



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



[DOKTORA TEZİ]

***[METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZE AKTİF AYARLI
KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ İLE YAPILARIN KONTROLÜ]***

[Aylin Ece KAYABEKİR]

**[DANIŞMAN
Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ]**

[İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı]

[İnşaat Mühendisliği Programı]

[İSTANBUL-2021]

Bu çalışma, [20.09.2021] tarihinde aşağıdaki jüri tarafından [İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı]nda [Doktora tezi] olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

[Prof. Dr.] [Gebrail BEKDAŞ] (Danışman)
[İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi]

[Doç. Dr.] [Sinan Melih NİGDELİ]
[İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi]

[Prof. Dr.] [Yusuf Cengiz TOKLU]
[Beykent Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi]

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

[Prof. Dr.] [Ali KOÇAK]
[Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi]



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

Bu tez, Yükseköğretim Kurumu “YÖK 100/2000 Doktora Projesi” ile desteklenmiştir.

Bu tez, 2211-A numaralı “TÜBİTAK Yurtiçi Doktora Bursu” projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

İyi bir tasarım yapabilmek için tasarımcının tecrübesi önemlidir. Ancak iyi bir tasarımcının da belirli bir amaç doğrultusunda birden çok olasılığı göz önüne alması çok zaman alabilir ya da mümkün olmayabilir. Metasezgisel algoritmalar birden çok seçeneğin göz önünde bulundurularak hızlı bir şekilde optimum tasarımların yapılmasına olanak sağlamaktadır. Yapı mühendisliğinde metasezgisel algoritmalar ile optimum tasarımın yapılmasını amaçladığımız tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimiyle beni yönlendiren, bilgi, yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Gebrail Bekdaş'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Doç. Dr. Sinan Melih Nigdeli'ye ve aileme destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim. |

Ağustos 2021

|Aylin Ece KAYABEKİR|

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vviii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xxiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	12
2.2. TEZİN AMACI.....	25
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	27
3.1. METASEZGİSEL ALGORİTMA KAVRAMI.....	27
3.2. METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA OPTİMİZASYON SÜRECİ.....	31
3.2.1. Metasezgisel Algoritmaların Genel Metodolojisi.....	31
3.2.2. Armoni Arama (HS) Algoritması.....	35
3.2.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (TLBO).....	37
3.2.4. Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA).....	39
3.2.5. Jaya Algoritması (JA).....	41
3.3. PID KONTROLÇÜLÜ ATMD SİSTEM OPTİMİZASYONU.....	42
3.3.1. Hareket Denklemleri.....	43
3.3.2. Sistemin Matlab Simulink ile Analizi.....	48
3.3.3. PID Kontrolçülü ATMD Sistem Optimizasyonu.....	51
4. BULGULAR.....	53
4.1. SINIRLANDIRILMAMIŞ AKTİF KUVVET VE ÜST KAT YERDEĞİŞİRMESİ DURUMU.....	54
4.1.1. Optimum Sonuçlar.....	56
4.1.2. Yöntemlerin Performans Karşılaştırılması.....	58
4.1.3. Aktif ve Pasif Ayarlı Kütle Sönümleyici Karşılaştırması.....	59

4.2. SINIRLANDIRILMIŞ AKTİF KUVVET VE ÜST KAT YERDEĞİŞTİRME DURUMU.....	62
4.2.1 Optimum Sonuçlar.....	63
4.2.2. Yöntemlerin Performans Karşılaştırılması.....	67
4.2.3 Aktif ve Pasif Ayarlı Kütle Sönümleyici Karşılaştırması.....	67
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	73
KAYNAKLAR.....	78
EKLER	84
EK 1. Aktif kuvvet ve üst kat yerdeğıştirmesinin sınırlandırıldığı duruma ait Matlab Simulink blok diyagramı.....	84
EK 2. FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğıştirme grafikleri (sınırlandırılmamış durum analizleri).	85
EK 3. FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğıştirme grafikleri (sınırlandırılmış durum analizleri).	86
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Yapısal kontrol sistemi türleri (Saaed ve diğ. 2015).	4
Şekil 2.2: Farklı konumlarda TMD'li yapısal sistemlerin şematik gösterimi (Nigdeli ve Bekdaş, 2017).	5
Şekil 2.3: Berlin Televizyon Kulesi, Berlin.	7
Şekil 2.4: LAX Theme Kulesi, Los Angeles (Miyamoto ve diğ., 2011).	7
Şekil 2.5: Taipei 101 binası ve kullanılan kütle sönümleyicisi (Bekdaş ve Nigdeli, 2011).	8
Şekil 2.6: Aktif kontrol sisteminin çalışma prensibi.	9
Şekil 2.7: ATMD' li yapısal sistem.	9
Şekil 2.8: Cao ve Li (2018) tarafından önerilen EHATMD modeli.	25
Şekil 3.1: Kuşların V şeklinde uçuşu (www.hurriyet.com.tr).	28
Şekil 3.2: Kanatların oluşturduğu hava burgacı (www.dlr.de).	28
Şekil 3.3: Hava burgaçlarının küçültülmesine yönelik kanat tasarımı (mediacat.com).	29
Şekil 3.4: Karıncaların içgüdüsel davranışı (www.wikiwand.com).	30
Şekil 3.5: Metasezgisel algoritma tabanlı optimizasyonun genel akış diyagramı.	34
Şekil 3.6: HS algoritmasının optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.	37
Şekil 3.7: TLBO algoritmasının optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.	39
Şekil 3.8: FPA'nın optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.	41
Şekil 3.9: JA'nın optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.	42
Şekil 3.10: Sırasıyla kontrolsüz, TMD kontrollü ve ATMD kontrollü N katlı bina modelleri.	43
Şekil 3.11: Kontrolsüz kesme binası modeline ait Matlab Simulink kodu.	48
Şekil 3.12: ATMD kontrollü kesme binası modeline ait Matlab Simulink kodu.	49
Şekil 4.1: ATMD kontrollü N=10 katlı bina modeli.	53

Şekil 4.2: Zaman Tanım alanına göre kritik deprem kaydı için üst kat yerdeğıştirmeleri.....	60
Şekil 4.2 (devam): Zaman Tanım alanına göre kritik deprem kaydı için üst kat yerdeğıştirmeleri.	61
Şekil 4.3: Zaman Tanım alanına göre $st_{max} 2$ için kritik deprem kaydı altında üst kat yerdeğıştirmeleri.	70
Şekil 4.4: Zaman Tanım alanına göre $st_{max} 3$ için kritik deprem kaydı altında üst kat yerdeğıştirmeleri.	71



