıdan TMD'ye aktarılan güç akışı TMD'nin deplasmanının ana kütle ile olan faz farkının 90 derece olduğu durumda maksimumdur. Bu sebeple TMD'nin görel ivmesinin fazı ana kütle hızının fazıyla aynıdır. Bu güç akışı yapı sistemindeki toplam etkili sönüm miktarını artıran bir sönüm gücüne eşdeğerdir (Soong ve G.F. Dargush, 1997). TMD'lerin, güçlü deprem ve rüzgârın etkisinden kaynaklı zararı titreşimleri azaltmada etki oldukları bilinmektedir. Bundan dolayı bu sönümleyicilerin optimum şekilde tasarlanmaları önem arz etmektedir. Ayarlı kütle sönümleyicinin dünyada birçok uygulaması mevcuttur. 1975'de inşaa edilen John Hancock Tower, 1978'de yapılan Newyork'daki Citicorp Center binası, 1976'da yapılan Kanada Toronto'daki Canadian National Tower, 1988'de yapılan Japonya'daki Chiba Port Tower, yine Japonya'da 1990'da inşaa edilen Crystal Tower, 2004 yılında inşaa edilen 101 katlı Taipei gökdeleni, Katar Doha'daki 2007 yılında inşaa edilen Aspire Tower , Çin Shanghai'de 2008'de yapılan World Financial Center binası ve Japonya Tokyo'daki 2012'de inşaa edilen Tokyo Sky Tree gökdeleni TMD kullanılan yapılara örnek olarak verilebilir (Sato ve Adeli, 2013).

2.2 TMD Davranışının Genel Prensipleri

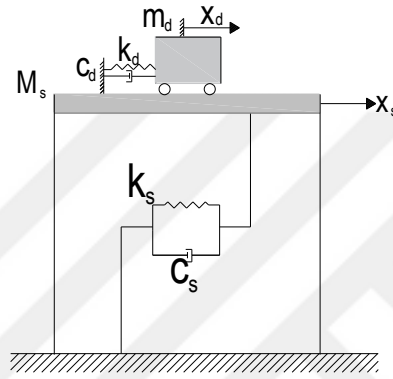
Şekil 2.1'de görülen TMD ile kontrol edilen tek serbestlik dereceli bir sistemde M_s , C_s ve K_s sırasıyla yapının kütlesi, sönümü ve rijitliği, $x_s(t)$ yapının deplasmanı, $f_s(t)$ ise yapıya gelen dış kuvvet, m_d , c_d , k_s sırasıyla TMD'nin kütlesi, sönümü ve rijitiği, $x_d(t)$, $\dot{x}_d$ ve $\ddot{x}_d$ sırasıyla TMD'nin yapıya göre deplasmanı, hızı ve ivmesi, $f_d(t)$ TMD'ye gelen dış kuvvet olmak üzere, yapı ve TMD'ye gelen kuvvetlerin toplamını gösteren denge denklemleri yazılırsa,

$$M_s \ddot{x}_s(t) + C_s \dot{x}_s(t) + K_s x_s(t) = c_d \dot{x}_d(t) + k_d x_d(t) + f_s(t) \quad (2.1)$$

$$m_d \ddot{x}_d(t) + c_d \dot{x}_d(t) + k_d x_d(t) = -m_d \ddot{x}_s(t) + f_d(t) \quad (2.2)$$

şeklinde olur. Yukardaki denklemler toplandığında oluşacak denklem aşağıdaki şekildedir.

$$(M_s + m_d) \ddot{x}_s(t) + C_s \dot{x}_s(t) + K_s x_s(t) = f_s(t) + f_d(t) - m_d \ddot{x}_d(t) \quad (2.3)$$



Şekil 2.1. TMD ile kontrol edilen tek serbestlik dereceli sistem

Eklenen TMD kütlesi yapının periyodunu çok az artırır, dış kuvveti ise $f_s(t)$ 'den $f_s(t) + f_d(t)$ 'ye çıkarır. Bu olumsuz etkiler son derece azdır. Fakat $-m_d \ddot{x}_d(t)$ kuvvet terimin sisteme eklenmesi sistemin davranışına son derece önemli katkı sağlayabilir (Soong ve G.F. Dargush, 1997).

Yukarıdaki denklemde $f_s(t)$ harmonik veya stasyonær rastgele girdi olarak ele alınırsa, denklem (2.3) enerji veya güç dengesi formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir (Soong ve G.F. Dargush, 1997).

$$(M_s + m_d) \langle \ddot{x}_s(t) \dot{x}_s(t) \rangle + C_s \langle \dot{x}_s^2(t) \rangle + K_s \langle x_s(t) \dot{x}_s(t) \rangle = \langle (f_s(t) + f_d(t)) \dot{x}_s \rangle - m_d \langle \ddot{x}_d(t) \dot{x}_s \rangle \quad (2.4)$$

Burada $\langle . \rangle$ rasgele girdinin beklenen değeridir. Sürekli davranış durumunda $x_s(t)$ düşünülürse, beklenen değerler $\langle \ddot{x}_s(t) \dot{x}_s(t) \rangle = x_s(t) \dot{x}_s(t) = 0$ 'dır. Dolayısıyla, denklem (2.4) basit bir güç denge denklemi olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_s \langle \dot{x}_s^2(t) \rangle = \langle (f_s(t) + f_d(t)) \dot{x}_s \rangle - m_d \langle \ddot{x}_d(t) \dot{x}_s \rangle \quad (2.5)$$

Burada $C_s \langle \dot{x}_s^2(t) \rangle$ ifadesi yapının sönümünden kaynaklı tüketilen gücü ve $\langle (f_s(t) + f_d(t)) \dot{x}_s \rangle$ ise daima pozitif olan dış kuvvetlerden kaynaklı sisteme giren gücü ifade eder. $m_d \langle \ddot{x}_d(t) \dot{x}_s \rangle$ ise yapıdan TMD ye aktarılan ve TMD kullanımında önemli bir rol oynayan güç akışını ifade eder. Bu TMD etkinliğinin uygun bir ölçümüdür. Maksimum güç akışı, ikinci kütlenin rölatif deplasmanının yapınınkinden 90 derece faz açısı olması durumunda oluşur. Bu durumda, ikincil kütlenin rölatif ivmesi yapı sisteminin hız davranışıyla aynı fazda ve güç akışı, yapı sistemindeki toplam etkili sönümü C_{eq} artıran bir sönüm gücüne eşdeğerdir. Toplam etkili sönüm aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Soong ve G.F. Dargush, 1997).

$$C_{eq} = C_s + m_d \frac{\langle \ddot{x}_d(t) \dot{x}_s(t) \rangle}{\langle \dot{x}_s^2(t) \rangle} \quad (2.6)$$

Dış etkinin gücünün TMD parametreleriyle değişmesi önemli bir bulgudur. Bununla birlikte güç akışı ile karşılaştırıldığında bu değişim küçüktür ve gerçekte giriş gücünün büyüklüğü TMD'nin etkinliği ile düşürülebilir.

2.2.1 Den Hartog'un çözümü

TMD'nin etkinliğini anlayabilmek açısından ilk olarak, yapının sönüm içermediği ($C_s = 0$), $f_s(t) = F_0 \sin(\omega t)$ ve $f_d(t) = 0$ gibi dış yük etkisi altında kaldığı düşünülerek Den Hartog (1956) tarafından bir yöntem geliştirilmiştir. Bu çözüme göre dışardan uygulanan kuvvetin maksimum değerinin yapının rijitliğine oranı olan statik deplasman $x_{st} = F_0/K_s$ olmak üzere Dinamik Büyütme Faktörü (DMF) şu şekildedir:

$$DMF = \frac{x_{max}}{x_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_d \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\zeta_d \alpha \beta)^2 (1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2}} \quad (2.7)$$

ω dış yük frekansı olmak bu denklemdeki ifadeler şu şekilde tanımlanır:

$$\mu = m_d/M_s \quad (\text{kütle oranı}) \quad (2.8)$$

$$\omega_d = \sqrt{k_d/m_d} \quad (\text{TMD'nin frekansı}) \quad (2.9)$$

$$\omega_s = \sqrt{K_s/M_s} \quad (\text{yapının doğal frekansı}) \quad (2.10)$$

$$\beta = \sqrt{\omega/\omega_s} \quad (\text{zorlanmış frekans oranı}) \quad (2.11)$$

$$\alpha = \omega_d/\omega_s \quad (\text{frekans oranı}) \quad (2.12)$$

$$\zeta_d = c_d/2m_d\omega_d \quad (\text{TMD sönüm oranı}) \quad (2.13)$$

TMD eklenmiş sistemdeki amaç yapının rezonans pik değerlerini uygun olan en olası şekilde aşağıya doğru indirmektir. Şekil 2.2'deki grafikte her bir ζ_d değeri bağımsız olarak aynı P ve Q noktalarından geçmektedir. Den Hartog (1956), optimum TMD'yi bulmak için her iki noktayı da aynı seviyeye getirecek optimum α_{opt} değerini aşağıdaki şekilde önermiştir.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (2.14)$$

TMD sönüm oranının ortalama optimum değeri,

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (2.15)$$

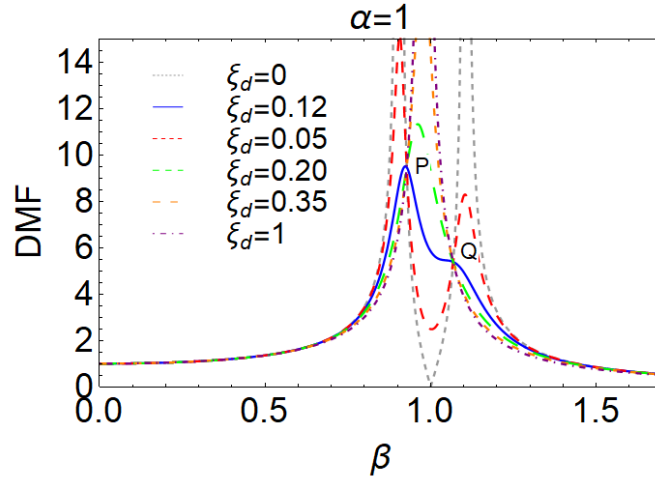
şekildedir. Sabit P ve Q değerleri için *DMF* değeri,

$$DMF_{opt} = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (2.16)$$

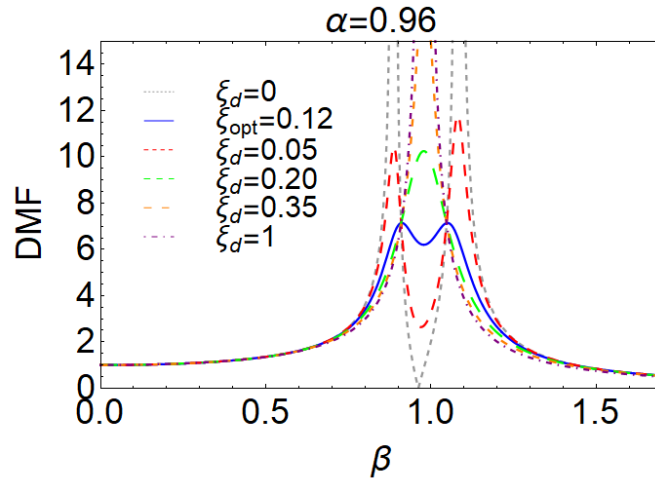
optimum olarak hesaplanır. Bu denklemden de anlaşılacağı üzere optimum olarak tasarlanmış TMD için kütle oranının artması *DMF* değerini aşağıya doğru indirecektir.

Örnek olarak, 100 N/m rijitliğe ve 20 kg kütleyle sahip tek serbestlik dereceli bir sistemde $\mu=0.04$ kütle oranına sahip TMD optimizasyonu neticesinde optimum frekans oranı $\alpha_{opt}=0.96$ ve optimum TMD sönüm oranı $\zeta_{opt}=0.12$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.2'de frekans oranı $\alpha = 1$ ve ζ_d 'nin çeşitli değerleri için dinamik büyütme faktörünün değerinin

zorlanmış frekans β 'ya göre değişimini göstermektedir. Sönümün olmadığı ana kütle TMD herhangi bir sönüme sahip değilse iki adet rezonans noktasında DMF sonsuza gitmektedir. Aynı şekilde $\zeta_d=1$ olması gibi büyük bir sönüm oranında TMD ve ana kütle birbiriyle yakın hareket ettiği için DMF çok büyük değer almaktadır. Şekil 2.3'de $\zeta_{opt}=0.12$ ve $\alpha_{opt}=0.96$ olduğu durumda DMF 'nin maksimum değeri 7.14'dür.



Şekil 2.2. Frekans oranı $\alpha = 1$ için ζ_d 'nin çeşitli değerlerinde DMF değerinin zorlanmış frekans oranına göre değişimi



Şekil 2.3. Optimum Frekans oranı $\alpha_{opt}=0.96$ için ζ_d 'nin çeşitli değerlerinde DMF değerinin zorlanmış frekans oranına göre değişimi

Ana yapının sönüm içerdiği durumlar için sabit bir P ve Q noktası mevcut olmayacaktır. Bu sebeple nümerik çözümlere ihtiyaç duyulacaktır. Ioi ve Ikeda (1978) ana yapının sönüm içerdiği durum için ampirik formüller geliştirmiştir. Bu formülasyona göre

$0.03 < \mu < 0.40$ arasında ve $0 < \zeta_s < 0.15$ arasında olduğunda hata oranı %1'in altında bulunmuştur. Söz konusu bu ampirik denklemler aşağıda verilmektedir.

$$\tilde{\alpha}_{opt} = \alpha_{opt} - (0.241 + 1.7\mu - 2.6\mu^2)\zeta_s - (1 - 1.9\mu + \mu^2)\zeta_s^2 \quad (2.17)$$

$$\tilde{\zeta}_{opt} = \zeta_{opt} + (0.13 + 0.12\mu + 0.4\mu^2)\zeta_s - (0.01 - 0.9\mu + 3\mu^2)\zeta_s^2 \quad (2.18)$$

Warburton (1982), yapıda düşük miktarda sönüm değerini dikkate alarak detaylı çalışmalar yapmıştır. TMD parametrelerini belirlemek amacıyla hem harmonik hem de rastgele yükler altında analizler yapmıştır. Örneğin temele gelen rastgele ivme etkisinde ve ana kütlede herhangi bir sönüm değerinin olmadığını varsayıp deplasmanın varyansını minimize ederek optimum TMD parametrelerini formüle etmiştir. Bu formülasyonlar,

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{1 - \mu/2} \quad (2.19)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \quad (2.20)$$

olarak verilmektedir. Soong ve Dargush (1997) kitabında anlatılan Warburton'nun (1982) yönteminde, harmonik etkiler altında optimum TMD parametrelerini bulmak amacıyla minimize edilecek olan DMF ifadesinin genlik değeri,

$$DMF_j = \sqrt{\frac{A_j^2 + B_j^2}{C^2 + D^2}} \quad (2.21)$$

olarak belirtilmektedir. Burada j tablo halinde sunduğu koşulları ifade eden bir tamsayıdır. C ve D ifadeleri ise aşağıdaki gibidir.

$$C = (\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2\beta^2\mu - 4\zeta_d\zeta_s\alpha\beta^2 \quad (2.22)$$

$$D = 2\zeta_d\alpha\beta(1 - \beta^2 - \beta^2\mu) + 2\zeta_s\beta(\alpha^2 - \beta^2) \quad (2.23)$$

Optimum TMD parametreleri bulunurken $\frac{\partial DMF_j}{\partial \alpha} = 0$ ifadesi ve $\frac{\partial DMF_j}{\partial \zeta_d} = 0$ eşitliğinden yararlanılabilir. Ancak α ve ζ_d ifadeleri için yukarıdaki denklemler genellikle doğrusal olmayacağından sayısal çözümlere ihtiyaç duyulacaktır.

2.3 TMD'nin Optimizasyon Kriterleri

Literatürde bazı optimizasyon kriterleri mevcuttur. Den Hartog (1956), Thompson (1981), Jacquot ve Hoppe (1973), Fujino ve Abe (1993) ana yapıdaki deplasmanı minimize etmişlerdir. Falcon vd. (1967) ana yapının dinamik rijitliğini maksimize etmiştir. Luft (1979) TMD yapı sistemindeki etkili sönümü maksimize etmiştir. Aynı zamanda deplasman kriterini kullanarak frekans ayarını içeren karma bir kriterden yararlanmış, TMD'nin ana yapıya göre olan hareketini minimize etmiştir. Warburton (1982) beyaz gürültü etkisini kullanarak ana kütlenin hem hızını hem de deplasmanını minimize etmiştir. Aynı zamanda ana kütlede yer alan kuvveti de minimize etmiştir. Ioi ve Ikeda (1978) ana yapının ivmesini minimize etmekle beraber, bazı ampirik formülasyonlar geliştirmişlerdir. Yukarıda belirtilen bütün bu optimizasyon kriterlerine ilaveten, katlar arası görel deplasman veya bunların toplam değeri de bir optimizasyon kriteri olarak ele alınabilir. Optimizasyon kriteri tasarım amacına göre belirlenir. Örneğin deplasman minimizasyonu yapıda güvenliği artırıp deformasyonları azaltacak, ivme minimizasyonu ise özellikle yapısal olmayan elamanların zarar görmesini engelleyecek, dinamik etkilerden kaynaklı bozulan yapı konforunu artıracak ve taban kesme kuvvetinin azaltılması konusunda katkı sağlayacaktır (Soong ve Dargush, 1997).

2.4 Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde Optimum TMD Tasarımında Klasik Çözüm

TMD'nin klasik tasarımında, çok serbestlik dereceli sistem öz değer-öz vektör problemi olarak ele alınıp, modal dönüşüm yapılarak tek serbestlik dereceli sisteme indirgenir ve çözümü yapılır. Bu sebeple tek bir modun kontrolüne odaklanılır. Klasik çözüm için izlenen yol aşağıdaki gibi özetlenebilir (Rana ve Soong, 1998),

1) Çok serbestlik dereceli ana sistemin öz değerlerinden bulunan frekanslar $\omega_{si} = \{\omega_{s1}, \omega_{s2}, \dots, \omega_{sp}\}$, ($i=1,2,\dots,p$) şeklindedir. TMD tasarımı daha çok 1. mod etkisini azaltmak üzerine yapılır.

2) Öz değerlere karşılık gelen öz vektörler hesaplanır. Bu öz vektörlerden 1. moda karşılık gelen öz vektörün normalize edilmiş hali $\phi_{n,1} = \{\phi_{n,11}, \phi_{n,12}, \dots, \phi_{n,1p} \dots, 1\}$ şeklindedir. Buradaki n indisi mod vektörünün normalize edildiğini göstermektedir. Normalize edilen kısım TMD'nin eklendiği kattır.

3) Normalize edilmiş mod vektörü ve kütle kullanılarak modal dönüşüm ile 1. moda ait modal kütle $\tilde{M}_1$ aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$\tilde{M}_1 = \phi_{n,1}^T M_s \phi_{n,1} \quad (2.24)$$

4) 1. moda ait modal kütle oranı μ_1 de aşağıdaki gibi hesaplanır

$$\mu_1 = \frac{m_d}{\tilde{M}_1} = \frac{m_d}{\phi_{n,1}^T M_s \phi_{n,1}} \quad (2.25)$$

5) Belirlenen modal kütle oranıyla sistemin tek serbestlik dereceli sisteme indirgenmesinin ardından α_{opt} ve ζ_{opt} değerleri Den Hartog (1956) veya Warburton (1982) tarafından önerilen formülasyonlarla hesaplanabilir.

Çok serbestlik dereceli sistemler için diğer bir yaklaşım da Sadek vd (1997) tarafından geliştirilmiştir. Formülasyonları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu\phi_{ij}} \left(1 - \zeta_s \sqrt{\frac{\mu\phi_{ij}}{1+\mu\phi_{ij}}}\right) \quad (2.26)$$

$$\zeta_{opt} = \phi_{ij} \left(\frac{\zeta_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right) \quad (2.27)$$

Burada ϕ_{ij} ifadesinde i kontrol edilecek titreşim modunu ve j ise TMD'nin yerleştirileceği katı göstermektedir. Herhangi bir normalizasyon söz konusu değildir. 1. moda ait modal kütle oranı,

$$\mu_1 = \frac{m_d}{\phi_1^T M_s \phi_1} \quad (2.28)$$

şeklinde hesaplanır. ϕ_1 1. moda ait mod vektörüdür ve normalize edilmiş değildir.

Bütün bu hesaplamalardan sonra 1. moda ait optimum TMD parametreleri olan TMD'nin frekansı ω_d , sönüm katsayısı c_d ve rijitlik katsayısı k_d aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\omega_d = \alpha_{opt} \omega_{s1} \quad (2.29)$$

$$k_d = m_d \alpha_{opt}^2 \omega_{s1}^2 \quad (2.30)$$

$$c_d = 2m_d \alpha_{opt} \omega_{s1} \zeta_{opt} \quad (2.31)$$

2.5 Optimum TMD Tasarımında Önerilen Çözüm Yöntemi

TMD'ler uygun bir şekilde tasarlandıkları takdirde deprem ve rüzgâr gibi titreşim etkilerini azaltmada son derece etkili araçlardır. Bu sebeple TMD'lerin uygun kullanımı için optimal şekilde tasarlanmaları gerekir. Bu tez çalışmasında, bu tip sönümleyicilerin deprem etkisine karşı optimum tasarımı için bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem uygulanırken zaman alanındaki hareket denklemi frekans alanına dönüştürülerek yönetici denklemler türetilmiştir. Yer hareketinin ivmesinin spektral güç yoğunluk (PSD) fonksiyonu sabit bant sınırlı beyaz gürültü olarak değerlendirilmiştir. Rastgele titreşimler teorisi kullanılarak en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması, en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması ve katlar arası rölatif deplasman oranlarının karesel ortalamalarının toplam değeri amaç fonksiyonu olarak seçilerek belirli kısıtlar altında minimize edilmişlerdir. Tasarım değişkeni olan sönümleyicinin kütle, rijitlik ve sönüm katsayısı için alt ve üst sınır değerleri kısıtlamalar olarak optimizasyon problemine dahil edilmiştir. Minimizasyon için stokastik bir optimizasyon yöntemi olan “Differential Evolution (DE)” yöntemi kullanılmıştır. Bütün TMD parametrelerinin bulunmasından sonra TMD-ana yapı sistemi altı farklı deprem ivme kaydı altında test edilerek kat pik deplasmanları, pik mutlak kat ivmeleri, katlar arası pik görelî deplasmanları (IDR), katların ortalama deplasmanlarının karekökü (RMSD) ve katların ortalama ivmelerinin karekökü (RMSA) ifadeleri belirlenerek literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bulanan sonuçlar her bir çalışmanın birbiriyle tutarlı olduğunu göstermekle beraber önerilen yöntemle yapılan TMD tasarımı yapıya gelen farklı deprem etkilerini azaltmada son derece başarılı olmuştur. Bu tez çalışmasında önerilen yöntemde TMD'nin rijitlik ve sönüm katsayısı ile beraber kütle parametresi de tasarım değişkeni

olarak alınmış ve optimize edilmiştir. Kütlenin tasarım değişkeni olarak alınması sonucunda yapının tepesindeki tek bir TMD'nin optimizasyonunda diğer tasarımlara benzer sonuçlar verdiği, genellikle kütlenin üst sınırına yakınsadığı gözlenmiştir. Kütlenin tasarım değişkeni olarak seçilmesi özellikle çoklu TMD tasarımında önem kazanmaktadır. Literatürdeki pek çok çalışma yapının 1. moduna odaklanırken bu tez çalışmasında geliştirilen yöntem ile daha geniş bir frekans bandında davranış dikkate alınmaktadır. Dahası bu çalışmada ana yapı çok serbestlik dereceli sistem olarak düşünülmekte ve modal bir dönüşüm ile tek serbestlik dereceli sisteme indirgenmemektedir.

2.5.1 Problemin formülasyonu

Yapıdaki doğal sönümün belirlenmesi hadisesi son derece karmaşık bir durumdur. Bununla beraber yapısal sönümün hesaplanması gerekir. Yaklaşık da olsa literatürde bazı yöntemler mevcuttur. Rayleigh orantılı sönüm hesabı yapıdaki doğal sönümü basit bir şekilde tayin etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelde yapının sönüm matrisi rijitlik ve kütle matrisiyle orantılı olduğu kabul edilir. Şekil 2.4'de en üst katına TMD eklenmiş kayma çerçevesi görülmektedir. $\ddot{x}_g$ stasyonere rastgele yer ivmesi, $x(t)$ TMD eklenmiş kayma çerçevesinde kat deplasman vektörü olmak üzere hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_{TMD}) \ddot{x}(t) + (\mathbf{C}_s + \mathbf{C}_{TMD}) \dot{x}(t) + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_{TMD}) x(t) = -(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_{TMD}) \mathbf{r} \ddot{x}_g(t) \quad (2.32)$$

Burada N katlı yapı için $\mathbf{r}$ etki vektörü $1 \times (N+1)$ boyutunda olup $\mathbf{r} = \{1, 1, 1, \dots\}_{1 \times (N+1)}^T$ şeklindedir. $\mathbf{M}_s$, $\mathbf{K}_s$, $\mathbf{C}_s$ matrisleri $(N+1) \times (N+1)$ boyutundaki yapının kütle, rijitlik ve sönüm matrisleridir. $\mathbf{C}_{TMD}$, $\mathbf{K}_{TMD}$, $\mathbf{M}_{TMD}$ matrisleri ise TMD'nin sönüm, rijitlik ve kütle matrisleri olup $(N+1) \times (N+1)$ boyutundadır. Söz konusu bu matrislerin açılımı aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dots & \\ & & \dots & & \\ & & & m_{(N-1)} & \\ & & & & m_N & 0 \\ 0 & \dots & & & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.33)$$

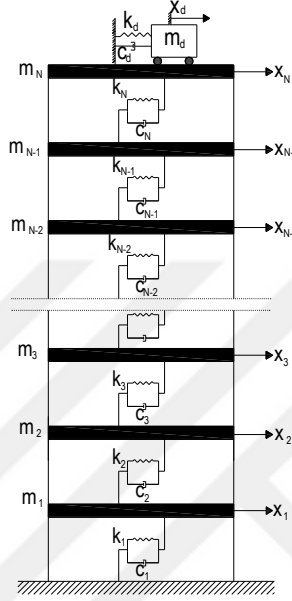
$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & \dots & \dots & & \dots \\ \dots & 0 & \dots & & -k_{(N-1)} & \\ & & \dots & -k_{(N-1)} & k_{(N-1)} + k_N & -k_N \\ & & & & -k_N & k_N & 0 \\ 0 & \dots & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & \dots & \dots & & \dots \\ \dots & 0 & \dots & & -c_{(N-1)} & \\ & & \dots & -c_{(N-1)} & c_{(N-1)} + c_N & -c_N \\ & & & & -c_N & c_N & 0 \\ 0 & \dots & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.35)$$

$$\mathbf{M}_{TMD} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & & 0 \\ \dots & 0 & & \dots \\ & & \dots & \\ & & & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & 0 & m_d \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.36)$$

$$\mathbf{K}_{TMD} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & & 0 \\ \dots & \dots & & \dots \\ & & & \\ & & k_{dN} & -k_{dN} \\ 0 & \dots & -k_{dN} & k_{dN} \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{C}_{TMD} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & c_{dN} & -c_{dN} \\ & & -c_{dN} & c_{dN} \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.38)$$



Şekil 2.4. TMD eklenmiş kayma çerçevesi

Denklem (2.32)'ye Fourier dönüşümü uygulanırsa bu denklem,

$$(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{X}(\omega) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{X}_g(\omega) \quad (2.39)$$

haline gelir. Burada $\mathbf{K}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{M}$ TMD ile kontrol edilen yapı sistemindeki $(N+1) \times (N+1)$ boyutundaki rijitik, sönüm ve kütle matrisleridir. $i = \sqrt{-1}$ imajiner birimdir. $\ddot{X}_g(\omega)$ sıfır ortalamaya sahip stasyoneryer ivmesidir. $\mathbf{X}(\omega) = \{X_1(\omega), X_2(\omega) \dots \dots X_N(\omega), X_{N+1}(\omega)\}^T$ ifadesi sistemin frekans alanındaki deplasman vektörüdür. Denklem (2.39) aşağıdaki şekilde kısaltılabilir.

$$\mathbf{A}\mathbf{X}(\omega) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{X}_g(\omega) \quad (2.40)$$

Burada $\mathbf{A}$ matrisi,

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}) \quad (2.41)$$

olarak ifade edilebilir. Deplasmanın Fourier dönüşümü olan $\mathbf{X}(\omega)$ denklem (2.40)'dan çekilirse,

$$\mathbf{X}(\omega) = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{X}_g(\omega) \quad (2.42)$$

şeklinde olur. $\mathbf{X}(\omega)$, $\mathbf{H}_D(\omega)$ deplasmanın transfer fonksiyonuna göre aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}_D(\omega)\ddot{X}_g(\omega) \quad (2.43)$$

$\mathbf{H}_D(\omega)$ ise aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$\mathbf{H}_D(\omega) = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (2.44)$$

Zaman tanım alanında katlar arası rölatif deplasman $\Delta_1 = x_1, \Delta_2 = x_2 - x_1, \dots, \Delta_N = x_N - x_{N-1}$ olarak hesaplanabilir. Katlar arası rölatif deplasman vektörünün Fourier Dönüşümü,

$$\boldsymbol{\delta}(\omega) = -\mathbf{T}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{X}_g(\omega) \quad (2.45)$$

olarak bulunur. Burada $\mathbf{T}$ rölatif deplasman dönüşüm matrisidir. Bu matris

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (2.46)$$

şeklinde ifade edilebilir. Frekans alanında katlar arası rölatif deplasman ifadesi $\boldsymbol{\delta}(\omega)$ ve onun transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\delta(\omega) = \mathbf{H}_\delta(\omega)\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (2.47)$$

Buradaki transfer fonksiyonu $\mathbf{H}_\delta(\omega)$ ifadesi,

$$\mathbf{H}_\delta(\omega) = -\mathbf{T}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (2.48)$$

şeklinde belirtilebilir. Yukarıdaki denklemlere benzer olarak, mutlak ivmenin Fourier Dönüşümü,

$$\ddot{\mathbf{X}}_{AA}(\omega) = \mathbf{H}_{AA}(\omega)\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (2.49)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde mutlak ivmenin transfer fonksiyonu $\mathbf{H}_{AA}(\omega)$ 'nın formülü aşağıda verilmektedir.

$$\mathbf{H}_{AA}(\omega) = (\mathbf{1} + \omega^2\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}) \quad (2.50)$$

$S_g(\omega)$ ifadesi, stasyonier rastgele girdi $\ddot{x}_g(t)$ 'nin istatistiksel ifadesi olan spektral güç yoğunluk fonksiyonu (PSD) olmak üzere, rastgele titreşim teorisine göre, i. katın deplasmanının karesel ortalaması σ_{Di}^2 , i. kat rölatif deplasmanının karesel ortalaması $\sigma_{\delta i}^2$ ve i. kat mutlak ivmesinin karesel ortalaması σ_{AAi}^2 aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma_{Di}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{Di}(\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} H_{Di} H_{Di}^* S_g(\omega) d\omega \quad (2.51)$$

$$\sigma_{\delta i}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{\delta i}(\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} H_{\delta i} H_{\delta i}^* S_g(\omega) d\omega \quad (2.52)$$

$$\sigma_{AAi}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{AAi}(\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} H_{AAi} H_{AAi}^* S_g(\omega) d\omega \quad (2.53)$$

Burada $|H_{Di}(\omega)|$, $|H_{\delta i}(\omega)|$ ve $|H_{AAi}(\omega)|$ sırasıyla i. katın deplasman, katlar arası rölatif deplasman ve mutlak ivmelerinin transfer fonksiyonu genliklerini gösterir. (*) ifadesi kompleks eşleniği göstermektedir. Takewaki (2009) yukarıda belirtilen formülasyonları optimum viskoz sönümleyici optimizasyonu ile ilgili çalışmalarında kullanmıştır.

2.5.2 Optimizasyon problemi ve yöntem

Lineer olmayan kısıtlı optimizasyonda nümerik algoritmalar gradyan tabanlı ve direk arama yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir. Gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleri duyarlılık hesaplarına ihtiyaç duyarlar. Amaç ve kısıtlama fonksiyonlarındaki süreksizlikler türev almada zorluklarını beraberinde getirir. Bazen optimum çözüm lokal optimumda takılabilir. Bu sebeple başlangıç değerleri önemli olabilir. Gradyan tabanlı yöntemlere örnek olarak “Sequential Quadratic Programming, (SQP)”, “Augmented Lagrangian Method” ve “Nonliner Interior Point Method” verilebilir. Optimizasyon probleminde birden çok amaç fonksiyonu ve birden çok kısıt varsa gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleriyle yapılan çözümde birtakım zorluklar görülebilmektedir. Bu sebeple karmaşık optimizasyon problemlerinde gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinden ziyade, direk arama optimizasyon yöntemlerinin kullanımı daha uygun olacaktır (Champion ve Strzebonski, 2008). Son yıllardaki bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle sayısal optimizasyon yöntemleri daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlere örnek olarak “Nelder-Mead”, “Genetic Algorithm”, “Differential Evalution” ve “Simulated Annealing” verilebilir. Direk arama yöntemleri sonuca daha yavaş yakınsarlar, bununla birlikte fonksiyon ve kısıtlardaki mevcut gürültülere daha toleranslıdır (Champaign ve Strzebonski, 2008).

Global optimizasyon teknikleri deterministik ve stokastik olarak da ikiye ayrılabilir (Nemhauser vd., 1989). Örneğin tünel algoritması gradyan tabanlı deterministik optimizasyon yöntemlerinden birisidir (Levy ve Montalvo, 1985). Diğer taraftan popülasyon tabanlı optimizasyon tekniği olan genetik algoritma stokastik global optimizasyon tekniklerinden birisidir (Goldberg, 1989). Gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinden birisi olan tünel algoritması çoğunlukla lokal arama yapan bir matematiksel yöntemdir. Bu sebeple optimum çözüme yaklaşmak amacıyla amaç fonksiyonu kısıt koşullarını sağlamak için daima azaltılır. Stokastik arama yöntemlerinden olan “Simulated Annealing” yöntemi birçok noktadan başlangıç yapar. İterasyon serisi her bir başlangıç noktası için güncel noktadan rastgele yöne doğru hareketiyle meydana getirilir. Hareketin sonucu neticesinde daha iyi bir noktaya ulaşılmışsa bu nokta için onay verilir. Değilse nokta belirli bir olasılıkla onaylanır. En iyi nokta sonuç olarak seçilir. Bu yöntem ayrık optimizasyon problemleri için de kullanılmaktadır. Son dönemlerde genetik algoritma, “particle swarm optimization”

(Kennedy ve Eberhart, 2001), “differential evolution” gibi popölasyon tabanlı evrimsel algoritmalar (Storn ve Price, 1997) ve “ant colony optimization” (Dorigo ve Stutzle, 2003) gibi global optimizasyon yöntemleri gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerine kıyasla problemin çözümünde daha geniş alanda kullanılmaya başlanmıştır (Fourie ve Groenwold, 2002; Schutte ve Groenwold, 2003; Venter ve Sobieski, 2004; Luh ve Lin, Serra ve Venini, 2006; 2008; Abachizadeh ve Tahani, 2009).

Evrimsel algoritmalar genellikle yaşama ve yaşam tecrübesi analogisine dayalı optimizasyon tekniklerinin iskeleti olan meta-sezgisellikler (Meta-Heuristics) algoritmalar olarak isimlendirilirler (Yang vd., 2016). Örneğin genetik algoritma Darwin’in evrim teorisine, Kennedy ve Eberhart (2001) tarafından geliştirilen “particle swarm optimization” temel düşüncesi insan, kuş, balık vs. topluluklarının sosyal davranışına dayandırılır. Ayrıca “ant colony optimization” tekniği ise kanıtlarını karıncaların davranışlarından alan bir optimizasyon tekniğidir. Evrimsel algoritmaların çoğu çözümlerinde rastgele elemanlar içerirler, bu sebeple bu tür yöntemlere stokastik optimizasyon yöntemleri denir. Evrimsel algoritmalar kullanıcı tarafından algoritma içerisinde önceden tanımlanmış birtakım parametreler içerirler. Örneğin genetik algortmada mutasyon oranı ve genetik değişim oranı gibi parametreler önceden tanımlanmalıdır. “Ant Colony Optimization” yönteminde ise durumları güncellemek için önceden tanımlamak zorunda olan üç tane parametre mevcuttur.

Yukarıda bahsedilen bu stokastik optimizasyon teknikleri son yıllarda pek çok pratik uygulama alanında kullanılmaya başlanmıştır. Ayarlı kütle sönümleyicilerinin tasarımında optimizasyona ihtiyaç duyulması kaçınılmazdır. Özellikle ayarlı kütle sönümleyicilerinin birden fazla olması, bu durumu daha da mecbur kılar. Bu sebepten dolayı stokastik yöntemlerden biri olan genetik algoritma tabanlı “Differential Evolution” algoritması tekli ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin optimizasyonunda kullanılabilir.

Mühendislik tasarımlarında optimum çözümler bulmak için farklı tasarım amaçları olabilir. Bazen yapının ağırlığı, deplasmanı, ivmesi ve enerji gibi parametreleri minimize edilirken, bazen de burkulma kuvveti gibi parametreleri de maksimize edilebilir. Mühendisin tasarım amacına göre bu değişebilir. Pasif yapısal kontrol sistemlerinin tasarımında yapının tepe deplasmanı ve ivmesi genellikle minimum yapılmak istenir. Ayrıca katlar arası göreceli deplasmanlar da önemli davranış parametrelerinden bir

tanesisidir. Bu düşünceler altında bu parametrelere bağlı amaç fonksiyonları TMD optimizasyonu için düşünülebilir. Bu çalışmada en üst katın ivmesinin karesel ortalaması, en üst katın deplasmanın karesel ortalaması ve katlar arası rölatif deplasmanların karesel ortalamalarının toplamı üç ayrı amaç fonksiyonu olarak seçilmiş ve minimize edilmiştir. Belirtilen amaç fonksiyonlarının tasarım parametrelerine bağlı kapalı formu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f_1(m_d, c_d, k_d) = \sigma_{AAN}^2 \quad (2.54)$$

$$f_2(m_d, c_d, k_d) = \sigma_{DN}^2 \quad (2.55)$$

$$f_3(m_d, c_d, k_d) = \sum_{i=1}^N \sigma_{\delta i}^2 \quad (2.56)$$

Yukarıdaki denklemlerde σ_{AAN}^2 ve σ_{DN}^2 en üst katın mutlak ivmelerinin ve deplasmanlarının karesel ortalamasını, $\sum_{i=1}^N \sigma_{\delta i}^2$ ifadesi ise katların rölatif deplasmanlarının karesel ortalamasının toplam değerini ifade eder. Söz konusu tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırları pasif kısıt olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$0 \leq m_d \leq \bar{m}_d \quad (2.57)$$

$$0 \leq c_d \leq \bar{c}_d \quad (2.58)$$

$$0 \leq k_d \leq \bar{k}_d \quad (2.59)$$

Burada $\bar{m}_d$, $\bar{c}_d$, $\bar{k}_d$ ifadeleri TMD'nin kütle, sönüm ve rijitlik katsayılarının üst sınırıdır. Literatürde TMD tasarımı yapılırken, genellikle kütle sabit seçilerek sönüm ve rijitlik katsayıları optimize edilir. Bu çalışmada bundan farklı olarak kütle parametresi de optimize edilerek TMD kütlelerinin optimum değeri de rijitlik ve sönüm katsayılarıyla beraber hesaplanmıştır.

2.6 TMD Optimizasyonu İçin “Differential Evolution (DE)” Algoritması

Stokastik bir optimizasyon yöntemi olan DE algoritması Storn ve Price (1997) tarafından geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan güçlü bir algoritmadır. Şekil 2.5’de DE

algoritmasının akış diyagramı görülmektedir. Bu akış diyagramı göz önüne alınarak DE algoritması aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Peñuñuri vd., 2011; Wu vd., 2018; Biswar vd., 2019).

1) Başlangıç (Popülasyon matrisinin belirlenmesi)

Jenerasyon numarası g olmak üzere, bu jenerasyondaki i . amaç vektörü $\vec{X}_i^g$,

$$\vec{X}_i^g = \{x_{1,i}^g, x_{2,i}^g, \dots, x_{D,i}^g\}, \quad i=1, \dots, NP \quad (2.60)$$

şeklinde verilebilir. Bu çalışmada, problemin boyutu olan D üçtür. Bilinmeyenlerin olduğu vektörün elemanları $x_{1,i}^g = m_{d,i}^g$, $x_{2,i}^g = c_{d,i}^g$ and $x_{3,i}^g = k_{d,i}^g$ şeklinde tasarım parametrelerine bağlıdır. NP popülasyon sayısı koşullara göre belirlenmek üzere genellikle $2D-40D$ arasında seçilir (Ronkkonen vd., 2005). Şekil 2.5'deki akış diyagramında da görüldüğü gibi klasik DE yönteminde: 1) Başlangıç popülasyon matrisi alt ve üst sınır koşulları altında tanımlanır. 2) Donör vektörü mutasyon esnasında tanımlanır. 3) Test vektörü, amaç vektörü veya çaprazlama yapılan donör vektöründen meydana getirilir. 4) Bu iki vektör kıyaslanarak düşük değerli olanı yeni jenerasyon için seçilir. Belirtilen bu ifadeler aşağıdaki gibi detaylandırılabilir.

Başlangıç popülasyon matrisi belirlenirken jenerasyon $g=0$ 'dır. Başlangıç için i . vektörün j . bileşeni aşağıdaki şekildedir.

$$x_{ij}^0 = x_{j,Low} + rand_{i,j}(0,1) \cdot (x_{j,Up} - x_{j,Low}) \quad (2.61)$$

Burada $rand_{i,j}(0,1)$ ifadesi anlık olarak i ve j için $(0-1)$ arasında üniform dağılımlı rastgele bir reel sayıyı, $i=1, 2, 3, \dots, NP$ ve $j=1, 2, 3, \dots, D$ şeklindedir. $x_{j,Low}$ ifadesi j . bileşenin en alt limiti ve $x_{j,up}$ ise j . bileşenin en üst sınırını ifade etmektedir.

2) Mutasyonla donör vektörünün belirlenmesi:

R_1^i, R_2^i ve $R_3^i \in [1, NP]$ olmak üzere başlangıçta her bir hedef vektörü $\vec{X}_i^g$ için rastgele olarak $\vec{X}_{R_1^i}^g, \vec{X}_{R_2^i}^g$ ve $\vec{X}_{R_3^i}^g$ vektörleri seçilerek mutasyon neticesinde oluşan donör vektörü $\vec{V}_i^g$ aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{V}_i^g = \vec{X}_{R_1^i}^g + F \cdot (\vec{X}_{R_2^i}^g - \vec{X}_{R_3^i}^g) \quad (2.62)$$

Buradaki F ölçek faktörü olup genelde (0,1) arasında seçilir.