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD) uygulama örnekleri (Soto ve Adeli, 2013).	6
Tablo 2.2: Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici (ATMD) uygulama örnekleri (Soto ve Adeli, 2013).	10
Tablo 3.1: Metasezgisel algoritmalar.	30
Tablo 3.1 (devam): Metasezgisel algoritmalar.	31
Tablo 3.2: Blok diyagramlar ve işlevleri.	50
Tablo 3.3: Tasarım sabitleri.	51
Tablo 4.1: Algoritma parametreleri.	54
Tablo 4.2: Optimizasyon problemine ait tasarım değişken ve sabitleri.	54
Tablo 4.3: FEMA P-695 uzak fay hareketi kayıtları.	55
Tablo 4.3 (devam): FEMA P-695 uzak fay hareketi kayıtları.	56
Tablo 4.4: HS algoritmasına ait optimum sonuçlar.	56
Tablo 4.5: TLBO algoritmasına ait optimum sonuçlar.	57
Tablo 4.6: FPA algoritmasına ait optimum sonuçlar.	57
Tablo 4.7: JA algoritmasına ait optimum sonuçlar.	57
Tablo 4.8: TMD ve ATMD sistemlerine ait optimum sonuçlar.	59
Tablo 4.9: FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğiştirmeleri.	61
Tablo 4.9 (devam): FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğiştirmeleri.	62
Tablo 4.10: HS algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).	63
Tablo 4.11: HS algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).	63
Tablo 4.12: TLBO algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).	64
Tablo 4.13: TLBO algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).	64
Tablo 4.14: FPA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).	64
Tablo 4.15: FPA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).	65

Tablo 4.16: JA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).	65
Tablo 4.17: JA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).	65
Tablo 4.18: TMD ve ATMD sistemlerine ait optimum sonuçlar.	69
Tablo 4.19: FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeşistirmeleri. ...	72



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
c_d	: Kontrol sistemi sönüm katsayısı
c_i	: Kat sönüm katsayısı
$[C]$	: Sönüm katsayısı matrisi
$e(t)$	: Hata sinyali
F_{maks}	: Aktif ayarlı kütle sönümleyicinin yapıya uyguladığı maksimum kontrol kuvveti
F_u	: Aktif kontrol kuvveti
$f(x)$	: Amaç fonksiyonu
g_1	: Tasarım kısıtı
i_{ATMD}	: Bobin üzerindeki akım
k_d	: Kontrol sistemi rijitlik katsayısı
K_e	: Bobinin voltaj sabiti (the induced voltage constant of armature coil)
K_f	: Kuvvet sabiti (trust constant)
K_p	: Orantı kazancı (orantı sabiti)
k_i	: Kat rijitlik katsayısı
$[K]$	: Rijitlik katsayısı matrisi
m_d	: Kontrol sistemi kütlesi
m_i	: Kat kütlesi
$[M]$	: Kütle matrisi
N_{opt}	: Optimum sonucun elde edildiği iterasyon sayısı
R	: Bobin direnci (resistance value)
$stmax$	: Aktif ayarlı kütle sönümleyici kol uzaması limiti
T_{ATMD}	: Aktif ayarlı kütle sönümleyici periyodu
td	: Zaman gecikmesi
T_d	: Türev zamanı
T_i	: İntegral zamanı
u	: kontrol sinyali (doğrusal motorun akımı)
x_d	: Kontrol sisteminin yere göre görelî yerdeğiştirmesi
x_i	: i. katın yere göre görelî yerdeğiştirmesi
$x(t)$	: Yerdeğiştirme vektörü
$\dot{x}(t)$	: Hız vektörü

$\dot{x}_d$	: Aktif ayarlı kütle sönümleyici hızı
$\dot{x}_N$	: Binanın üst kat hızı
$\ddot{x}_g$	: Yer ivmesi
$\ddot{x}(t)$	: İvme vektörü
$\ddot{x}_g(t)$	: Yer ivmesi vektörü
$\{1\}$	: Birim vektör
ξ_d	: Aktif ayarlı kütle sönümleyici sönüm oranı

Kısaltmalar

Açıklama

ABC	: Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony)
ACO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimizastion)
ATMD	: Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici (Active Tuned Mass Damper)
AMTMD	: Aktif Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici
BA	: Yarasa Algoritması (Bat Algorithm)
BB-BC	: Büyük Patlama-Büyük Çöküş Algoritması (Big Bang-Big Crunch)
BSCR	: En İyi Çözümü Dikkate Alma Oranına (Best Solution Considering Rate)
CS	: Guguk kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search)
çs	: Çözüm vektörü sayısı
DE	: Diferansiyel Evrim (Differential Evolution)
DMF	: Dinamik Büyütme Faktörü (Dynamic Magnification Factor)
EHATMD	: Geliştirilmiş Hibrit Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici
FA	: Ateş öceği Algoritması (Firefly Algorithm)
FLC	: Bulanık mantık kontrolü (Fuzzy logic controller)
FPA	: Çiçek Tozlaşma Algoritması (Flower Pollination Algorithm)
FPIDC	: Bulanık PID Algoritmali Kontrolcü (Fuzzy PID Controller)
GA	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
GFLC	: Bulanık mantık kontrolü ile genetik algoritmayı birlikte kullanan yöntem
GSM	: Değişim Arama Yöntemi (Gradient Search Method)
GWO	: Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer)
HATMD	: Hibrit Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici (Hibrit Active Tuned Mass Damper)
HS	: Armoni Arama Algoritması (Harmony Search)
HMCR	: Armoni Belleğini Dikkate Alma Oranı (Harmony Memory Considering Rate)
HMS	: Armoni Belleği Boyutu (Harmony Memory Size)

IN	: Mevcut iterasyon sayısı
IT2FLC	: Tip-2 Bulanık mantık kontrolü (interval type-2 FLC)
JA	: Jaya Algoritması (Jaya Algorithm)
KH	: Kril Sürüsü (Krill Herd Optimization)
LQG	: Doğrusal Karesel Gauss (Linear Quadratic Gaussian)
LQR	: Doğrusal Karesel Düzenleyici (Linear Quadratic Regulator)
LT-ATMD	: Manivelalı Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici (Lever-Type ATMD)
LT-AMTMD	: Manivelalı Çoklu Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici
LT-MTMD	: Manivelalı Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici
LT-TMD	: Manivelalı Ayarlı Kütle Sönümleyici
MI	: Maksimum iterasyon sayısı
MTMD	: Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici
OCLAMTMD	: Açık-Kapalı Döngülü Aktif Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici (Open-Closed-Loop AMTMD)
PAR	: Ton Ayarlama Oranı (Pitch Adjusting Rate)
PD	: Orantı+Türev
PFF	: Pozitif Konumlu Geri Besleme (Positive Position Feedback)
PID	: Orantı+Integral+Türev
pln	: Polen sayısı
pn	: Popülasyon sayısı
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
PSFLC	: Bulanık mantık kontrolü ile parçacık sürü optimizasyonunu birlikte kullanan yöntem
RMS	: Ortalama Karakök (Root Mean Square)
RO	: Işın Optimizasyonu (Ray Optimization)
SA	: Tavlama Benzeşimi (Simulated Annealing)
SMC	: Kayan Tip Kontrol (Sliding Mode Control)
sp	: polen geçiş olasılığı (switch probability)
SSI	: Yapı Zemin Etkileşimi
STFLC	: Kendinden Ayarlı Bulanık Mantık Kontrol Algoritması (Self-Tuning Fuzzy Logic Controller)
TLBO	: Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization)
TMD	: Ayarlı Kütle Sönümleyici (Tuned Mass Damper)
TSD	: Tek Serbestlik Dereceli
2DOF	: İki Serbestlik Dereceli