3) Çaprazlama (yeniden kombinasyon)

Hedef vektörü ve mutasyon sonucu oluşan donör vektöründen çaprazlama (yeniden kombinasyon) neticesinde sına vektörü $\vec{U}_i^g = \{u_{1,i}^g + u_{2,i}^g + \dots + u_{D-1,i}^g + u_{D,i}^g\}$ 'nin belirlenmesi aşağıdaki şekildedir.

$$u_{j,i}^g = \begin{cases} v_{j,i}^g, & \text{eğer } rand_{i,j}(0,1) \leq C_r \text{ veya } j = j_{rand} \\ x_{j,i}^g, & \text{diğer koşullarda} \end{cases} \quad (2.63)$$

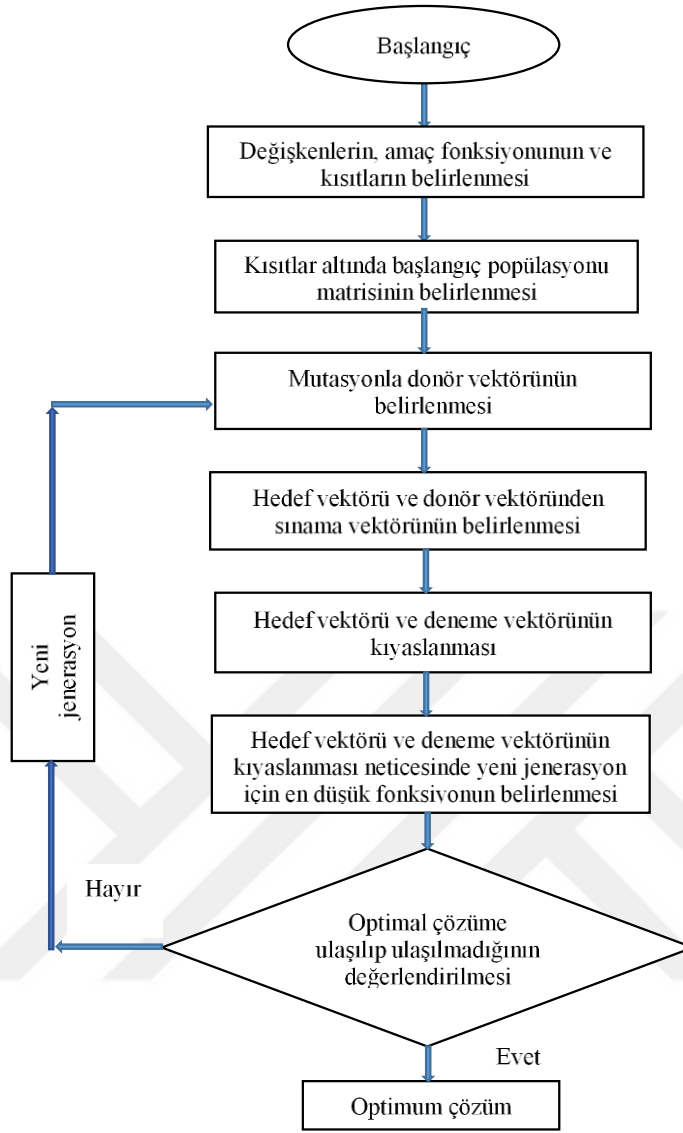
Burada C_r çaprazlama oranı $[0,1]$ arasında olan bir reel sayıdır. j_{rand} $[1-D]$ arasında rastgele bir tamsayıdır.

4) Seçim

Hedef vektörü $\vec{X}_i^g$ ve deneme vektörünün $\vec{U}_i^g$ kıyaslanması neticesinde yeni jenerasyon için en düşük fonksiyonun belirlenmesi amacıyla seçim yapılır. Bu vektörlerden üstün olanı ayakta kalarak gelecek nesle aktarılacaktır. Bir sonraki nesle aktarılacak hedef vektörü aşağıdaki şekildedir.

$$\vec{X}_i^{g+1} = \begin{cases} \vec{U}_i^g, & \text{eğer } f(\vec{U}_i^g) \leq f(\vec{X}_i^g) \\ \vec{X}_i^g, & \text{eğer } f(\vec{U}_i^g) > f(\vec{X}_i^g) \end{cases} \quad (2.64)$$

Eğer optimum çözüme ulaşırsa işlem sonlandırılır. Optimum sonuca ulaşılmazsa yeni nesli oluşturmak için mutasyon adımına geri dönülerek jenerasyon sayısı 1 artırılır.



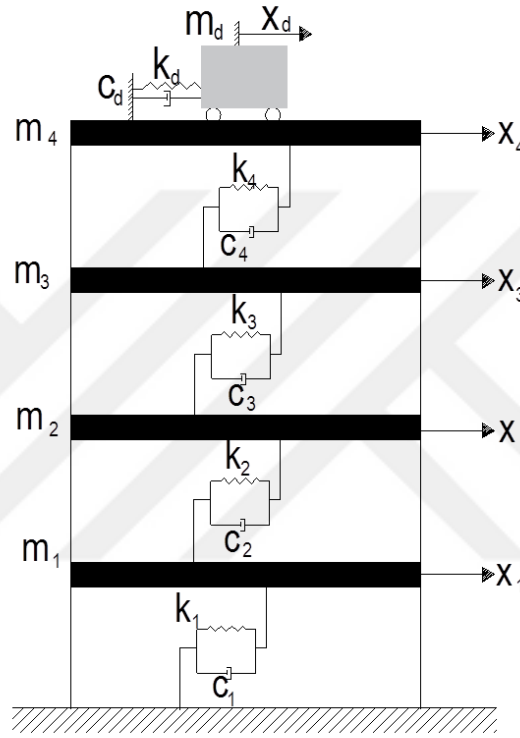
Şekil 2.5. Klasik DE algoritması

2.7 Sayısal Örnekler

2.7.1 Örnek 1: 4 katlı düzenli kayma çerçevesi modeli için TMD tasarımı

Bu örnekte, Şekil 2.6’da görülen dört katlı düzenli bir kayma çerçevesinde en üst kata yerleştirilen TMD’nin optimum tasarımı araştırılmıştır. Optimum olarak tasarlanan TMD için, yapı-TMD sistemi Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de belirtilen altı farklı yakın fay ve üç farklı uzak fay deprem kaydı altında test edilmiştir. Kullanılan yakın fay depremlerinin Arias yoğunluğu ve bu depremlerin frekans genişlikleri Çizelge 2.3’de gösterilmiştir (Moustafa ve Takewaki, 2010). Arias yoğunluğu yer hareketinin yıkıcılık etkisini ve yer hareketinin zamana bağlı ivmesinin karesel ortalamasını gösteren bir parametredir

(Gómez-Bernal vd., 2012). Optimum TMD parametrelerini bulmak amacıyla daha önceden bahsi geçen amaç fonksiyonları; en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması, en üst katının deplasmanlarının karesel ortalaması ve katların göreceli deplasmanlarının karesel ortalamalarının toplamı DE optimizasyon algoritması kullanılarak her biri ayrı olarak minimize edilmiş, TMD'nin kütle, rijitlik ve sönüm katsayısının optimum değerleri bulunmuştur.



Şekil 2.6. TMD eklenmiş 4 katlı kayma çerçevesi modeli

Çizelge 2.1. Yakın fay depremleri ve özellikleri

Deprem	Bileşen	Tarih	Uzaklık (km)	Büyüklik (M_w)	İstasyon	PGA (g)
Cape Mendocino	NS	25/04/1992	7.80	7.2	89156 Petrolia	0.662
El Centro	NS	19/05/1945	16.90	6.9	117 El Centro Array #9	0.313
Düzce	NS	12/11/1999	6.58	7.2	Düzce	0.535
Kobe	NS	16/01/1995	18.27	6.9	KJMA	0.821
Kocaeli	EW	17/08/1999	3.10	7.6	Sakarya	0.376
Loma Prieta	NS	18/10/1989	7.00	6.9	16 LGPC	0.563

Çizelge 2.2. Uzak fay depremleri ve özellikleri

Deprem	Bileşen	Tarih	Uzaklık (km)	Büyüklik (M_w)	İstasyon	PGA (g)
Northridge	N005	17/01/1994	35.30	6.7	Los Angeles – Univ. Hospital Grounds	0.490
Fukushima	NS	11/04/2011	94.10	6.6	IBR013	0.547
Kern County	N21E	21/07/1952	38.89	7.4	Taft Lincoln School	0.159

Çizelge 2.3. Kullanılan depremlerin yakın bölge ivme kayıtları için farklı frekans aralıklarındaki Arias yoğunluğunun % oranları (Moustafa ve Takewaki, 2010)

Deprem Kayıtları	Toplam deprem yoğunluğu göre %				
	(0-1) Hz	(1-2) Hz	(2-3) Hz	(3-4) Hz	(4-5) Hz
Cape Mendocino (Petrolia NS)	86.75	8.30	1.98	1.03	0.60
El Centro (NS)	82.03	13.27	2.70	1.22	0.49
Düzce (Bolu Station NS)	72.65	16.72	5.83	2.01	0.95
Kobe (NS)	91.43	6.02	1.40	0.58	0.21
Kocaeli (Sakarya EW)	85.46	7.23	3.61	1.50	0.89
Loma Prieta (LGP 000)	65.57	8.56	6.13	3.01	2.61
Ortalama değer	80,65	10,02	3,61	1,56	0,96

Beyaz gürültü şeklindeki spektral güç yoğunluk fonksiyonu depremin frekans içeriğine göre belirlenen bir parametredir. Bu çalışmada sismik girdinin spektral güç yoğunluk fonksiyonu (PSD) bant sınırlı beyaz gürültü olarak modellenerek $-30 \text{ rad/s} \leq \omega \leq -0.2 \text{ rad/s}$ ve $0.2 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 30 \text{ rad/s}$ aralıklarında $S_g(\omega) = 0.015 \text{ m}^2/\text{s}^3$ olarak sabit bir değer alınmış, bu aralığın dışında sıfır olarak kabul edilmiştir. Kontrol edilmeyen kayma çerçevesindeki 1.mod ve 2.mod sönüm oranları $\xi_1 = \xi_2 = 0,02$ olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada ele alınan dört katlı kayma çerçevesi için her bir katın rijitliği $k_i = 2.5 \times 10^7 \text{ N/m}$ ($i=1, 2, 3, 4$) ve her bir katın kütlesi $m_i = 12 \times 10^4 \text{ kg}$ ($i=1, 2, 3, 4$) olarak seçilmiştir. Bu değerlere göre kontrol edilmeyen yapıda her bir mod için yapının doğal dairesel frekansları $\omega_{si} = \{5.01, 14.43, 22.11, 27.13\} \text{ rad/s}$ olarak hesaplanmıştır.

TMD'nin sönüm, rijitlik ve kütle parametrelerinin alt sınırları sıfır olmakla beraber üst sınırları sırasıyla $\bar{c}_d = 7.5 \times 10^4 \text{ Ns/m}$, $\bar{k}_d = 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}$, $\bar{m}_d = 2.88 \times 10^4 \text{ kg}$ (toplam yapı kütesinin % 6'sı kadar) olarak seçilmiştir. Konstrüktif kısıtlar sebebiyle TMD'lerin kütle oranları birçok uygulamada genellikle % 5 ve altında tercih edilirler (Connor and Klink, 1996). Bu koşullar altında σ_{A44}^2 (en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması), σ_{D4}^2 (En üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması), $\sum_1^N \sigma_{\delta i}^2$ (katların

görelî deplasmanlarının karesel ortalamasının toplam değeri) amaç fonksiyonları olarak seçilmiş olup; m_d , c_d ve k_d değeriinin optimum değeriini bulmak için minimize edilmişlerdir. Optimum TMD parametrelerinin bulunmasından sonra TMD-yapı sistemi Çizelge 2.1 ve 2.2’de belirtilen yakın fay ve uzak fay depremleri altında test edilmiştir. Önerilen yöntemle bulunan sonuçlar literatürdeki bazı yöntemlerle (Den Hartog, 1956; Warburton, 1982; Sadek vd., 1997) karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler ve bulunan sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

2.7.1.1 TMD’nin temel yöntemlere göre tasarımıyönte

Den Hartog (1956) aşağıda belirtilen optimum TMD parametreleri olan $\alpha_{opt}=\omega_d/\omega_s$ ve ζ_{opt} ifadelerini hesaplarken harmonik etki altındaki ana yapının deplasmanını minimize etmiştir. Bu parametreler daha önceden denklem (2.14) ve denklem (2.15) de belirtildiği gibi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (2.65)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (2.66)$$

Söz konusu dört katlı yapıda TMD en üst kata yerleştirilmiştir. Bu sebeple normalize edilmiş 1. Mod vektörü $\phi_1=\{0.347, 0.653, 0.879, 1\}$ olarak hesaplanmıştır. Bulunan sonuçların literatürdeki çalışmalarla (Den Hartog, 1956; Warburton, 1982; Sadek vd., 1997) karşılaştırılması için mevcut çalışmayla hesaplanan TMD kütlesi miktarı kadar (aynı zamanda en üst sınırı olan %6 kütle oranı) kütle değeri diğer yöntemler için kullanılmıştır. 1. modal kütle oranı $\mu_1 = 0.103$ olarak bulunmuştur. Den Hartog (1956)’a göre birinci mod kontrolü için optimum frekans oranı $f_{opt} = 0.906$, optimum ayar frekansı $\omega_d = 4.54$ rad/s, TMD’nin optimum rijitlik katsayısı $k_d = 594355$ N/m, optimum sönüm oranı ve optimum sönüm katsayısı $\xi_{dopt} = 0.187$ ve $c_d = 49063$ Ns/m olarak hesaplanmıştır.

Warburton (1982) tarafından ortaya konan yaklaşımda, TMD parametrelerinin hesabında beyaz gürültü etkisi kullanılmıştır. Denklemler (2.19) ve (2.20)’de belirtildiği gibi optimum ayar frekansı α_{opt} ve optimum sönüm oranı ζ_{opt} değeri,

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{1 - \mu/2} \quad (2.67)$$

$$\xi_{dopt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \quad (2.68)$$

formülleri ile hesaplanır. Bu fomülasyonlardan TMD parametreleri sırasıyla $\alpha_{opt}=0.882$, $\zeta_{dopt}=0.155$, $\omega_d =4.42$ rad/s, $k_d=563612$ N/m, $c_d=39538.40$ Ns/m olarak hesaplanmıştır.

Çok serbestlik dereceli sistemlerde TMD tasarımında diğer bir yaklaşım ise Sadek vd. (1997) tarafından ortaya konmuştur. Denklemler (2.26) ve (2.27)'de belirtildiği gibi bu yaklaşıma göre optimum parametreler,

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu\phi_{ij}} \left(1 - \xi \sqrt{\frac{\mu\phi_{ij}}{1+\mu\phi_{ij}}}\right) \quad (2.69)$$

$$\xi_{opt} = \phi_{ij} \left(\frac{\xi}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right) \quad (2.70)$$

şeklinde hesaplanır. Burada ϕ_{ij} değeri birim katkı faktörü için i . mod titreşiminin genlik değeridir. Bu yaklaşımda 1. moda ait normalize edilmemiş mod vektörü için modal kütle oranı,

$$\mu_1 = \frac{m_d}{\phi_1^T M_s \phi_1} \quad (2.71)$$

şeklinde dir. Burada $\phi_1 = \{0.228, 0.428, 0.577, 0.66\}$ olarak hesaplanan 1. mod için normalize edilmemiş mod vektörüdür. $\phi_{ij}=\phi_{14}=0.66$ olarak hesaplanmıştır. 1. mod için kütle oranı $\mu_1 =0.24$, ayar frekans oranı $f_{opt}=0.86$ ve optimum sönüm oranı $\xi_{opt}=0.30$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere istinaden, rijitlik katsayısı $k_d=532139$ N/m, sönüm katsayısı ise $c_d=74136.30$ Ns/m olarak hesaplanmıştır.

2.7.1.2 Önerilen yöntem için elde edilen sonuçlar

En üst katın mutlak ivmelerinin karesel ortalaması (f_1), en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması (f_2) ve katlar arası rölatif deplasmanlarının karesel ortalamalarının

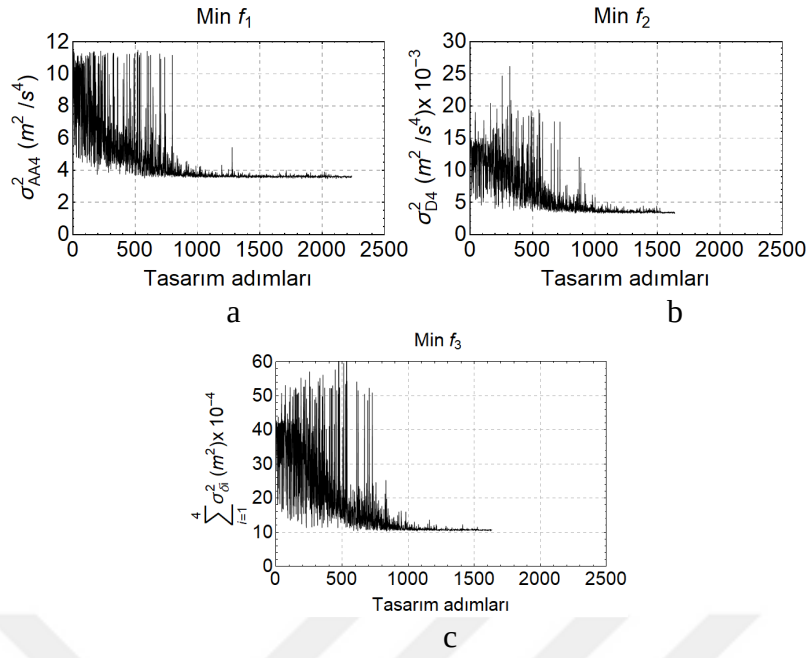
toplam değeri (f_3) daha önceden belirtilen kısıtlar altında DE algoritması kullanılarak minimize edilmiştir. Optimal tasarım parametreleri bu üç amaç fonksiyonuna göre hesaplanmıştır. Şekil 2.7 amaç fonksiyonunun tasarım adımlarına göre değişimini ve optimal değere nasıl yakınsadığını göstermektedir. Optimizasyon esnasında TMD parametrelerinin tasarım adımlarına göre değişimi ekler bölümünde verilen Şekil A.1-A.3’de gösterilmiştir. Şekil A.1’de görüldüğü gibi TMD kütlesi m_d en üst sınırına yakınsamaktadır. Bu üç amaç fonksiyonuna göre diğer TMD parametreleri k_d ve c_d ’nin tasarım adımlarına göre değişimi Şekil A.2-A.3’de gösterilmiştir. Çizelge 2.4’de görüldüğü gibi üç amaç fonksiyonu için TMD’nin kütle miktarı bütün tasarımlar için aynı olurken, sönüm ve rijitlik katsayıları birbirinden farklıdır. k_d ’nin en büyük değeri, f_1 ’e göre yapılan tasarım için olurken, c_d ’nin en büyük değeri Sadek vd. (1997)’ye göre olmuştur. f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları deplasman tabanlı olduğundan, bu fonksiyonlar için hesaplanan TMD parametreleri hem birbirleriyle, hem de Hartog (1956) ve Warburton (1982)’un yöntemlerine göre hesaplanan değerlerle tutarlılık göstermektedir. Bu tutarlılığın sebebi Den Hartog (1956) ve Warburton (1982)’un yöntemlerinin deplasman tabanlı olmasıdır. Ayrıca f_1 fonksiyonu ivme tabanlı olduğu için bu fonksiyon kullanılarak hesaplanan TMD parametreleri deplasman tabanlı olan f_2 , f_3 , Hartog (1956) ve Warburton (1982)’un parametrelerine göre farklı olmuştur.

Çizelge 2.4. Optimum TMD parametreleri

TMD Parametreleri	Den Hartog (1956)	Warburton (1982)	Sadek vd. (1997)	Mevcut Çalışma (Min f_1)	Mevcut Çalışma (Min f_2)	Mevcut Çalışma (Min f_3)
m_d (kg)	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4
k_d (N/m)	59.4355×10^4	56.3612×10^4	53.2139×10^4	61.7235×10^4	582546×10^4	56.2682×10^4
c_d (Ns/m)	49.063×10^3	39.538×10^3	74.136×10^3	60.501×10^3	42.031×10^3	45.986×10^3

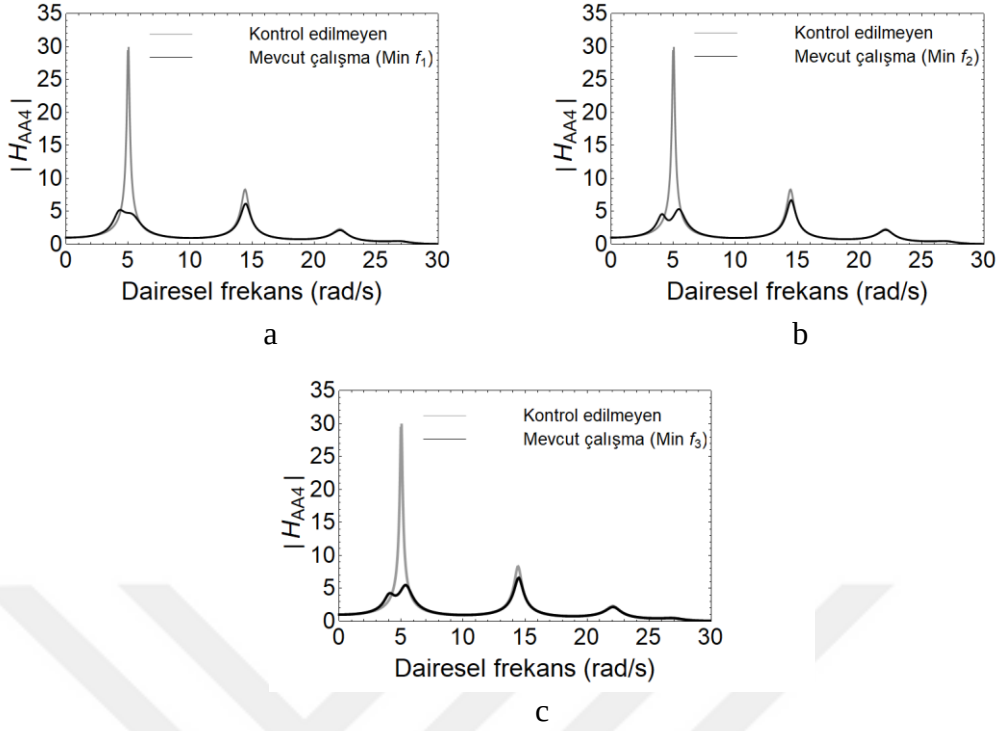
f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları için en üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{A44}|$ ’nin değişimi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. En üst katın deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğünün $|H_{D4}|$ ve en alt katın katlar arası göreceli deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğünün $|H_{\delta 1}|$ değişimi Şekil A.4-A.5’de gösterilmiştir. Şekil 2.8 ve Şekil A.4-A.5’de görüldüğü gibi, önerilen yöntemle tasarlanan TMD’nin yapı tepkisini azalmadaki etkinliği her üç amaç fonksiyonu için de görülmektedir.

f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları ve El Centro (NS) depremi için katların pik deplasman, mutlak pik ivme, katlar arası pik görelî deplasman (IDR), kat deplasmanlarının karesel ortalamalarının karekökü (deplasman RMS), kat ivmelerinin karesel ortalamasının karekökü (ivme RMS) Şekil 2.9 ve Şekil A.6-A.9’de görülmektedir. Görüldüğü üzere f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonların minimizasyonu ile mevcut çalışma için optimal olarak tasarlanan TMD performansı her üç amaç fonksiyonu içinde benzer ve başarılı sonuçlar vermiştir ve yapının tepkisini önemli ölçüde azaltabilmiştir. Bunlara ilaveten, bulunan sonuçlar literatürdeki kıyaslanan yöntemlerle tutarlılık göstermektedir. Söz konusu bu kıyaslamada kullanılan yakın fay depremleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 2.5 ve Çizelge A1-A5’de, uzak fay depremleri için ise Çizelge 2.6’da gösterilmiştir. Çizelge 2.5, Çizelge A1-A5 ve Çizelge 2.6’da görüldüğü gibi, yakın fay depremleri için TMD performansı incelendiğinde, en üst katın deplasmanlarının karesel ortalamasının minimizasyonu neticesinde yapılan tasarım, deplasmanı azaltmada diğer iki amaç fonksiyonu için yapılan tasarıma göre daha iyi performans sergilemektedir. Aynı şekilde, en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması minimizasyonu neticesinde yapılan tasarım, ivmelerin indirgemesinde diğer tasarımlara göre daha iyi performans sergilemektedir. Özellikle bazı depremler için f_3 amaç fonksiyonuna göre yapılan tasarım IDR’leri azaltmada daha etkili olmuştur. Fakat yakın fay deprem kayıtları altında yapılan analizlerde çoğunlukla f_2 minimizasyonu için yapılan tasarımda, IDR azaltımı daha fazla olmuştur. Yakın fay depremleri için oluşturulan Çizelge 2.5, Çizelge A1-A5 detaylı olarak incelendiğinde her üç amaç fonksiyonun performansı birebirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca önerilen yöntem için bulunan sonuçlar literatürdeki temel yöntemlerle tutarlılık göstermektedir.

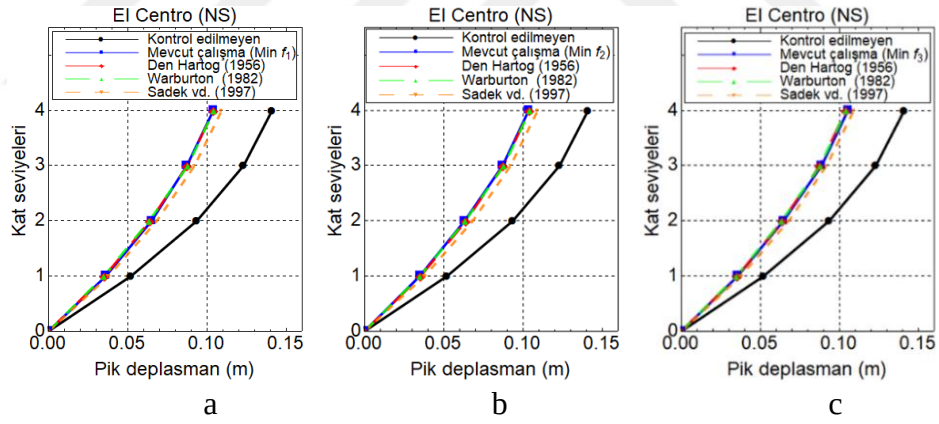


Şekil 2.7. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 'ün (c) tasarım adımlarına göre değişimi ve optimal değere yakınsaması

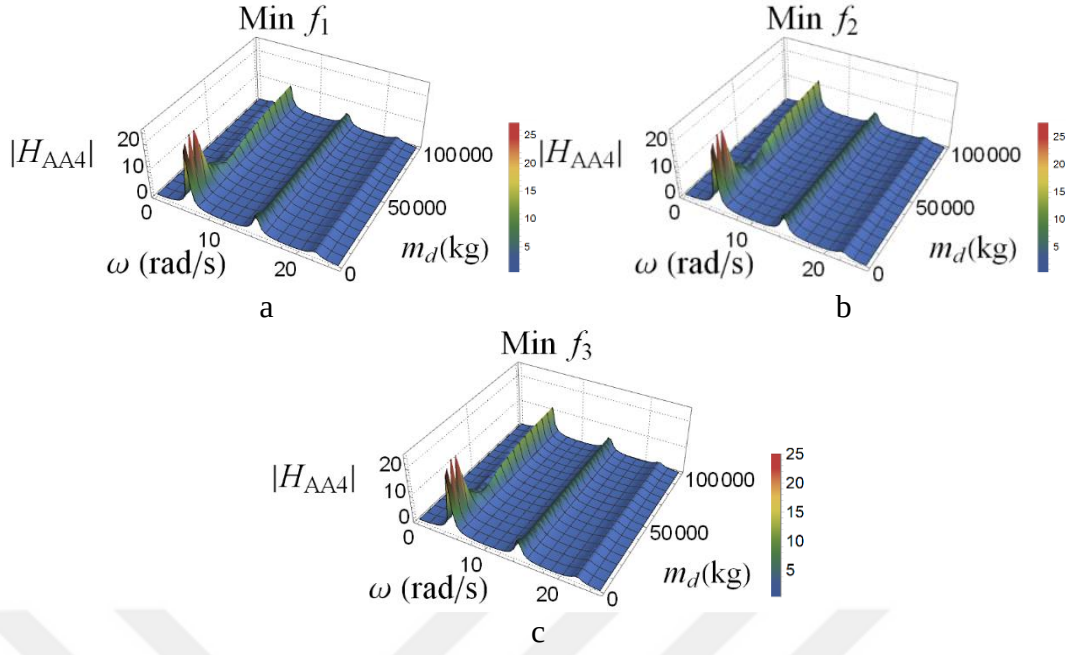
Çizelge 2.6'da görüldüğü gibi her üç amaç fonksiyonu için bulunan tasarımlar üç adet uzak fay depremleri altında da test edilmiştir. Bu çizelgeye göre, deplasman minimizasyonuna dayalı yapılan tasarım ivme minimizasyonuna dayalı tasarıma göre daha iyi bir performans sergilemiştir. Northridge depremi için ivmeye dayalı tasarım her ne kadar ivmeleri ve ivmelerin RMS'lerini azalmada daha etkili olsa da Fukushima ve Kern County depremleri için hesaplanan değerler diğer tasarımlara göre daha iyi bir performans sergileyememiştir. Uzak fay deprem kayıtları için katlar arası rölatif deplasmanların karesel ortalamalarının toplamına göre yapılan tasarımın ise birinci katın IDR'ni daha iyi azaltamamıştır. Genel olarak kullanılan uzak fay depremleri göz önüne alındığında her üç amaç fonksiyonu için farklı hedeflere göre yapılan tasarımların iyi performans sergiledikleri ve genel olarak birbirleri ile tutarlı sonuçlar verdikleri görülmüştür.



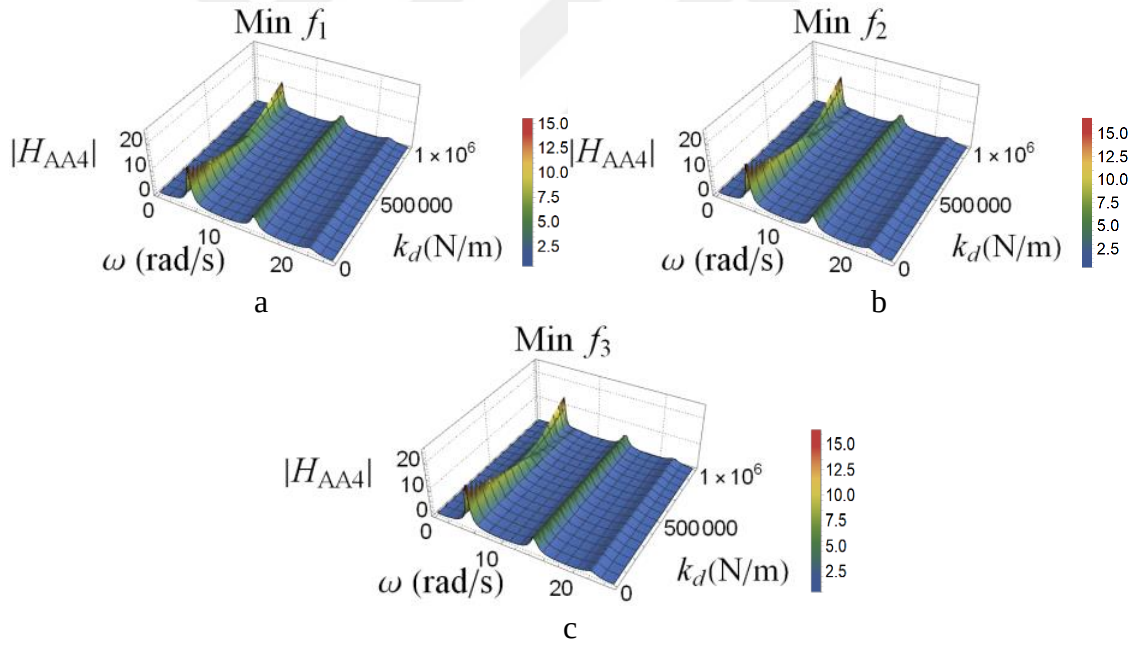
Şekil 2.8 f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları için en üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin değişimi



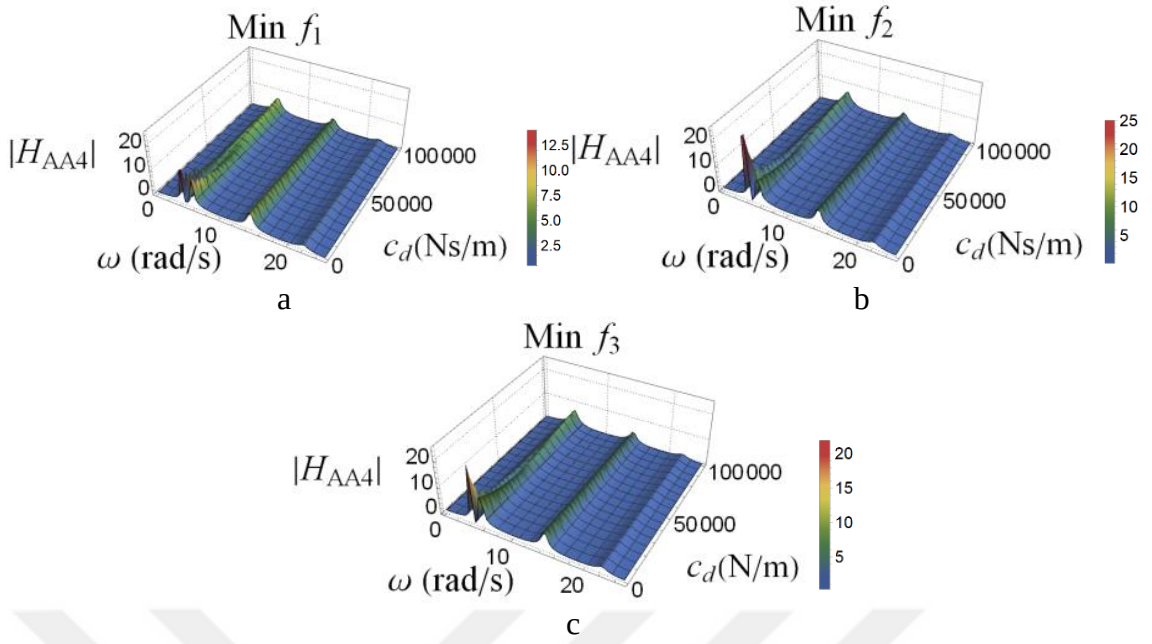
Şekil 2.9. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat deplasmanlarının değişimindeki etkisi



Şekil 2.10. Dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil 2.11. Dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil 2.12. Dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi

$|H_{AA4}|$, $|H_{D4}|$ ve $|H_{\delta 1}|$ transfer fonksiyonlarının amaç fonksiyonları f_1 , f_2 ve f_3 minimize edilerek hesaplanan tasarım parametreleri m_d , c_d , k_d ve dış etki frekanslarına göre değişimi üç boyutlu olarak Şekil 2.10-2.12 ve Şekil A.10-A.15'de gösterilmiştir. Bu grafikler çizilirken diğer iki optimum tasarım parametresi sabit alınarak diğer tasarım parametresinin değişimine göre çizimler yapılmıştır. Görüleceği üzere transfer fonksiyonları tasarım parametresinin optimum olduğu değerde minimum değer almaktadır. Bütün amaç fonksiyonlarının minimizasyonu neticesinde optimum kütle 28800 kg olarak hesaplanmıştır. Şekiller incelendiğinde bütün amaç fonksiyonlarında kütle parametresi bu değere yaklaştığında transfer fonksiyonu minimum değere doğru yakınsıyor. Kütle parametresinin optimizasyonda artırılması neticesinde de optimum değer bu üst sınıra yakınsayacağı ortaya çıkmıştır. Tasarımcının uygulanabilirlik açısından seçeceği kütle üst sınırı tekli TMD optimizasyonunda muhtemel optimum değer olacaktır. Tekli TMD'de böyle bir durum ortaya çıkarken çoklu TMD tasarımında kütlenin optimum değerlerinin bulunması açısından kütlenin tasarım değişkeni olarak seçilmesi önem kazanacaktır. Çizelge 2.4 gösterilen c_d ve k_d optimum değerlerine ulaştığında söz konusu transfer fonksiyonlarının minimum olduğu görülmektedir. Buradan da anlaşılabileceği gibi optimum parametrelerle tasarlanmış TMD yapıya yerleştirildiğinde, transfer fonksiyonlarını minimize etmede son derece etkindir. Dahası farklı amaç fonksiyonlarını minimize eden optimum c_d ve k_d değerleri de farklı olarak

ortaya çıkmaktadır. Önerilen yöntem mühendisin tasarım amacına hizmet etmektedir. Deplasman esaslı veya kuvvet esaslı tasarım yapmak isteyen mühendis kendi tasarım amacını belirledikten sonra o amaca ulaşmak için burada önerilen yöntemi kullanabilir. Bu konuda bulunan optimum tasarımların El Centro (NS) depremi altındaki deplasman ve ivme zaman davranışları Şekil A16-A17’de görülmektedir.

Çizelge 2.5. Dört katlı kayma çerçevesinde, El Centro (NS) yakın fay deprem kaydı için önerilen yöntemin sonuçları ve literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanması

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol Edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd. (1997)	
				Min (f_1)	Min (f_2)	Min (f_3)					
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
El Centro (NS)	Pik Deplasman (m)	4	0.1410	0.1050 0.1030 0.1050	25.530 26.950 25.532	0.1040	26.241	0.1040	26.241	0.1090	22.695
	Pik İvme (m/s ²)	4	7.2100	6.9200 6.9270 6.9300	4.022 3.925 3.883	6.9300	3.883	6.9300	3.883	6.9400	3.745
	Pik IDR	1	0.0174	0.0120 0.0110 0.0119	31.034 36.782 31.609	0.0118	32.184	0.0117	32.759	0.0126	27.586
	RMS Deplasman (m)	4	0.0468	0.0286 0.0283 0.0287	38.890 39.530 38.675	0.0283	39.530	0.0287	38.675	0.0302	35.470
	RMS İvme(m/s ²)	4	1.7100	1.3200 1.3430 1.3500	22.810 21.462 21.053	1.3300	22.222	1.3500	21.053	1.3400	21.637

Çizelge 2.6. 4 Katlı kayma çerçevesinde uzak fay depremleri için mevcut çalışmanın sonuçlarının literatürdeki çalışmalarla kıyaslanması

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol Edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd. (1997)	
				Min (f_1)	Min (f_2)	Min (f_3)					
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
Northridge (N005)	Pik Deplasman (m)	4	0.0965	0.0766 0.0766 0.0759	20.622 20.622 21.347	0.0763	20.933	0.076	21.244	0.0752	22.073
	Pik ivme (m/s ²)	4	8.3538	7.8971 8.007 7.991	5.467 4.151 4.343	7.9755	4.528	8.0197	3.999	7.9086	5.329
	Pik IDR	1	0.01395	0.01 0.0098 0.0099	28.315 29.749 29.032	0.0099	29.032	0.0099	29.032	0.0101	27.599
	RMS Deplasman (m)	4	0.0277	0.0109 0.0095 0.0097	60.650 65.704 64.982	0.0098	64.621	0.0094	66.065	0.0113	59.206

	RMS İvme (m/s ²)	4	1.2859	0.9627 0.9996 0.996	25.134 22.265 22.545	0.989	23.089	1.005	21.845	1.005	21.845
Fukushima (NS)	Pik Deplasman (m)	4	0.0569	0.0426 0.0420 0.0411	25.132 26.186 27.856	0.042	26.186	0.0414	27.214	0.043	24.429
	Pik İvme (m/s ²)	4	7.0274	6.5564 6.1886 6.5326	6.702 11.936 7.041	6.5336	7.027	6.516	7.277	6.6032	6.036
	Pik IDR	1	0.0082	0.0072 0.0070 0.0069	12.195 14.512 16.098	0.00701	14.512	0.00692	15.610	0.007	14.634
	RMS Deplasman (m)	4	0.0088	0.0066 0.0064 0.0063	25.000 27.614 27.955	0.0064	27.273	0.00635	27.841	0.0064	27.273
	RMS İvme (m/s ²)	4	0.603	0.5688 0.5735 0.572	5.672 4.892 5.1410	0.5719	5.158	0.5741	4.793	0.5677	5.854
	Pik Deplasman (m)	4	0.0941	0.0701 0.0689 0.0691	25.505 26.780 26.567	0.0693	26.387	0.0688	26.844	0.0702	25.345
Kern County (N21E)	Pik ivme (m/s ²)	4	3.904	2.7326 2.4770 2.5501	30.002 36.549 34.676	2.2563	34.338	2.5312	35.161	2.8467	27.131
	Pik IDR	1	0.0078	0.0074 0.00738 0.0074	5.128 5.385 5.128	0.0074	5.128	0.0074	5.385	0.0075	3.910
	RMS Deplasman (m)	4	0.0276	0.0137 0.01218 0.0122	50.471 55.870 55.797	0.0124	55.072	0.0121	56.123	0.0134	51.594
	RMS İvme (m/s ²)	4	0.8021	0.5063 0.5180 0.5027	36.878 35.420 37.327	0.501	37.539	0.5099	37.215	0.5099	36.429

2.7.2 Örnek 2: 4 katlı düzensiz kayma çerçevesi modeli için TMD tasarımı

Bu konuda, düzensiz bir kayma çerçevesinde önerilen yöntem kullanılarak ayarlı kütle sönümleyicisi (TMD) parametreleri olan kütle, rijitlik ve sönüm katsayısının optimum değerleri bulunmuştur. Belirli kısıtlar altında ve rastgele titreşimler teorisi kullanılarak, amaç fonksiyonları olan en üst katın mutlak ivmelerinin, deplasmanlarının karesel ortalaması ve katlar arası görelî deplasmanının karesel ortalamalarının toplamı frekans tanım alanında tanımlanmış ve minimize edilmiştir. Daha sonra TMD eklenmiş kayma çerçevesinin performansı El Centro (NS) yer hareketi altında test edilmiştir. Bulunan sonuçlar literatürdeki diğer bazı yöntemlerle de karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemle doğru olarak tasarlanmış TMD'nin deprem etkisi altındaki düzensiz binaların yapısal davranışlarının iyileştirilmesinde son derece etkili olduğu gözlenmiştir. Bu

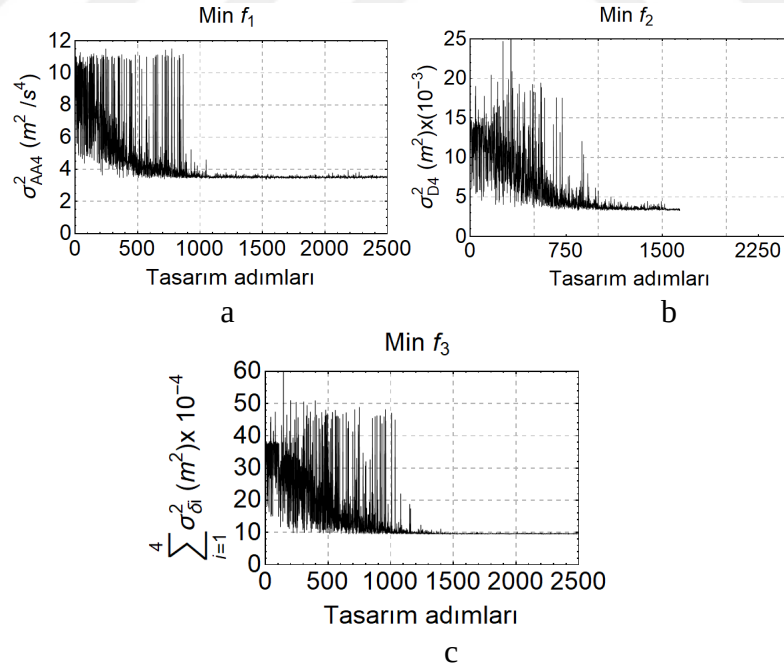
konuda düşeyde rijitlik düzensizliği olan bir dört katlı kayma çerçevesi modeli üzerinde geliştirilen TMD optimizasyonu yöntemi uygulanmıştır.

Sismik girdinin ivmesinin Spektral güç yoğunluk (PSD) fonksiyonu belirli frekans aralığında sabit bir değer alınarak beyaz gürültü olarak modellenmiştir. Literatürde TMD tasarımı ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunda kütle yapının belirli bir yüzde oranı alınıp, tasarım parametresi olarak sadece rijitlik ve sönüm katsayısı için optimizasyon yapılır. Bundan farklı olarak bu çalışmada DE algoritması kullanılarak rijitlik ve sönüm katsayısı yanında kütle parametresi de optimize edilmiştir. Bulunan sonuçlarla tasarlan TMD daha sonrasında literatürdeki birkaç iyi bilinen yöntemle karşılaştırılmıştır. Dört katlı düzensiz bir kayma çerçevesi örnek olarak seçilmiştir. Her bir katın kütlesi $m_i = 12 \times 10^4 \text{ kg}$ ($i=1, 2, 3, 4$) ve her bir katının rijitliği $k_i = \{2.5 \times 10^7, 2.75 \times 10^7, 3 \times 10^7, 3.25 \times 10^7\} \text{ N/m}$ olarak alınmıştır. Yapının doğal frekansları $\omega_{si} = \{5.20 \text{ rad/s}, 15.52 \text{ rad/s}, 23.83 \text{ rad/s}, 29.53 \text{ rad/s}\}$ şeklinde hesap edilmiştir. Sismik ivmenin girdisinin spektral güç yoğunluk (PSD) fonksiyonu bant sınırlı beyaz gürültü (PSD) olarak modellenerek $-30 \text{ rad/s} \leq \omega \leq -0.2 \text{ rad/s}$ ve $0.2 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 30 \text{ rad/s}$ aralıklarında sabit bir değer olarak $S_g(\omega) = 0.015 \text{ m}^2/\text{s}^3$ alınmış, bu aralığın dışında sıfır olarak değerlendirilmiştir. Kayma çerçevesinin 1. ve 2. mod sönüm oranları $\xi_1 = \xi_2 = 0.02$ olarak alınmıştır. TMD'nin sönüm, rijitlik ve kütle parametrelerinin üst sınırları sırasıyla $\bar{c}_d = 7.5 \times 10^4 \text{ Ns/m}$, $\bar{k}_d = 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}$, toplam yapı kütlelerinin % 6'sı olarak $\bar{m}_d = 2.88 \times 10^4 \text{ kg}$ alınmış, alt sınırları sıfır olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında m_d , c_d ve k_d değerlerinin optimal değerlerini hesaplamak amacıyla en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması $\sigma_{AA4}^2(f_1)$, en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması $\sigma_{D4}^2(f_2)$ ve katların göreceli deplasmanlarının karesel ortalamasının toplam değeri $\sum_1^N \sigma_{\delta i}^2(f_3)$ "Differential Evolution (DE)" algoritması kullanılarak her biri ayrı olarak minimize edilmiştir. Optimum TMD parametrelerinin bulunmasından sonra TMD-yapı sistemi El Centro (NS) depremi altında test edilmiştir. Sunulan örnekte bulunan sonuçlar literatürdeki Den Hartog (1956), Warburton (1982) and Sadek vd. (1997)'in yöntemlerle kıyaslanmıştır. Seçilen dört katlı yapı modeli için, söz konusu önerilen yöntemle ve diğer yöntemlerle hesaplanan optimum TMD parametreleri Çizelge 2.7.'de özetlenmiştir. Görüldüğü gibi üç amaç fonksiyonu için kütle miktarı bütün tasarımlar için aynı miktarda iken, sönüm ve rijitlik katsayıları için birbirinden farklıdır.

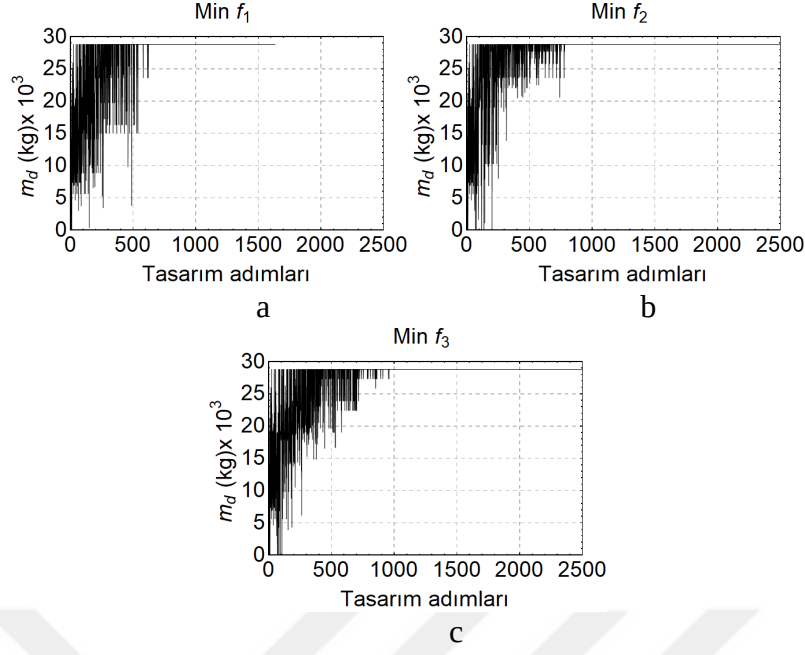
Çizelge 2.7. Düzensiz kayma çerçevesi için optimum TMD parametreleri

TMD Parametreleri	Den Hartog (1956)	Warburton (1982)	Sadek vd. (1997)	Mevcut Çalışma (Min f_1)	Mevcut Çalışma (Min f_2)	Mevcut Çalışma (Min f_3)
m_d (kg)	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4	2.88×10^4
k_d (N/m)	64.6591×10^4	61.4821×10^4	57.7562×10^4	66.5038×10^4	58.2546×10^4	56.2682×10^4
c_d (Ns/m)	40.313×10^3	40.314×10^3	75.274×10^3	43.891×10^3	42.031×10^3	45.986×10^3

Optimum tasarım parametreleri f_1, f_2, f_3 amaç fonksiyonuna göre belirlenmiştir. Amaç fonksiyonunun tasarım adımlarına göre değişimini ve optimal değere yakınsaması Şekil 2.13’de görülmektedir. Optimizasyon sırasında TMD’nin tasarım parametreleri olan kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerine göre değişimi Şekil 2.14 ve Şekil B.1-B.2.’de gösterilmiştir. Bu örnekte TMD kütle oranının üst limiti 6 % olarak seçilmiştir. Şekil 2.14’de görüldüğü gibi TMD kütle oranının optimum değeri TMD kütle oranının üst sınırına yakınsamaktadır. Önerilen yöntemde kütle oranı belirli bir değer olarak sabit alınmamış, üst ve alt sınır koşulları için optimize edilmiştir. Optimizasyon esnasındaki değişen bu kütle oranı sebebiyle rijitlik ve sönüm oranı buna uygun olarak değişmektedir.



Şekil 2.13. Düzensiz kayma çerçevesinde amaç fonksiyonları f_1 , (a), f_2 , (b), f_3 ’ ün (c) tasarım adımlarına göre değişimi

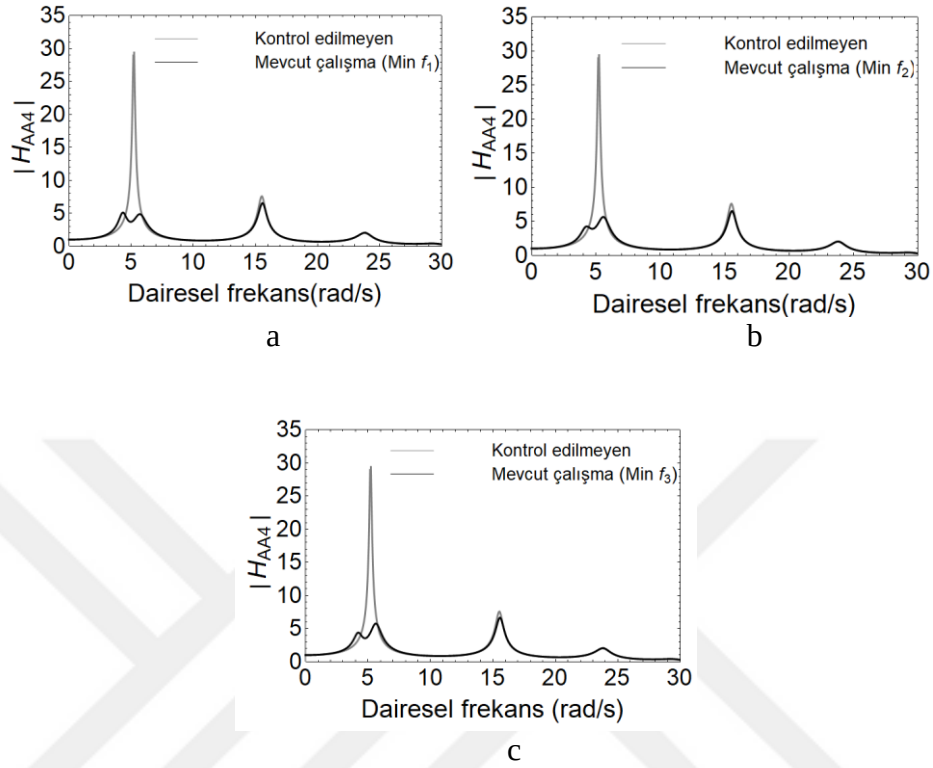


Şekil 2.14. Düzensiz kayma çerçevesinde amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), f_3 (c) için hesaplanan TMD kütlelerinin tasarım adımlarına göre değişimi

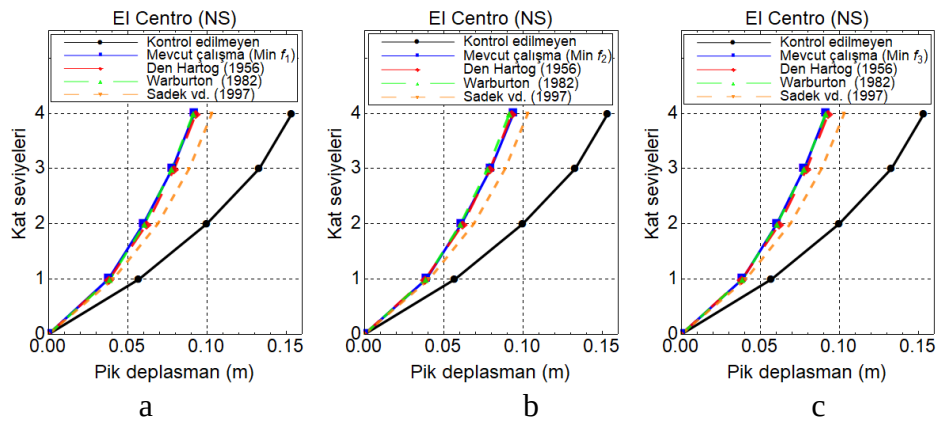
Şekil 2.15 düzensiz kayma çerçevesinde f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonları için en üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin değişimini göstermektedir. En üst katın deplasmanlarının karesel ortalamasının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ ve en alt katın katlar arası görel deplasmanı transfer fonksiyonunun büyüklüğün $|H_{\delta 1}|$ 'nin dairesel frekansa göre değişimi Şekil B.3'de ve Şekil B.4'de görülmektedir. Şekil 2.15 ve Şekil B.3-B.4'den anlaşılacağı üzere tasarlanan TMD; $|H_{AA4}|$, $|H_{D4}|$ ve $|H_{\delta 1}|$ transfer fonksiyonlarını etkili bir şekilde azaltabilmiştir. Özellikle ivme tabanlı olan f_1 fonksiyonu deplasman tabanlı olan f_2 ve f_3 amaç fonksiyonlarından tasarım parametreleri açısından kısmen farklı olsa da yapının tepkisini azaltımı konusunda diğer iki fonksiyonla yakın bir tasarım ortaya çıkarmıştır.

Şekil 2.16 ve Şekil B.5-B.8 f_1 , f_2 ve f_3 amaç fonksiyonlarının minimizasyonu sonucu tasarlanan TMD-kayma çerçevesi sisteminin El Centro (NS) ivme kaydı altındaki pik deplasmanlar, pik mutlak ivmeler, katlar arası görel pik deplasmanların oranı (IDR), her bir katın deplasmanlarının karesel ortalamalarının karekökü (RMSD) ve her bir katın ivmelerinin karesel ortalamalarının karekökü (RMSA) ifadelerinin kat seviyelerine göre değişimlerini ve literatürdeki iyi bilinen diğer yöntemlerle (Den Hartog, 1956; Warburton, 1982 ve Sadek vd., 1997) kıyaslanmasını göstermektedir. Şekil 2.16 ve Şekil B.5-B.8 da görüldüğü üzere her üç amaç fonksiyonuyla tasarlanan TMD, El Centro (NS)

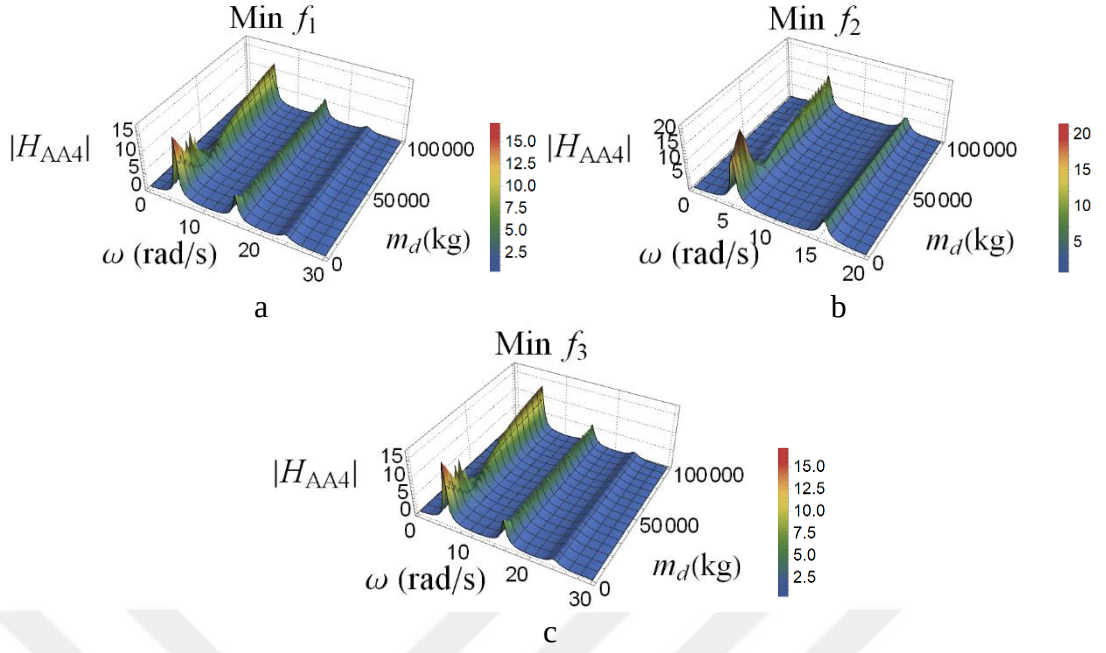
ivme kaydı etkisi altındaki yapının tepkisini indirgemedi son derece etkilidir. Söz konusu bu azaltmaların % olarak değişimi Çizelge 2.8’de görülmektedir.



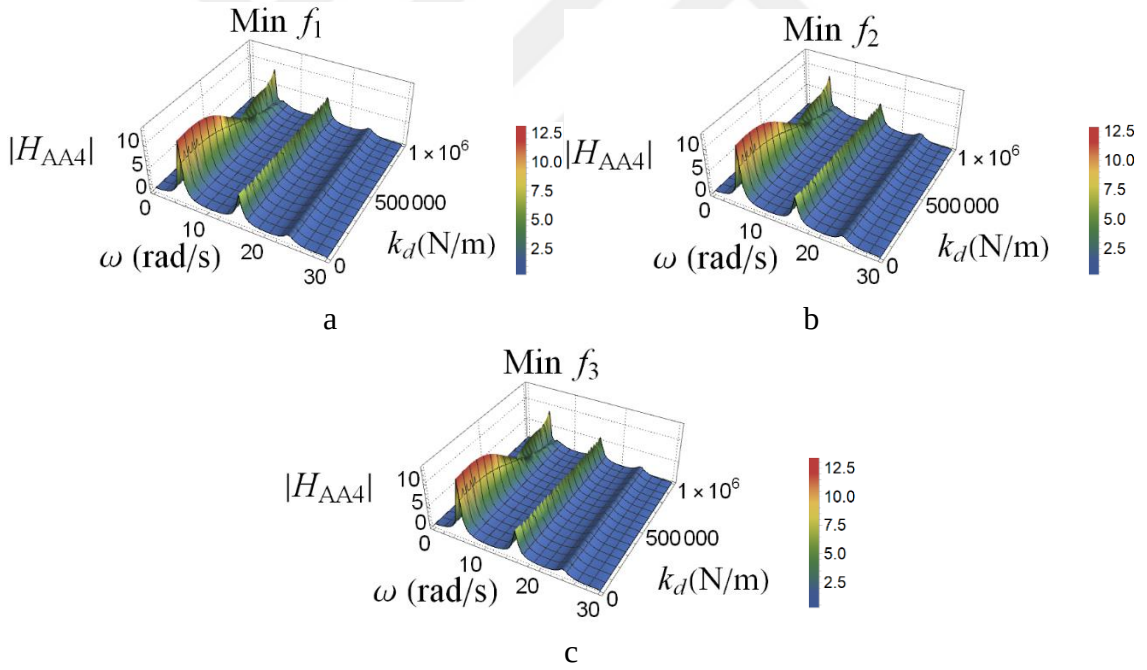
Şekil 2.15. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b), f_3 (c) amaç fonksiyonları için en üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ ’nin değişimi



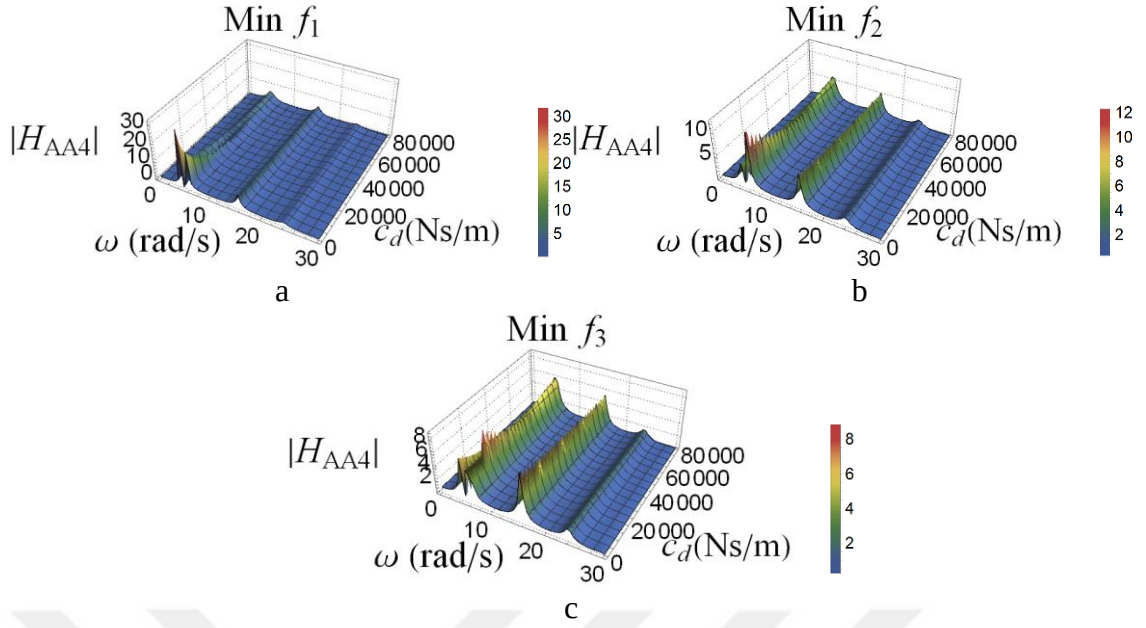
Şekil 2.16. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b) ve f_3 (c) amaç fonksiyonları için pik mutlak kat deplasmanları ve literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanması



Şekil 2.17. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil 2.18. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil 2.19. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat ivme transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA4}|$ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi

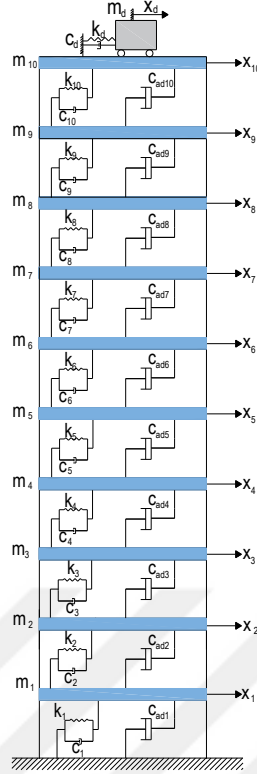
Çizelge 2.8. Düzensiz kayma çerçevesinde El Centro (NS) depremi için önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol Edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd. (1997)	
				Min (f_1)	Min (f_2)						
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
EL Centro (NS)	Pik Deplasman (m)	4	0.157	0.0926 0.097 0.091	41.019 38.217 42.038	0.0931	40.701	0.0919	41.465	0.1031	34.331
	Pik ivme (m/s^2)	4	7.13	6.733 6.74 6.73	5.568 5.470 5.5.610	6.73	5.610	6.751	5.316	6.746	5.386
	Pik IDR	1	0.0191	0.0128 0.0132 0.0128	32.984 30.890 32.984	0.0128	32.984	0.0092	39.211	0.0056	25.333
	RMS Deplasman (m)	4	0.067	0.0268 0.0272 0.026	60.000 59.403 61.194	0.0265	60.448	0.0264	60.597	0.0292	56.418
	RMS İvme (m/s^2)	4	2.1868	1.295 1.329 1.31	40.781 39.226 40.025	1.303	40.415	1.333	39.043	1.32	39.638

Şekil 2.17-2.19 ve Şekil B.9-B.14’de $|H_{AA4}|$, $|H_{D4}|$ ve $|H_{\delta 1}|$ transfer fonksiyonlarının her üç amaç fonksiyonu için hesaplanan tasarım parametresi (m_d , c_d and k_d) ve bunların dış etki frekansına göre değişimi üç boyutlu olarak görülmektedir. Diğer iki optimum TMD parametresi sabit tutularak, diğer parametrenin değişimine göre çizilen grafiklerde transfer fonksiyonunun değişimi görülmektedir. Şekil 2.17-2.19 ve Şekil B.9-B.14’de görülen 3D grafiklerden de anlaşılabacağı üzere transfer fonksiyonu parametrenin optimum değerine yaklaşıırken minimum değere yaklaşmaktadır. TMD kütlelerinin değişimi incelendiğinde amaç fonksiyonları 28800 kg değerinde minimum olmuştur. Bu değerlerin optimum olduğu değerlerde amaç fonksiyonları minimum değerini almıştır. Optimum TMD tasarım yönteminin düşeyde rijitlik açısından düzensiz çerçeveler üzerinde uygulanması sonucunda bulunan optimum tasarımların davranışı oldukça iyileştirdiği gözlenmiştir. Düzenli çerçeveye göre düzensiz çerçevede yüzde olarak daha fazla iyileştirmeler görülmüştür. Dolayısıyla optimum TMD’ler geliştirilen yöntem ile tasarlanarak rijitlik düzensizliğine sahip yapılarda kullanılarak yapısal tepkiler oldukça aşağı seviyelere çekilerek bir rehabilitasyon yapılabilir.

2.7.3 Örnek 3: 10 katlı kayma çerçevesi modeli için TMD tasarımı

Bu örnekte, geliştirilen yöntemin etkinliğini test etmek amacıyla TMD eklenmiş 10 katlı bir yapı modeli Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Bu kayma çerçevesinde bir TMD tasarımı yapılarak, literatürdeki iki yöntemle (Hadi ve Arfiadi 1998; Lee vd., 2006) karşılaştırılmıştır. On katlı yapının özellikleri Hadi ve Arfiadi (1998)’den alınmış olup, kat kütleleri birbirine eşit ve $i=1,...,10$ için $m_i=3.6 \times 10^5$ kg, kat rijitlikleri $k_i=6.5 \times 10^7$ N/m, kat sönüm katsayıları $c_i=6.2 \times 10^6$ Ns/m’dir. En üst kata yerleştirilen TMD’nin kütle oranı üst sınırı %3 olarak alınmıştır. TMD parametrelerinin alt üst sınırları Hadi ve Arfiadi (1998)’nin çalışmasından alınmıştır. Söz konusu alt ve üst sınır değerleri rijitlik katsayısı için $0-4 \times 10^6$ N/m, sönüm katsayısı için $0-1 \times 10^6$ Ns/m’dir. Analiz için seçilen frekans aralığı $-30 \text{ rad/s} \leq \omega \leq -0.2 \text{ rad/s}$ ve $0.2 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 30 \text{ rad/s}$ olup spektral güç yoğunluk fonksiyonu $S_g(\omega)=0.015 \text{ m}^2/\text{s}^3$ olarak sabit alınmıştır.



Şekil 2.20. TMD eklenmiş 10 katlı yapı modeli

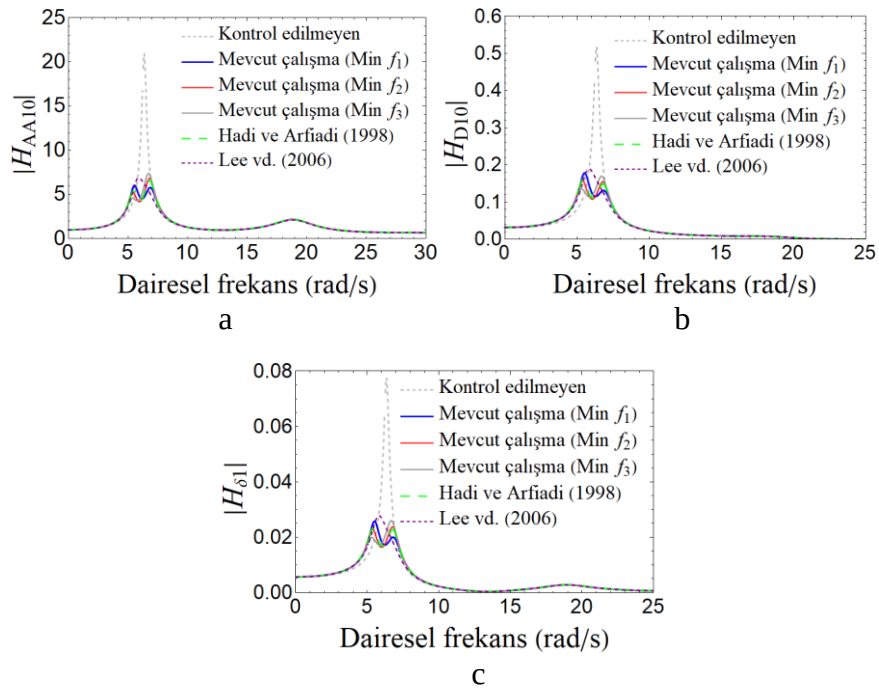
Çizelge 2.9. 10 katlı model için hesaplanan TMD parametreleri

TMD Parametreleri	Hadi ve Arfiadi (1998)	Lee vd. (2006)	Mevcut çalışma (Min f_1)	Mevcut çalışma (Min f_2)	Mevcut çalışma (Min f_3)
m_d (kg)	10.8×10^4	10.8×10^4	10.8×10^4	10.8×10^4	10.8×10^4
k_d (N/m)	375×10^4	412.63×10^4	396.9911×10^4	369.348×10^4	348.7326×10^4
c_d (Ns/m)	151.5×10^3	271.790×10^3	162.7438×10^3	145.8219×10^3	159.223×10^3

Hadi and Arfiadi (1998) ve Lee vd., (2006)'nin çalışmaları için hesaplanmış TMD parametreleri ve bu çalışmada geliştirilen f_1 , f_2 , f_3 amaç fonksiyonları için hesaplanan TMD parametreleri Çizelge 2.9'da görülmektedir. Çizelgeden anlaşılabacağı üzere her üç amaç fonksiyonu için hesaplanan kütle miktarları birbirine çok yakın olup %3 kütle oranı değerine yakınsamıştır. Ayrıca görüldüğü üzere, ivme minimizasyonu ile hesaplanan k_d ve c_d değerleri Hadi ve Arfiadi (1998)'nin çalışmasından bulunan değerlerden büyük olup, Lee vd. (2006) için hesaplanan değerlerden küçüktür. En üst katın deplasmanının minimizasyonu neticesinde hesaplanan k_d ve c_d parametreleri Hadi ve Arfiadi (1998) ve Lee vd. (2006) çalışmalarından hesaplanan değerlerden daha düşüktür. Katlar arası rölatif deplasmanların karesel ortalamalarının toplamının minimizasyonu ile hesaplanan k_d ve

c_d parametreleri Hadi ve Arfiadi (1998) ve Lee vd, (2006)'nin çalışmalarından hesaplanarlara göre çok az düşük olmuştur.

Söz konusu 10-katlı yapı modelinde zaman tanım alanında dinamik analiz yapmak için El Centro (NS) ivme kaydı kullanılmıştır. Çizelge 2.10'da mevcut çalışma ve literatürdeki yöntemler ile elde edilen sonuçlar (en üst katın pik deplasmanı, en üst katın pik ivmesi, ilk katın IDR'si en üst katın RMS deplasmanı ve en üst katın RMS ivmesi) davranış değerleri ve yüzde olarak azalım değerleri gösterilmektedir. Üç amaç fonksiyonu için, her ne kadar tepki % azaltmaları çok az farklılıklar gösterse de sonuçlar birbirleriyle tutarlıdır. En üst katın deplasmanı ve ivmesinin minimizasyonu göz önüne alındığında elde edilen sonuçlar katlar arası görel deplasmanların toplamıyla ilgili olan tasarıma göre biraz daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 2.21'de üç amaç fonksiyonu ve Hadi ve Arfiadi (1998), Lee vd. (2006)'nin çalışmaları için $|H_{AA10}|$, $|H_{D10}|$ ve $|H_{\delta1}|$ transfer fonksiyonlarının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, bütün yöntemler için bulunan sonuçlar transfer fonksiyonlarını azaltmalarda etkili olmakla birlikte, birbirleriyle de tutarlıdır. Küçük farklılıkların sebebi çalışmalarda dikkate alınan amaç fonksiyonlarının ve çözüm yöntemlerinin farklı olmasındandır.



Şekil 2.21. 10. Katın ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{AA10}|$ (a), deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D10}|$ (b) ve birinci katın rölatif deplasmanının büyüklüğü $|H_{\delta1}|$ 'nin frekans ile değişimi

Literatürdeki birçok yöntem belirli bir modun kontrolüne odaklanırken, mevcut çalışma için yapılan TMD tasarımı geniş bir frekans bandını içermektedir. Bu frekans aralığı seçilen 10 katlı model için ilk üç doğal frekansını içermektedir. İhtiyaç durumunda söz konusu bu frekans aralığı tasarımcı tarafından istenirse genişletilebilir veya belli bir banda sıkıştırılabilir. Birinci modun baskınlığı sebebiyle önerilen yöntem ve kıyaslanan yöntemler için bulunan sonuçlar birbirleriyle uyumludur. Bu örnekte kütle oranının üst sınırı Hadi ve Arfiadi (1998)'nin çalışmasındaki sabit kütle oranı değerine eşit alınmıştır. Kütlenin optimum değerinin yapılan analizlerde hep üst sınıra yakınsadığı görülmüştür. Tekli TMD optimizasyonunda, kütlenin tasarım değişkeni olarak alınmasının bir etkisi olmadığı düşünülebilir. Özellikle kütlenin tasarım değişkeni olarak alınması çoklu TMD'lerde ön plana çıkmaktadır. Dahası TMD rijitliğinin ve sönümünün bilindiği sadece kütlenin optimizasyonunun arandığı problemlerde ve farklı modların farklı lokasyonlara yerleştirilen TMD'lerle kontrolünün yapıldığı problemlerde kütle optimizasyonu önem kazanabilir. Bu sebeple çalışmadaki tekli TMD kütlelerinin optimizasyonu çoklu TMD'lerin tasarımı için öncü olabilecektir.

Çizelge 2.10. 10 katlı kayma çerçevesinde önerilen yöntemden elde edilen sonuçlarla literatürdeki yöntemlerden elde edilen sonuçların kıyaslanması

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol Edilmeyen	Önerilen Yöntem		Hadi ve Arfiadi (1998)		Lee vd. (2006)	
				Min (f_1) Min (f_2) Min (f_3)	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
El Centro (NS)	Pik Deplasman (m)	10	0.1765	0.0976 0.0968 0.1028	44.708 44.986 41.756	0.0971	44.986	0.1096	37.904
	Pik ivme (m/s^2)	10	10.572	6.3887 6.3858 6.7040	39.572 39.596 33.212	6.3862	39.596	6.7849	35.824
	Pik IDR	1	0.0085	0.0273 0.0284 0.0057	31.234 36.588 33.212	0.0054	36.859	0.0058	31.765
	RMS Deplasman (m)	10	0.0397	0.0273 0.0284 0.0287	31.234 28.489 27.715	0.0281	31.234	0.0268	32.519
	RMS İvme (m/s^2)	10	2.0598	1.4603 1.5157 1.5391	29.105 26.415 25.279	1.501	29.105	1.4290	30.624

Bu bölümde kayma çerçevesi için “Differential Evolution (DE)” algoritması kullanılarak bir tekli TMD tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin amacı, optimum TMD parametreleri olan TMD'nin kütlesi, rijitliği ve sönüm katsayısını bulmaktır. Ayrıca, geliştirilen yöntem ile bulunan tasarımlar literatürdeki bazı temel yöntemler ile bulunan

tasarımlar ile karşılaştırılmış sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Üç amaç fonksiyonu için altı tane yakın fay ve üç tane uzak fay depremi altında dört katlı model yapı test edilmiştir. Deplasman ve ivmelere göre tanımlanan transfer fonksiyonlarının tasarım parametrelerine göre değişimleri de incelenmiş ve geliştirilen yöntemin iyi bir performans gösterdiği transfer fonksiyonu genlikleri ile de gösterilmiştir. Optimizasyonun yapıldığı esnada TMD kütlelerinin rijitliğinin ve sönüm katsayısının değişimleri tasarım adımlarına gözlemlenerek optimum değerlere yakınsadıkları grafiksel olarak ispatlanmıştır. Önerilen yöntemin literatürdeki iyi bilinen yöntemlerle kıyaslanmasını yapabilmek için yer hareketleri altında en üst katın pik deplasmanı, pik ivmesi, pik IDR'ler, en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması ve en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması hesaplanmıştır.

Bu bölümden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- TMD tasarımında literatürdeki birçok yöntem sadece rijitlik ve sönüm parametresini optimize ederken önerilen yöntem TMD'nin kütle parametresini de optimize etmektedir. Konsriktif kısıtlar sebebiyle TMD kütle oranı birçok uygulamada genellikle %5'in altında seçilmektedir. Bu sebeple örnek 1 ve örnek 2 problemleri için TMD kütle oranı üst sınırı %6 seçilmiş olup, örnek problem 3 için kütle oranı üst sınırı % 3 olarak seçilmiştir. Optimizasyonda TMD kütle parametresi tasarım parametresi olarak alındığında yukarıdaki tüm örneklerdeki tasarımlarda TMD kütlesi en üst limite yakınsamıştır. Tekli TMD tasarımında sönümleyicinin tepeye konulması durumunda kütlesi optimizasyon probleminde seçilen üst sınıra yakınsaması kütlenin tasarım değişkeni olarak alınmasını gereksiz gibi gösterse de sönümleyicinin lokasyonundaki değişimler, kütle sınırlarının genişletilebileceği problemler ve çoklu TMD'lerin tasarımında kütlenin optimizasyonu önemli olacaktır. Dolayısıyla kütlenin de optimum tasarıma dahil edildiği daha genel bir yöntem burada geliştirilmiştir.
- Birçok TMD optimizasyon yöntemi genellikle birinci moda karşılık gelen davranışı veya sadece ayırık bir modu kontrol etmektedir. Önerilen yöntemde, geniş bir frekans bant aralığı dikkate alınabilmekte olup, arzu edilirse, dar bir bant frekans aralığı da seçilerek daha özel bir frekans aralığında optimizasyon yapma imkanı vardır. Bu bant aralığı tasarımcının seçimi ile genişletilip daraltılabilir.
- Geliştirilen yöntemin yönetici denklemleri frekans tanım alanında türetilmiş olup yapısal davranışlar tanımlanmıştır. Deplasmana ve ivmeye dayalı amaç fonksiyonları düşünülmüş olup bunlara göre hesaplanan TMD parametreleri

birbirleriyle azda olsa farklılıklar göstermektedir. Fakat performans açısından birbirleriyle yakın performans sergilemişlerdir.

- Yapı davranışı açısından optimum olarak tasarlanmış TMD, hem yakın fay depremlerine karşı hem de uzak fay depremlerine karşı oldukça etkili olmuştur. Bulunan bütün sonuçlar, literatürdeki yöntemlerle elde edilen sonuçlarla son derece tutarlı olmuştur.
- Bazı pasif sönümleyicilerin tasarımında da kullanılan transfer fonksiyonları TMD optimizasyonu için amaç fonksiyonlarının tanımlanmasında kullanılabilir.
- TMD'lerin optimum parametrelerinin bulunması için yapının tepe deplasmanı, tepe ivmesi ve birinci kat rölatif deplasmanı minimize edilecek amaç fonksiyonları olarak seçilebilirler. Seçilen bu amaç fonksiyonlarının ortaya çıkardığı optimum tasarımlar literatürdeki yöntemlere göre bulunanlar ile oldukça uyumludur.
- Optimizasyon için kullanılan “Differential Evolution (DE)” algoritması oldukça güçlü ve uygulama açısından oldukça kolay bir algoritmadır. Birçok kodlama programında yer alması ve kodlamaya çok uygun olması sebebiyle mühendislik esaslı optimizasyon problemlerinde yaygın kullanılır. Yapılan analizler göstermiştir ki DE algoritması ile bulunan optimum TMD'ler oldukça depreme dayanıklılık hususunda etkilidir.

BÖLÜM III

ÇOKLU AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ

3.1 Giriş

Ayarlı kütle sönümleyicileri (TMDs) deprem ve rüzgâr gibi yapıya etkiyen dinamik yükleri azaltmada son derece etkili araçlar olup genellikle yapının birinci moduna ayarlanmakta ve yapıyla ters fazda hareket ederek atalet kuvvetleri sayesinde davranış değerlerini azaltmaktadır. TMD parametreleri uygun şekilde seçilip yapının istenen titreşim moduna ayarlandığında sadece o moddaki tepkiyi azaltmaktadır. Fakat yapı davranışının iyileştirilmesinde farklı titreşim modlarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan çoklu ayarlı kütle sönümleyici (MTMD) parametrelerinin optimum şekilde tasarlanması ve yapıya optimal şekilde yerleştirilmesi diğer modların kontrolünü de sağlanarak yapıdaki deplasmanları ve ivmeleri düşürecektir.

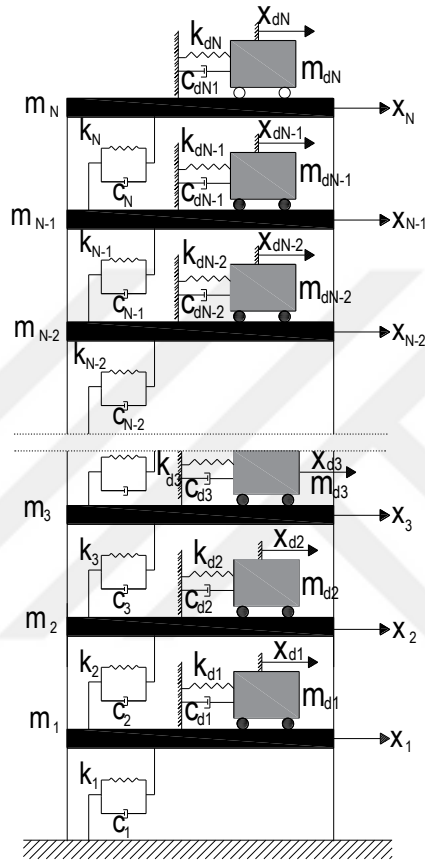
Bugünkü bilgi birikimine rağmen yer hareketinin davranışının nasıl olacağını kesin tahmin etmek oldukça güçtür. Bir yapının deprem ve rüzgâr gibi rastgele dinamik etkilere karşı cevabı da rastgeledir. Bu sebeple yapının analizinde birçok titreşim etkisinin göz önüne bulundurulması gerekmektedir. Literatürdeki çalışmaların birçoğunda yapı sistemi öz değer ve öz vektör problemi olarak ele alınıp tek serbestlik derecesine indirgenerek tasarım yapıldığından, tek bir modun kontrolü sağlanabilmektedir. Bu çalışmada sistemin lineer olduğu varsayılarak kayma çerçevesi modelinde MTMD'lerin kullanıldığı bir optimal tasarım yöntemi sunulmuştur. Deprem etkisine karşı sağlam ve dayanıklı yapı tasarımı yapabilmek amacıyla önerilen yöntemde, sistem bütün olarak ele alınarak tek serbestlik dereceli sisteme indirgenmeden modelleme yapılmıştır. MTMD'lerin yapının düşey yöndeki optimum yerleşiminin belirlenmesiyle ilgili olarak literatürdeki çalışmalar oldukça azdır. Dahası çalışmaların birçoğunda TMD kütleleri yapı kütlelerinin belirli %'si olarak hesaplanır. Önerilen yöntem sayesinde dinamik etkiler altındaki yapılarda MTMD parametreleri optimize edilip katlara en uygun şekilde yerleşimi sağlanmıştır. Bununla beraber hangi kata hangi özellikte ve kütlede TMD yerleştirileceği belirlenmiştir. Böylece farklı modları kontrol eden farklı TMD'ler tasarlanabilmektedir.