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[*METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZE AKTİF AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİ İLE YAPILARIN KONTROLÜ*]

[Aylin Ece KAYABEKİR]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

[**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**]

[**Danışman : Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ**]

İnşaat mühendisliği bakımından geçmişten günümüze yapısal sistemler incelendiğinde, sistemlerin insanların ihtiyaçları temelinde teknoloji, çevre ve ekonomik faktörler gibi çok sayıda etmene bağlı olarak değiştiği ve çeşitlilik gösterdiği görülmektedir. Bu duruma, insanların geçmişte olduğu gibi günümüzde barınma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yapılar inşa etmelerine karşın, artan nüfus ve ihtiyaçlar nedeniyle günümüzde geçmişe nazaran çok daha yüksek yapılar kullanılıyor olması veya geçmişten günümüze teknolojinin gelişmesiyle inşa edilen köprüler, açık deniz yapıları, rüzgâr tribünleri, televizyon kuleleri, elektrik nakil hatları üretilmesi örnek olarak gösterilebilir. İhtiyaca bağlı artan yapısal çeşitlik ise daha karmaşık yapı sistemlerinin tasarlanması ile tasarımda yapıya özel farklı dış etiklerin de dikkate alınması beraberinde getirmiştir. Geleneksel yöntemlerin söz konusu etkilere karşı yapısal güvenliği sağlamadaki yetersizliği, mimari, estetik veya ekonomik sebepler tasarımlarda yenilikçi çözümlerin kullanılmasını gerekli kılmıştır.

Tez çalışması kapsamında söz konusu yenilikçi çözümlerden kontrol sistemlerinin bir türü olan aktif ayarlı kütle sönümleyicilerinin (ATMD) optimum tasarımı incelenmiştir. Optimizasyon işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla metasezgisel algoritma tabanlı yöntem geliştirilmiştir. Matlab R2018a ile bilgisayar kodu yazılmış yöntemde, metasezgisel algoritmalar içerisinde etkinliği bilimsel çalışmalarla kanıtlanmış Armoni arama, öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon, çiçek tozlaşma ve jaya algoritmaları kullanılmıştır. Optimizasyon işleminde tasarım değişkenleri olan ATMD sistemi (kütle, periyot ve sönüm oranı) ile sisteme ait PID

(orantı+integral+türev) kontrolcü parametrelerinin (orantı sabiti, integral zamanı ve türev zamanı) en uygun değerleri FEMA P:695 tanımlanan 24 deprem kaydının dış etki olarak tanımlandığı yapısal sistemin son kat yerdeğiştirmesinin minimum değerinin elde edilmesi amacıyla aranmıştır. On katlı kesme binası üzerinde çeşitli durumlar altında test edilen yöntemden ait sonuçlar algoritmaların optimizasyon performansının kendi içerisinde ve kontrol sistemin etkinliğinin belirlenmesi bakımından ise TMD sistemi ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, algoritma olarak armoni arama (HS) algoritmasının en uygun olduğu optimum ATMD tasarımının performansının kontrolsüz sisteme göre %52.13'e, TMD kontrollü sisteme göre ise %29.97'e varan düzeyde daha etkin olduğu görülmüştür. |

Eylül 2021, |113| sayfa.

Anahtar kelimeler: |Yapısal kontrol, aktif ayarlı kütle sönümleyici, optimum tasarım, metasezgisel algoritma. |



SUMMARY

[Ph.D. THESIS]

**[CONTROL OF STRUCTURES BY ACTIVE TUNED MASS DAMPERS
OPTIMIZED VIA METAHEURISTIC ALGORITHMS]**

[Aylin Ece KAYABEKİR]

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

[Department of Civil Engineering]

Supervisor : [Prof. Dr.] [Gebrail BEKDAŞ]

Examining the structural systems from past to present in terms of civil engineering, it is seen that the systems change and vary depending on many factors such as technology, environment and economic factors on the basis of people's needs. As example of this situation, the use of much higher structures with respect to the past, or the production of bridges, offshore structures, wind turbines, television towers, electricity transmission lines with the development of technology can be given. Increasing structural diversity depending on the human needs has revealed the necessity to take into account different external factors specific to the structure in design as well as complex structural systems. The inability of traditional methods to provide structural safety against these effects, architectural, aesthetic or economic reasons make it necessary to use innovative solutions in designs.

Within the scope of the thesis, the optimum design of active tuned mass dampers (ATMD), which is a type of control systems, has been investigated. A metaheuristic algorithm-based method has been developed in order to perform the optimization process. In the method, written with Matlab R2018a, harmony search, teaching-learning-based optimization, flower pollination and jaya algorithms are used as metaheuristic algorithms. Design variables of optimization ATMD system parameters are mass, period, damping ratio, proportional constant, integral time and derivative time.

The most suitable values of combination of these design variables are searched in order to obtain the minimum value of the top storey displacement of the structural system for critical earthquakes within 24 earthquake records defined in FEMA P: 695. Developed method is tested on a 10-storey shear building and the results are evaluated in terms of the optimization performance of the algorithms and the efficiency of the control system.

According to these results, it has been seen that the most suitable algorithm for the optimum ATMD design is harmony search. It has been also understood that the optimum ATMD system decreases the maximum displacement value up to 52.13% compared to the uncontrolled system and it is 29.97% more successful than the TMD controlled system. |

September 2021, [113] pages.

Keywords: |Structural control, active tuned mass damper, optimum design, metaheuristic algorithm. |



1. GİRİŞ

[Yapı tasarımı esnasında mühendisin karşılaştığı belirsizlikler, yapısal belirsizlikler ve dış etkilerle bağlı belirsizlikler olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Bunlardan yapısal belirsizlere yol açan sebepler arasında malzemelerin üretim kusurları, malzemenin mekanik özelliklerindeki belirsizlikler, analiz süresince yapılan çeşitli varsayımlar, yapının üretim aşamasında oluşan işçilik kusurları gibi malzeme ve üretim kaynaklı belirsizlikler yer almaktadır.