Önerilen yöntemde rastgele titreşimler teorisi ve kritik etki yöntemi (Takewaki, 2000b; Takewaki 2002; Fujita vd, 2010; Takewaki 2013) kullanılarak kritik frekans bandında analizler yapılmıştır. En üst katın ivmelerinin karesel ortalaması (f_1) ve en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması (f_2) amaç fonksiyonunu olarak seçilerek optimum MTMD parametreleri belirlenmiştir. Bu optimizasyonda da “Differential Evalution (DE)” algoritması kullanılmıştır. Tasarım aşamasında MTMD’nin katlara optimum yerleşimi belirlenirken hesaplanan optimum sönümleyici rijitliği veya kütlesi çok küçük bir değer aldığında, eleme işlemi yapılarak o kata TMD yerleştirilmemiştir. Tasarımı yapılan MTMD-yapı sistemi El Centro (NS), Kobe (NS) ve Loma Prieta (LGP 000) ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında analizler ile test edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, optimal olarak tasarlanmış ve katlara yerleştirilmiş bu çoklu pasif sönümleyicilerin yapı davranışını iyileştirmede son derece etkili olduğu görülmüştür. Bulunan sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalarla (Rana ve Soong, 1998; Frans ve Arfiadi, 2015) karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

3.2 Deprem Etkisi Altındaki Kayma Çerçevesi İçin Optimum MTMD Tasarımı

Tek serbestlik dereceli ve sadece tek bir TMD ile optimize edilen sistem çok karmaşık değildir ve yaygın olarak bilinmektedir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde TMD ve MTMD tasarımı daha karmaşıktır ve genellikle analizlerde sayısal çözümler kaçınılmazdır. Klasik çözüm yönteminde çözümü indirgemek amacıyla çok serbestlik dereceli sistem genellikle ayrıklaştırılarak tek serbestlik dereceli eşdeğeri haline getirilir. MTMD tasarımı ve sönümleyicilerin katlara yerleşiminde klasik yöntemin kullanılması tek bir modun kontrolünü sağladığından yetersiz kalacaktır. Ayrıca MTMD’lerin optimum olarak katlara yerleşiminin belirlenmesi son derece karmaşık bir problem haline gelecektir. Bu çalışmada sistem tek serbestlik dereceli sistem indirgmeden modellenecek, optimizasyonda rastgele titreşimler teorisi kullanılarak olasılıksal kritik etki altında yani kritik bir frekans bandında analizler yapılacaktır. Çoklu sönümleyicilerin tasarlanmasında kütlenin de tasarım parametresi olarak ele alınması ile her bir sönümleyici için üç adet olmak üzere sönümleyici sayısının üç katı tasarım değişkeni olacaktır. Bu çalışmada başlangıçta her kata bir TMD eklenmiş ve sönümleyicilerin kütle rijitlik ve sönüm katsayılarının optimum değerleri araştırılmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi kütlenin veya rijitliğin optimum değerlerinin sıfır olması veya sıfıra yakın olması fiziksel olarak o kata sönümleyici yerleştirilmemesi gerektiği anlamına

gelir. Yapı sisteminin çok serbestlik dereceli olarak modellenmesi, farklı yapısal parametrelerin eş zamanlı olarak optimize edilmesi için güçlü bir optimizasyon yöntemine ihtiyaç duyulur. DE algoritması bir direk optimizasyon yöntemi olup genetik algoritma tabanlıdır. Problemin doğrusal olmaması ve karmaşık hesaplar içermesi dolayısıyla bu güçlü optimizasyon yönteminin kullanımını gerektirmektedir.



Şekil 3.1. MTMD'li yapı

Şekil 3.1'de N katlı bir kayma çerçevesine yerleştirilen N adet TMD görülmektedir. Tasarım değişkenleri şekilden de görülebileceği gibi sönümleyicinin kütle, rijitlik ve sönüm katsayılarıdır. Yapının yatay deplasmanlarını gösteren N adet serbestliği var iken N adet serbestlik de sönümleyicilerden gelerek toplam sistemin serbestliği $2N$ 'dir. Şekilde görülen m_i , c_i , k_i yapının i. katındaki kütle, sönüm ve rijitlik katsayılarını ifade eder. Dış etki olarak depremin etkisi sabit spektral yoğunluk fonksiyonu alınarak bant sınırlı beyaz gürültü olarak tanımlanmıştır. Son katın ivmelerinin karesel ortalaması (f_1) ve son katın deplasmanlarının karesel ortalaması (f_2) amaç fonksiyonları olarak belirlenerek sınır koşulları altında optimum MTMD parametreleri "Differential Evolution

(DE)” algoritması kullanılarak kritik etki altında optimize edilmiştir. Bu minimizasyon işleminde ilk olarak toplam TMD kütlelerinin üst sınırı ana yapının kütlelerinin belirli bir yüzdesi oranında sınırlandırılıp her kata eşit şekilde bir kütle üst sınırı tanımlanarak optimizasyon problemi kurgulanmıştır. Diğer tasarım değişkenleri olan TMD’lerin rijitlik ve sönüm katsayılarının sınır değerleri de optimizasyona birer kısıt olarak dahil edilmiştir. Analizler sonucu hesaplanan kütle ve rijitlik parametreleri herhangi bir katta sıfıra yakınsa o kattaki TMD kaldırılmıştır. Bu sayede hem TMD parametreleri optimize edilmiş hem de katlara en uygun yerleşimi sağlanmış olmaktadır. Tasarlanan ve katlara yerleştirilen MTMD’ler El Centro (NS), Kobe (NS) ve Loma Prieta (LGP 000) depremleri etkisinde zaman tanım alanında analiz edilmiştir. Bulunan sonuçlar literatürdeki iyi bilinen bazı yöntemlerle (Rana ve Soong, 1998; Frans ve Arfiadi, 2015) karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır.

3.3 Problemin Formülasyonu

Şekil 3.1’de görülen kayma çerçevesi modelinde, $\mathbf{M}_s$, $\mathbf{K}_s$, $\mathbf{C}_s$ sırasıyla yapının kütle, rijitlik ve sönüm matrisi olmak üzere, sıfır ortalamaya sahip stasyonere rastgele yer ivmesi $\ddot{u}_g$ ’nin etkisi altında kaldığı varsayılarak hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t) = -\mathbf{M}_s \mathbf{r} \ddot{u}_g \quad (3.1)$$

Burada $\mathbf{x}_s(t)$ katlara ait deplasman vektörü, $\mathbf{r}$ etki vektörü olarak tanımlanır ve $\mathbf{r}=\{1 \ 1 \ 1 \ ... \ 1\}^T$ olarak ifade edilir. N serbestlik dereceli kontrol edilmeyen yapının $2N \times 2N$ boyutundaki $\mathbf{M}_s$, $\mathbf{K}_s$, $\mathbf{C}_s$ matrislerinin açılımı aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & & & \dots & 0 \\ \dots & m_2 & & & & \dots \\ & & \dots & & & \\ & & & m_{N-1} & & \\ \dots & \dots & & m_N & & \dots \\ & & & & 0 & \\ \dots & & & & & \dots \\ 0 & \dots & & & & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \dots \\ & -k_3 & \dots & & & \\ & & \dots & & -k_{N-1} & \\ & & & k_{N-1} + k_N & -k_N & \\ \dots & \dots & & -k_N & k_N & \\ & & & & 0 & \\ \dots & & & & & \dots \\ 0 & \dots & & & & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \dots \\ & -c_3 & \dots & & & \\ & & \dots & & -c_{N-1} & \\ & & & c_{N-1} + c_N & -c_N & \\ \dots & \dots & & -c_N & c_N & \\ & & & & & \dots \\ \dots & & & & & \dots & 0 \\ 0 & \dots & & & & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \quad (3.4)$$

Yapısal sönüm matrisi Rayleigh sönümü kullanılarak hesaplanmıştır. Bu sebeple sistemin doğal sönüm matrisi, kütle ve rijitlikle orantılı kabul edilmiştir.

Şekil 3.1’de görülen MTMD ile kontrol edilen sistemde hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_{TMD})\ddot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{C}_s + \mathbf{C}_{TMD})\dot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_{TMD})\mathbf{x}(t) = -(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_{TMD})\mathbf{r}\ddot{x}_g(t) \quad (3.5)$$

Burada $\mathbf{M}_{TMD}$, $\mathbf{K}_{TMD}$, $\mathbf{C}_{TMD}$ sırasıyla MTMD'nin kütle, rijitlik ve sönüm matrisleridir. Söz konusu bu matrislerin açık formu aşağıdaki gibi belirtilebilir.

$$\mathbf{M}_{TMD} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & m_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & m_{d2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & m_{d(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_{dN} \end{bmatrix}_{2Nx2N} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{K}_{TMD} = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 & -k_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & k_{d2} & \dots & 0 & 0 & 0 & -k_{d2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & k_{d(N-1)} & 0 & 0 & 0 & \dots & -k_{d(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & k_{dN} & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_{dN} \\ -k_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 & k_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_{d2} & \dots & 0 & 0 & 0 & k_{d2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{d(N-1)} & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{d(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -k_{dN} & 0 & 0 & \dots & 0 & k_{dN} \end{bmatrix}_{2Nx2N} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{C}_{TMD} = \begin{bmatrix} c_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 & -c_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & c_{d2} & \dots & 0 & 0 & 0 & -c_{d2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_{d(N-1)} & 0 & 0 & 0 & \dots & -c_{d(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & c_{dN} & 0 & 0 & \dots & 0 & -c_{dN} \\ -c_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 & c_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_{d2} & \dots & 0 & 0 & 0 & c_{d2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -c_{d(N-1)} & 0 & 0 & 0 & \dots & c_{d(N-1)} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -c_{dN} & 0 & 0 & \dots & 0 & c_{dN} \end{bmatrix}_{2Nx2N} \quad (3.8)$$

Burada c_{di}, k_{di}, m_{di} ($i = 1, \dots, N$) sırasıyla i . TMD'nin sönüm, rijitlik ve kütle katsayılarıdır. Denklem (3.5)'e Fourier dönüşümü uygulanırsa,

$$(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{X}(\omega) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (3.9)$$

formuna gelir. Burada $\mathbf{K}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{M}$ ifadeleri MTMD eklenmiş sistemin rijitlik, sönüm, kütle matrisi ve $i = \sqrt{-1}$ 'dir. $\mathbf{X}(\omega)$ deplasman vektörünün Fourier dönüşümünü, $\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega)$ yer hareketinin Fourier dönüşümünü gösterir. Denklem (3.9)'un kısaltılmış hali aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{A}\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{B}\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (3.10)$$

Bu denklemdeki $\mathbf{A}$ matrisi ve $\mathbf{B}$ vektörü,

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}) \quad (3.11)$$

$$\mathbf{B} = -\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (3.12)$$

olarak ifade edilebilir. Deplasmanın Fourier dönüşümü olan $\mathbf{X}(\omega)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{X}(\omega) = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (3.13)$$

$\mathbf{X}(\omega)$ 'nın deplasmanın transfer fonksiyonu $\mathbf{H}_D(\omega)$ 'ye göre ifadesi.

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}_D(\omega)\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. $\mathbf{H}_D(\omega)$ deplasman vektörünün transfer fonksiyonu,

$$\mathbf{H}_D(\omega) = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilir. $\mathbf{T}$ dönüşüm matrisi olmak üzere, $\boldsymbol{\delta}(\omega)$ katlar arası rölatif deplasmanların Fourier dönüşümü,

$$\boldsymbol{\delta}(\omega) = -\mathbf{T}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (3.16)$$

olarak yazılabilir. Katlar arası rölatif deplasmanların transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\mathbf{H}_\delta(\omega) = -\mathbf{T}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r} \quad (3.17)$$

$\mathbf{T}$ rölafif deplasman hesabı için kullanılacak olan dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (3.18)$$

Mutlak ivmelerin Fourier dönüşümü,

$$\ddot{\mathbf{X}}_{AA}(\omega) = \mathbf{H}_{AA}(\omega) \ddot{\mathbf{X}}_g(\omega) \quad (3.19)$$

gibi ifade edilebilir. Bu denklemde mutlak ivmenin transfer fonksiyonu $\mathbf{H}_{AA}(\omega)$ aşağıdaki gibi yazılır.

$$\mathbf{H}_{AA}(\omega) = (\mathbf{1} + \omega^2 \mathbf{A}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{r}) \quad (3.20)$$

$S_g(\omega)$ stasyonere rastgele girdi olarak tanımlanan $\ddot{x}_g(t)$ 'nin istatistiksel ifadesi olan Spektral güç yoğunluk fonksiyonudur. Rastgele titreşimler teorisine göre, i. katın ivmelerinin karesel ortalaması σ_{AAi}^2 ve deplasmanlarının karesel ortalaması σ_{Di}^2 aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma_{AAi}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{AAi}(\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} H_{AAi} H_{AAi}^* S_g(\omega) d\omega \quad (3.21)$$

$$\sigma_{Di}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{Di}(\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} H_{Di} H_{Di}^* S_g(\omega) d\omega \quad (3.22)$$

Burada $|H_{AAi}(\omega)|$ i. katın mutlak ivmelerinin transfer fonksiyonunun genliğini ve $|H_{Di}(\omega)|$ i. katın deplasmanlarının genliğini göstermektedir. $()^*$ ifadesi kompleks eşleniği gösterir. Yukarıdaki formülasyonlar viskoz sönümleyicilerin optimum tasarımı için kullanılmıştır (Takewaki, 2009).

3.4 Tasarım İçin Kritik Etki Yöntemi

Her bir yapı sistemi kendine has dinamik karaktere sahiptir. Yer hareketinin, bir yapının doğal frekansını etkilediği duruma kritik etki denir. Yapının doğal periyodu ve yer hareketinin baskın periyodu bir araya geldiğinde yapıda ciddi hasarlara yol açabilmektedir (Takewaki 2013). Bu çalışmada sismik tasarım için Takewaki (2013) tarafından önerilen “olasılıksal kritik etki yöntemi” kullanılacaktır. Bilindiği üzere yer hareketi birçok bilinmeyi içinde barındırmaktadır. Yer hareketinin ivmesi olan $\ddot{u}_g(t)$ ’nin spektral güç yoğunluk (PSD) fonksiyonu $S_g(\omega)$ olmak üzere, olasılıksal kritik etki yöntemine göre $S_g(\omega)$ ’lerin üzerindeki sınırlamalar için PSD’nin enerji limiti aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

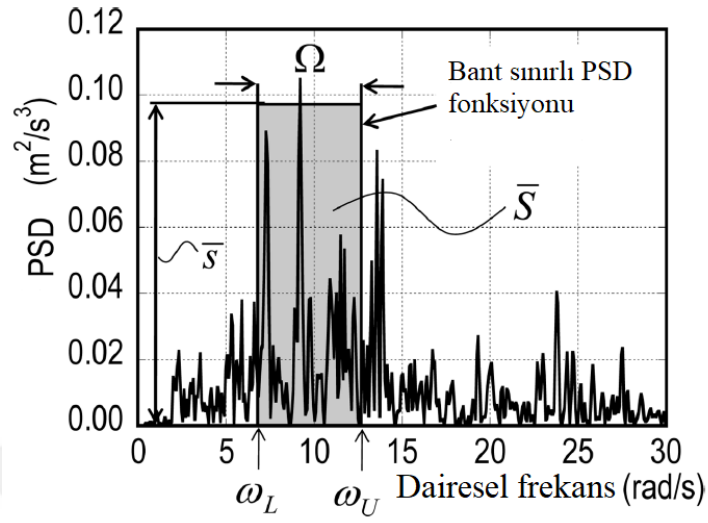
$$\int_{-\infty}^{\infty} S_g(\omega) d(\omega) \leq \bar{S} \quad (3.23)$$

Görüldüğü üzere girdi varyansını temsil eden PSD fonksiyonunun altındaki alanın üst sınırı $\bar{S}$ enerji limitidir. Genlik limiti $\bar{s}$ (PSD fonksiyonun yoğunluğunun üst limiti) aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

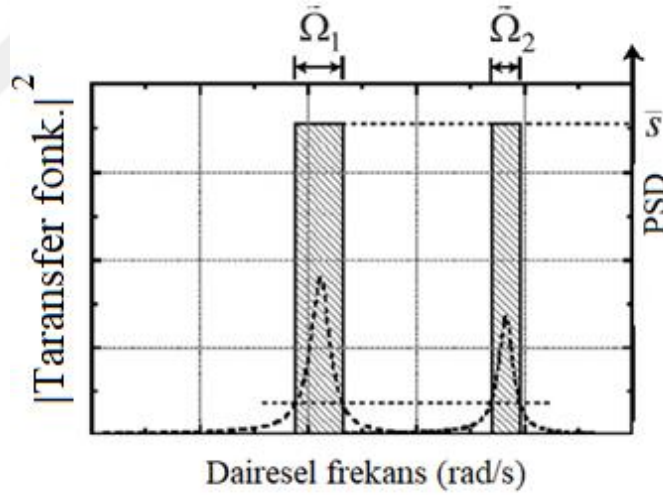
$$\sup S_g(\omega) \leq \bar{s} \quad (3.24)$$

Bu ifade PSD fonksiyonunun maksimum veya pik değeridir. $\bar{S}$ ve $\bar{s}$ parametrelerin kritik değerleri yer hareketi kayıtlarının analizi sonucu tanımlanır. Çözüm olarak PSD fonksiyonun bir şekli “Dirac delta” fonksiyonu varsayılabilir ($\bar{s}$ sonsuz olduğunda) veya bir bant sınırlı beyaz gürültü ($\bar{s}$ sonlu olduğunda) olarak görülebilir. Bir bant sınırlı beyaz gürültüde Ω bant genişliği olmak üzere, bu bant genişliğinin frekans aralığı ω_u üst sınırları, ω_L alt sınırları verilen $\bar{S}$ ve $\bar{s}$ parametrelerinin oranı olan $\bar{S}/\bar{s}$ ’ye göre belirlenebilir (Takewaki, 2000b; Takewaki 2002; Fujita ve Takewaki, 2010). Şekil 3.2. El Centro (NS) depremi için kritik bant sınırlı bir beyaz gürültü etkisini göstermektedir (Fujita ve Takewaki, 2010). Şekil 3.3. kritik etkinin birkaç bant sınırlı aralıkta tanımlanmasını göstermektedir. Eğer kritik etki birkaç aralıkta incelenecekse bu dikdörtgen altındaki kalan alanların toplamı dikkate alınarak hesaplamalar yapılır. Kritik etki yöntemi haricinde yer hareketinin spektral güç yoğunluk fonksiyonunun

modellenmesinde Kanai (1957) ve Tajimi (1960) spektrumu da yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. El Centro (NS) depremi için kritik bir bant sınırlı beyaz gürültü etkisi



Şekil 3.3. Kritik etkinin birkaç bant sınırlı aralıkta tanımlanması

3.5 İvme ve Deplasman Kontrolü İçin Optimizasyon

Bu çalışmada i . katın mutlak ivmelerinin karesel ortalaması (f_1) ve i . katın deplasmanlarının karesel ortalaması (f_2) amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonları ve optimizasyon kısıtları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$f_1(c_{d1}, c_{d2}, \dots, c_{dN}, k_{d1}, k_{d2}, \dots, k_{dN}, m_{d1}, m_{d2}, \dots, m_{dN}) = \sigma_{AAi}^2 \quad (3.25)$$

$$f_2(c_{d1}, c_{d2}, \dots, c_{dN}, k_{d1}, k_{d2}, \dots, k_{dN}, m_{d1}, m_{d2}, \dots, m_{dN}) = \sigma_{Di}^2 \quad (3.26)$$

Optimizasyon kısıtları,

$$0 \leq m_{di} \leq \bar{m}_d \quad (3.27)$$

$$0 \leq \sum_i^N m_{di} \leq \bar{m}_d \quad (3.28)$$

$$0 \leq c_{di} \leq \bar{c}_d \quad (3.29)$$

$$0 \leq k_{di} \leq \bar{k}_d \quad (3.30)$$

olarak sıralanabilir. Burada $\bar{c}_d$ TMD sönüm katsayısının üst sınırı, $\bar{k}_d$ TMD rijitlik katsayısının üst sınırı, $\bar{m}_d$ TMD kütesinin üst sınırıdır. Son yıllarda geliştirilen pek çok güçlü optimizasyon yöntemi mevcuttur. Bu çalışmada MTMD parametrelerinin optimizasyonu için genetik algoritma tabanlı “Differential Evolution” yöntemi kullanılmıştır.

3.6 Sayısal Örnek

Bu bölümde MTMD’lerin optimum tasarımı için bir yöntem önerilmiştir. Optimum tasarımıyla kastedilen, bütün katlarda var olduğu düşünülen sönümleyicilerin kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin tanımlanan yapı davranışlarını minimize edecek şekilde en uygun değerlerinin bulunmasıdır. Kütle veya rijitliğin herhangi bir sönümleyicide sıfır veya sıfıra yakın bulunması o kattaki TMD’nin kaldırılması anlamına geldiğinden, amaçlanan yöntem TMD’nin düşeydeki yerleşim lokasyonlarını da ortaya çıkarmaktadır.

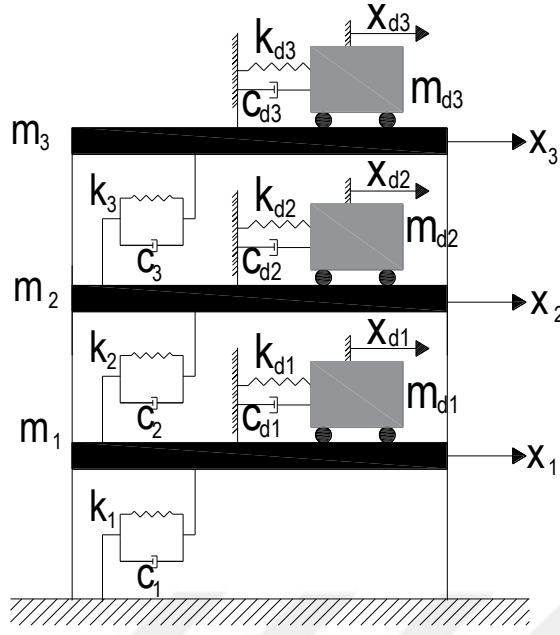
En üst katın ivmelerinin karesel ortalaması (f_1) ve en üst katın katın deplasmanlarının karesel ortalaması (f_2) amaç fonksiyonları “Differential Evolution (DE)” algoritması ile minimize edilerek optimum TMD parametreleri ve katlara yerleşimi belirlenmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliğini doğrulamak amacıyla, literatürde Rana ve Soong (1998)’un yaptığı çalışma örnek model olarak alınmış, mevcut çalışmadan elde edilen bulgularla kıyaslanmıştır. Frans ve Arfiadi (2015) aynı problemi ele almıştır. Bu üç

çalışmanın sonucunda bulunan tasarımlar, El Centro (NS), Kobe (NS) ve Loma Prieta (LGP 000) depremleri altında test edilmiştir. Son kat deplasmanlarının zamana bağlı değişimi, son kat ivmelerinin zamana göre değişimi, katların pik deplasmanları, katların pik mutlak ivmeleri, katlar arası pik rölatif deplasman oranı (IDR), katlardaki deplasmanların karesel ortalamalarının karekökü (Deplasman RMS) ve kattaki ivmelerin karesel ortalamalarının karekökü (İvme RMS) gibi davranış bulguları karşılaştırılmıştır. Beyaz gürültü olarak modellenen Spektral Güç Yoğunluk (PSD) fonksiyonu depremin yoğunluğunu gösteren bir ifadedir. Ayrıca depremin frekans içeriği de önemli bir husustur.

Şekil 3.4’de görülen 3 katlı bir kayma çerçevesi modeli Rana ve Soong (1998)’un çalışmalarından alınarak, burada önerilen yöntem optimum sönümleyici tasarımı için kullanılmıştır. Şekil 3.4’de görülen üç katlı kayma çerçevesinde her bir katın rijitliği $k_i = 1000 \text{ N/m}$ ($i=1, 2, 3$) ve her bir katın kütlesi $m_i = 10 \text{ kg}$ ($i=1, 2, 3$) olarak alınmıştır. Sönüm matrisi C_s ise aşağıda belirtildiği gibidir (Rana ve Soong, 1998).

$$C_s = \begin{bmatrix} 1.246 & 0.176 & 0.097 \\ 0.176 & 1.343 & 0.272 \\ 0.097 & 0.272 & 1.519 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Yapının doğal frekansları her bir mod için $\omega_{si} = \{4.45, 12.47, 18.02\} \text{ rad/s}$, ($i=1, 2, 3$) olarak hesaplanmıştır. Enerji limiti $\bar{S} = 0.553 \times 2 \text{ m}^2/\text{s}^4$, genlik limiti $\bar{s} = 0.066 \times 2 \text{ m}^2/\text{s}^3$ olarak alınmıştır (Takewaki, 2002). Frekans bant genişliği $\Omega = \bar{S}/2\bar{s} = 4.2 \text{ rad/s}$ ’dir. Bant genişliğine göre frekans aralığı alt ve üst sınır limiti yapının 1. mod doğal frekansı için $\omega_{L1} = 2.35 \text{ rad/s}$, $\omega_{u1} = 6.55 \text{ rad/s}$, 2. mod doğal frekansı için $\omega_{L2} = 10.37 \text{ rad/s}$, $\omega_{u2} = 14.57 \text{ rad/s}$ olarak seçilmiştir. Bu aralıklarda 1. ve 2. mod frekans aralığı dikkate alınarak PSD fonksiyonu beyaz gürültü olarak tanımlanarak $S_g(\omega) = 0.066 \text{ m}^2/\text{s}^3$ alınmış, diğer aralıklarda sıfır olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.4. TMD'li üç katlı kayma çerçevesi modeli

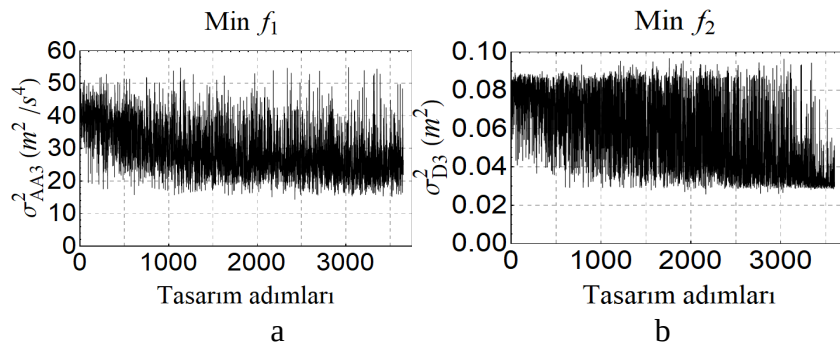
Burada $\bar{c}_d$ TMD sönüm parametresinin üst sınırı, $\bar{k}_d$ TMD rijitlik parametresinin üst sınırı, $\bar{m}_d$ her bir TMD kütesinin üst sınırıdır. TMD kütesinin alt sınır değeri sıfır, üst sınırı değeri $\bar{m}_d = 0.6$ kg ve toplam kütlelerin üst sınırı yine 0.6 kg'dır. Sönüm katsayılarının alt limiti değeri sıfır ve üst limit değeri $\bar{c}_d = 1$ Ns/m'dir. Her bir TMD'nin rijitliğinin alt limit değeri sıfır, üst limit değeri, $\bar{k}_d = 22$ N/m'dir. En üst katın ivmelerinin karesel ortalaması olan amaç fonksiyonu f_1 ve en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması olan amaç fonksiyonu f_2 DE optimizasyon yöntemi kullanılarak minimize edilmiştir. f_1 minimizasyonu neticesinde sönüm parametreleri $c_{d1} = 0.167$ Ns/m, $c_{d2} = 2.7 \times 10^{-6}$ Ns/m, $c_{d3} = 0.28$ Ns/m, rijitlik parametreleri $k_{d1} = 19.37$ N/m, $k_{d2} = 3.85 \times 10^{-6}$ N/m, $k_{d3} = 8.594$ N/m, kütle parametreleri ise $m_{d1} = 0.127$ kg, $m_{d2} = 3.11 \times 10^{-6}$ kg, $m_{d3} = 0.451$ kg olarak hesaplanmıştır. Görüleceği üzere c_{d2} , k_{d2} , m_{d2} değerleri neredeyse sıfıra yakın değerler çıkmıştır. Söz konusu bu durum 2. kata TMD yerleştirilmeyeceğini göstermektedir. Hesaplamalarda kütle veya rijitlik parametrelerinden birisinin sıfıra yakın çıkması o kattaki TMD'nin yerleştirilmemesi gerektiğini gösterir. f_2 minimizasyonu neticesinde kütle parametreleri yaklaşık $m_{d1} = m_{d2} = 0$ kg ve $m_{d3} = 0.6$ kg'dır. Bu sonuçtan da anlaşılabacağı üzere f_2 minimizasyonu neticesinde TMD sadece en üst kata yerleştirilmiştir. En üst kata yerleştirilen TMD'nin sönüm katsayısı değeri $c_{d3} = 0.442$ Ns/m, rijitliği ise $k_{d3} = 11.09$ N/m olarak

hesaplanmıştır. Hesaplanan optimum TMD parametrelerinin değerleri ve katlara yerleşimi Çizelge 3.1’de ve Şekil C1’de gösterilmiştir. Çizelge 3.1’de gösterilen Frans ve Arfiadi (2015)’nin sonuçlarında üçüncü kat için bulunan değerler iki adettir. Onların çalışmasında tepeye birbirinden bağımsız iki ayrı optimum sönümleyici yerleştirilmiştir. Diğer çalışmalarda her kata tek bir sönümleyici düşünülmüştür.

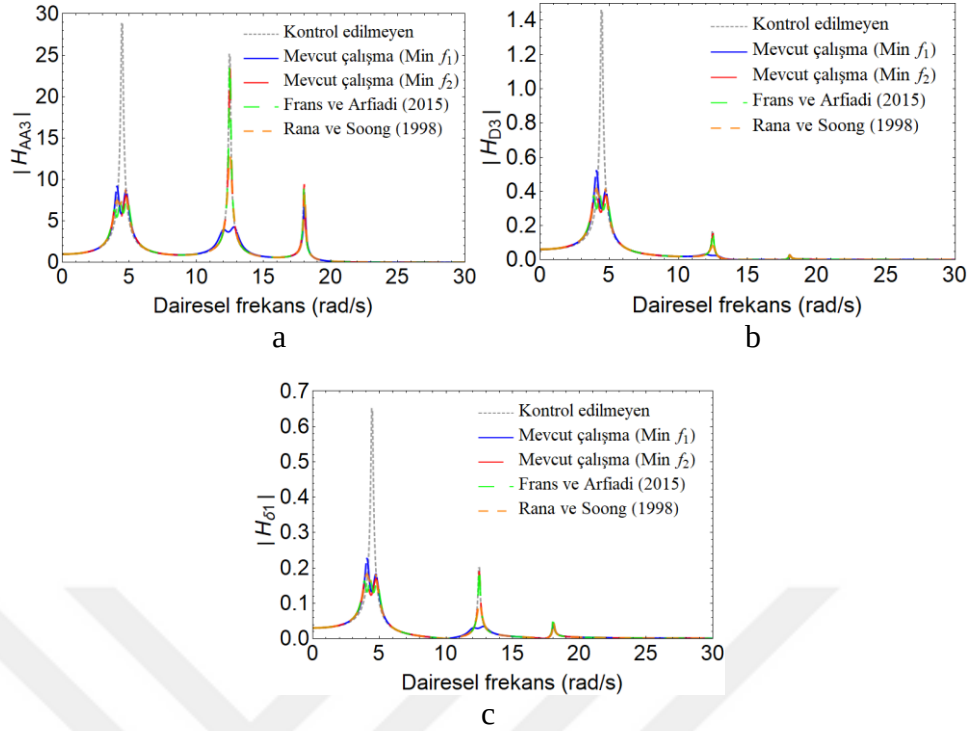
Optimizasyon esnasında amaç fonksiyonunun tasarım adımlarına göre değişimi Şekil 3.5’de görülmektedir. Optimizasyon neticesinde 3. katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonunun büyüklükleri $|H_{AA3}(\omega)|$, 3. katın deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D3}(\omega)|$ ve 1. kat görel deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta1}(\omega)|$ Şekil 3.6’de görülmektedir. Şekilden de anlaşılaçağı gibi MTMD kat deplasman ve ivmelerinin büyüklüklerini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu grafikten anlaşılaçağı üzere önerilen yöntemin 2. modun kontrolünde de son derece etkilidir.

Çizelge 3.1. MTMD parametreleri ve katlara yerleşimi

Parameteler	TMD Lokasyonu	Mevcut Çalışma ($Min f_1$)	Mevcut Çalışma ($Min f_2$)	Frans ve Arfiadi (2015)	Rana ve Soong (1998)
m_{d3} (kg)	Üçüncü Kat	0.451	0.6	0.2875- 0.2875	0.5
k_{d3} N/m		8.594	11.09	4.6399- 5.94	9.11
c_{d3} (Ns/m)		0.28	0.442	0.1231-0.1487	0.43
m_{d2} (kg)	İkinci Kat	-	-	-	0.075
k_{d2} N/m		-	-	-	11.53
c_{d2} (Ns/m)		-	-	-	0.07
m_{d1} (kg)	Birinci Kat	0.127	-	-	-
k_{d1} N/m		19.37	-	-	-
c_{d1} (Ns/m)		0.167	-	-	-

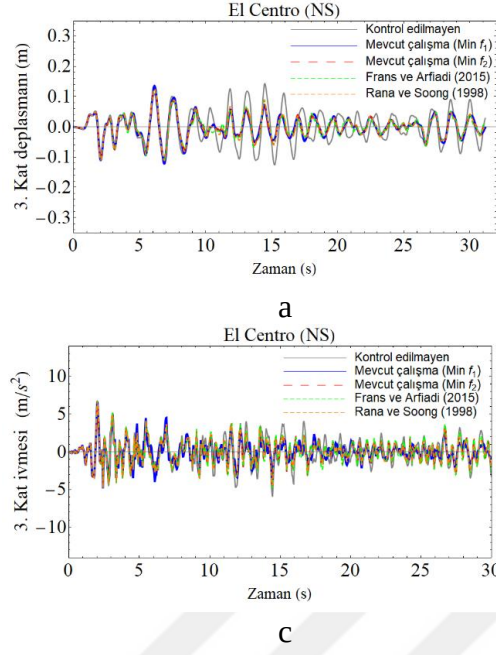


Şekil 3.5. f_1 (a) ve f_2 (b) amaç fonksiyonlarının optimizasyon esnasındaki tasarım adımlarına göre değişimi



Şekil 3.6. En üst katın mutlak ivmesinin transfer fonksiyonun büyüklüğünün $|H_{AA3}(\omega)|$ frekans davranışı (a) En üst katın deplasmanın transfer fonksiyonun büyüklüğünün $|H_{D3}(\omega)|$ frekans davranışı (b) 1. kat göreceli deplasmasının transfer fonksiyonunun büyüklüğünün $|H_{\delta1}(\omega)|$ frekans davranışı (c)

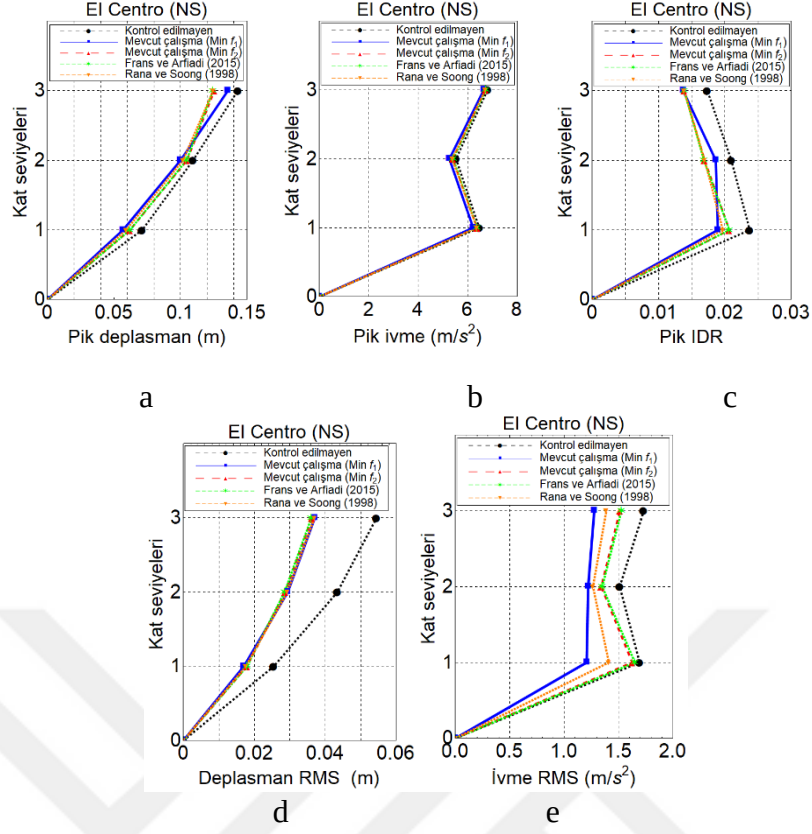
Bulunan sonuçların test edilmesi için El Centro depremi ivme kaydı altında hesaplanan tepki değerleri ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması Çizelge 3.2’de özetlenmiştir. Çizelgeden anlaşılabacağı gibi önerilen yöntemle göre bulunan tasarımlar El Centro (NS) depremi altında oldukça iyi performans göstermiştir. Bütün katlar için davranış değerleri ayrı ayrı incelenmiş bazen birinci amaç fonksiyonuna göre olan tasarım daha iyi performans gösterirken bazen de diğer amaç fonksiyonuna göre olan tasarımın performansı daha iyi olmuştur. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldıklarında ivme deplasman ve rölatif deplasman oranları açısından önerilen yöntemin sonuçları oldukça iyidir. Şekil 3.7’de katların deplasman ve ivmelerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 3.8’de mutlak pik deplasmanlarının, mutlak pik ivmelerinin, rölatif deplasman oranının (IDR), deplasmanların karesel ortalamalarının karekökünün (RMSD) ve ivmelerin karesel ortalamalarının karekökünün (RMSD) katlara göre değişimi görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi El Centro (NS) deprem kaydı etkisi altında çoklu ayarlı kütle sönümleyicisi (MTMD), yapı performansını son derece olumlu etkilemiş, kıyaslanan çalışmalarla benzer sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 3.7. El Centro (NS) deprem kaydı için 3. kat deplasmanının zamana göre değişimi (a) 3. kat ivmesinin zamana göre değişimi (b)

Çizelge 3.2. Zaman tanım alanında hesap sonuçları ve karşılaştırmalar

	Tepkiler	Kat no	Kontrol edilmeyen	Mevcut Çalışma (Min f_1)		Mevcut Çalışma (Min f_2)		Frans ve Arfiadi (2015)		Rana ve Soong (1998)	
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
El Centro (NS)	Pik deplasman (m)	3	0.1430	0.1355	5.20	0.1253	12.33	0.1244	12.96	0.124	12.91
		2	0.1094	0.1000	8.59	0.1048	4.19	0.1045	4.50	0.1018	6.92
		1	0.0712	0.0568	20.29	0.0620	12.92	0.0620	12.94	0.059	17.03
	Pik mutlak ivme (m/s²)	3	6.8064	6.6545	2.23	6.7270	1.16	6.7348	1.05	6.7112	1.40
		2	5.5322	5.2615	4.89	5.3976	2.43	5.4144	2.13	5.3792	2.77
		1	6.4689	6.2254	3.76	6.9791	1.39	6.3834	1.32	6.3720	1.50
	Pik IDR	3	0.0173	0.0137	21.00	0.0139	41.62	0.0139	20.11	0.0138	20.23
		2	0.0210	0.0186	11.19	0.0169	19.41	0.0168	19.71	0.0169	19.22
		1	0.0237	0.0189	20.29	0.0207	30.64	0.0207	12.94	0.0197	17.03
	Deplasman RMS (m)	3	0.0545	0.0370	32.02	0.0363	33.40	0.0361	33.76	0.0369	32.16
		2	0.0434	0.0294	32.26	0.0287	33.87	0.0285	34.31	0.0293	32.47
		1	0.0255	0.0171	33.09	0.0178	30.17	0.0179	29.76	0.0176	31.09
	İvme RMS (m/s²)	3	1.7333	1.2777	26.28	1.513	10.74	1.5277	11.86	1.3885	19.89
		2	1.5114	1.2213	19.19	1.342	11.21	1.3510	10.61	1.2658	16.25
		1	1.6953	1.2077	28.76	1.6268	6.12	1.6512	2.60	1.4116	16.73

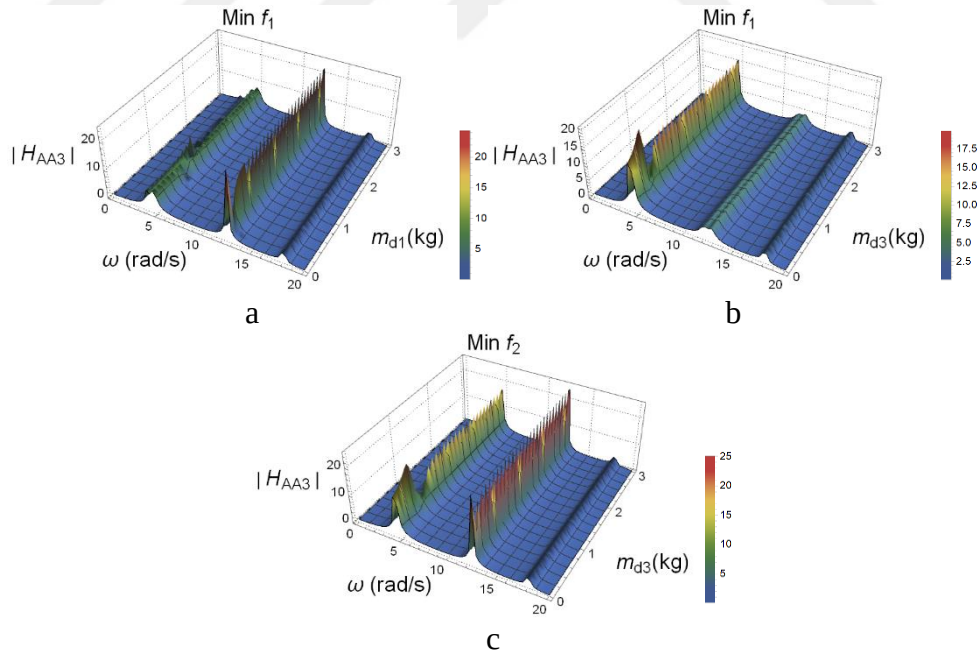


Şekil 3.8. El Centro (NS) depremi için pik kat deplasmanları (a), pik mutlak kat ivmeleri (b) pik kat (IDR)'leri (c), deplasmanların karesel ortalamalarını kare kökleri (RMSD) (d) mutlak İvmelerin karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSA) (e)

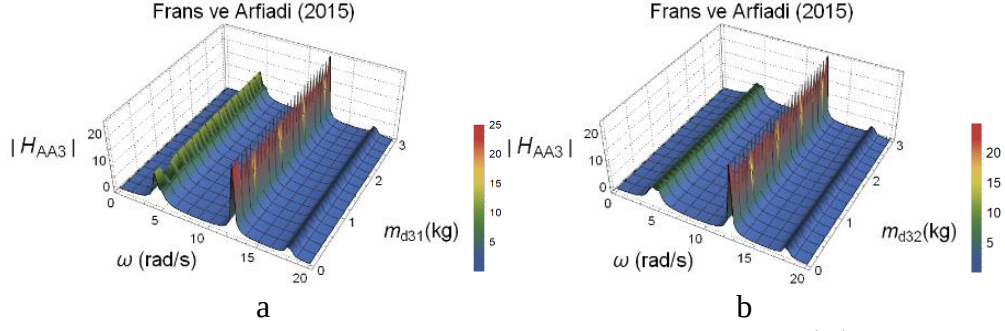
Şekil C.2 ve Şekil C.3'de Kobe (NS) ve Loma Prieta (LGP 000) deprem kaydı altında son katın deplasman ve ivmelerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Diğer dinamik davranış parametrelerinin değişimleri ve karşılaştırmalar Şekil C.4 ve Şekil C.5'de görülmektedir. Büyük ivme değerlerine sahip bu depremler kullanıldığında, görüldüğü üzere optimum MTMD yapı tepkilerini azaltmada son derece etkili olmuştur. Bulunan optimum tasarımların sonuçları literatürdeki yöntemlere göre bulunan tasarımların sonuçları ile oldukça uyumludur.

f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun büyüklüğünün frekansa ve TMD'nin kütlesine göre değişimi Şekil 3.9'da, frekansa ve rijitliğine göre değişimi Şekil 3.12'de, frekansa ve sönüm katsayısına göre değişimi Şekil 3.15'de üç boyutlu olarak görülmektedir. TMD 3. kata yerleştirildiği durum için 1. doğal frekansa karşılık gelen $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun pik değerini önemli ölçüde azaltırken, TMD'nin 1. kata yerleştirildiği durum için 2. doğal frekansa karşılık değeri önemli ölçüde azaltmıştır. Benzer durum Şekil C.6, Şekil C.9 ve Şekil C.12'de $|H_{D3}(\omega)|$ transfer

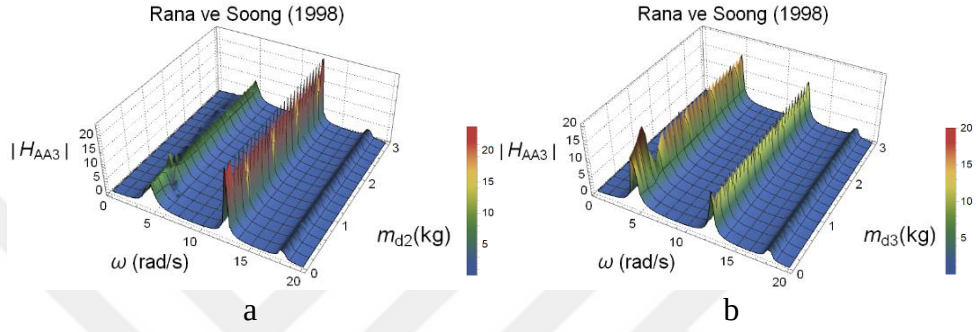
fonksiyonu içi de görülmektedir. TMD'nin parametreleri optimum değere yaklaştığında transfer fonksiyonları minimum değerine ulaşmaktadır. Transfer fonksiyonunu azaltmada f_1 minimizasyonu ile yapılan tasarım 1. doğal frekansları ve 2. doğal frekanslarına karşılık gelen değerleri azaltmada f_2 'ye göre daha etkili olmuştur. Şekil 3.10, Şekil 3.13 ve Şekil 3.16'de görülen Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması göz önüne alındığında, TMD'lerin her ikisi de yapının 3. katına yerleştirilmiştir. Burada m_{d31} ve m_{d32} parametreleri 3. kata yerleştirilen iki farklı sönümleyicinin kütlelerini ifade etmektedir. Tasarlanan her iki TMD yapının 1. doğal frekansına karşılık gelen $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun pik değerini düşürmede etkili olurken, yapının 2. doğal frekansına karşılık gelen pik değeri düşürmede çok etkili olmadığı görülmüştür. Benzer durum Şekil C.7, Şekil C.10 ve Şekil C.13'de gösterilen $|H_{D3}(\omega)|$ 'ün değişimi için de gözlenmiştir. Rana ve Soong (1998)'un çalışmasında $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi Şekil 3.11'de, rijitliğine göre değişimi Şekil 3.14'de, sönümüne göre değişimi Şekil 3.17'de görülmektedir. Yapının 2. ve 3. katına yerleştirilen TMD'lerin her ikisi de yapının 1. doğal frekansı ve 2. doğal frekansına karşılık gelen $|H_{AA3}(\omega)|$ değerlerini azaltmada etkili olmuştur. Benzer durum Şekil C.8, Şekil C.11 ve Şekil C.14'de gösterilen $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun değişimi için de gözlenmiştir.