Dış etkilere bağlı belirsizler ise yapısal sisteme doğrudan veya dolaylı etkiyen yüklerin tanımlanması aşamasında ortaya çıkan belirsizlikleri kapsamaktadır. Örnek olarak ilgili yönetmeliklerde yapının kullanım türüne göre yaklaşık olarak önerilen sabit yüklerde zaman içerisinde büyük bir değişiklik olmazken, hareketli yüklerde zamana bağlı olarak farklılıklar oluşabilmektedir. Ancak her durumda yönetmelik tarafından önerilen değerlerin aşılma riski belirsizlik nedenidir.

Bir diğer örnek ise sismik aktiviteler nedeniyle yapıya etkiyen yüklerin belirsizliğidir. Yapının deprem etkisi altındaki dinamik davranışında, depremin büyüklüğü, fayın kırılma mekanizması ve doğrultusu, bölgenin faya olan uzaklığı, deprem dalgasının ilerlediği jeolojik ortamın özellikleri ile yerel zemin özellikleri etkili olmaktadır ve bu belirsizliklere bağlı olarak yapısal sistemin iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerlerinde beklenmedik artışlar olabilmektedir. Bu tarz durumlara örnek olarak, yakın fay hareketlerinin ortaya çıktığı 1995 Kobe depreminde fay karakteri sebebiyle veya 1985 Mexico City depreminde zemin büyütmesi problemiyle nedeniyle yapısal sistemlerde büyük yerdeğiştirmeler meydana gelebilmesi, bunun sonucunda etkilerin tam olarak belirlenip tasarlanmadığı yapılarda göçmeye varan yüksek hasarlar oluşabilmesi gösterilebilir.

Sismik etkilerden başka, rüzgâr ve trafik gibi zamana bağlı değişen yükler ile ısı etkileri sonucu yapıya etkiyen yüklerin yol açtığı belirsizlere benzer daha birçok örnek dış etkilere bağlı belirsizler kapsamında sayılabilir.

Yukarıdaki bahsi geçen ve benzeri nedenlerden meydana gelebilecek yapısal tepkilerdeki artış hem yapısal güvenliğin sağlanması açısından tehlike arz edebilmekte hem de yapısal konforu bozabilmektedir. Bu nedenlere bağlı olarak son yıllarda, yapılarda deprem, rüzgar, trafik ve benzeri dinamik etkiler sebebiyle oluşması beklenen yapısal tepkilerin ve titreşimlerin azaltılmasına yönelik araştırmalara verilen önem artmıştır.

Bölüm 2’de bu araştırmalar sonucunda geliştirilen kontrol sistemlerinin kısa tarihçesi, türleri ile söz konusu sistemler hakkında yapılmış bilimsel çalışmalara ait bilgiler sunulmuştur.

Tez çalışması kapsamında bu sistemlerin bir türü olan ve günümüzde yapılarda birçok pratik uygulamasına rastlanılan aktif ayarlı kütle sönümleyicilerinin (ATMD) optimum tasarımı incelenmiştir. Çalışmada metasezgisel algoritma tabanlı optimizasyon kodları yazılmıştır. Bunlara ait ayrıntılı bilgi Bölüm 3’te verilmiştir.

Geliştirilen optimizasyon kodu 10 katlı örnek bir yapı üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar algoritma performansının belirlenmesi amacıyla kendi içerisinde, ATMD performansının belirlenmesi içinse pasif ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sonuçları çok sayıda durum altında detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bunlara ait bilgiler ve ulaşılan sonuçlar Bölüm 4’te detaylarıyla ele alınmıştır.

Analiz sonuçlarının her yönüyle bütüncül değerlendirilmesi sonucunda ise çeşitli çıkarımlar yapılmıştır. Söz konusu çalışmaya ait çıkarımlar ise Bölüm 5’te yapılmıştır.

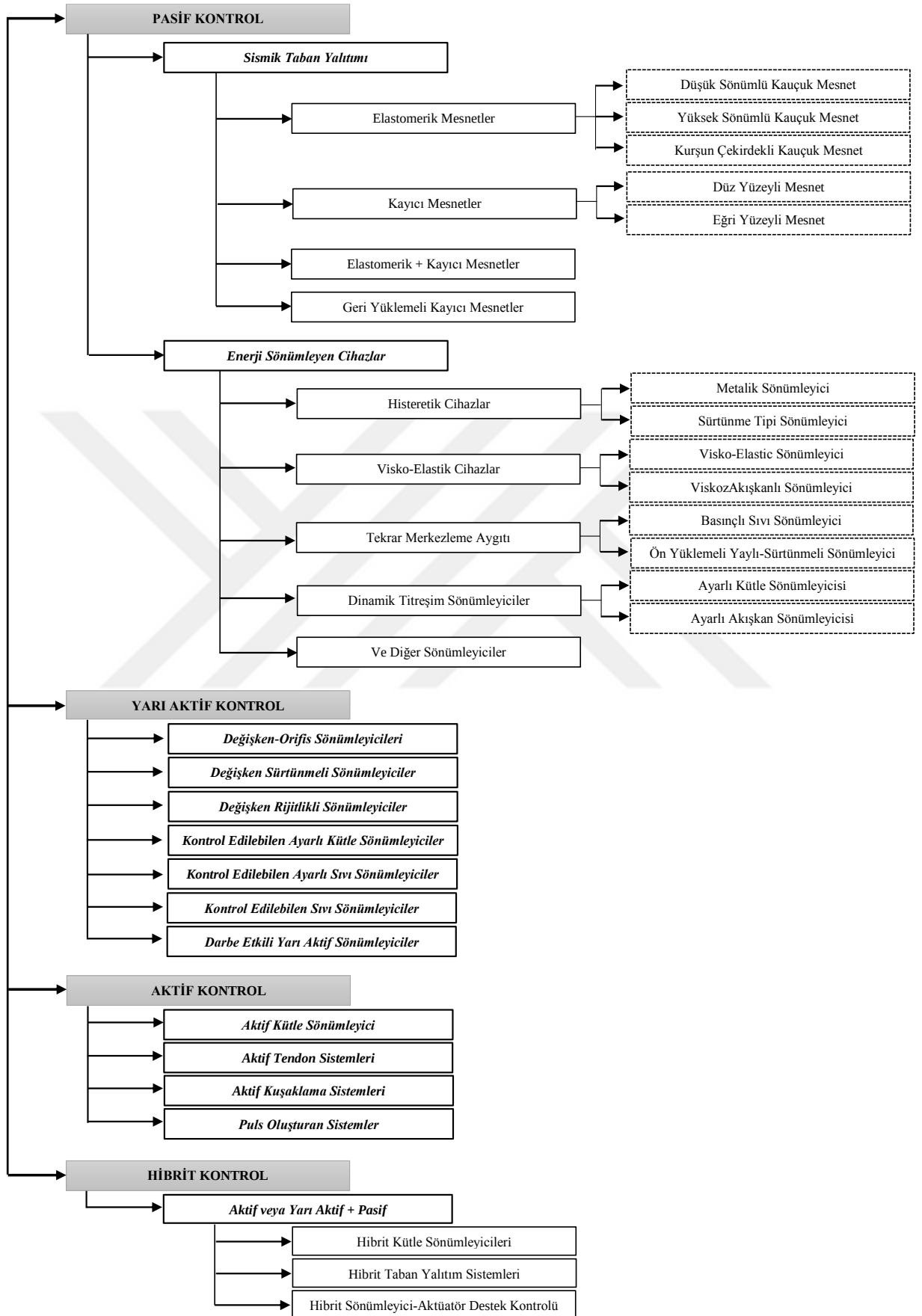
|

2. GENEL KISIMLAR

Geleneksel tasarımlarda yapıya giren enerji yapıda plastik mafsallar oluşmasına bir başka deyişle yapının hasar görmesine izin vererek tüketmek üzerine kuruludur. Kontrol sistemlerinin genel çalışma prensibine göre söz konusu enerji yapıya sağlanan ek sönüm ile tüketilmelidir.

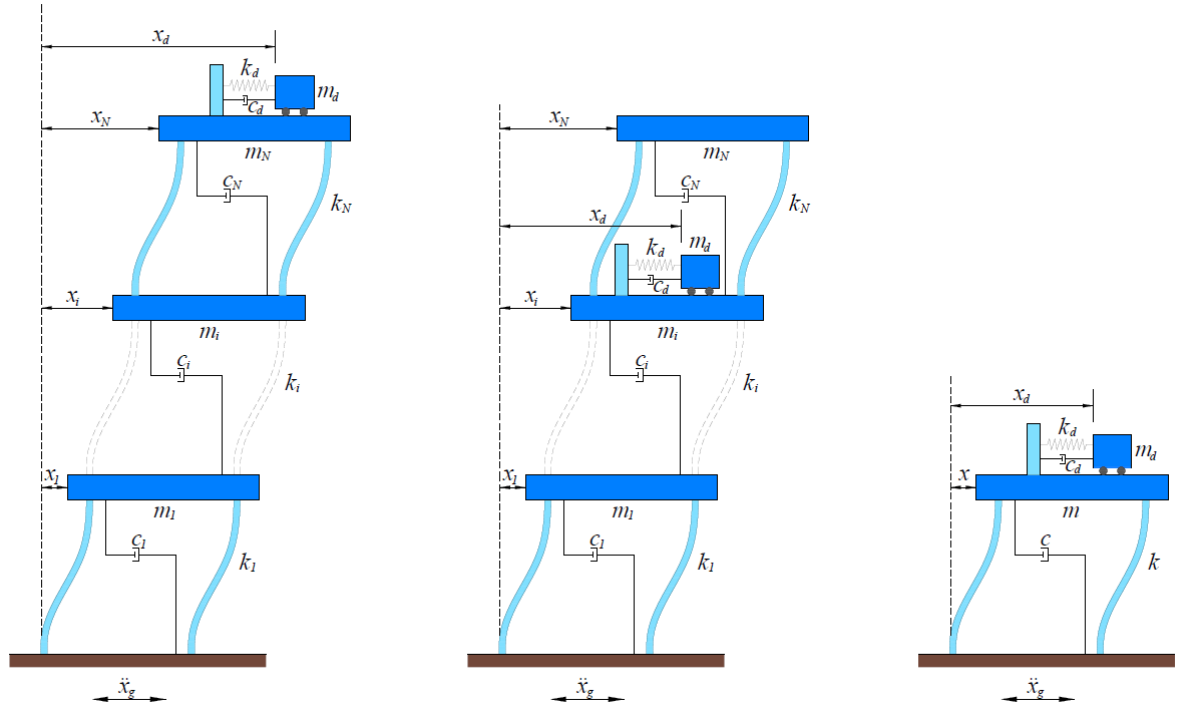
Tasarım ve kullanılan ekipmanları bağlı olarak farklı türleri bulunan kontrol sistemleri genel anlamda aktif ve pasif olmak üzere iki ana başlık altında ele alınabilir. Ancak bu sistemlere ek olarak yarı-aktif ve hibrit kontrol sistemlerini de ayrı bir başlık altında değerlendirmek mümkündür. Literatürde bulunan çalışmalar içerisinde Saaed ve diğ. tarafından 2015 yılında gerçekleştirilen çalışma kontrol sistemlerin tasarım ve türleri açısından genel bir fikir edinilmesi açısından dikkate değer çalışmalar arasındadır ve genel anlamda günümüzde kullanılan kontrol sistemlerinin türleri hakkında bilgi edinilmesini açısından kontrol sistemlerine ait Şekil 2.1’de gösterilen sınıflandırma, söz konusu çalışmaya bazı ekler yapılarak hazırlanmıştır.

Yapısal kontrol sistemlerinden pasif kontrol sistemlerinin genel çalışma prensibi, yapının hareketi neticesinde kontrol sisteminde oluşan göreceli yerdeğiştirmeler sayesinde herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaksızın yapı ile sistem arasında enerji dağılımının sağlanması ve bunun sonucunda titreşim enerjinin önemli bir kısmının kontrol sistemi ile tüketilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere çeşitli türleri bulunan sistemler enerji dağılımını sistem bileşenlerindeki çeliğin akması, kauçuk benzeri malzemelerde viskoelastik etki ya da sıvının orifis yardımıyla akış özelliklerinin kontrolü gibi mekanizmalar sayesinde sağlanabilmektedir (Symans ve Constantinou, 1999).



Şekil 2.1: Yapısal kontrol sistemi türleri. (Saeed ve diğ. 2015)

Tez çalışması kapsamında aktif türü incelenecek ve pratik uygulamalarına sıklıkla karşılaşılan **pasif ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sistemleri**, yapının titreşim moduna uygun olarak parametreleri tasarımcı tarafından belirlenen kütle (m_d), rijitlik elemanı (k_d rijitlik katsayılı) ile viskoz sönümleyici (c_d sönüm katsayılı) bileşenleri sayesinde titreşim enerjisinin yapı ve sistem arasında paylaşılmasını sağlayarak esas yapının titreşim enerjisi azaltırlar. Genellikle yapısal titreşimlerin en fazla olduğu üst katlarda uygulanan bu sistemler, ihtiyaca uygun olarak yapının farklı yerlerinde de uygulanabilmektedirler. Şekil 2.2’de kayma binası ile üzerinde söz konusu TMD sistemine ait şematik gösterim yapılmıştır. Şekilde TMD sistemin kütle, rijitlik, sönüm ve yere göre göreceli yerdeğiştirmeleri sırasıyla m_d , k_d , c_d ve x_d ile ifade edilirken; bu parametreler yapının her bir katı için m_i , k_i , c_i ve x_i ($i=[1,N]$) ile sembolize edilmiştir ve $\ddot{x}_g$ ile yer ivmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Farklı konumlarda TMD’li yapısal sistemlerin şematik gösterimi (Nigdeli ve Bekdaş, 2017).