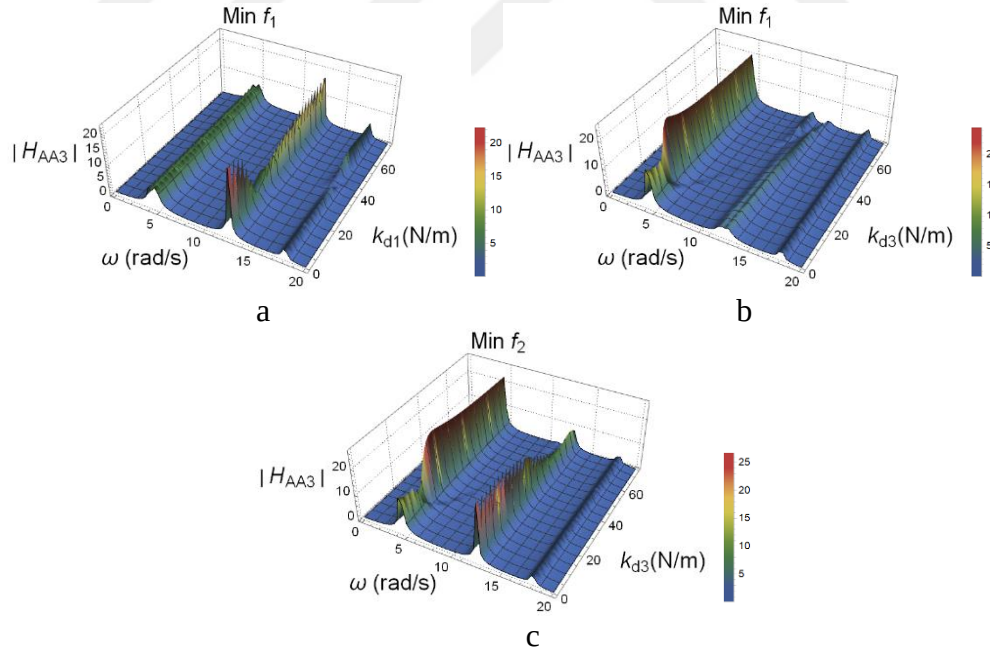
Şekil 3.9. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



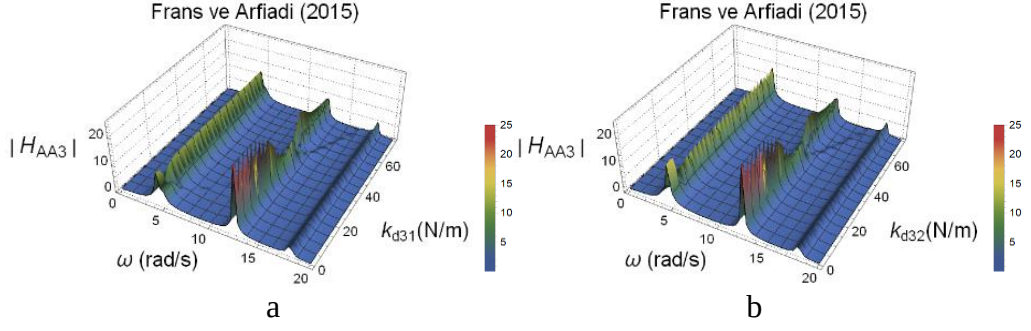
Şekil 3.10. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



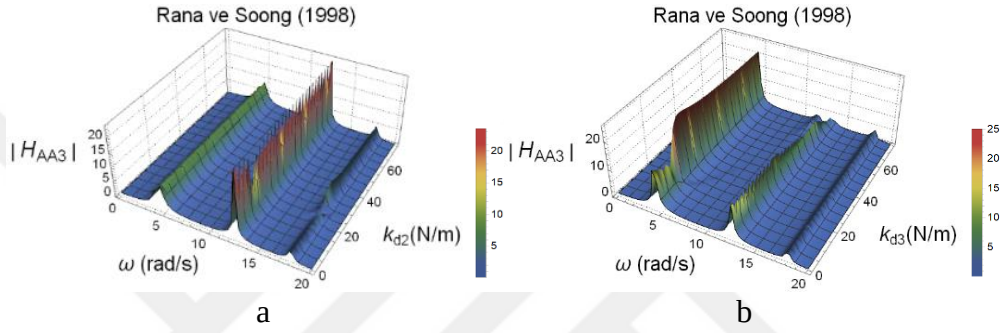
Şekil 3.11. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



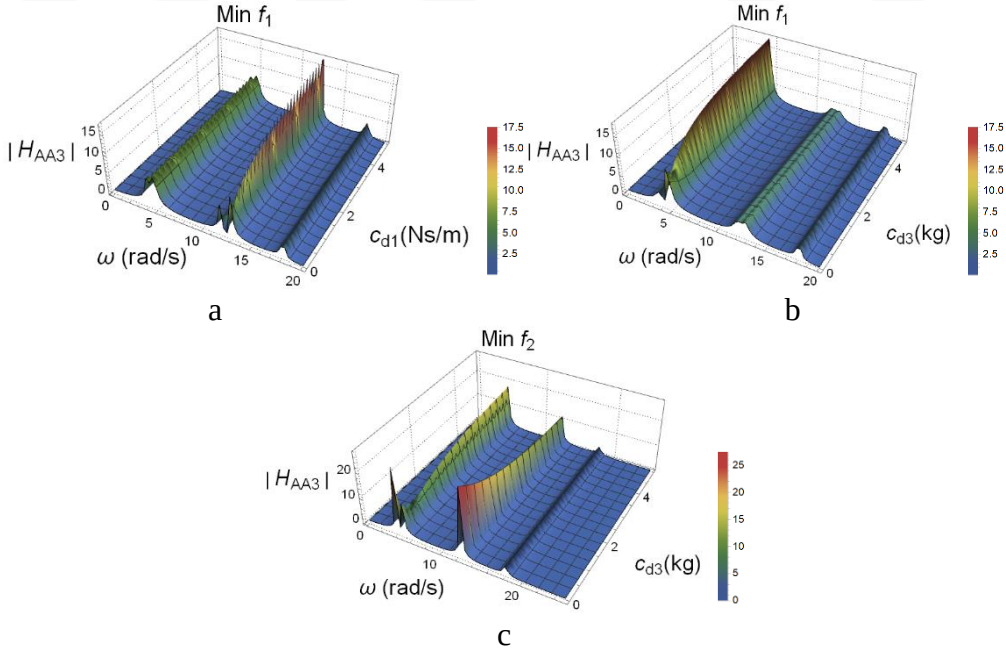
Şekil 3.12. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



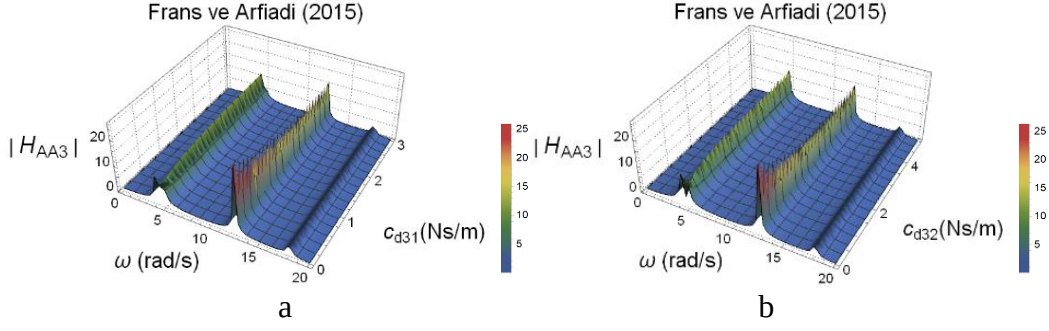
Şekil 3.13. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $|H_{AA3}(\omega)|$ 'ün TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



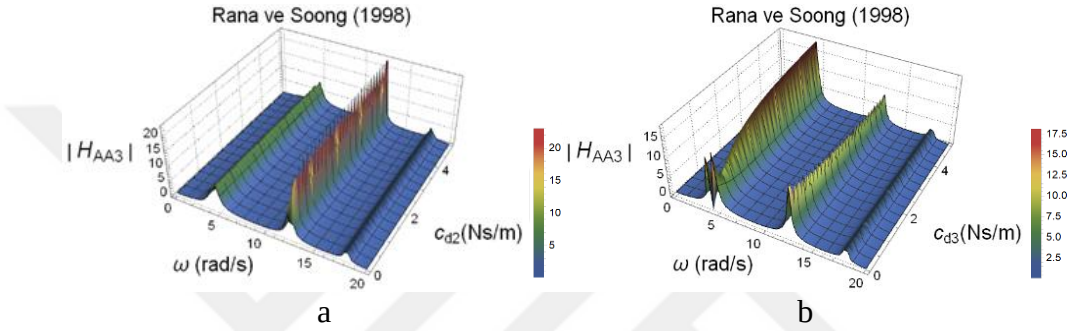
Şekil 3.14. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



Şekil 3.15. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



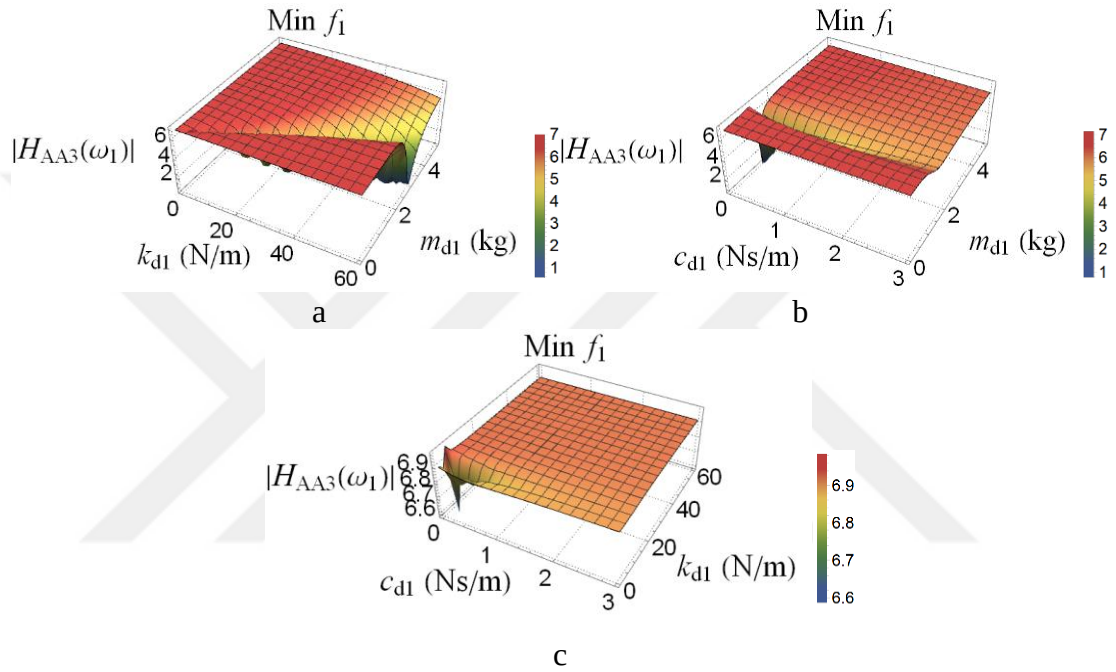
Şekil 3.16. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $|H_{AA3}(\omega)|$ 'ün TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



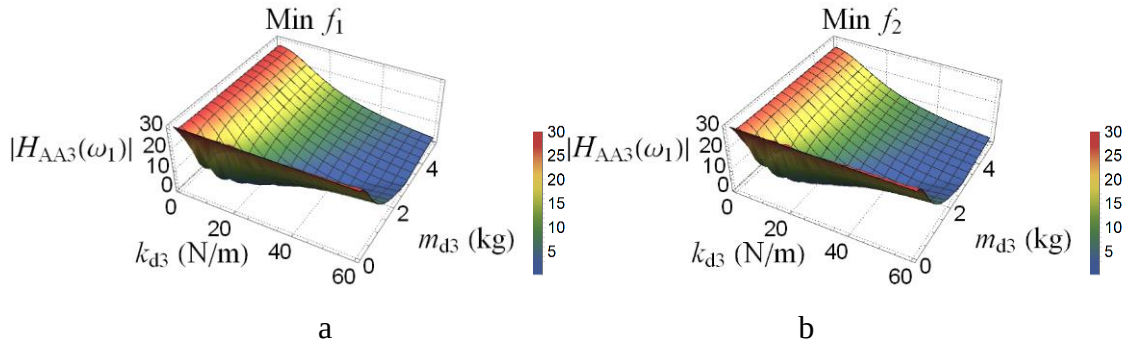
Şekil 3.17. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $|H_{AA3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi

Şekil 3.18 ve Şekil C.15'de f_1 amaç fonksiyonu için TMD'nin 1. kata yerleştirildiği durumda $|H_{AA3}(\omega_1)|$ ve $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonlarının 1. kata yerleştirildiği durum için TMD'nin rijitliğine ve kütlesine, TMD'nin sönüm katsayısına ve kütlesine, TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi görülmektedir. TMD'nin 1.kata yerleştirilmesi yapının 1. doğal frekansına karşılık gelen amaç fonksiyonlarının pik değerlerini azaltabilmesi için üst sınır değerlerinden daha yüksek değerler alması gerekmektedir. Şekil 3.19-3.21' de ve Şekil C.16-C.18'de f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için TMD'nin 3. katta olduğu durumda $|H_{AA3}(\omega_1)|$ ve $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun rijitliği ve kütlesine, sönüm katsayısı ve kütlesine, sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi görülmektedir. Yapının 1. doğal frekansına karşılık gelen $|H_{AA3}(\omega_1)|$ ve $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonları değerleri 3. kata yerleştirilen TMD'lerin optimum olduğu yerlerde minimum değerlerini almıştır. Burada da anlaşılabacağı gibi 3. kata yerleştirilen optimum tasarlanmış TMD yapının 1. doğal frekansın etkilerini azaltmada son derece etkili olmuştur. f_1 minimizasyonu ile tasarlanan ve 1. kata yerleştirilen TMD için Şekil 3.22'de ve Şekil C.19 $|H_{AA3}(\omega_2)|$ ve $|H_{D3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun

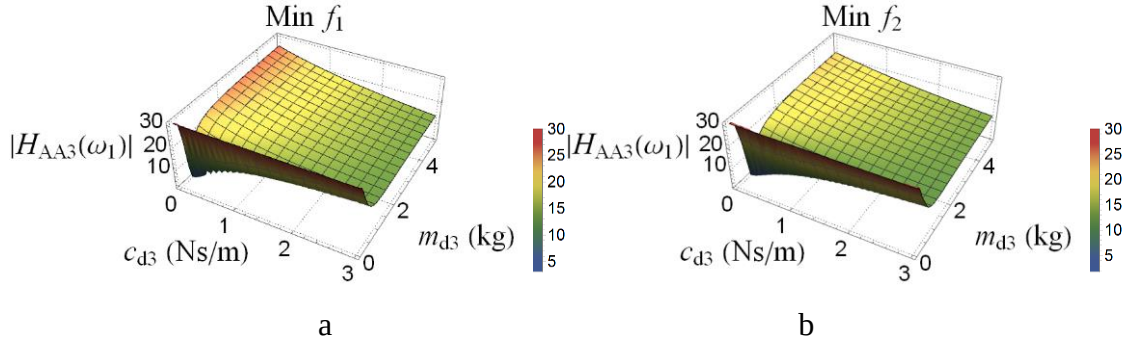
TMD'nin rijitliğine ve kütlesine, TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine, TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi görülmektedir. Anlaşılabacağı üzere 1. kata yerleştirilen TMD 2. doğal frekansın etkilerini azaltmada son derece etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.23-3.25' de ve Şekil C.20-C.22'de f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için TMD'nin 3. katta olduğu durumda üç boyutlu değişimi görülmektedir. TMD parametrelerinin üst sınırları göz alındığında yapının 2. doğal frekansının etkilerini azaltmada çok etkili olmadığı görülmektedir.



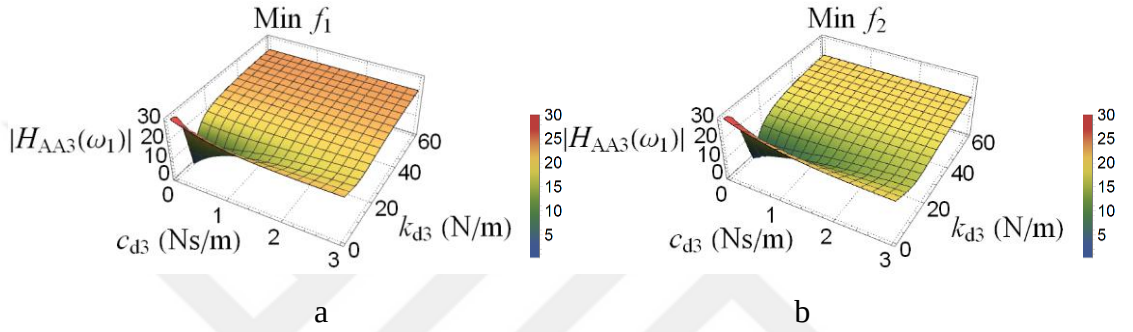
Şekil 3.18. $|H_{AA3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısına ve kütlesine (b) TMD'nin sönüm katsayısına ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi



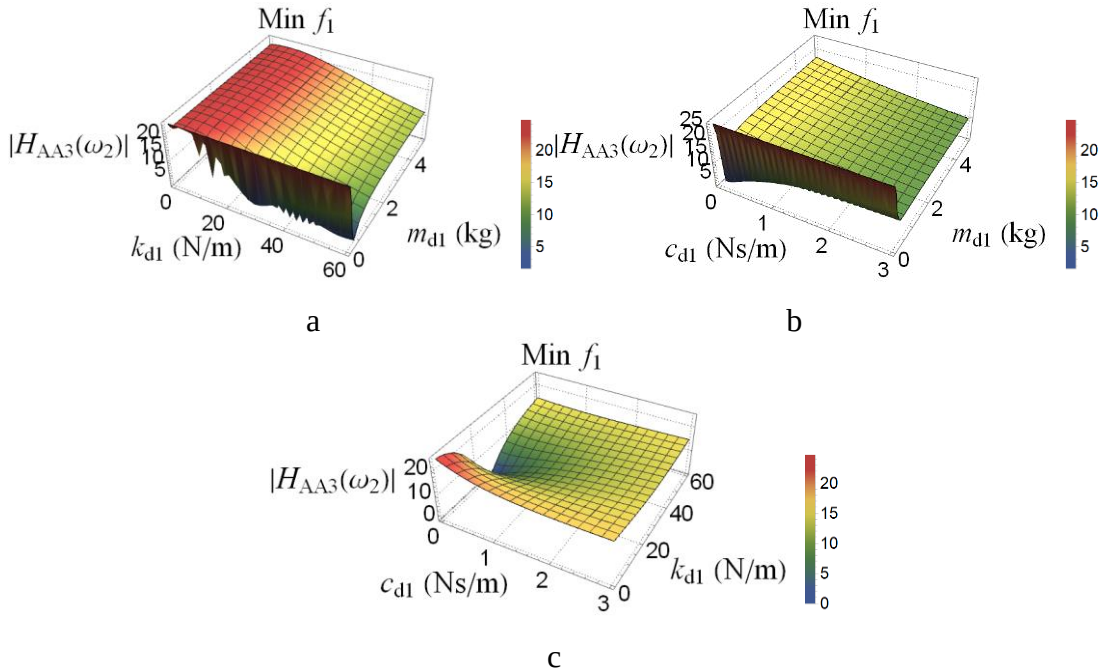
Şekil 3.19. $|H_{AA3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



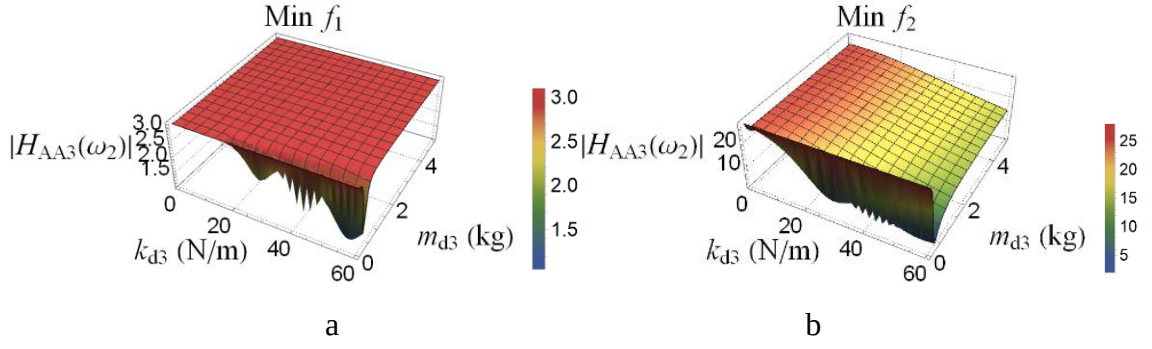
Şekil 3.20. $|H_{AA3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütleğine göre üç boyutlu değişimi



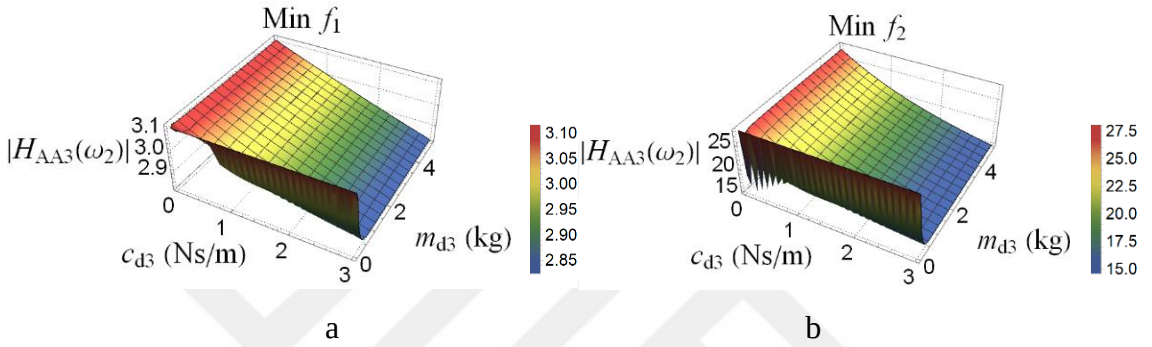
Şekil 3.21. $|H_{AA3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi



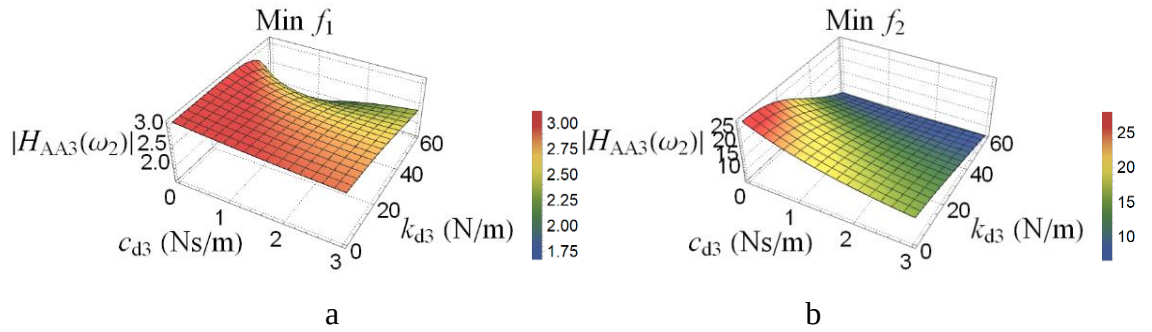
Şekil 3.22. $|H_{AA3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütleğine (a) TMD'nin sönüm katsayısı ve kütleğine (b) TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi



Şekil 3.23. $|H_{AA3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



Şekil 3.24. $|H_{AA3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



Şekil 3.25. $|H_{AA3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi

Bu bölümde çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin (MTMD) katlara optimum yerleşimi, miktarları ve parametrelerinin optimizasyonu için bir tasarım yöntemi geliştirilmiş ve üç katlı bir kayma çerçevesi modeli üzerinde uygulanmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Optimum çoklu ayarlı kütle tasarımını gerçekleştirmek için en üst katın ivmelerinin karesel ortalaması ve en üst katın deplasmanlarının karesel ortalaması

amaç fonksiyonları olarak seçilmiş ve kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin optimum değerleri elde edilmiştir. MTMD parametrelerini optimize edebilmek için stokastik bir optimizasyon algoritması olan “Differential Evolution” algoritması kullanılmıştır.

- TMD’lerin katlara düşey yöndeki optimum yerleşimi ve kütlelerin miktarlarının optimize edilmesi literatürde çok yaygın olarak çalışılmamıştır. Bu sebeple tasarım aşamasında MTMD’nin katlara en uygun yerleşimi belirlenirken bulunan optimum TMD rijitlik veya kütlesi çok küçük olduğunda o kattaki TMD elimine edilerek optimum TMD yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda TMD kütlesi de optimize edilerek kütle miktarı belirlenmiştir.
- Çok serbestlik dereceli bir sistemde çoklu ayarlı kütle sönümleyicisi tasarımı yapılırken denklemlerin ayrıklaştırılarak sistemin tek serbestlik dereceli sisteme indirgenmesi sadece tek bir modun kontrolünü sağlamaktadır. Bu sebeple birden çok modun kontrolünü sağlamak, MTMD parametrelerini daha iyi optimize edebilmek ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin katlara en uygun şekilde yerleşimini sağlamak amacıyla sistem indirgenmeden çözümler yapılmıştır. Ayrıca bu yöntem TMD’lerin katlara yerleşimine ve miktarlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Bu sayede birden çok modun kontrolü de sağlanmıştır.
- Yöntemin geçerliliğini test etmek amacıyla yapı-MTMD sistemi El Centro (NS), Kobe (NS) ve Loma Prieta (LGP 000) deprem kayıtları vasıtasıyla zaman tanım alanında hesap yapılarak literatürdeki birkaç çalışma ile karşılaştırılmış ve oldukça tutarlı sonuçlara ulaşılmıştır. Dahası f_1 minimizasyonu ile yapılan tasarım ivme davranışının azaltılması konusunda karşılaştırılan yöntemlere göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Dış etkinin tanımlanmasında olasılıksal kritik etki yöntemi bu bölümde çoklu ayarlı kütle sönümleyicisi tasarımında kullanılmıştır. Kritik etki bölgeleri yapının 1. ve 2. Doğal frekanslarına karşı gelen bölgeleri kapsayacak şekilde hesaplanmıştır.
- Önerilen yöntemle tasarlanan MTMD yapının tepkilerini önemli ölçüde azaltmıştır.
- Yapıdaki oluşacak hasar göz önüne alındığında elastik olmayan yapılarda deplasman veya deformasyonun azaltılması önemli bir husustur. Yapıdaki ivme

ve deformasyonların azaltılması ise yapısal olmayan elemanların hasar görmemesi açısından önemlidir.



BÖLÜM IV

SONUÇLAR

Deprem ve rüzgar gibi dinamik dış etkiler altındaki yapıları korumak için son yıllarda ortaya çıkan sönüm sistemlerinden biri olan ayarlı kütle sönümleyicilerin optimum tasarlanması zaruridir. Genellikle yapının tepesinde bulunan tek bir ayarlı kütle sönümleyicisinin optimum tasarımı literatürde gösterilen bazı yöntemlerle yapılabilmektedir. Genellikle yapının birinci mod davranışının baskın olduğu ve bu modun kontrolünün önemli olmasından dolayı yöntemlerin çoğu bu temel moda odaklanmaktadır. Bu tip sönümleyicilerin temel tasarım parametreleri olarak rijitlik ve sönüm katsayıları optimum olarak hesaplanmakta, kütle genellikle tasarımcı tarafından yapı kütlelerinin belli bir yüzdesi olarak seçilmektedir. Dış dinamik etkilerin belirsiz doğası düşünüldüğünde yapının dikkate alınan davranışının çeşidi, tasarım parametrelerindeki kısıtlar ve bu sönümleyicilerin çoklu kullanımı optimum tasarım problemini daha karmaşık hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasında tekli ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin optimum tasarımı için bir yöntem geliştirilmiş olup çalışmanın bulguları aşağıdaki maddelerde özetlenmiştir.

- Çok serbestlik dereceli kayma çerçevelerinde hareketin denkleminde Fourier dönüşümü uygulanarak frekans tanım alanına geçilmiş ve yapısal davranışın tarifi frekansa bağlı olarak ifade edilmiştir. Transfer fonksiyonları ile sönümleyicili yapı modelinin deplasman ve ivme davranışları ifade edilerek yönetici denklemler türetilmiştir.
- İlk olarak yapının tepesine yerleştirilen tek bir ayarlı kütle sönümleyicinin optimum tasarımı araştırılmıştır. Amaç fonksiyonları transfer fonksiyonlarına bağlı olarak yapının tepe deplasmanı, mutlak ivmesi ve 1. kat rölatif deplasmanı seçilerek minimize edilmiştir. Tasarım değişkenleri olan TMD'nin kütle, rijitlik ve sönüm katsayılarının alt ve üst sınır değerleri tasarım kısıtlamaları olarak optimizasyon problemine dahil edilmiştir.
- Deplasman ve ivme tabanlı olarak tanımlanan optimum TMD tasarımı için genetik algoritma esaslı bir yöntem olan “Differential Evolution” algoritması optimizasyon aşamasında kullanılmıştır. Direk bir optimizasyon yöntemi olan bu

algoritma doğrusal veya doğrusal olmayan problemlerde oldukça etkili olduğu bilinmekte olup, TMD optimizasyonunda da oldukça güçlü olduğu yapılan analizlerle ve yapılan karşılaştırmalarla gözlenmiştir.

- Tekli ayarlı kütle sönümleyiciler optimize edildikten sonra yapının dinamik davranış parametrelerini incelemek amacıyla, yakın ve uzak fay deprem etkileri altında test edilerek, ortaya koyulan optimum tasarımların diğer yöntemlerle de karşılaştırılarak etkinliği gösterilmiştir.
- Tekli sönümleyici için geliştirilen üç farklı amaç fonksiyonu da ortaya etkili TMD tasarımları çıkarmıştır. Uygulamacı mühendisler tasarım hedeflerine uygun amaç fonksiyonunu seçerek burada geliştirilen yöntemi kullanarak optimum TMD tasarımı yapabilirler.
- TMD optimizasyonunda literatürdeki yöntemlerin genellikle baskın olan birinci moda odaklanması diğer modların etkilerini göz ardı etmektedir. Bu çalışmada birden fazla moda odaklanabilen ve belirli bir frekans bandını dikkate alan bir optimum TMD tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem kullanılarak istenilen herhangi bir moda odaklanan TMD tasarımı yapılabileceği gibi birden fazla mod davranışını kapsayacak daha geniş bir frekans bandı dikkate alınabilecektir. Dahası kritik dış etki de tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmaktadır. Bu durum daha etkili tasarımları ortaya çıkarabilecektir.
- Çalışmanın üçüncü bölümünde çoklu TMD'lerin optimum tasarımları araştırılmıştır. Burada optimum tasarımla kastedilen her kata bir adet yerleştirilmek üzere düşünülen TMD'lerin kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin optimizasyonudur. Kütle ve rijitlik parametresinin optimizasyon sonunda sıfır ya da sıfıra yakın çıkması, o kata sönümleyici eklenmemesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla sönümleyicilerin boyut optimizasyonu ile beraber, katlarda var olup olmaması da belirlenerek bir lokasyon optimizasyonu da otomatik olarak yapılmaktadır.
- Çoklu TMD optimizasyonunda transfer fonksiyonları ile ifade edilen tepe deplasmanı ve tepe mutlak ivmesi davranışları minimize edilerek optimum tasarımlar bulunmuştur. Kısıtlama fonksiyonları olarak TMD'lerin kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin alt ve üst sınır değerlerine göre seçilirken, tekli TMD tasarımına ek olarak toplam sönümleyici kütlelerinde de bir üst sınır dikkate alınmıştır.

- Literatürde gösterilen pek çok yöntemde, sönümleyicinin kütle parametreleri gerek tekli gerekse çoklu sönümleyici durumunda tasarımcı tarafından pratik kısıtlardan dolayı belli değerler (yapı kütlelerinin % 5'i veya daha altı) seçilerek, rijitlik ve sönüm parametreleri optimize edilir. Burada geliştirilen optimum TMD tasarım yönteminde kütle parametresi de hem tekli hem de çoklu sönümleyici durumunda optimize edilmiştir. Tek bir ayarlı kütle sönümleyicinin yapının tepesinde olması durumunda optimum kütle değeri, kütle sınırının üst değerine yakınsadığı sayısal analizlerde gözlenmiştir. Tek bir TMD'nin yerinin değişmesi, pratik uygulamada kullanılacak sönüm ve rijitliğin uygun sınırlarda tutulması ve daha büyük bir kütle kullanabilme imkanının artması gibi değişken durumlarda kütlelerin optimum değerinin bulunması önemli olabilecektir.
- Çoklu ayarlı kütle sönümleyicisi tasarımında kütlelerin yapının kütlelerinin belli bir oranına göre seçimi birden fazla kütle olduğu için zordur. Dolayısıyla sönümleyici kütlelerinin de tasarım parametresi olarak seçilmesi kaçınılmazdır. Böyle durumlarda tek bir moda odaklanan ve kütleleri başlangıçta seçerek tasarım yapan yöntemler geçersiz kalacaktır. Bu çalışmada geliştirilen optimum çoklu ayarlı kütle sönümleyici yöntemi kütleleri de tasarım parametreleri içine dahil ederek optimize etmektedir.
- Çoklu sönümleyici tasarımı bölümünde, dış etkiyi tanımlamak için olasılıksal kritik etki yöntemi kullanılarak birden fazla modu kontrol edebilecek optimum tasarımlar farklı iki amaç fonksiyonu için geliştirilmiştir.
- Geliştirilen optimum TMD tasarımları deprem etkileri altında ve frekans uzayında literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılmış ve oldukça uyumlu ve etkili oldukları sayısal analizler ile gösterilmiştir.
- Bu tez çalışmasında önerilen optimum ayarlı kütle sönümleyicisi yönteminin inşaat mühendisliği yapı sistemleri dışında da titreşim etkisi altındaki pek çok mühendislik tasarımında kullanılması mümkündür. Yöntem pek çok farklı sisteme adapte edilebilir. Dahası birden fazla çeşit pasif kontrol elemanının beraber kullanılması durumunda geliştirilen yöntemin uyarlanması oldukça kolay olacaktır.

KAYNAKLAR

Abachizadeh, M. and Tahani, M., “An ant colony optimization approach to multi-objective optimal design of symmetric hybrid laminates for maximum fundamental frequency and minimum cost”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37 (4), 367–376, 2009

Abe, M., and Fujino, Y., “Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(8), 813-835, 1994.

Aydın, E., Yapıların deprem davranışlarının iyileştirilmesi için sönümleyicilerin ve çelik çapraz elemanların optimum yerleşimi, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 2, 2005.

Almazan, J.L., Espinoza, G. and Aguirre, J.J., “Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers”, *Engineering Structures*, 42, 308–328, 2012.

Arfiadi, Y. and Hadi, M.N.S., “Optimum placement and properties of properties of tuned mass damper s using hybrid genetic algorithms, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 1(1), 167-187, 2011.

Bektas G. and Nigdeli S.M., “Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 71, 68-84, 2013.

Bektas, G. and Nigdeli, S.M., “Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search”, *Engineering Structures*, 33(9), 2716-2723, 2011.

Bishop, R.E.D. and Welbourn, D.B., “The problem of the dynamic vibration absorber”, *Engineering*, 174- 769, London, 1952.

Biswar, P.P., Sugantan, P.N, Wu, G. and Amaragunta, G.A.J., “Parameter estimation of solar cells using datasheet information with the application of an adaptive differential evolution algorithm”, **Renewable Energy**, 132, 435-438, 2019.

Carneiro, R. B., Avilla, S.M. and De Brito, J.VL., “parametric study on multiple tuned mass damper s using interconnected masses” **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 8 (1), 187–202, 2008

Celep, Z., Yapı Dinamiği 5. Baskı, **Damga Dağıtım**, İstanbul, 2014.

Cetin H., Aydin, E. and Ozturk, B., “Optimal damper allocation in shear buildings with tuned mass dampers and viscous dampers “ , **International Journal of Earthquake and Impact Engineering (IJEIE)**, 2 (2), 89-120, 2017.

Champion, B. And Strzebonski, A., Constrained optimization, **Wolfram Mathematica Tutorial Collection**, USA, 2008.

Chen, G., “Multi-stage tuned mass damper”, **Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering**, Acapulco, Mexico, Paper No.1326, 1996.

Chen, G. and Wu J., “Optimal placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 127(9), 1054-1062, 2001.

Chen, G. and Wu, J., “Experimental study on multiple tuned mass dampers to reduce seismic responses of a three-storey building structure”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 32 (5), 793-810, 2003.

Cheung, Y.L., Wongn, W.O., “H2 optimization of a non-traditional dynamic vibration absorber for vibration control of structures under random force excitation”, **Journal of Sound and Vibration**, 330(6), 1039–1044, 2011.