TMD sistemlerin pratik uygulamalarına ise ABD, Almanya, Japonya ve Çin gibi birçok ülkede rastlamak mümkündür. Bu uygulama örneklerinden bazıları, yapılar ve uygulanan sistemin özellikleriyle birlikte Tablo 2.1’de sunulmuştur (Soto ve Adeli, 2013). Tablodan görüleceği üzere, uygulamada en yüksek fayda sağlanması amacıyla TMD sistemlerinin tek veya birden

fazla da kullanıldığı uygulamalara da bulunmaktadır. Bir başka ifadeyle TMD sistemleri farklı şartlara uygun çeşitli şekillerde uygulanabilmektedir.

Tablo 2.1: Ayarlı Kütle Sönümleyici (TMD) uygulama örnekleri (Soto ve Adeli, 2013).

Yapı İsmi	Yapı Türü	Yapı Yüksekliği	Kat Sayısı	Konum	Tamamlanma Yılı	TMD Sayısı ve Özellikleri
Citycorp Center	Bina	278 m	59	New York, ABD	1978	TMD Frekans = 0.16 Hz Kütle = 370 ton
Al Khobar	Baca	120 m	–	Al Khobar, Suudi Arabistan	1982	TMD Frekans = 0.44 Hz Kütle = 7 ton
Kyobashi Center	Bina	33 m	11	Tokyo, Japonya	1989	2 TMD Kütle = 5 ton
Sendagaya INTES	Bina	58 m	11	Tokyo, Japonya	1992	2 TMD Kütle = 72 ton
Chifley Tower	Bina	209 m	53	Sydney, Avustralya	1993	1 TMD Kütle = 400 ton
Al Taweelah	Baca	70 m	–	Abu Dabi, Birleşik Arap Emirlikleri	1993	1 TMD Frekans = 1.4 Hz Kütle = 1.35 ton
Hotel Burj-Al-Arab (7-star)	Bina	321 m	60	Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri	1997	11 TMDs Frekans = 0.8–2 Hz Kütle = 11 × 5.00 ton
Stakis Metropole	Otel Binası	60 m	20	London, Birleşik Krallık	2000	7 TMD Frekans = 4.4 Hz Kütle = 4.5 ton
Regensburg Siemens Building	Bina	–	–	Regensburg, Almanya	1996	11 TMD Kütle = 11 × 0.17 ton
Hangzhou Bay Bridge Tower	Kule	130 m	–	Jiaxing, Çin	2009	1 TMD Frekans = 0.3 Hz
Lanxess, Chemical Plant	Bina	–	2	Ontario, Kanada	2009	4 TMDs Kütle = 4 × 3 ton
Estela de la Luz	Kule	104 m	–	Mexico City, Meksika	2010	8 TMD Frekans = 0.3 Hz Kütle = 3 ton
Tokyo Skytree	Kule	634.0 m	–	Tokyo, Japonya	2012	1 TMD Kütle = 100 ton

Bu sistemlerin pratik uygulamalarına ait bazı görseller de aşağıda sunulmuştur (Şekil 2.3-2.5). Şekildeki yapılar ve sistemlerin kullanım amaçları ise, Berlin Televizyon Kulesi-rüzgar etkilerinin sönümlenmesi (Şekil 2.3), Los Angeles havaalanındaki LAX Theme Kulesi-güçlendirme (Şekil 2.4) ve küre şeklinde kütle sönümleyicisine sahip olan Taipei 101 binası-rüzgar ve deprem etkilerinin azaltılmasıdır (Şekil 2.5) (Kayabekir, 2011).



Şekil 2.3: Berlin Televizyon Kulesi, Berlin.



Şekil 2.4: LAX Theme Kulesi, Los Angeles (Miyamoto ve diğ., 2011).

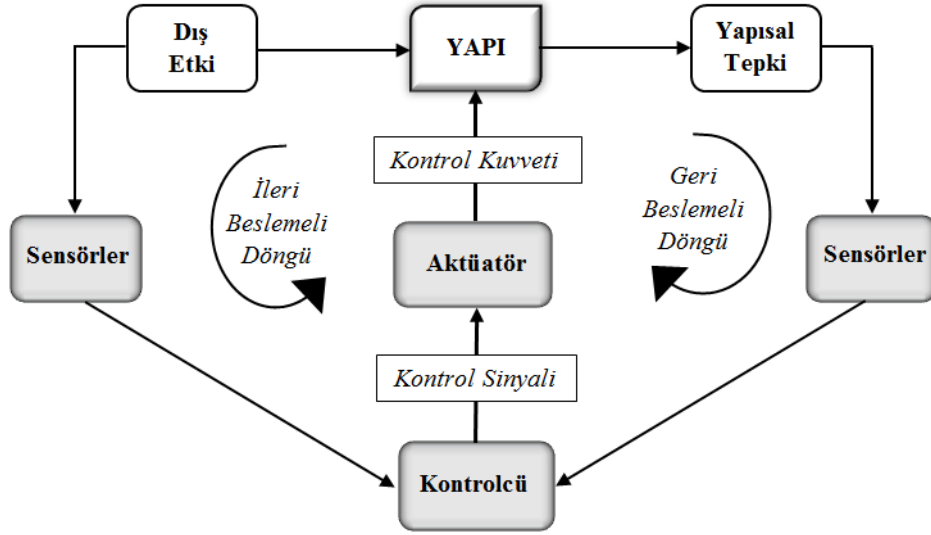


Şekil 2.5: Taipei 101 binası ve kullanılan kütle sönümleyicisi (Bekdaş ve Nigdeli, 2011).

Tasarım, türleri ve uygulama örneklerine yukarıda kısaca değinilen pasif kontrol sistemlerinin performansı, deprem gibi zamana bağlı değişen etkilere karşı kontrol sisteminin tasarımı gereği kısıtlı kalabilmektedir. Bu performans probleminin sınırlandırılması amacıyla uygulanabilecek alternatif sistemlerden biri olan **aktif kontrol sistemleri** zamana göre değişen kuvvetleri, dinamik verenler sayesinde elde ederek yapısal tepkileri sönümlenmesini sağlayacak aktif kuvvet üretirler ve bu sayede etkisi yüksek olan dinamik etkiler karşısında bile yapının hızlı bir şekilde kararlı hale gelmesini sağlarlar.

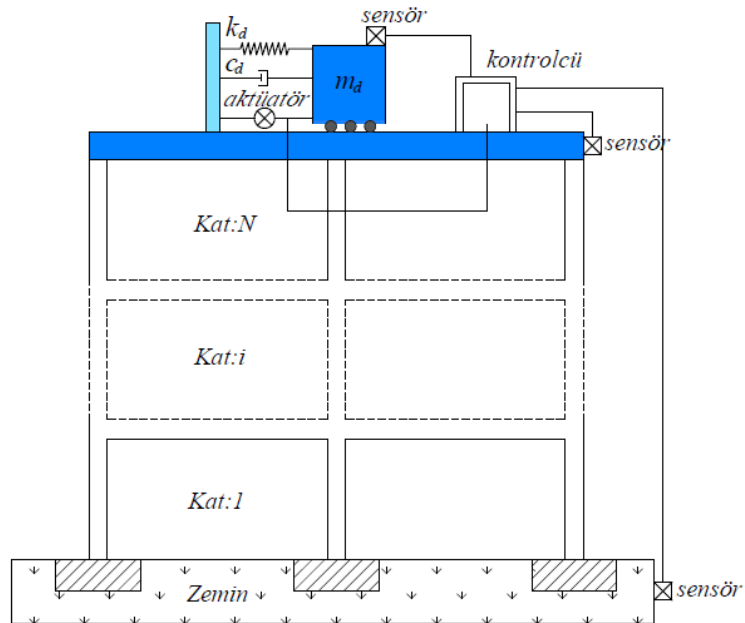
Aktif kontrol sistemlerinin temel bileşenleri yapının farklı bölgelerine yerleştirilebilen sensör (veya sensörler), kontrolcü ve aktüatör (veya aktüatörler) şeklindedir. Ancak bazı sistemler, söz konusu bileşenlere ilaveten rijitlik ve/veya sönüm elemanları da içerebilirler. Sistemin genel çalışma prensibi ve bileşenlerin sistem içerisindeki görevleri ise, dış etkilerin (ileri beslemeli kontrol süreci için) ve/veya yapısal tepkilerin (geri beslemeli kontrol süreci için) (Suhardjo ve diğ., 1990), sensörler aracılığıyla gerçek zamanlı olarak algılanıp ölçülmesi, ölçümlerin bir kontrol bilgisayarı veya kontrolcü ile değerlendirilerek gerekli olan kontrol kuvvetinin belirlenmesi ve bu kontrol kuvvetlerinin elektrohidrolik veya elektromekanik aktüatörler aracılığıyla yapıya uygulanması şeklindedir. Şekil 2.6’da hem ileri hem de geri beslemeli

kontrolü içeren bir kontrol isteminin çalışma prensibini özetleyen bir akış diyagramı sunulmuştur.



Şekil 2.6: Aktif kontrol sisteminin çalışma prensibi.

Bu sistemlerin bir kolunu oluşturan **aktif ayarlı kütle sönümleyicileri (ATMD)**, TMD sistemlerin değişken frekanslardaki uygulanabilirliğini arttırmak amacıyla TMD sisteme aktif kontrol mekanizması eklenmesiyle (sensör, kontrolcü ve aktüatör) türetilmiş bir sistem olarak tanımlanabilir (Şekil 2.7). TMD sistemlere benzer şekilde birçok yapıya başarıyla uygulanan ATMD sistemlerine ait bazı örnekler Tablo 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.7: ATMD' li yapısal sistem.

Tablo 2.2: Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici (ATMD) uygulama örnekleri (Soto ve Adeli, 2013).

Yapı	Kullanım Amacı	Yüksekliği	Kat Sayısı	Yeri	Yapım Yılı	ATMD Özellikleri
ORC 2000 Symbol tower	Bina	188 m	50	Osaka, Japonya	1992	2 ATMD Frekans = 0.21 Hz Kütle = 200 ton
Rokko Island Procter and Gamble	Bina	117 m	36	Kobe, Japonya	1993	ATMD Frekans = 0.33–0.62 Hz Kütle = 270 ton
Kansai International airport	Kule	86 m	7	Osaka, Japonya	1993	2 ATMD Frekans = 0.8 Hz Kütle = 10 ton
C Office Tower	Bina	130 m	32	Tokyo, Japonya	1993	ATMD Frekans = 0.34 Hz Kütle = 200 ton
KS Project	Kule	121 m	–	Kanasawa, Japonya	1993	ATMD Kütle = 100 ton
Ando Nishikicho	Bina	68 m	14	Tokyo, Japonya	1993	TMD & ATMD Frekans = 0.68-0.72 Hz
MKD8 Hikarigaoka	Building	100 m	30	Tokyo, Japonya	1993	ATMD pendulum 0.44 Hz
Shinjuku Park Tower	Bina	227 m	33	Tokyo, Japonya	1994	3 ATMD Kütle = 330 ton
Triton Square office complex	Bina	195 m	–	Tokyo, Japonya	2001	4 ATMD Kütle = 4×35 ton
Incheon International Airport Control Tower	Kule	100.4 m	22	Incheon, Kore	2001	2 ATMD & TMD Frekans = 0.71 Hz Kütle = 11&13 ton Yerleşim = 19. kat
Air Traffic Control Tower	Kule	57 m	–	Edinburgh, Almanya	2005	ATMD Frekans = 1.7-2.0 Hz Kütle = 14 ton
Shanghai World Financial Center	Bina	492 m	101	Shanghai, Çin	2008	ATMD Yerleşim= 90. kat
Canton Tower (Guangzhou TV Tower)	Kule	600 m	85	Guangzhou, Çin	2010	ATMD & TMD Kütle = 50 & 600 ton Yerleşim = 85. kat

ATMD sistemler, aktüatör aracılığıyla yardımcı sistem hareketinin kontrolcüyü önceden tanımlanmış ve çeşitli yöntemlere bağlı olarak çalışan kontrol algoritmaları sayesinde ayarlanmasını sağlamaktadırlar. Söz konusu kontrol algoritmalarının başta H_∞ , PID (orantı+integral+türev), bulanık mantık kontrolü (FLC) olmak üzere birçok çeşidi bulunmaktadır. Algoritmalar aktif kontrol sisteminde yapıya uygulanacak kuvvetlerinden belirlenmesinde kullandıklarından, algoritmaların sistem içerisindeki rolü önemlidir. Bu kuvvetlerin belirlenmesinin ardından, kuvvetlerin yapıya uygulanması aşamasında ise diğer aktif kontrol sistemlerine benzer şekilde kuvvetin büyüklüğüne bağlı önemli değerlere varabilecek bir enerjiye ihtiyaç duymaktadır.

Zamana bağlı değişen kuvvetlerin etkisi altındaki performansı pasif kontrol sistemlerine kıyasla daha iyi olan aktif kontrol sistemlerinin büyük enerji kaynağına ihtiyaç duyması ve pasif kontrol sistemlerine oranla daha maliyetli olmaları söz konusu sistemlerin dezavantajları arasındadır.

Maliyet bakımından en uygun aktif kontrol sistemin hangisidir sorusunun cevabı ise birçok parametreye bağlı olarak değişebilir. Ancak maliyet açısından aktif kontrol sistemleri içerisinde ATMD sistemlerinin daha ekonomik çözümler bakımında avantajlı olduğu söylenebilir. Bu ekonomik avantajın sebebi ATMD sistemin çalışma prensibinde saklıdır. ATMD sistemlerinde kuvvet yardımcı kütleye uygulanırken, aktif kontrol sistemlerin kuvvet genel olarak yapıya uygulanır. Bunun sonucu olarak da gerekli olan kontrol kuvvetleri ile sistemin kollarındaki uzama miktarlarının diğer sistemlere kıyasla düşük olur (Saaed ve diğ., 2015).