Cheung, Y.L., Wong, W.O. and Cheng., L., “Optimization of a hybrid vibration absorber for vibration control of structures under random force excitation”, ***Journal of Sound and Vibration***, 332(3), 494–509, 2013.

Chopra, A.K., Dynamics of Structures, 2th ed., ***Prentice Hall International Inc***, New Jersey, 2007.

Clough, R.W. and Penzien, J., Dynamics of Structures, 2th ed., ***McGraw-Hill, Inc***, Newyork,1993.

Connor, J.J and Klink B.S.A., Introduction to Motion Based Design, ***Computational Mechanics Publication***, Boston, USA, pp. 145-196, 1996.

Daniel, Y., Lavan, O., “Gradient based optimal seismic retrofitting of 3D irregular buildings using multiple tuned mass damper s”, ***Computers and Structures.***, 139, 84 97, 2014.

Den Hartog, J.P., Mechanical Vibrations, ***4thed. Mc Graw-Hill***, New York,1956.

Dorigo, M. and Stutzle T., “Ant Colony Optimization”, ***MIT Press***, Cambridge, MA, 2004.

Falcon, K.C., Stone, B J., Simcock, W.D. and Andrew, C., “Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping”, ***Journal of Mechanical Engineering Science***, 9(5), 374-381,1967.

Farshidianfar, A. and Soheili, S., “Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction”, ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering***, 5, 114–22, 2013.

Fourie, P.C. and Groenwold, A.A., “The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization”, ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 23(4), 259–267, 2002

Frans, R. and Arfiadi, Y., “Designing optimum locations and properties of MTMD systems”, *Procedia Engineering* 125, 892 – 898, 2015.

Fujino, Y. and Abe, M., “Design formulas for tuned mass dampers based on A perturbation technique”, Earthquake *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(10), 833-854, 1993.

Fujita, K., Moustafa, A. and Takewaki, I., “Optimal Placement of viscoelastic dampers and supporting members under variable critical excitations”, *Earthquakes and Structures*, 1, (1), 43-67, 2010.

Garrido H., Curadelli, O. and Ambrosini, D., “Improvement of tuned mass damper by using rotational inertia through tuned viscous mass damper”, *Engineering Structures*, 56, 2149-2153, 2013.

Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison-Wesley*, 1989.

Gómez-Bernal, A., Lecea, M. A. and Juárez-García H., “Empirical attenuation relationship for Arias Intensity in Mexico and their relation with the damage potential”, *Proceedings of the Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 20-28 September, 2012.

Guo, Y.Q. and Chen, W.Q., “Dynamic analysis of space structures with multiple tuned mass dampers”, *Engineering Structures*, 29(12), 3390–3403, 2007.

Hadi, M.N.S. and Arfiadi, Y., “Optimum design of absorber for MDOF structures”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 124 (11), 1272-1280, 1998.

Hussan, M., Rahman, M.S., Sharmin, F., Kim, D., and Do, J., “Multiple tuned mass damper for multi-mode vibration reduction of offshore wind turbine under seismic excitation”, *Ocean Engineering*, 160, 449–460, 2018.

Igusa, T., and. Xu, K., “Vibration control using multiple tuned mass dampers”, ***Journal of Sound Vibration***, 175(4), 491-503,1994.

Ikago, K., Saito, K. and Inoue, N., “Seismic control of single degree of freedom structure using tuned viscous mass damper”, ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics***, 41(3), 453–474, 2012.

Ioi, T. and Ikeda, K., “On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system”, ***Bulletin of JSME***, 21(151), 64-71,1978.

Jacquot, R.G. and Hoppe, D.L., “Optimal Random Vibration Absorber’, ***Journal of Engineering Mechanics Division***, 99(3), 612–616, 1973.

Jangid, R.S. “Dynamic characteristic of structures with multiple tuned mass dampers’’, ***Structural Engineering and Mechanics***, 3(5), 497-509, 1995.

Jangid, R.S. “Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system’’, ***Structural Engineering and Mechanics***, 28(9), 1041-1049, 1999.

Joshi, A.S., and Jangid, R.S. “Optimum Parameters of Multiple Tuned Mass Dampers for base-excited damped systems.’’, ***Journal of Sound and Vibration***, 202(5), 657-667, 1997.

Kanai K., “Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground.’’, ***Bulletin of the Earthquake Research Institute***, The University of, Tokyo; 35, 309–25,1957

Kelly, S.G., “Mechanical vibration, theory and application”, ***Cengage Learning***, USA, 2012.

Kennedy, J, and Eberhart R.C.,” Swarm Intelligence”, ***Morgan Kaufmann Publishers***, 2001.

Kim., S.Y., Lee, C.H., “Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected

to white-noise base acceleration considering practical configurations”, *Engineering Structures* 171, 516–528, 2018.

Lee, C.L., Chen, Y.T., Chung, L.L, and Wang, Y.P., “Optimal design theories and applications of tuned mass dampers”, *Engineering Structures*, 28(1), 43-53, 2006.

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

Lewandowski, R. and Grzymislawskaj, “Dynamic analysis of structures with multiple tuned mass dampers”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(1), 77-86, 2009.

Levy, A.V. and Montalvo, A., “The tunneling algorithm for the global minimization Functions”, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 6(1),15–29,1985.

Li, C. and Liu, Y., “Further characteristics for multiple tuned mass dampers”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(10), 1362-1365, 2002a

Li, C. and Liu, Y., “Active Multiple Tuned Mass Damper for structures under the ground acceleration”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(5), 1041-1052, 2002b.

Li, C., “Optimum multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(4), 897-919, 2002.

Li, C. and Qu, W., “Optimum properties of multiple tuned mass dampers for reduction of translational and torsional response of structures subject to ground acceleration”, *Engineering Structures*, 28(4), 472–494, 2006.

Li, H.N. and Ni, X.L., “Optimization of non-uniformly distributed multiple tuned mass damper”, *Journal of Sound and Vibration*, 308(1-2), 80–97, 2007.

Lin C.C., Lu L.Y., Lin G.L. and Yang T.W., “Vibration control of seismic structures using semi- active friction multiple tuned mass dampers”, *Engineering structures*, 32 (10), 3404–3417, 2010.

Lin, J.L, Tsai, K.C., and Yu, Y.J, “Bi-directional coupled tuned mass dampers for the seismic response control of two-way asymmetric-plan buildings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40, 675-690, 2011.

Lu, Z., Chen, X., Dai, D.Z.K., “Experimental and analytical study on the performance of particle tuned mass dampers under seismic excitation”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46, 697-714, 2017.

Luft, R.W., “Optimal Tuned Mass Dampers for Buildings”, *Journal of the Structural Division*, 105 (12), 2766-2772, 1979.

Luh, G.C. and Lin, C.Y., “Optimal design of truss structures using ant algorithm”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 36(4), 365–379, 2008.

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

Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour, Y., and Majzoup, H., “Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures “, *Journal of Sound and Vibration*, 19(4), 605-625, 2013.

Moon, K.S., “Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance analysis and preliminary design”, *The Structural Design of Tall and special Buildings*, 19(3), 347-366, 2010.

Moustafa, A. and Takewaki, I., “Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (5), 412–422, 2010.

Moutinho, C., “An alternative methodology for designing tuned mass dampers to reduce seismic vibrations in building structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(14), 2059–2073, 2012.

Nagarajaiah, S. and Sonmez, E, “Structures with semi active variable stiffness single/multiple tuned mass dampers”, *Journal of Structural Engineering*,.133(1), 67-77, 2007.

Nemhauser, G.L., Rinnooy Kan, M.J. and Todd (Eds.), “Handbooks in Operations Research and Management Science, vol. 1”, *Optimization, Elsevier Science Publishers*, Amsterdam, 1989.

Newland, D.E., An introduction to Random Vibrations and spectral Analysis, *Longman*, London, 1975.

Ormondroyd, J. and Den Hartog, J.P., “The theory of dynamic vibration absorber”, *Trans. ASME, Applied Mechanics*, 50-7,9-22, 1928.

Peñuñuri, F., Peón-Escalante, R, Villanueva, C., and Pech-Oy, D., “Synthesis of mechanisms for single and hybrid tasks using differential evolution,” *Mechanism and Machine Theory*, 46(10),1335–1349, 2011

Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P. and Chatupote, P., (2003), “Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures”, *Engineering Structures*,.25(1), 39-46, 2003.

Poh’sie, G.H., Chisari, C., Rinaldin, G., Amadio, C. and Fragiaco, M., “Optimal design of tuned mass dampers for a multi-storey cross laminated timber building against seismic loads”, *Earthquake Engng Struct Dyn*, 45(12), 1977–1995, 2016.

Rana, R. and Soong, T.T., “Parametric study and simplified design of tuned mass dampers”, *Engineering Structures*, 20 (3), 193-204, 1998.

- Rao, S.S., Mechanical Vibrations 5th Edition, **Prentice Hall**, Singapore, 2009.
- Ronkkonen, J., Kukkonen, S., and Price, K.V., “Real-parameter optimization with differential evolution”, IEEE Congress on Evolutionary Computation, 506-513 ,2-5 Sept, 2005
- Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung R.M., “A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 26, 617-635, 1997.
- Sakar, A. and Manahor, C.S., “Critical seismic vector random excitations for multiply supported structures”, **Journal of Sound and Vibration**, 212(3), 525–546, 1998.
- Sato, M.G. and Adeli, H., “Tuned mass dampers”, **Archives of Computational Methods in Engineering**, 20(4), 419-431, 2013.
- Schutte, J.F. and. Groenwold, A.A., “Sizing design of truss structures using particle swarms”, **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 25(4), 261–269, 2003.
- Serra, M. and Venini, R., “On some applications of ant colony optimization metaheuristic to plane truss optimization, **Structural and Multidisciplinary Optimization**. 32(6), 499–506, 2006.
- Sgobba, S., and Marano, G.C., “Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behaviour”, **Mechanical Systems and Signal Processing**, 24(6), 1739-1755, 2010.
- Sonmez , E., Deterministic and stochastic responses variable stiffness and damping system and smart tuned mass dampers, PhD Thesis, **Rice University**, Houston, Teksas, s.4, 2009.
- Soong, T.T and Grigoriu, M., “Random vibration of mechanical and structural systems”, **Prentice Hall**, Newyork, 1993.

Soong, T.T. and Dargush, G.F., “Passive energy dissipation systems in structural engineering”, **John Wiley & Sons Ltd.**, Chichester, UK, and New York NY, 1997.

Soto-Brito, R. and Ruiz, S.E., “Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 28 (11), 1255-1271, 1999.

Storn, R., and Price, K. V., “Differential evolution—a simple and efficient the heuristic for global optimization over continuous spaces”, **Journal of Global Optimization**, 11(4), 341–359, 1997.

Tajimi H.A., “Statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake”, **In: Proc. 2nd World Conf. on Earthquake Engineering**, 2, 781–798, 1960.

Takewaki I., “Soil–structure random response reduction via TMD-VD simultaneous use”, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 190(5-7), 677-690, 2000a.

Takewaki, I., “Optimal damper placement for critical excitation”, **Probabilistic Engineering Mechanics**, 15, 317-325, 2000b.

Takewaki, I., “Robust building stiffness design for variable critical excitation”, **Journal of Structural Engineering-ASCE**, 128(12), 1565-1574, 2002.

Takewaki, I., Building control with passive dampers: optimal performance-based design for earthquakes”, **John Wiley & Sons Ltd.**, Singapore, (Asia), 2009.

Takewaki, I., Critical excitation methods in earthquake engineering 2th edition, **Elsevier Science**, USA, 2013.

Thompson, A.G., 1981, “Optimum tuning and damping of a dynamic vibration absorber applied to a force excited and damped primary system”, **Journal Sound and Vibration**, 77(3), 403-415, 1981

Tigli, O.F., “Optimum vibration absorber (tuned mass damper) design for linear damped systems subjected to random loads”, *Journal of Sound and Vibration*, 331(13), 3035–3049, 2012.

Tsai, H. C. and Lin, G. C., “Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(11), 957-973, 1993.

Venter, G., Sobieszczanski-Sobieski, J.,” Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26 (1–2), 121–131, 2004.

Vickery, B.J., Isyumov, N. and Davenport, A.G., “The role of damping, mass and stiffness in the reduction of wind effects on structures”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11(1-3), 285- 294, 1983.

Villaverde, R. and Koyama, L.A, “Damped resonant appendages to increase inherent damping in Buildings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(6), 491-507, 1993.

Wang, J.F. and Lin, C.C., “Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil–irregular building interaction systems” *International Journal of Solids and Structures*, 42(20), 5536–5554, 2005.

Warburton, G.B., “Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(3), 381-401, 1982.

Warburton, G.B., and Ayorinde, E.O, “Optimum absorber parameters for simple systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 8(3), 197-217, 1980.

Warnitchai, P. and Hoang, N., “Optimal placement and tuning of multiple tuned mass dampers for suppressing multi-mode structural response”, *Smart Structures and Systems*, 2(1), 1-24, 2006.

Wen, B., Moustafa, M.A. and Junwu, D., “Seismic response of potential transformers and mitigation using innovative multiple tuned mass dampers”, *Engineering Structures*, 174, 67–80, 2018.

Wong, K. and Johnson, J., “Seismic energy dissipation of inelastic structures with multiple tuned mass dampers”, *Journal of Engineering Mechanics*, 135(4), 265-275, 2009.

Wolfram Research, Mathematica Edition, Version 11.0, **Wolfram Research**, Champaign, Illinois, 2016.

Wu, G., Shen, X., Li, H., Chen, H., Lin, A., Sugantan, P.N, “Ensemble of differential evolution variants”, *Information Science*, 423, 172-186, 2018.

Wu, J., “Seismic performance design and placement of multiple tuned mass dampers in building applications”, *Ph.D. Dissertation, University of Missouri*, Rolla, s. 1-33, U.S.A, 2000.

Xiang, P. and Nishitani, A., “Optimum design and application of non-traditional tuned mass damper toward seismic response control with experimental test verification”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(13), 2199–2220, 2015.

Yamaguchi, H. and Harnpornchai, N., “Fundamental Characteristic of Multiple Tuned Mass Dampers for suppressing harmonically forced oscillations”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(1), 51-62, 1993.

Yang, C.Y., Random Vibrations of structures, **Wiley**, Newyork, 1986.

Yang, J.N., Agrawal A.K., Samali B. and Wu J.C., “Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings”, *Jornal of Civil Mechanics, ASCE*, 130(4), 437-446, 2004.

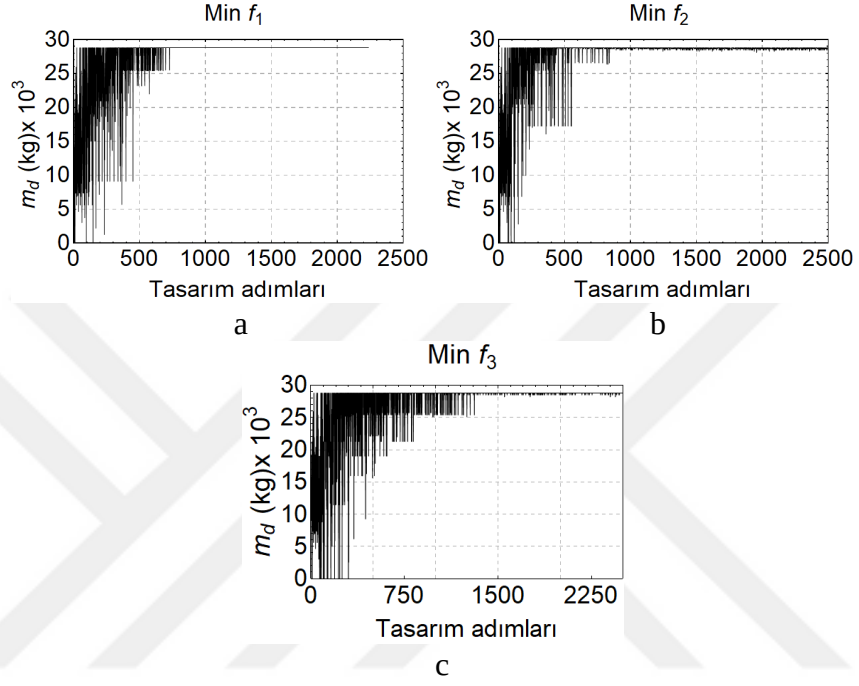
Yang, X.S., Bekdaş, G. and Nigdeli, M.S., “Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering”, ***Modeling and Optimization in Science and Technologies, Springer, International Publishing***, Switzerland, 2016.

Zuo, L. and Nayfeh, S.A., “Optimization of the Individual Stiffness and Damping Parameters in multiple-tuned-mass-damper systems”, ***Journal of Vibration and Acoustics***, 127(1), 77-83, 2005.

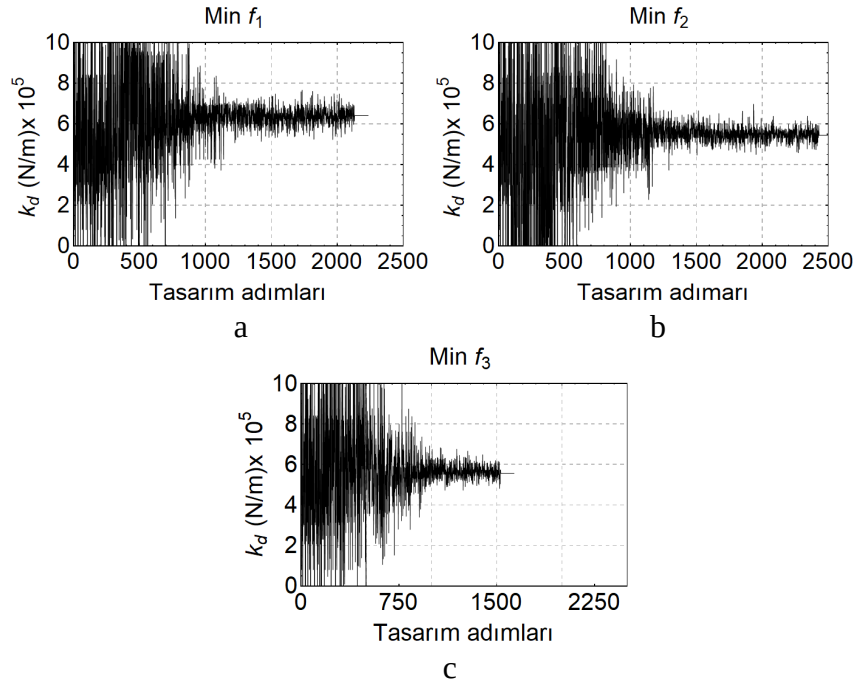


EKLER

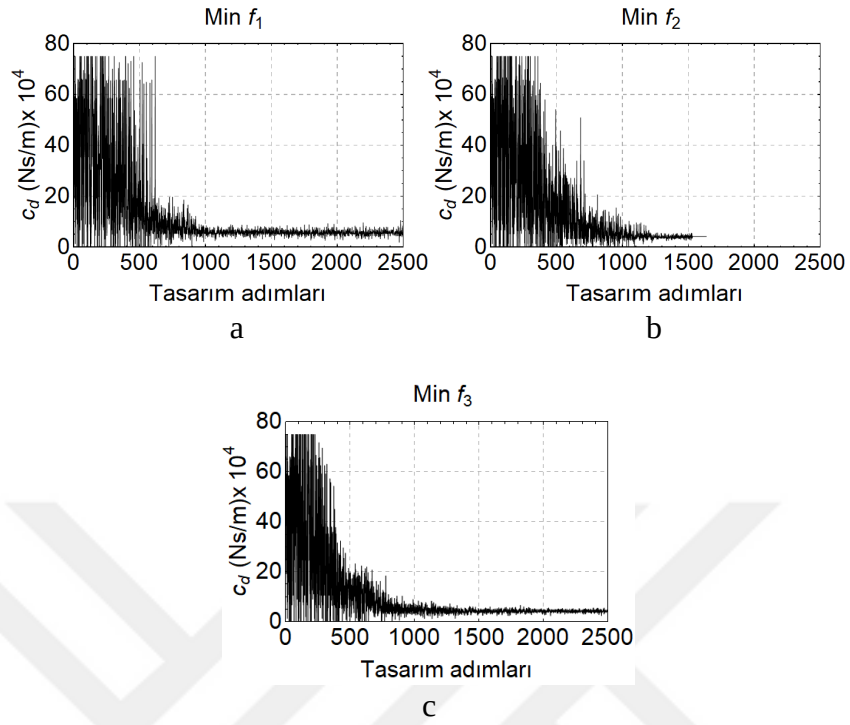
Ek-A



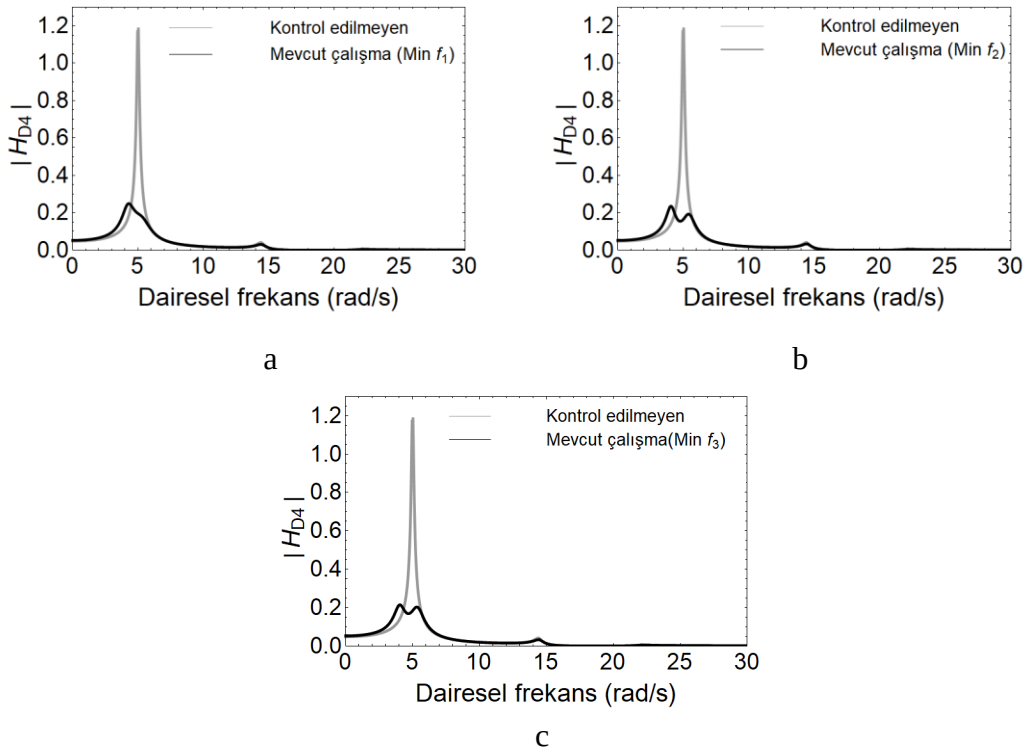
Şekil A.1. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 (c) için, TMD kütlesi m_d ’nin tasarım adımlarına göre değişimi



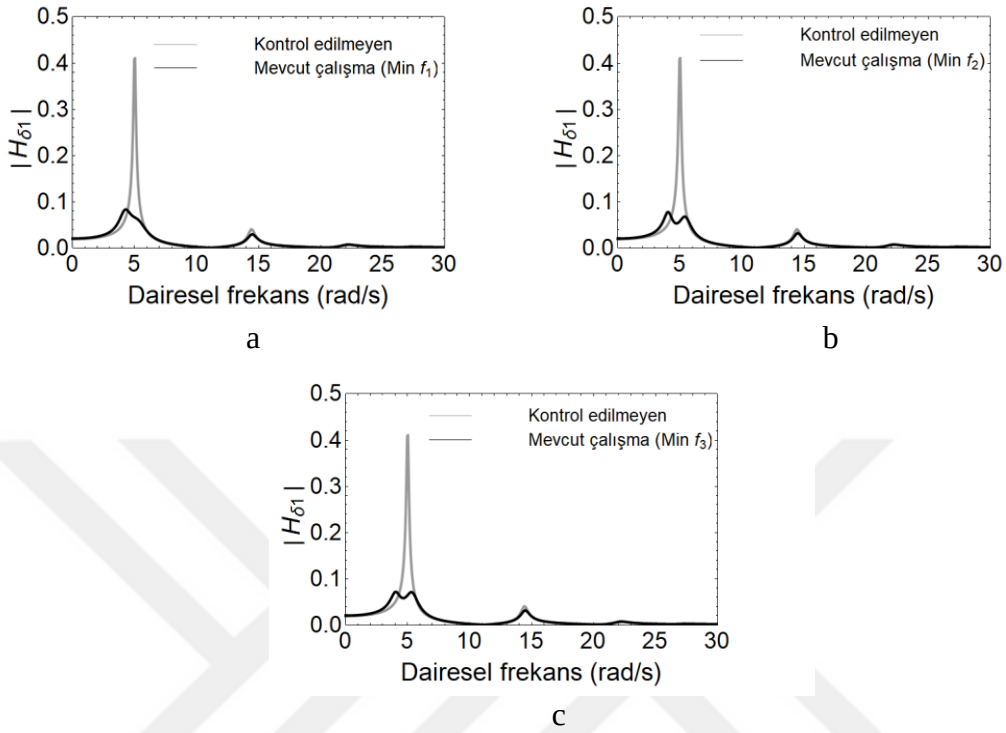
Şekil A.2. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 (c) için, TMD kütle parametresi k_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi



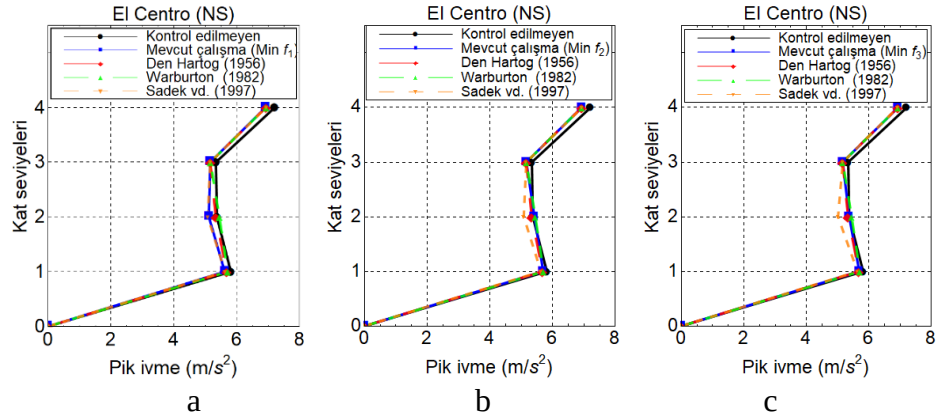
Şekil A.3. Amaç fonksiyonları f_1 (a), f_2 (b), ve f_3 (c) için, TMD'nin kütle parametresi c_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi



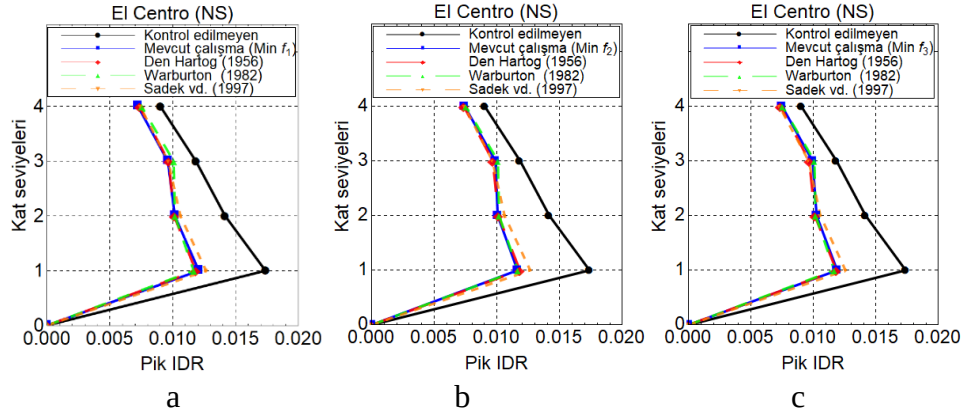
Şekil A.4. f_1 , f_2 ve f_3 transfer fonksiyonları için dördüncü katın deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin değişimi



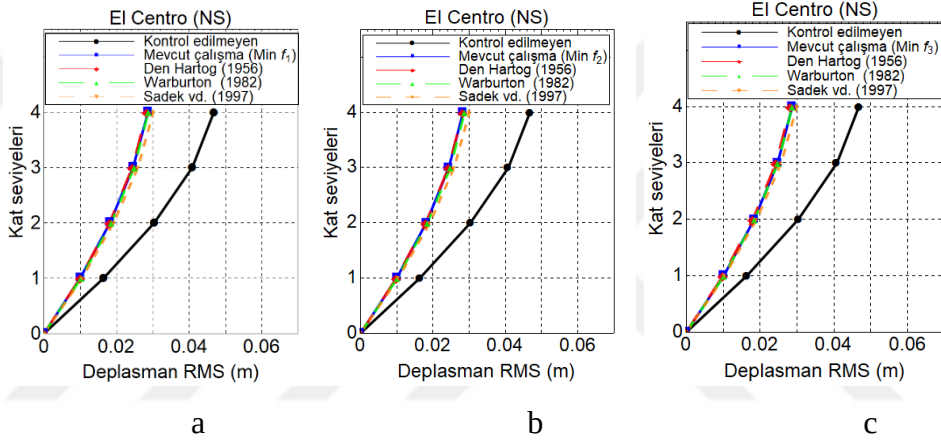
Şekil A.5. f_1 , f_2 ve f_3 transfer fonksiyonları için en alt katın görece deplasmanının transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta 1}|$ 'nin değişimi



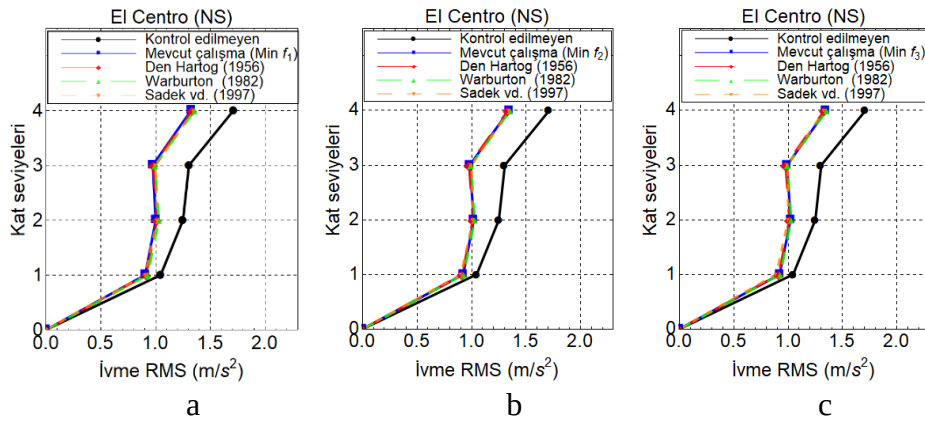
Şekil.A.6. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat ivmelerinin değişimindeki etkisi



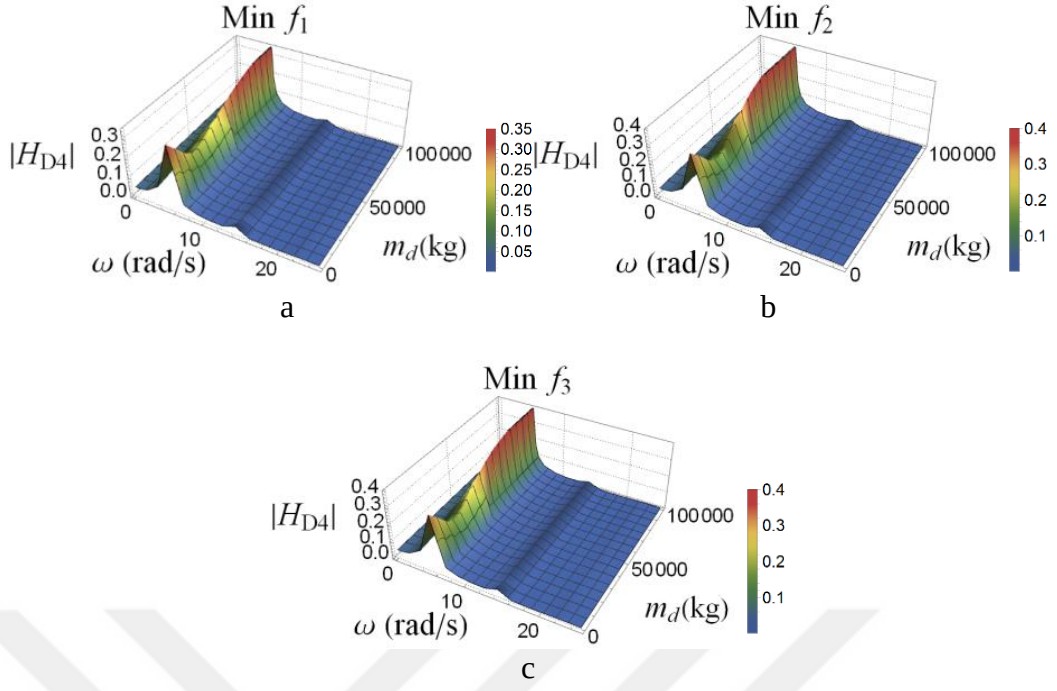
Şekil.A.7. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların katlar arası görece deplasman oranlarının (IDR) değişimindeki etkisi



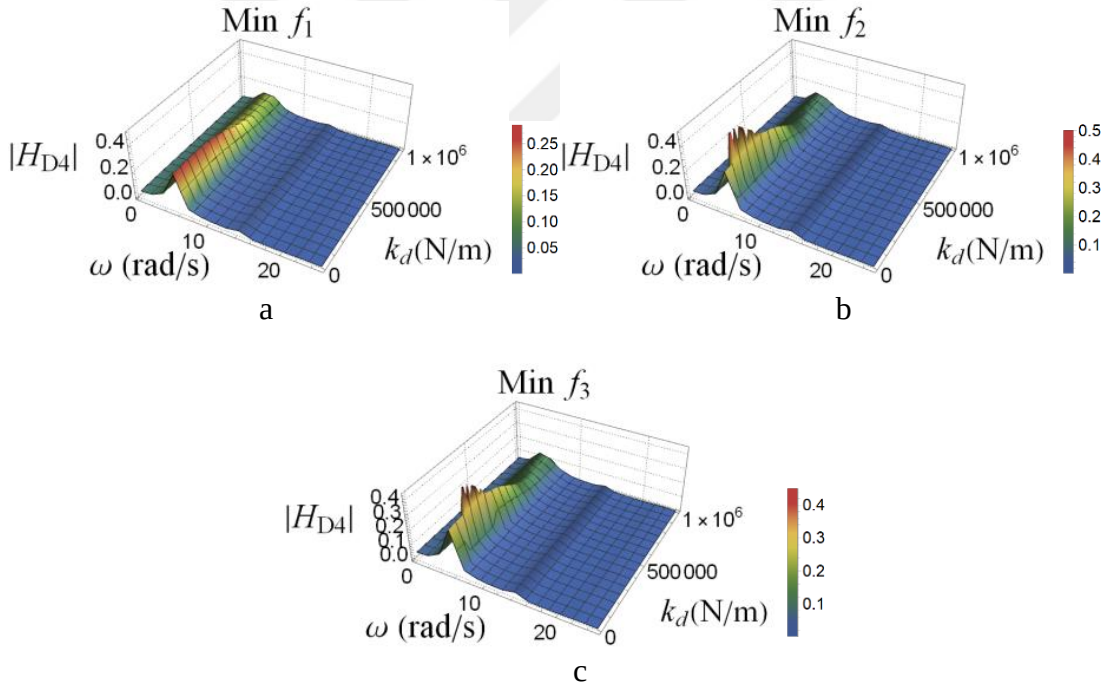
Şekil. A.8. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat deplasmanlarının karesel ortalamalarının karekökü üzerindeki etkisi



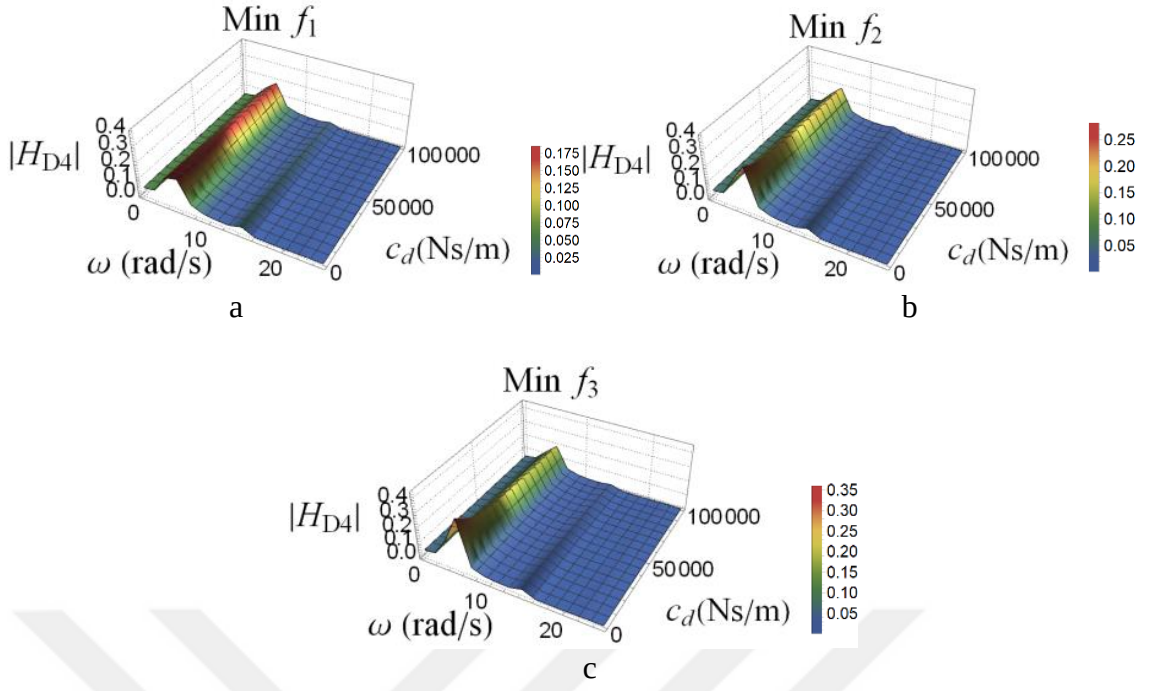
Şekil.A.9. El Centro (NS) depremi altında optimum tasarımların kat ivmelerinin karesel ortalamalarının karekökü üzerindeki etkisi



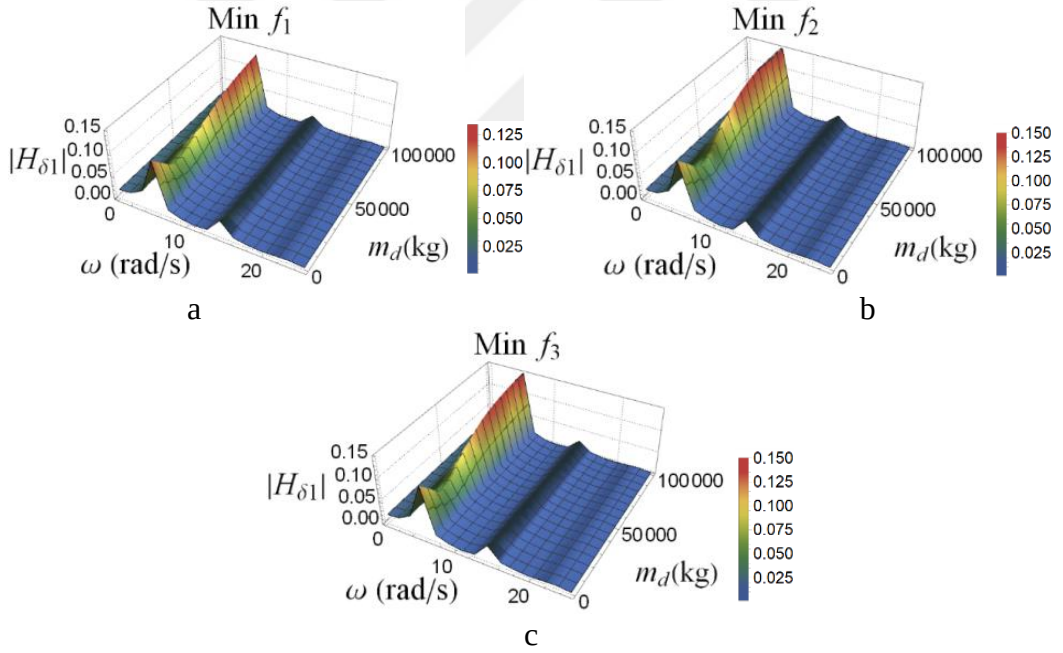
Şekil A.10. Dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi



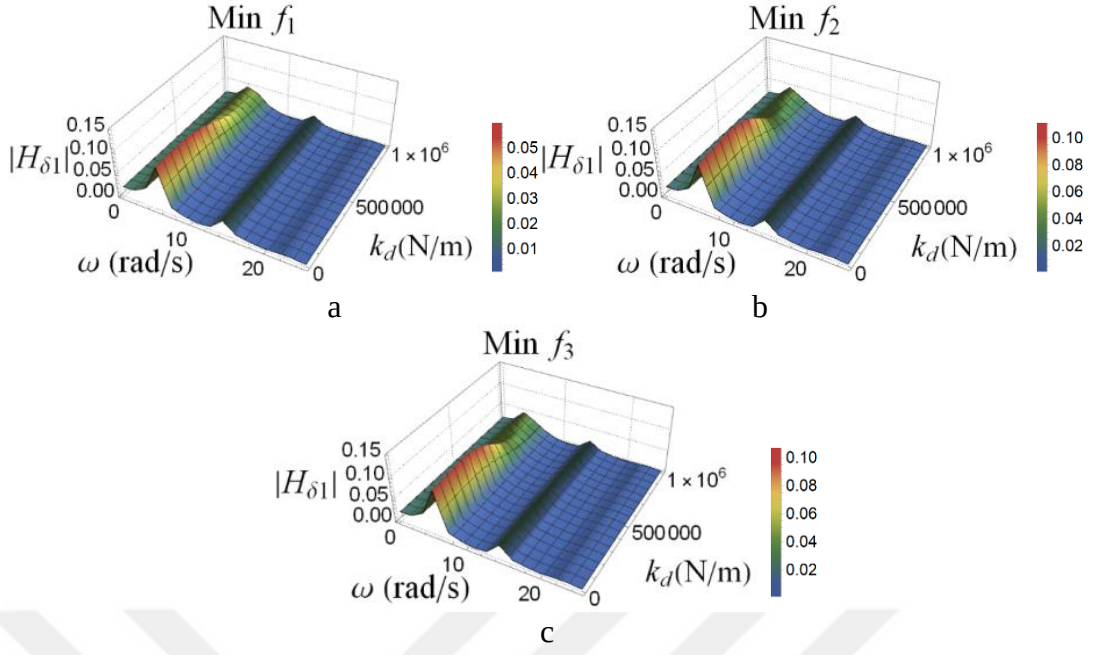
Şekil A.11. Dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi



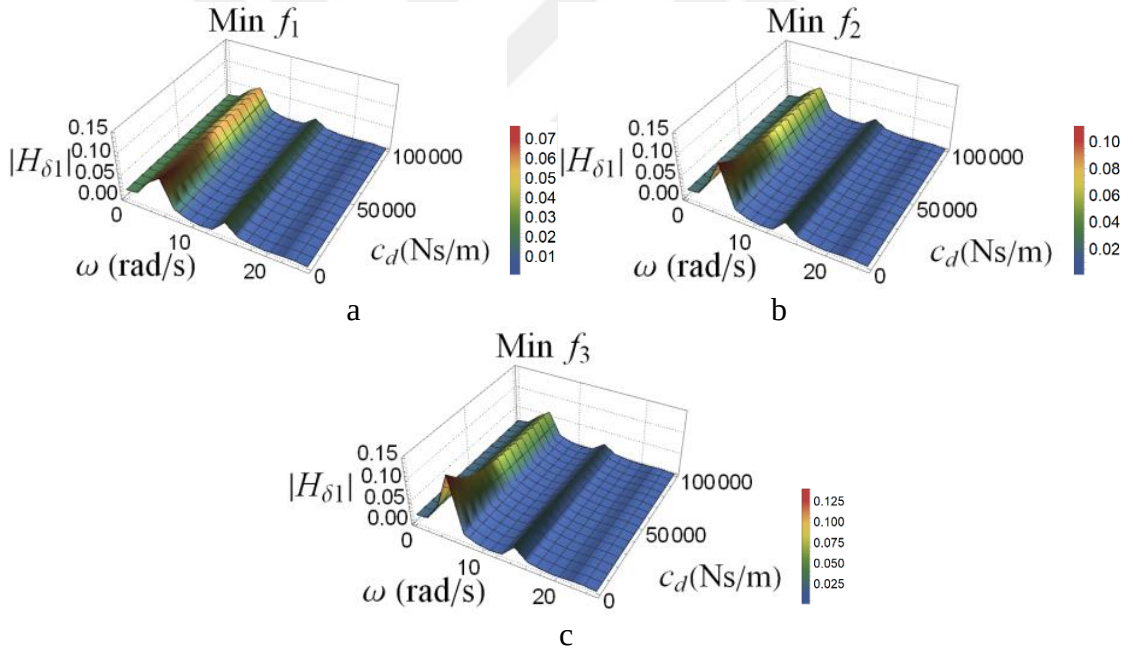
Şekil A.12. Dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil A.13. Birinci kat rölatif deplasmanın transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta 1}|$ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil A.14. Birinci kat rölâtif deplasmanın transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta 1}|$ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil A.15. Birinci kat rölâtif deplasmanın transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta 1}|$ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi

Çizelge A.1. Cape Mendocino (Petroli NS) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd., (1997)	
				Min (f ₁)	Min (f ₂)	Min (f ₃)					
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
Cape Mendocino (Petroli NS)	Pik deplasman (m)	4	0.3400	0.2910	14.412	0.2900	14.706	0.2920	14.118	0.2900	14.706
				0.2910	14.412						
				0.2920	14.118						
	Pik mutlak ivmesi (m/s ²)	4	17.940	16.587	7.540	15.640	12.821	16.860	6.020	16.590	7.525
				16.800	6.355						
				16.790	6.410						
	Pik IDR	1	0.0333	0.0329	1.201	0.0329	1.201	0.0330	0.901	0.0330	0.901
				0.0330	0.901						
				0.0330	0.901						
	Deplasman RMS (m)	4	0.0409	0.0327	20.01	0.0314	23.227	0.0320	21.760	0.0320	21.760
			0.0326	20.293							
			0.0320	21.760							
İvme RMS (m/s ²)	4	1.6300	1.4350	11.960	1.4730	9.632	1.4730	9.632	1.4200	12.883	
			1.4660	10.061							
			1.4600	10.429							

Çizelge A.2. Düzce (Bolu istasyonu NS) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması

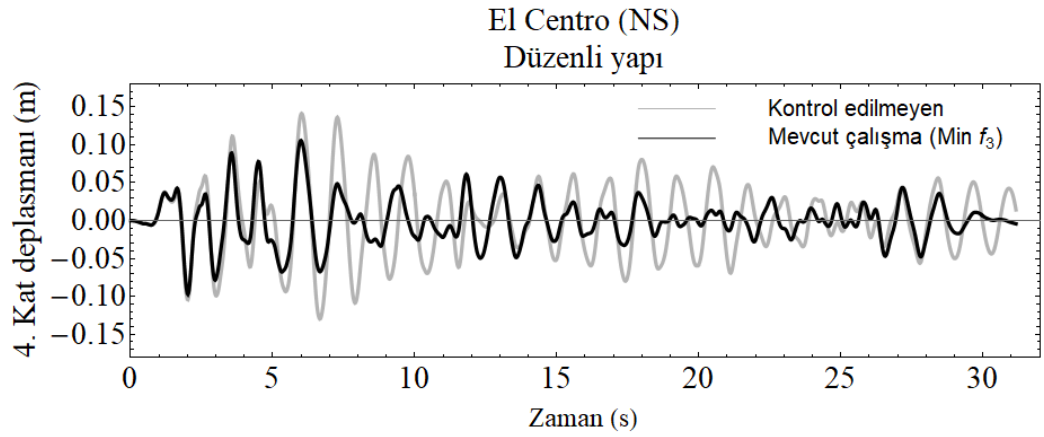
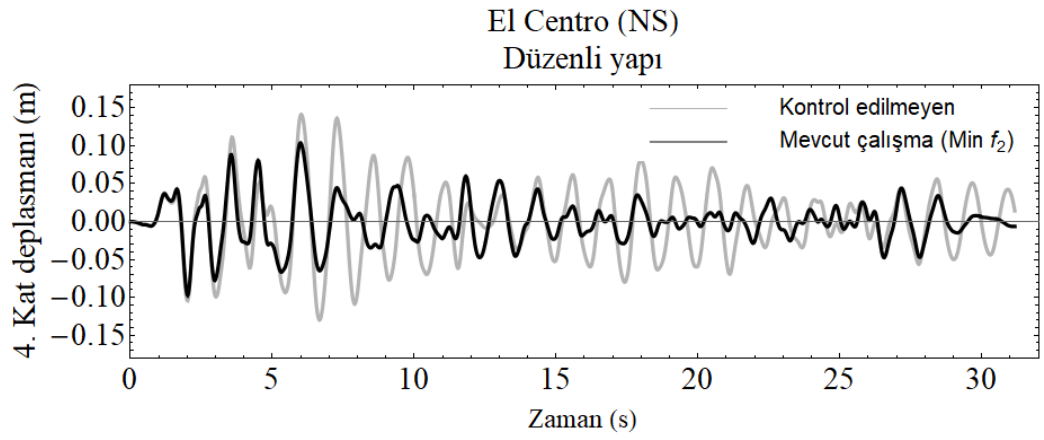
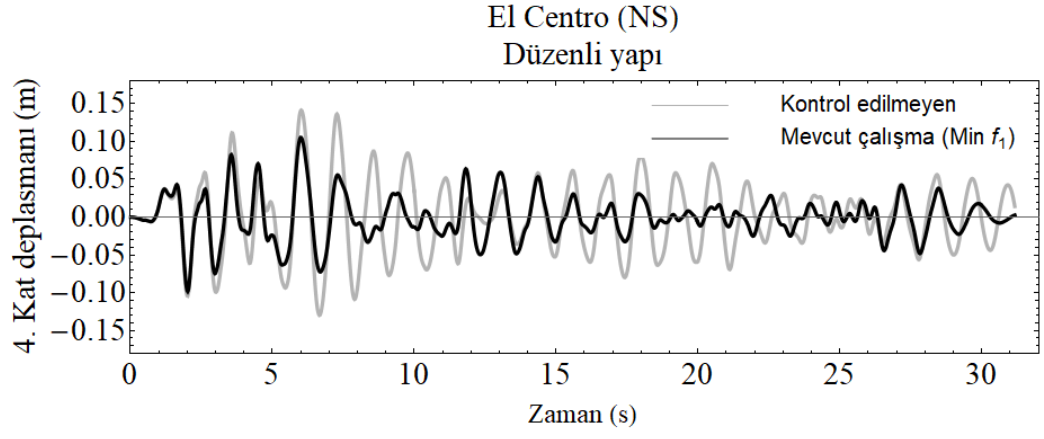
	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd. (1997)		
				Min (f_1)	Min (f_2)	Min (f_3)						
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	
Düzce (Bolu istasyonu NS)	Pik deplasman (m)	4	0.2130	0.2090	1.878	0.2090	1.878	0.2090	1.878	0.2090	1.878	
				0.2090	1.878							
				0.2090	1.878							
	Pik mutlak ivmesi (m/s ²)	4	15.780	13.310	15.655	13.440	14.829	13.630	13.625	13.500	14.449	
				13.529	14.265							
				13.440	14.829							
	Pik IDR	1	0.0267	0.0256	0.359	0.0257	3.745	0.0256	4.120	0.0256	4.120	
				0.0258	3.371							
				0.0257	3.745							
	Deplasman RMS (m)	4	0.0770	0.0430	45.460	0.0440	42.857	0.0455	40.909	0.0455	40.909	
				0.0440	42.857							
				0.0438	43.117							
	İvme RMS (m/s ²)	4	2.8500	2.1370	25.018	2.1700	23.860	2.2300	21.754	2.1500	24.561	
				2.2000	22.807							
				2.1700	23.860							

Çizelge A.3. Kobe (NS) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması.

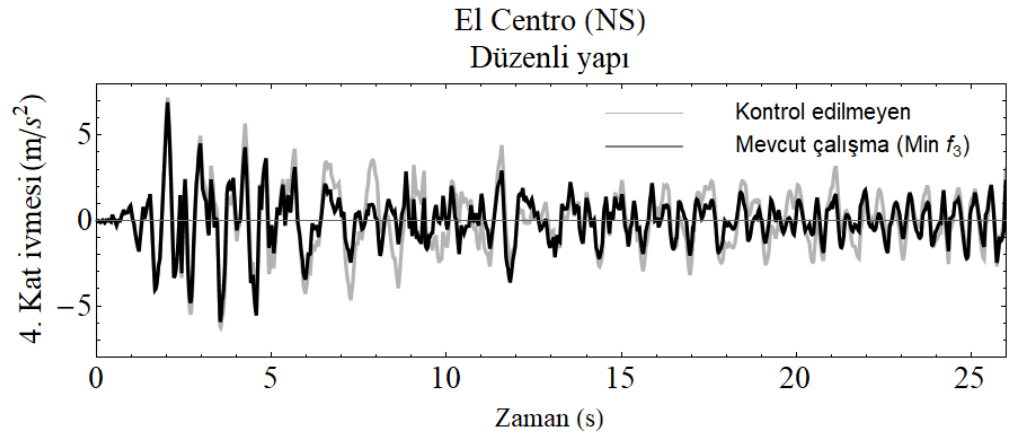
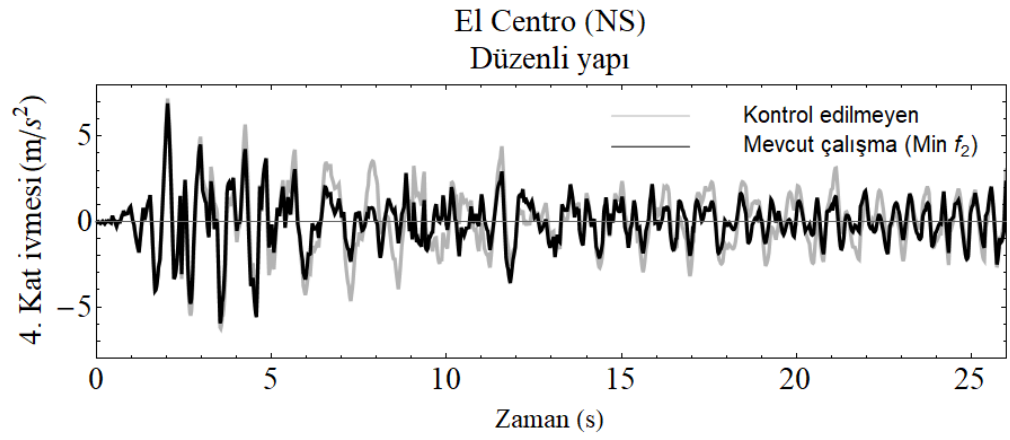
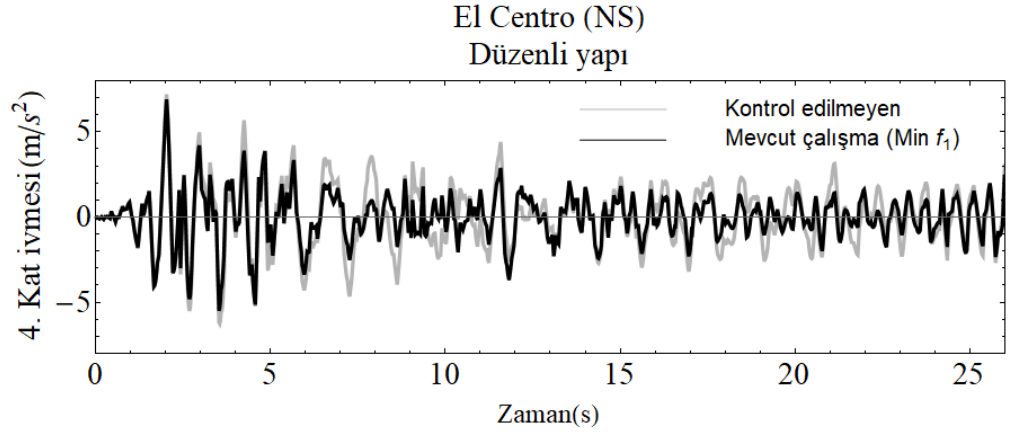
	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd., (1997)	
				Min (f ₁)	Min (f ₂)	Min (f ₃)					
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
Kobe (NS)	Pik deplasman (m)	4	0.5570	0.3975 0.3500 0.3540	28.636 37.163 36.445	0.364 0	34.650	0.3540	36.445	0.3940	29.264
	Pik mutlak ivmesi (m/s ²)	4	24.620	22.34 22.570 22.590	9.261 8.327 8.245	22.48 0	8.692	22.650	8.002	22.440	8.855
	Pik IDR	1	0.0729	0.0475 0.0487 0.0370	34.84 33.196 49.246	0.048 2	33.882	0.0490	32.785	0.0486	33.333
	Deplasman RMS (m)	4	0.0970	0.0400 0.0360 0.0318	58.763 62.887 69.216	0.037 8	61.031	0.0360	62.887	0.0430	55.670
	İvme RMS (m/s ²)	4	2.8280	1.6100 1.6100 1.6100	43.069 43.069 43.069	1.610 0	43.069	1.6100	43.069	1.6400	42.008

Çizelge A.4. Kocaeli (Sakarya EW) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol edilmeyen	Önerilen Yöntem		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd., (1997)	
				Min (f ₁)	Min (f ₂)	Min (f ₃)					
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
Kocaeli (Sakarya EW)	Pik deplasman (m)	4	0.2280	0.1550 0.1500 0.1540	32.018 34.211 32.456	0.1520	33.333	0.1500	34.211	0.1660	27.193
	Pik mutlak ivmesi (m/s ²)	4	7.0200	5.9500 5.8000 5.8700	15.242 17.379 16.382	5.9100	15.812	5.9000	15.954	5.9500	15.242
	Pik IDR	1	0.0244	0.0166 0.0146 0.0158	31.967 40.164 35.246	0.0159	34.836	0.0159	34.836	0.0177	27.459
	Deplasman RMS (m)	4	0.0550	0.0340 0.0354 0.0340	38.182 35.636 38.182	0.0341	38.000	0.0340	38.182	0.0340	38.182
	İvme RMS (m/s ²)	4	1.6670	1.1350 1.1500 1.1600	31.914 31.014 30.414	1.1500	31.014	1.1500	31.014	1.1500	31.014



Şekil A.16. El Centro (NS) deprem kaydı için son katın deplasmanının zamana göre değişimi

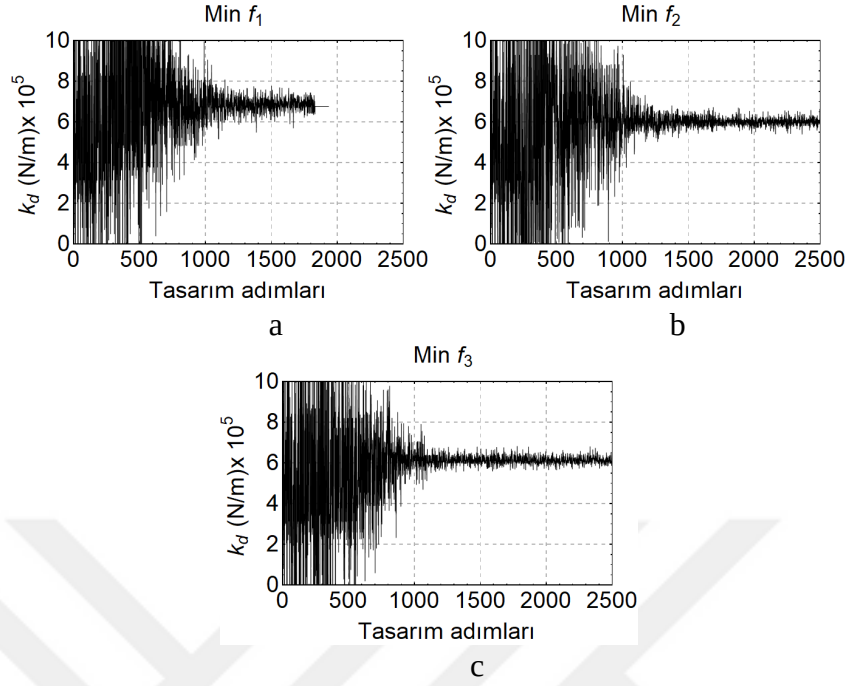


Şekil A.17. El Centro (NS) deprem kaydı için son katın ivmesinin zamana göre değişimi

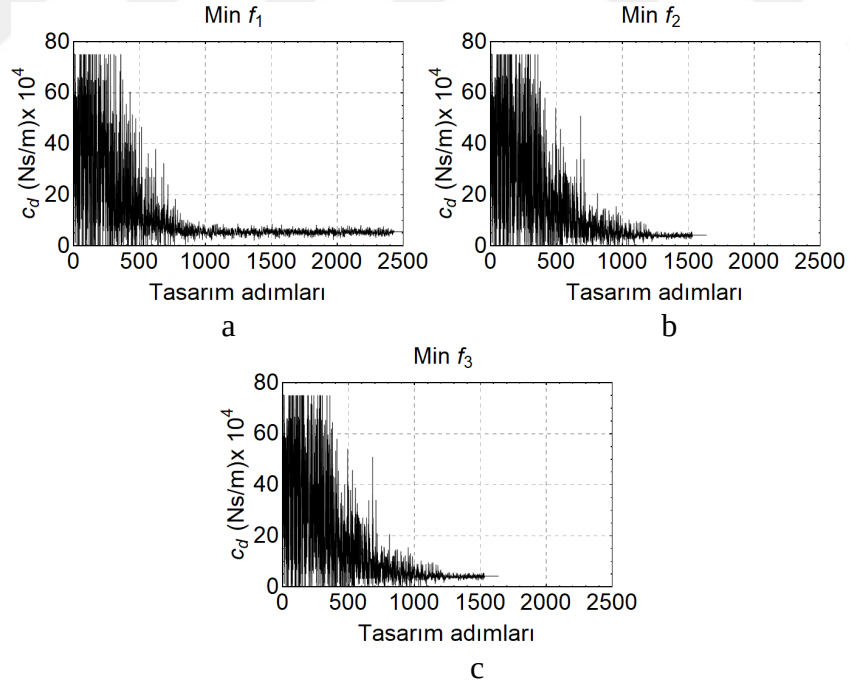
Çizelge A.5. Loma Prieta (LGP 000) deprem kaydı altında önerilen yöntemle literatürdeki yöntemlerin kıyaslanması

	Yapı Tepkisi	Kat No	Kontrol edilmeyen	Önerilen Yöntem Min (f_1) Min (f_2) Min (f_3)		Den Hartog (1956)		Warburton (1982)		Sadek vd., (1997)	
				Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)	Değer	Azaltma (%)
Loma Prieta (LGP 000)	Pik deplasman (m)	4	0.5490	0.4040 0.3930 0.3950	26.412 28.415 28.051	0.3980	27.505	0.3920	28.597	0.3910	28.780
	Pik mutlak ivmesi (m/s^2)	4	21.890	16.940 16.900 17.040	22.613 22.796 22.156	16.920	22.704	16.970	22.476	16.970	22.476
	Pik IDR	1	0.0750	0.0390 0.0370 0.0374	48.000 50.667 50.133	0.0378	49.600	0.0370	50.667	0.0370	50.667
	Deplasman RMS (m)	4	0.1300	0.0920 0.0910 0.0890	29.231 30.000 31.538	0.0909	30.077	0.0905	30.385	0.0904	30.462
	İvme RMS (m/s^2)	4	4.3100	3.3340 3.3900 3.3700	22.500 21.346 21.810	3.3660	21.903	3.4070	20.951	3.4100	20.882

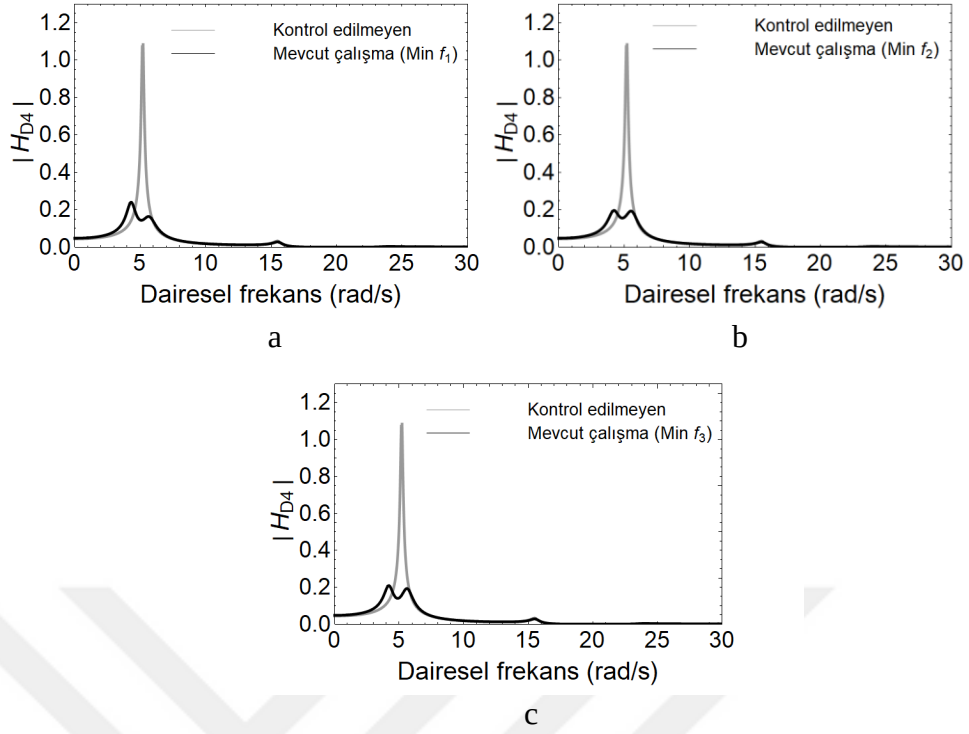
Ek-B



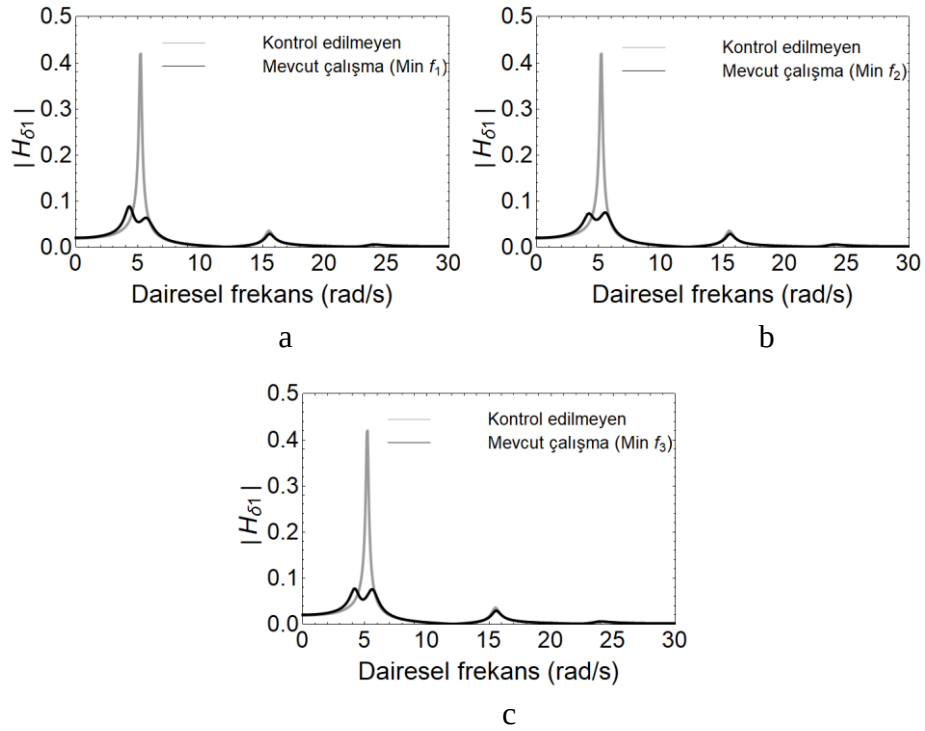
Şekil B.1. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b) ve f_3 . (c) amaç fonksiyonları için TMD'nin rijitlik katsayısı k_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi



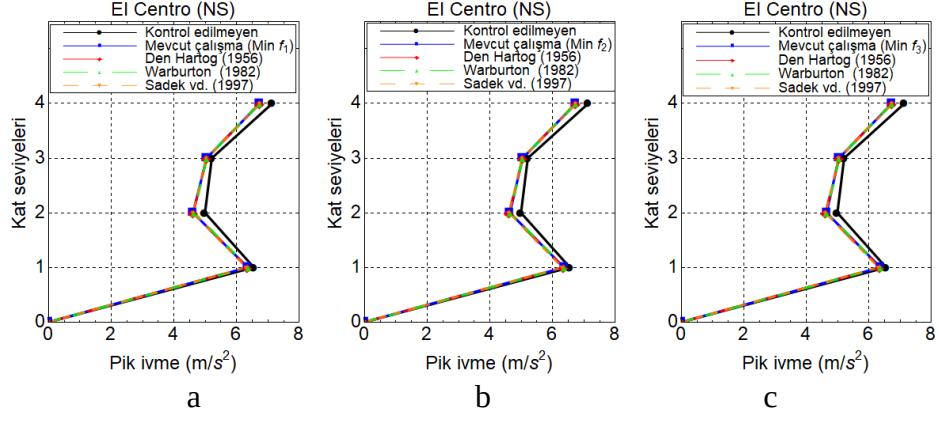
Şekil B.2. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b) ve f_3 . (c) amaç fonksiyonları için TMD'nin sönüm katsayısı c_d 'nin tasarım adımlarına göre değişimi



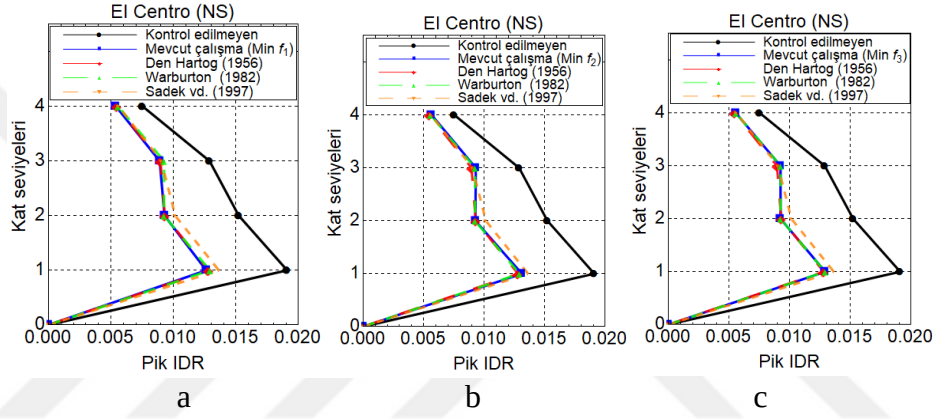
Şekil B.3. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b) ve f_3 . (c) amaç fonksiyonları için 4. katın deplasmanının transfer fonksiyonu büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'ün TMD'li ve TMD'siz durum için değişimi



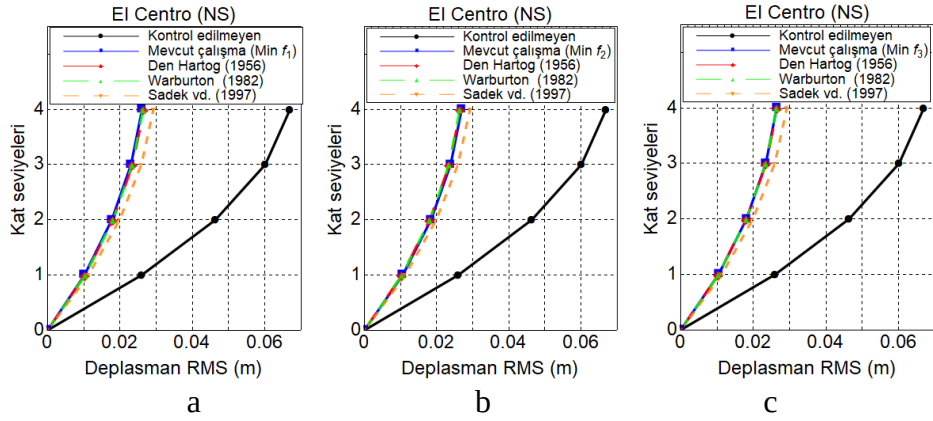
Şekil B.4. Düzensiz kayma çerçevesinde f_1 (a), f_2 (b) ve f_3 . (c) amaç fonksiyonları için 1. katın rölatif deplasmanının transfer fonksiyonu büyüklüğü $|H_{\delta1}|$ 'ün TMD'li ve TMD'siz durum için değişimi



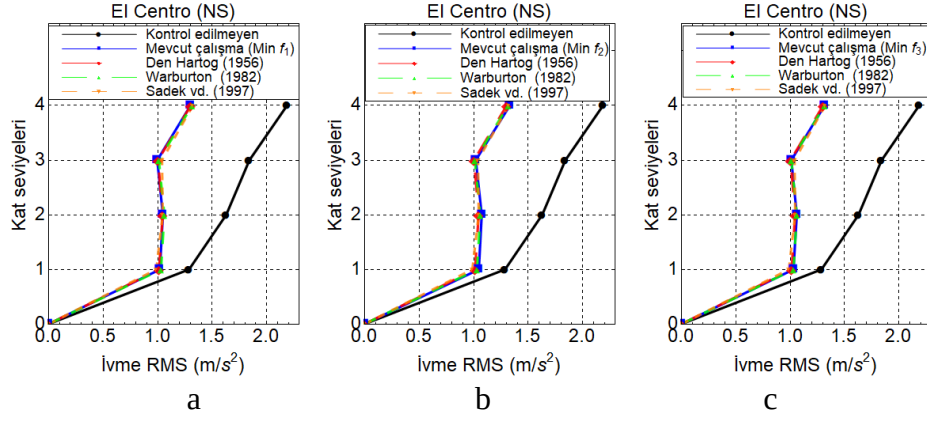
Şekil B.5. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların kat ivmelerinin değişimindeki etkisi



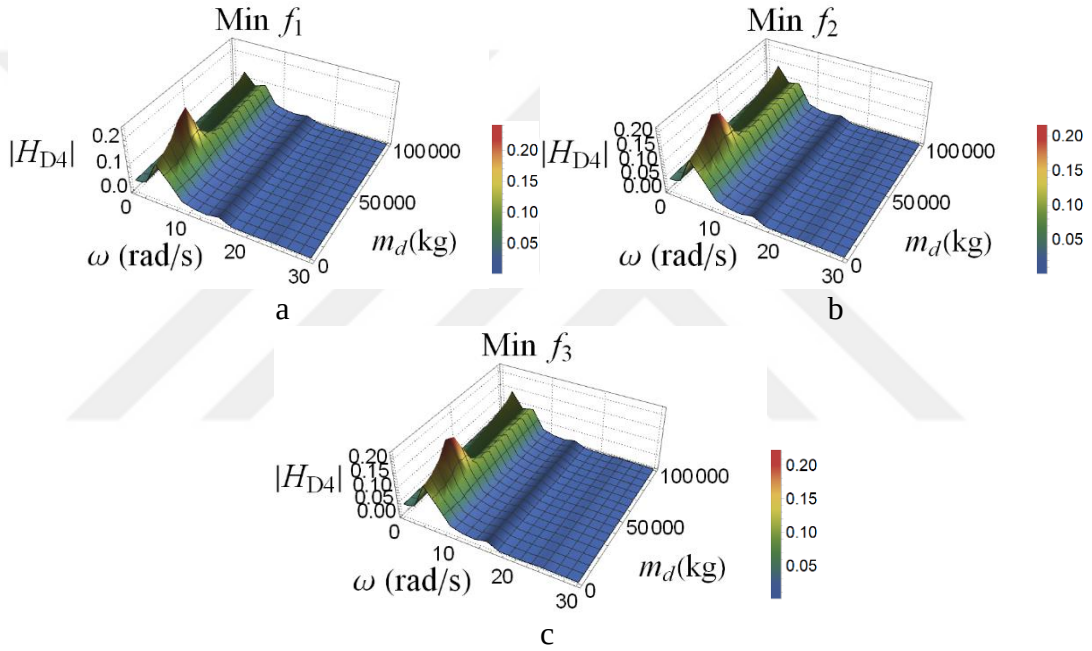
Şekil B.6. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların IDR'lere etkisi



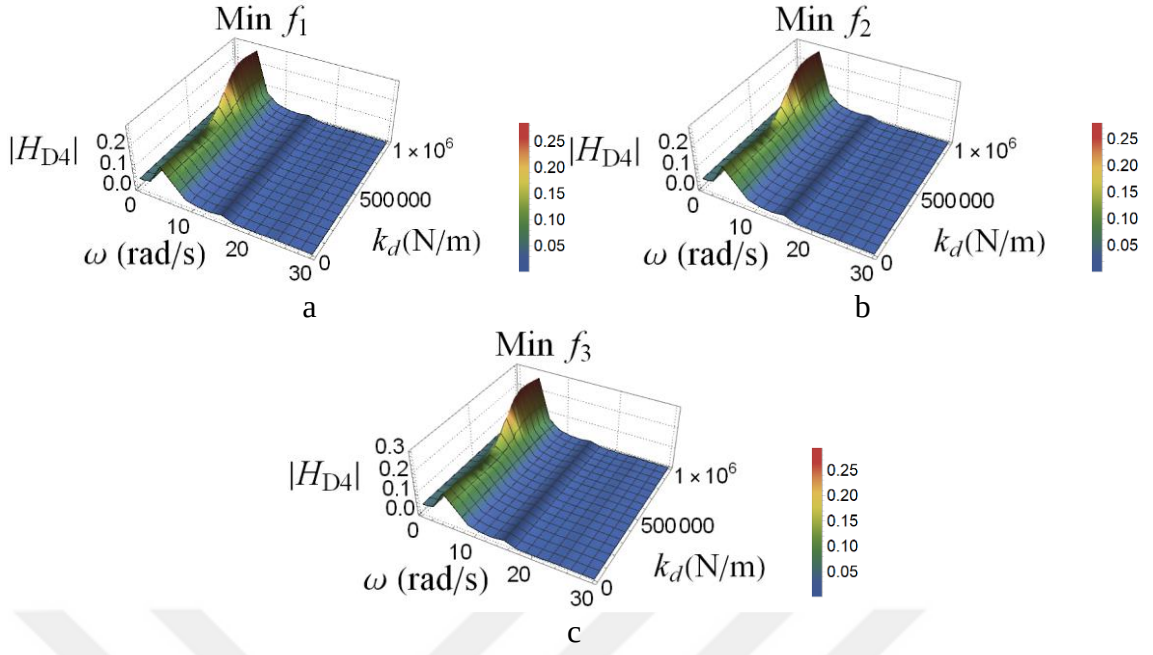
Şekil B.7. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların deplasman RMS'lere etkisi



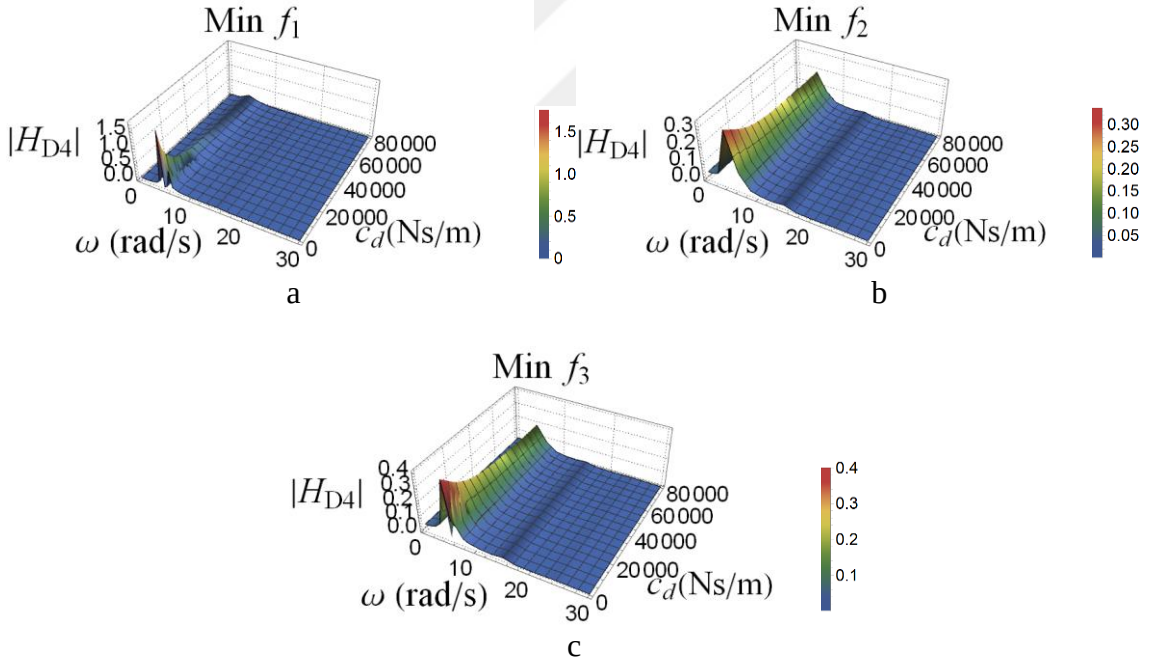
Şekil B.8. El Centro (NS) depremi altında düzensiz kayma çerçevesinde optimum tasarımların ivme RMS'lere etkisi



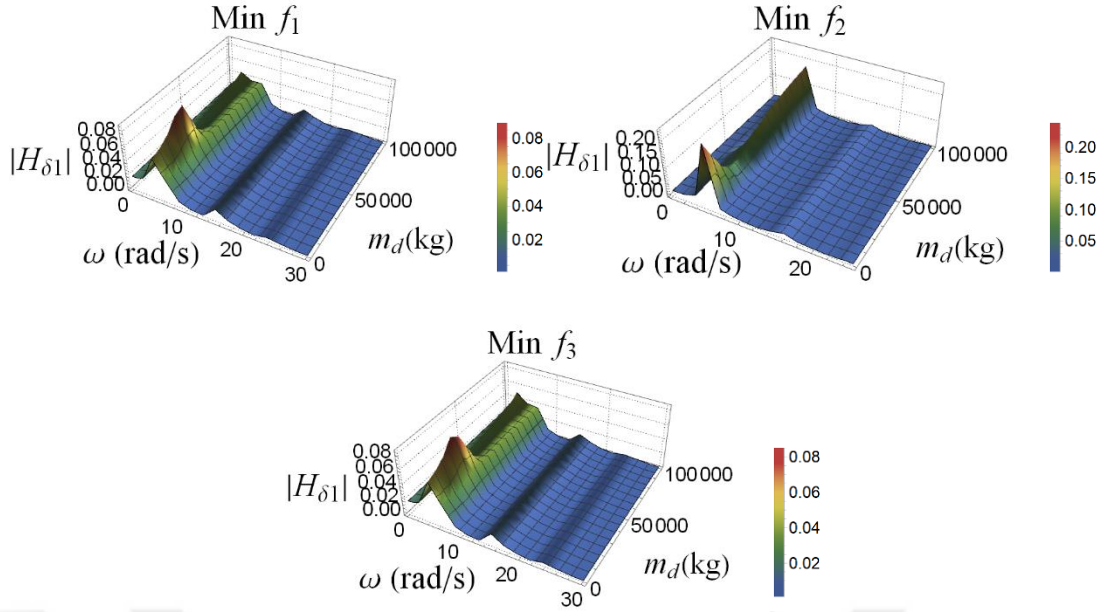
Şekil B.9. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi



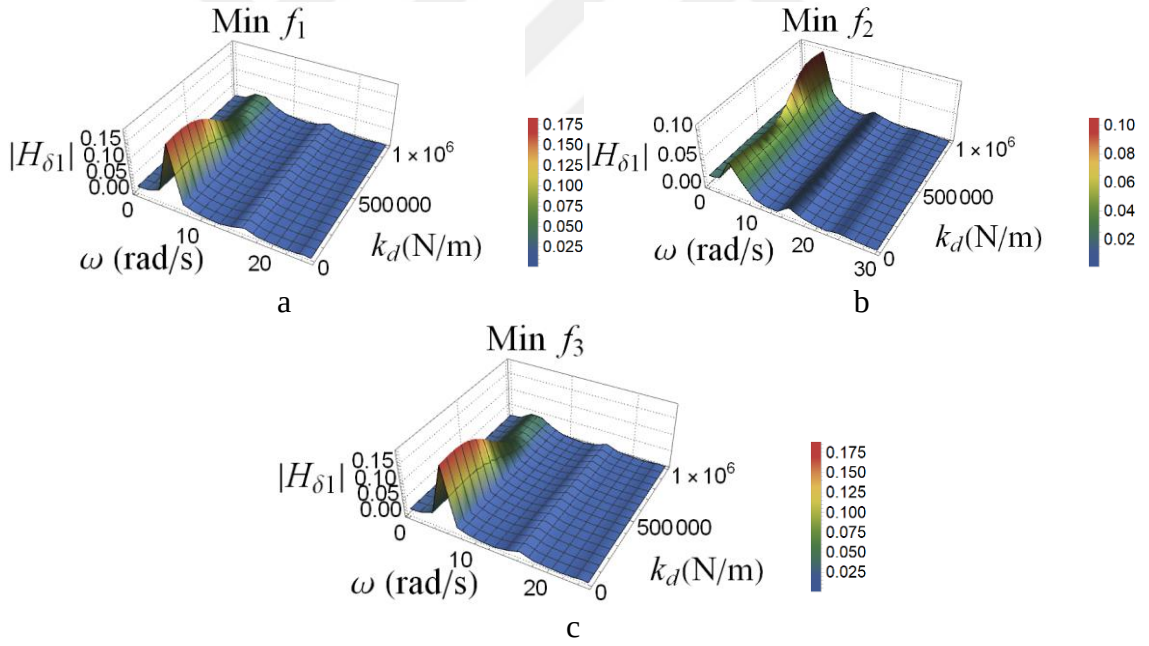
Şekil B.10. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi



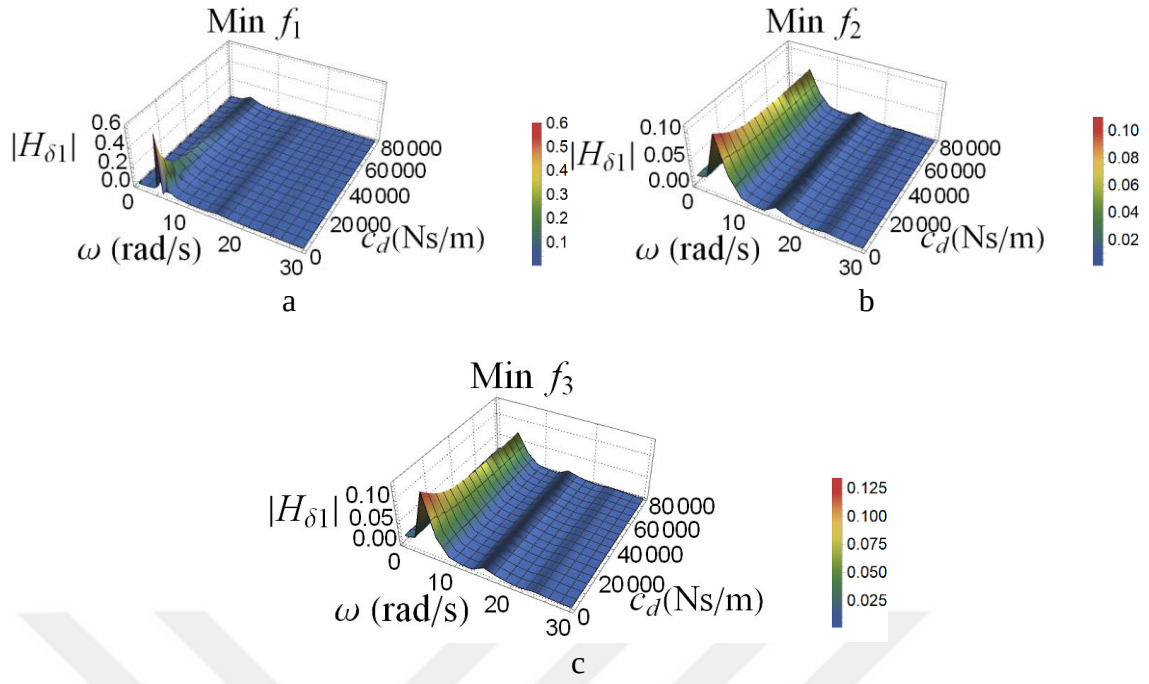
Şekil B.11. Düzensiz kayma çerçevesinde dördüncü kat deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{D4}|$ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi



Şekil B.12. Düzensiz kayma çerçevesinde birinci kat rölâtif deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta i}|$ 'nin dış etki frekansı ve m_d kütle parametresine göre 3 boyutlu değişimi

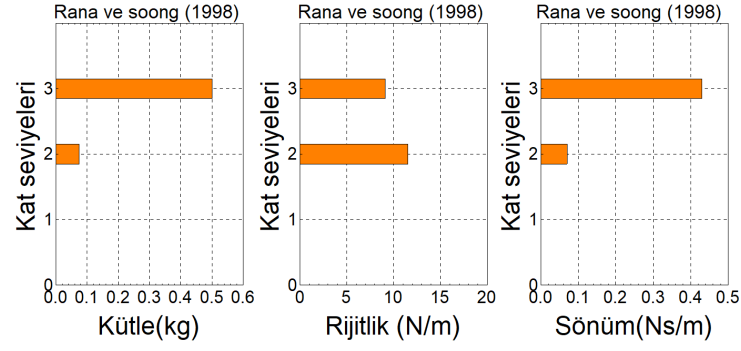


Şekil B.13. Düzensiz kayma çerçevesinde birinci kat rölâtif deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta i}|$ 'nin dış etki frekansı ve k_d rijitlik parametresine göre 3 boyutlu değişimi

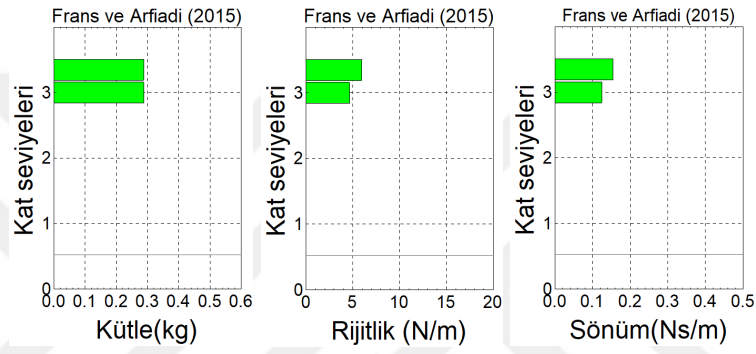


Şekil B.14. Düzensiz kayma çerçevesinde birinci kat rölatif deplasman transfer fonksiyonunun büyüklüğü $|H_{\delta i}|$ 'nin dış etki frekansı ve c_d sönüm parametresine göre 3 boyutlu değişimi

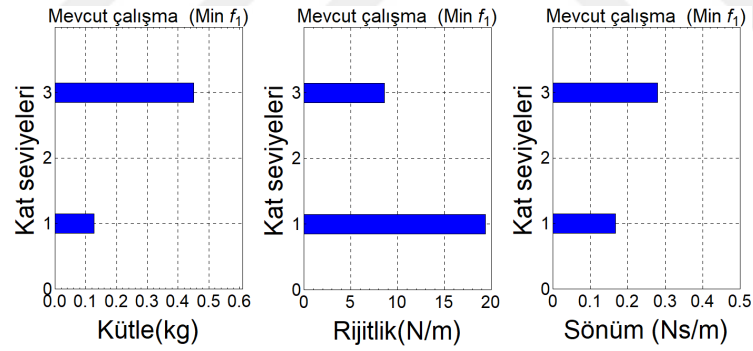
Ek-C



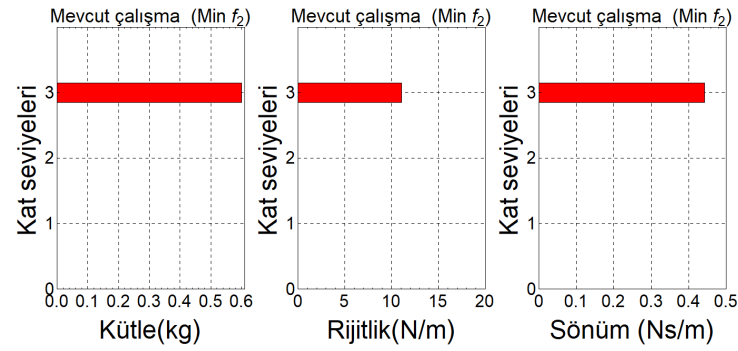
a



b

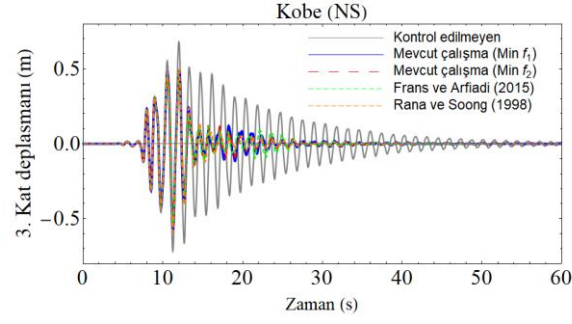


c

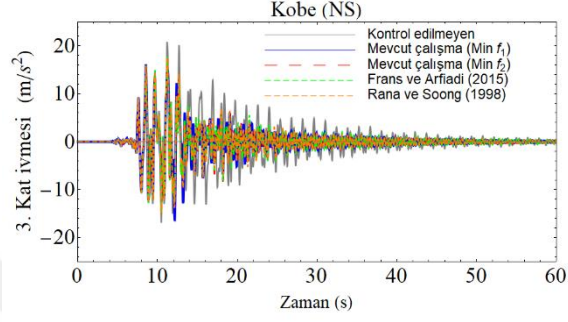


d

Şekil C.1. Optimum MTMD parametreleri ve dağılımları, Rana ve Soong (1998) (a), Frans ve Arfiadi (2015) (b), mevcut çalışma (Min f_1) (c) mevcut çalışma (Min f_2)

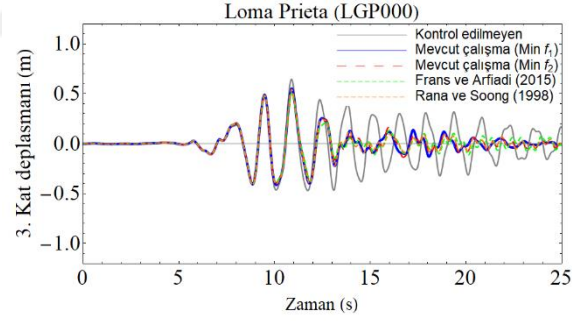


a

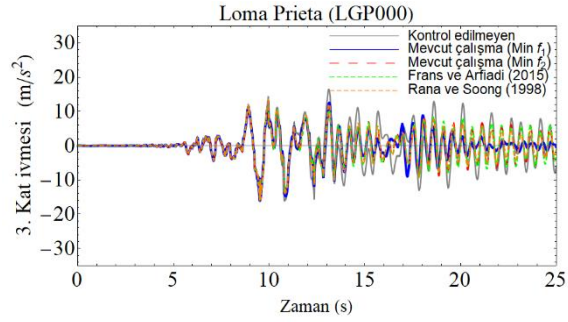


b

Şekil C.2. MTMD'li yapıda Kobe (NS) depremi ivme kaydı için 3. kat deplasmanının zamana göre değişimi (a) 3. kat ivmesinin zamana göre değişimi (b)

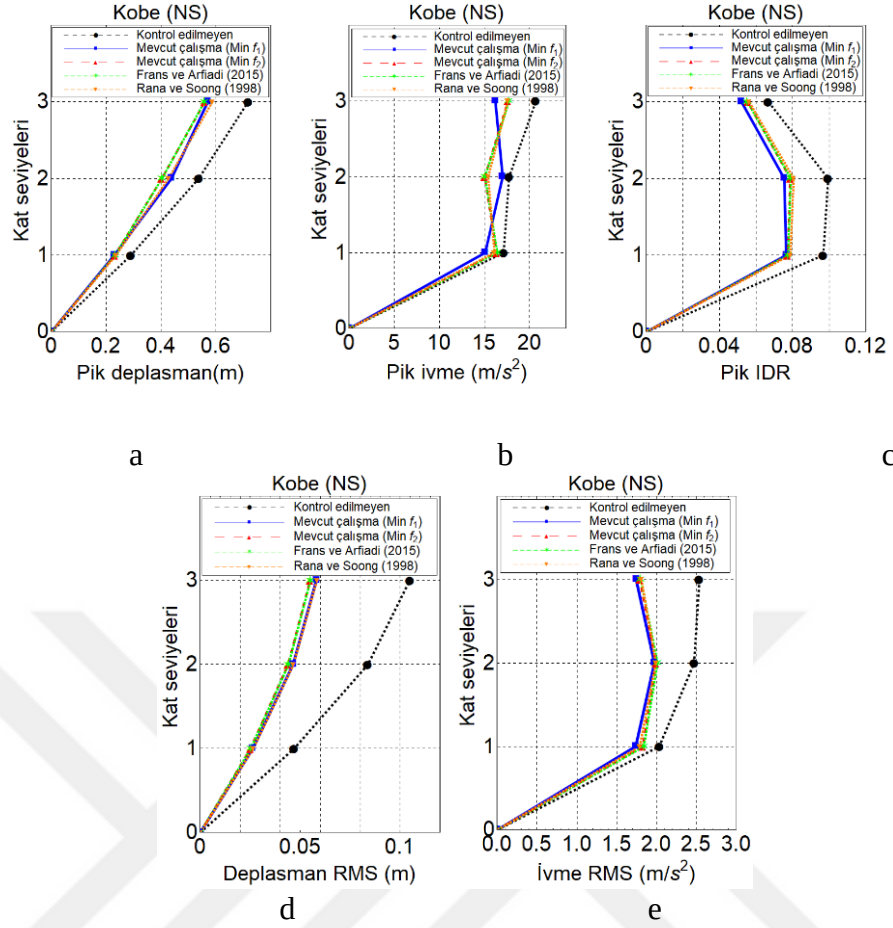


a

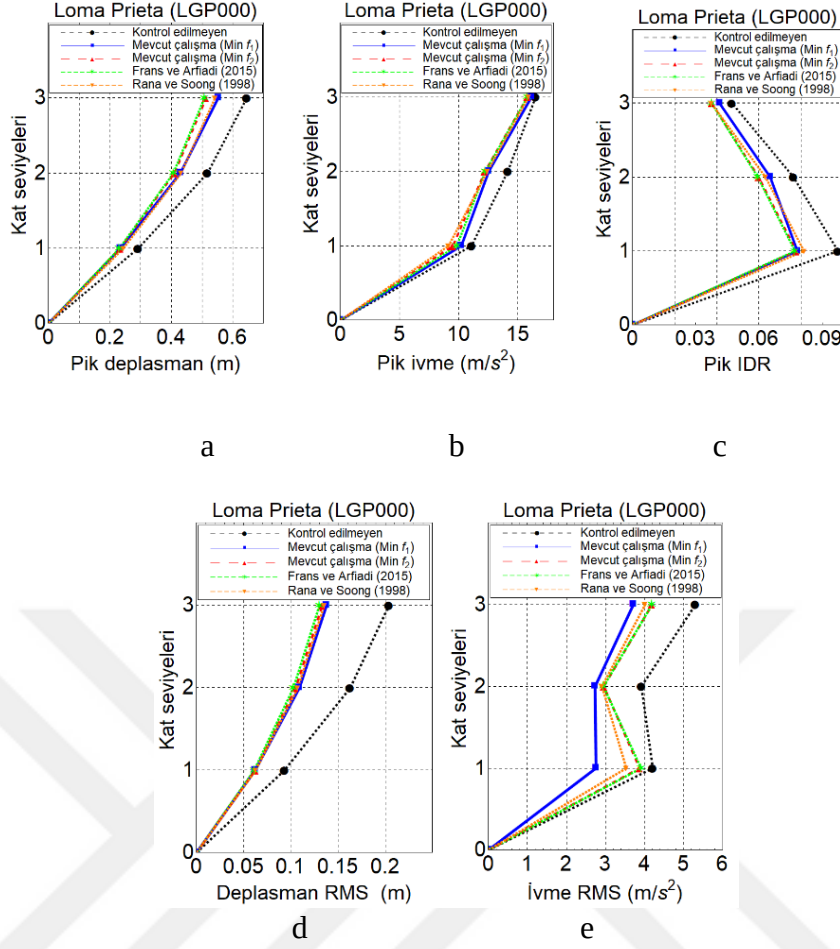


b

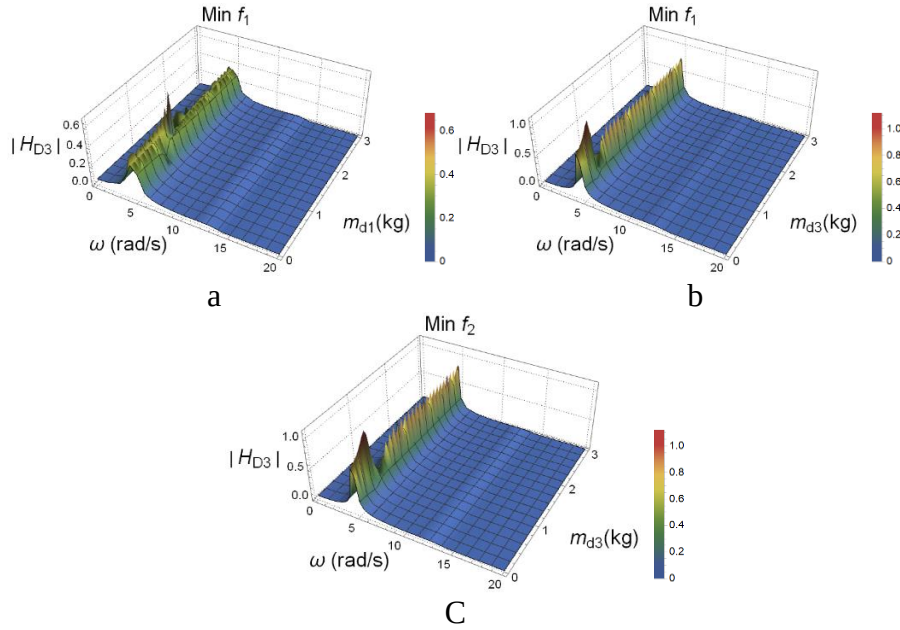
Şekil C.3. Loma Prieta (LGP000) depremi kaydı için 3. kat deplasmanının zamana göre değişimi (a) 3. kat ivmesinin zamana göre değişimi (b)



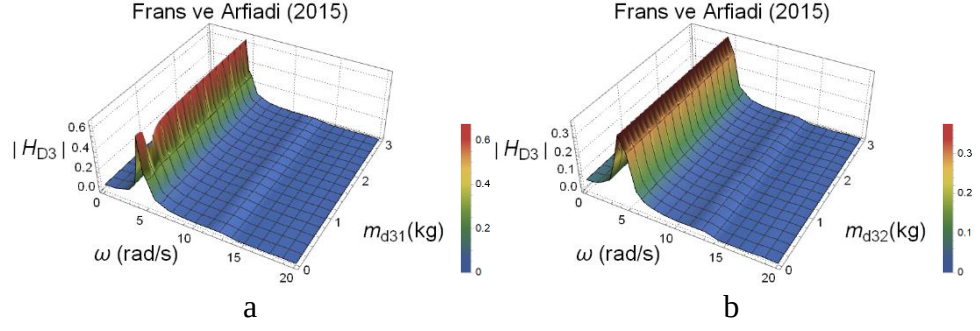
Şekil C.4. MTMD'li yapıda Kobe (NS) depremi için pik kat deplasmanları (a) pik mutlak kat ivmeleri (b) pik kat (IDR)'leri (c), deplasmanların karesel ortalamalarını kare kökleri (RMSD) (d) ivmelerin karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSA) (e)



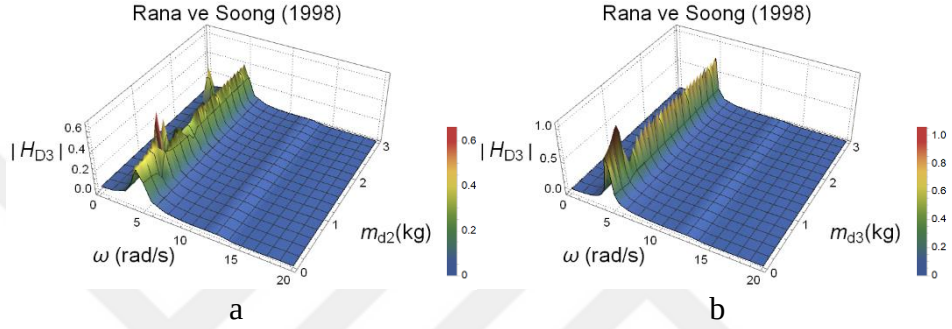
Şekil C.5. Loma Prieta (LGP000) depremi için pik kat deplasmanları (a) pik mutlak kat ivmeleri (b) pik kat (IDR)'leri (c), deplasmanların karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSD) (d) ivmelerin karesel ortalamalarının kare kökleri (RMSA) (e)



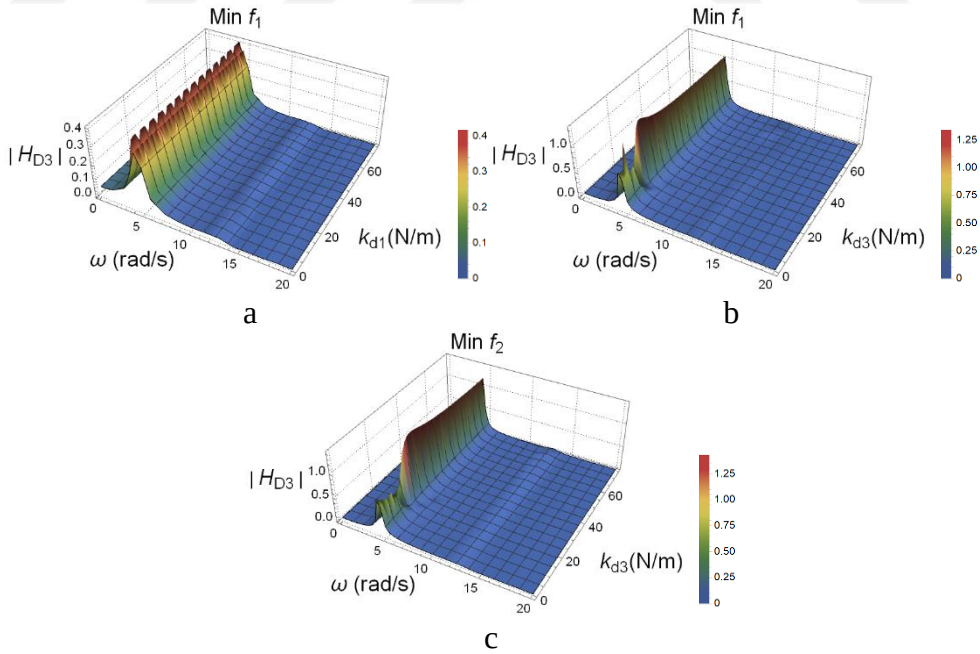
Şekil C.6. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



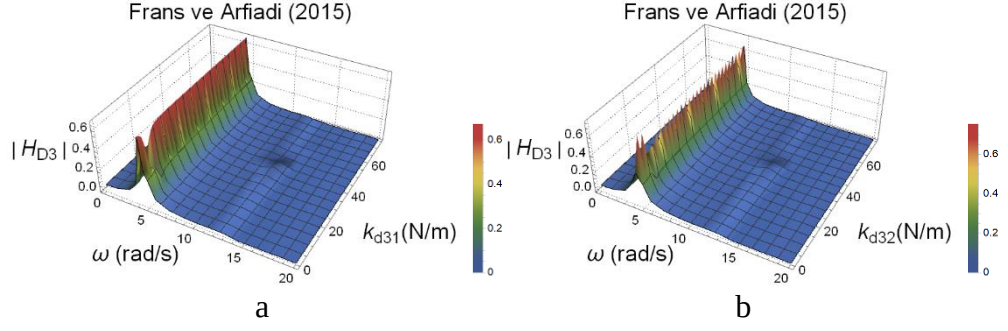
Şekil C.7. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



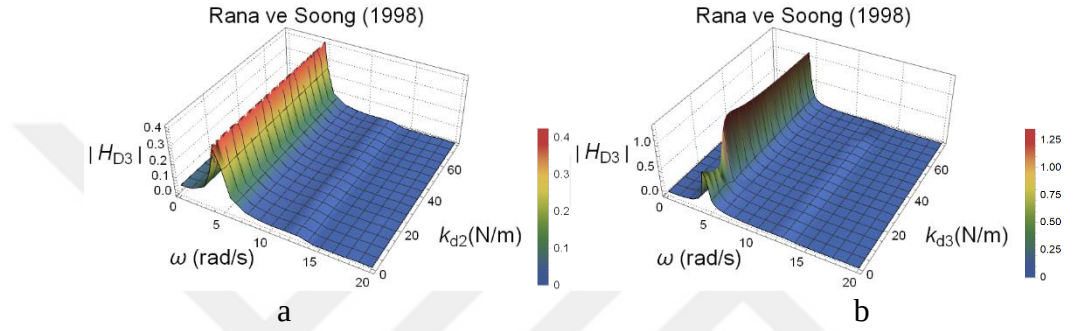
Şekil C.8. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin kütlesi ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



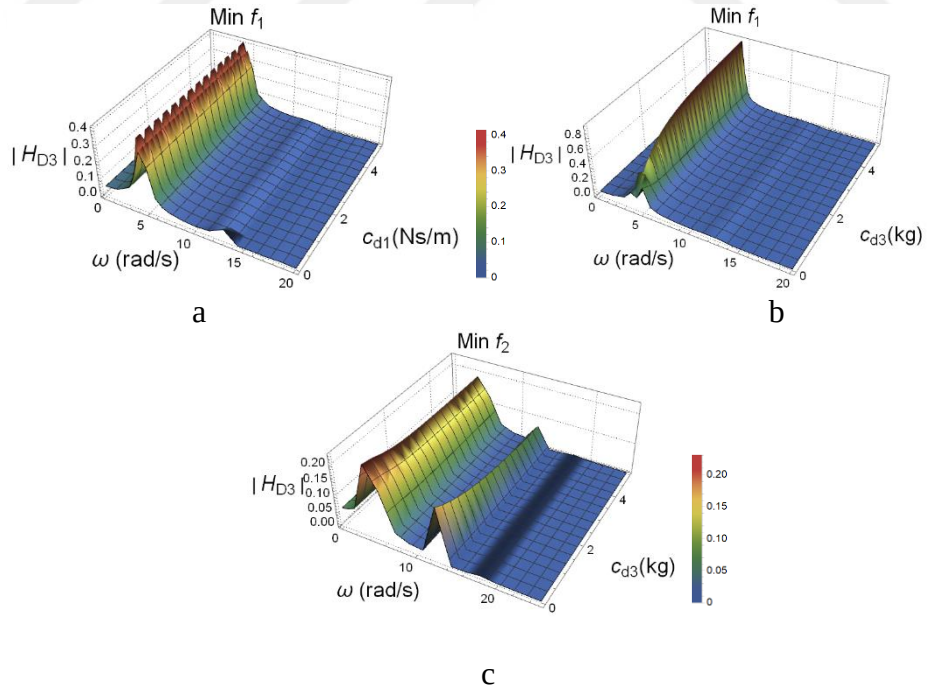
Şekil C.9. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



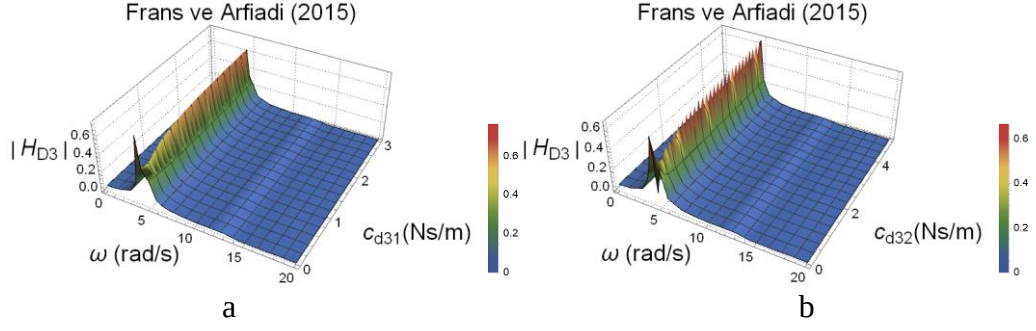
Şekil C.10. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



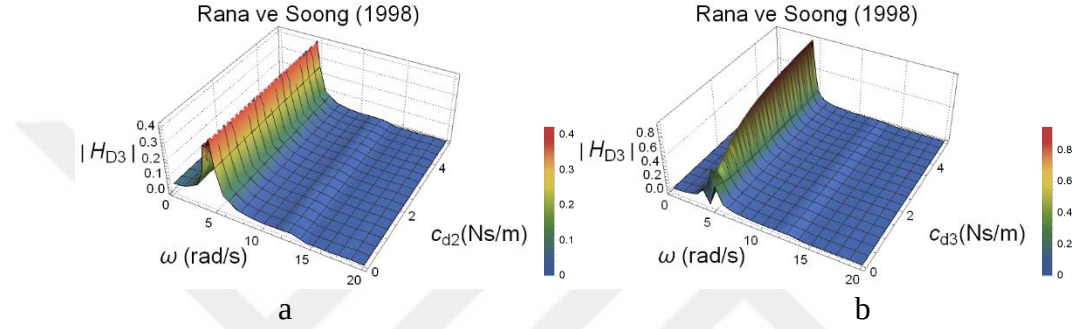
Şekil C.11. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin rijitliği ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



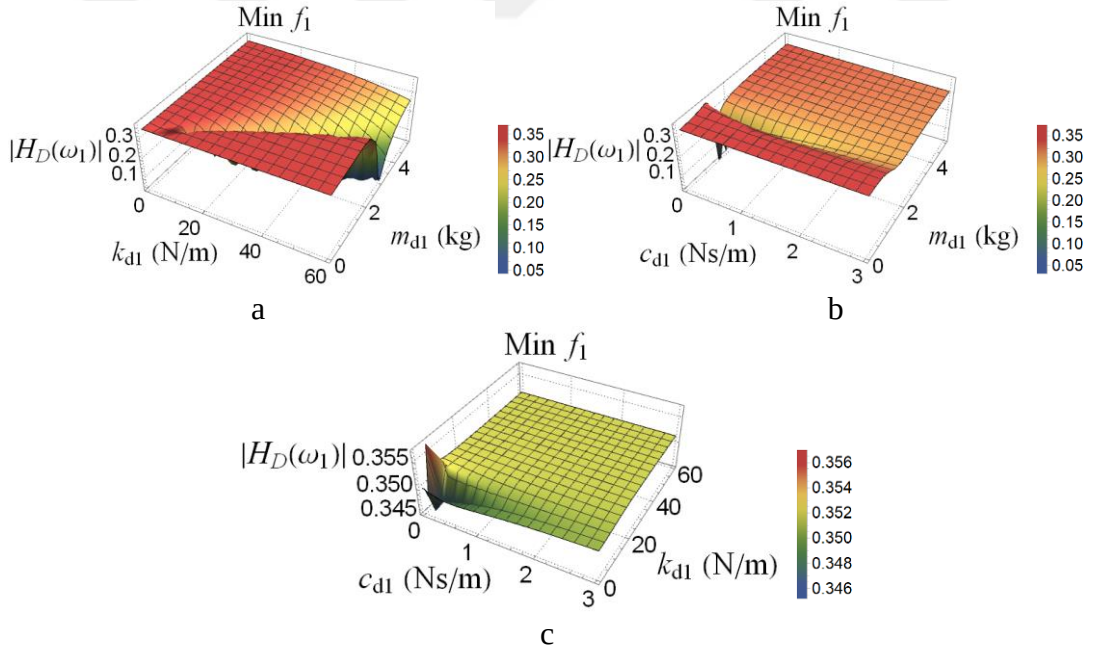
Şekil C.12. f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



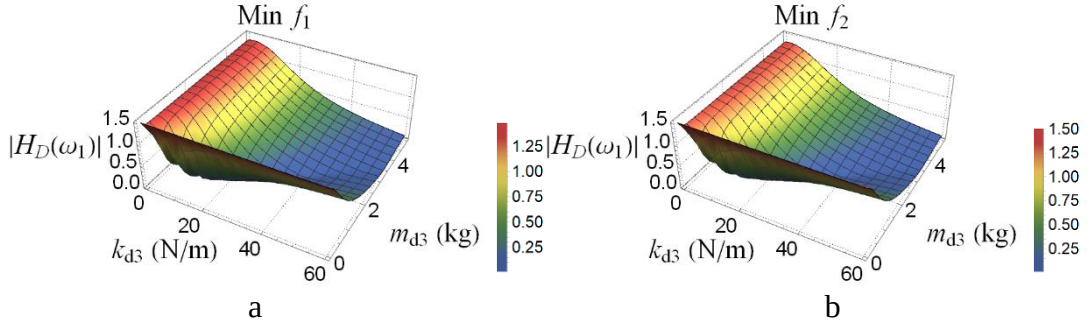
Şekil C.13. Frans ve Arfiadi (2015)'nin çalışması için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



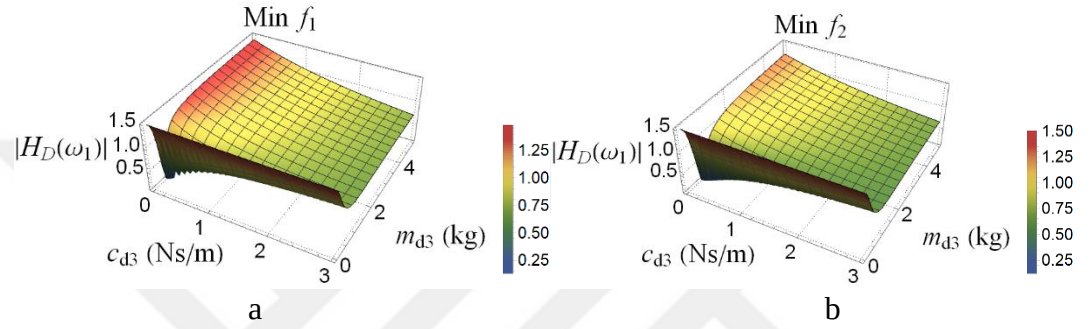
Şekil C.14. Rana ve Soong (1998)'un çalışması için $|H_{D3}(\omega)|$ transfer fonksiyonunun TMD'nin sönümü ve frekansa göre üç boyutlu değişimi



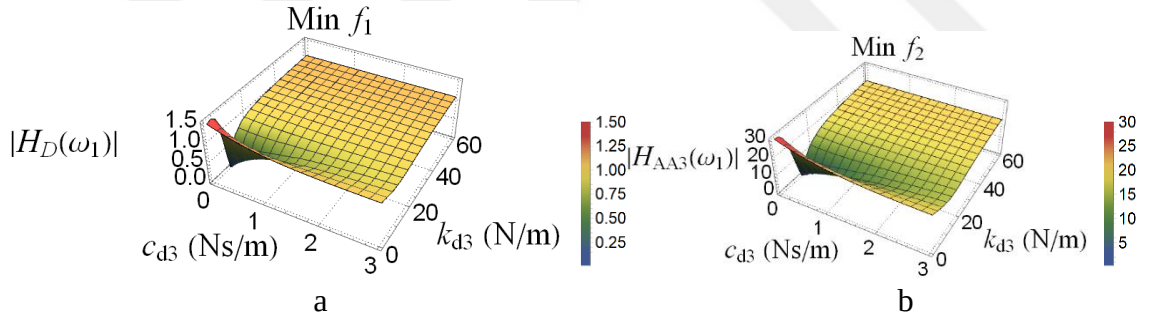
Şekil C.15. $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine (b) TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi



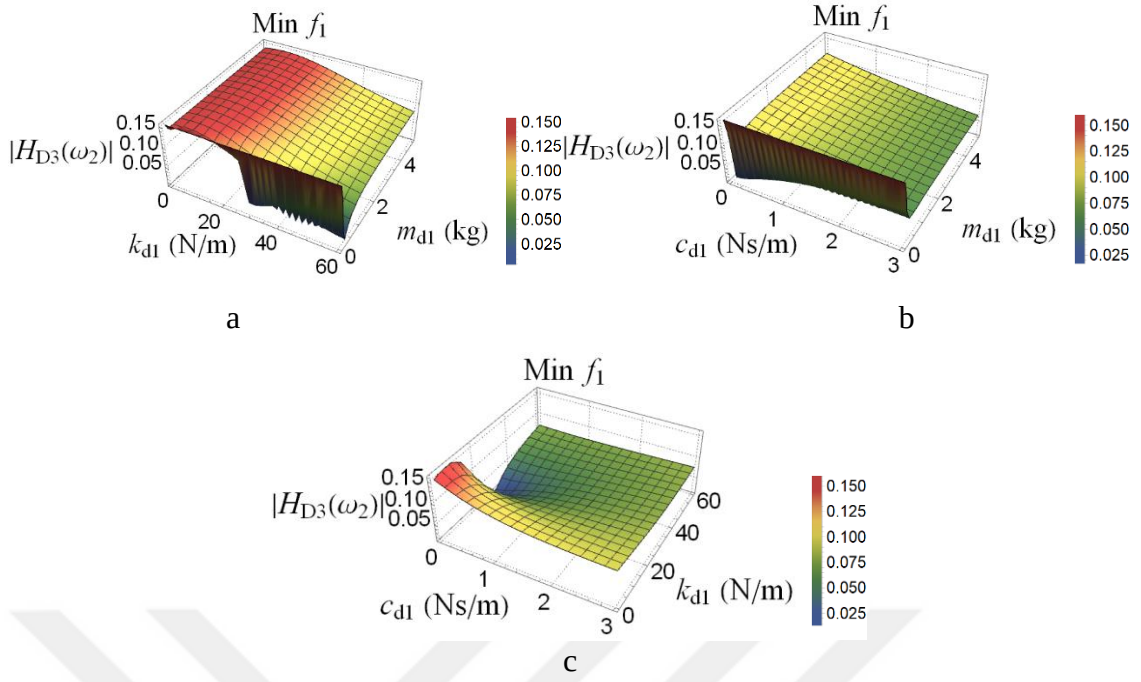
Şekil C.16. $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



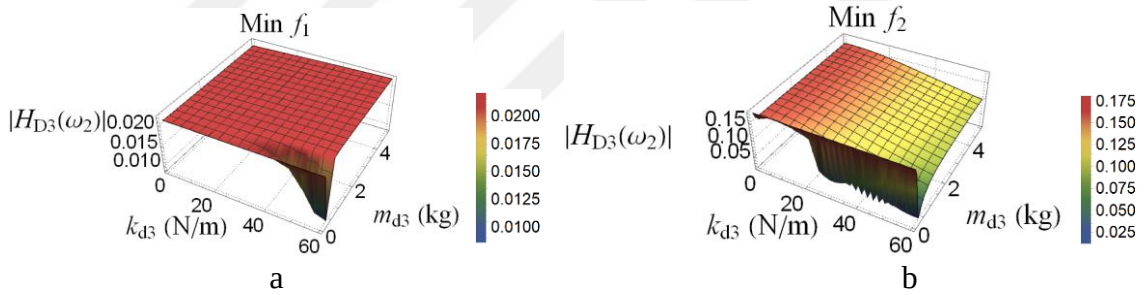
Şekil C.17. $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



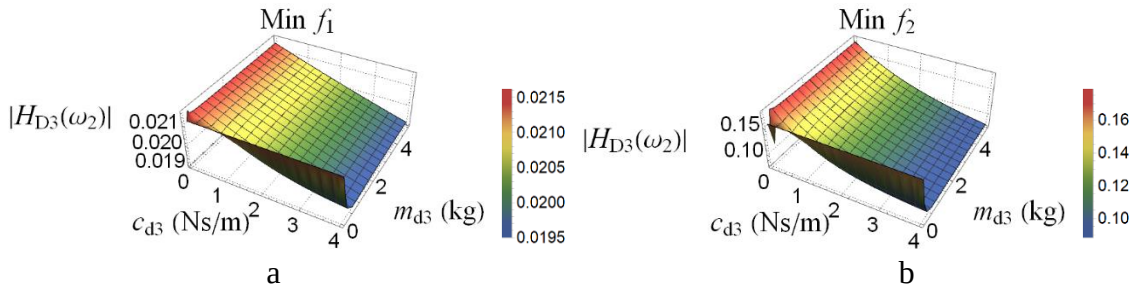
Şekil C.18. $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi



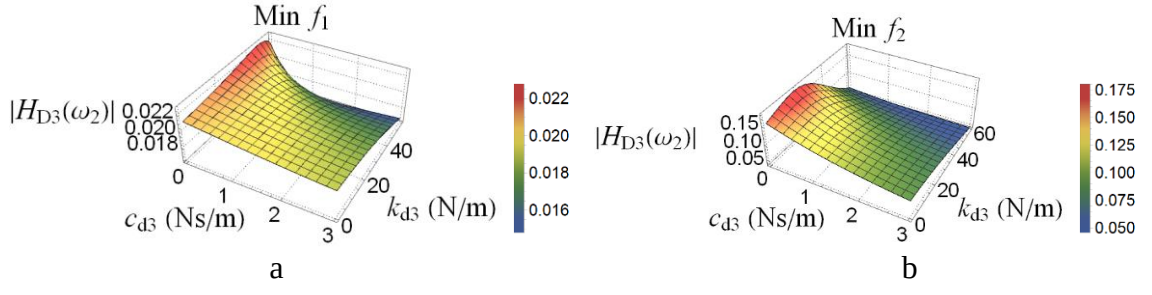
Şekil C.19. $|H_{D3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 amaç fonksiyonu için 1. katındaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine (a) TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi (b)



Şekil C.20. $|H_{D3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin rijitliğine ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



Şekil C.21. $|H_{D3}(\omega_2)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve kütlesine göre üç boyutlu değişimi



Şekil C.22. $|H_{D3}(\omega_1)|$ transfer fonksiyonunun f_1 ve f_2 amaç fonksiyonları için 3. kattaki TMD'nin sönüm katsayısı ve rijitliğine göre üç boyutlu değişimi

ÖZ GEÇMİŞ

Hüseyin ÇETİN 17.09.1979 tarihinde Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğretimini Nevşehir Hacıbektaş’ta, lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2003 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2004 yılında askerliğini tamamladıktan sonra, 2004-2005 yılları arasında bir inşaat firmasında şantiye mühendisi olarak çalıştı. 2005 yılında, halen de projecilik ve inşaat alanında faaliyet gösteren kendi firması HENA mühendisliği kurdu. Yüksek Lisans eğitimini 2013 yılında Niğde Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tamamladı. 2013 yılında Niğde Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında başladığı Doktora eğitimine devam etmektedir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ile 1 (bir) adet ulusal bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Çetin, H., Aydın, E., “A new tuned mass damper design method based on transfer functions”, *KSCE J. Civ. Eng*, 23(10), 4463-4480, DOI: 10.1007/s12205-019-0305-x

Çetin, H., Aydın, E. and Öztürk, B., “Sismik etki altındaki düzensiz yapılarda ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMDs) optimal tasarımı”, **21. TUMTMK Ulusal Mekanik Kongresi**, Niğde, 2019.