Aktif ve pasif kontrol sistemlerine alternatif olarak, yarı-aktif kontrol sistemleri ile hibrit kontrol sistemleri ihtiyaca uygun olarak kullanılabilecek diğer kontrol sistemleridir. Bunlardan **yarı-aktif kontrol sistemleri** rijitlik, sönüm gibi mekanik özellikleri değiştirilebilen pasif kontrol sistemleri olarak tanımlanabilirler. Söz konusu mekanik özellikler, sensörler aracılığıyla yapısal tepkilerden ve/veya dış etkilerden elde edilen ölçümlere uygun olarak kontrolcü tarafından üretilen komutlar ile ayarlanabilmektedirler. Bu sistemler, çalışma prensipleri açısından aktif kontrol sistemlerine benzerlik gösterebilir de yapıya direkt olarak bir aktif kuvvet uygulamadıklarından pil gibi küçük enerji kaynakları ile çalışabilirler (Saaed ve diğ., 2015; Symans ve Constantinou, 1999; Soong ve Spencer, 2002).

Diğer bir kontrol sistemi olan **hibrit kontrol sistemleri** ise genel anlamda şimdiye kadar ele alınan kontrol sistemlerinin (pasif, aktif, yarı aktif) farklı avantajlarından yararlanmak amacıyla birlikte kullanıldığı (aktif veya yarı aktif+pasif) sistemler olarak tanımlanabilirler (Şekil 2.1). Hibrit sistemler farklı sistemlerin avantajlarına sahip olduklarından aktif sistemlere oranla daha düşük enerji ile çalışabilmekte ve söz konusu enerji kaynaklarının kesilmesi durumunda bile pasif sistemler olarak çalışmaya devam edebilmektedirler. Bu açıklamalara uygun olarak, aktif kontrol sistemlerinin bir kolu olarak ele alınan ATMD sistemlerinin de hem TMD sistemlerin pasif özelliklerinden yararlanmaları hem de aktif kontrol mekanizmaları ile aktif kontrol prensibine uygun çalışmaları sebebiyle hibrit kontrol sistemlerine dahil edildiği çalışmalar bulunmaktadır. Bahsi geçen çalışmalara örnek olarak Nishitani ve Inoue (2001), Venanzi ve Materazzi (2012), Venanzi ve diğ. (2013) tarafından yapılmış çalışmalar gösterilebilir.

2.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde aktif kontrol sistemlerinden olan aktif ayarlı kütle sönümleyici (ATMD) sistemler ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar kronolojik sıralamaya uygun olarak sunulacaktır.

Chang ve Yang (1995) tek serbestlik dereceli (TSD) sistemler ile modellenen yapıların ATMD ile aktif kontrolüne ilişkin yaptıkları çalışmalarında, ATMD sistemin yapıya uygulaması gereken kontrol kuvvetlerinin belirlenmesinde kapalı döngülü tam geri beslemeli kontrol algoritmasının (closed-loop complete-feedback control algorithm) kullanılmasını önermişlerdir ve “Gaussian white noise stationary” yer hareketine maruz bırakılan TSD sistem için yaptıkları analizler sonucunda önerilen kontrol algoritmasının yapısal tepkileri azaltmakta başarılı olduğu kanısına varmışlardır.

Ankireddi ve Yang (1996) ise rüzgar yüklemesine maruz kalan yüksek yapıların titreşim kontrolü için ATMD tasarımı yaptıkları çalışmalarında rüzgar yüklerini beyaz gürültü (white noise) ile modellenmişlerdir ve ATMD sistemin kontrolünde tam geri besleme (yerdeğiştirme, hız ve ivme geri beslemesi) kontrol algoritmasından yararlanmışlardır. Söz konusu aktif kontrol yöntemin etkinliği, yüksekliği 162 m ve 400 m olan basitleştirilmiş yapı modelleri (konsol bir kiriş gibi davranan dört serbestlik dereceli model) kullanılarak yapıların birinci mod tepkileri üzerinde test edilmiştir ve yapılan değerlendirmeler sonucunda yapı modelinin tepe noktasında oluşması beklenen yerdeğiştirmelerin standart sapma değerlerini azaltmakta pasif kontrolle nazaran daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Loh ve Chao (1996), yapının üst katına konumlandıkları TMD ve ATMD sistemler ile yapı ve temel arasına yerleştirdikleri izolasyon sistemlerine ATMD ekleyerek elde ettikleri hibrit kontrol sistemlerinin yapı üzerindeki etkinliğini araştırmışlardır. İlgili çalışmada, TMD tasarımı Den Hartog’nun önerilerine (Den Hartog’s proposal) uygun olarak yapılırken ATMD’li sistemin kontrolünde kutup atama yönteminden yararlanılarak (pole assignment method) ağırlık matrisi (weighting matrix, Q) belirlenmiştir. Buna ek olarak sismik izolasyon sisteminin inelastik davranışının modellenmesinde Bouc-Wen modelinden yararlanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizlerde ise rijitliği yüksek olan üç katlı bir yapı ile rijitliği daha düşük bir yapının hem yumuşak zemin hem de sert zemine konumlandırıldıkları durum göz önüne alınmıştır. Buna göre ATMD sistem iyi bir kontrol sağlarken, TMD sistemin yapıda 1.0 g’nin

üzerinde olan oldukça büyük ivmelerin oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Hibrit sistemin ise uygun ağırlık matrisi seçildiği durumlarda makul sonuçlar verebildiği sonucuna varılmıştır.

Adhikari ve Yamaguchi (1997), kayan kip kontrol algoritmasından (sliding mode control (SMC) algorithm) yararlanarak ATMD'li çok katlı yapılarda oluşabilecek yapısal tepkilerin azaltılmasını amaçladıkları çalışmalarında, geleneksel SMC uygulamasından farklı olarak bir kompansatörden yararlanmışlardır. Geleneksel SMC yöntemi uygulanan ATMD'li yapılarda büyük ATMD tepkilerine bağlı olarak büyük yapısal tepkilerin ortaya çıkabilmesi nedeniyle söz konusu çalışmada bir kompansatör kullanılması önerilmiştir. Önerilen yöntem Japonya'da bulunan 100 m yüksekliğe sahip bir yapı modelinde rüzgâr yüklemeleri altında test edilmiştir ve geleneksel yöntemin aksine, yapıda büyük tepkilerin oluşması engellendiği görülmüştür.

Mackriell ve diğ. (1997) 200 ve 400 m yüksekliğinde iki yüksek yapının rüzgâr etkileri altında birinci mod titreşim kontrolünü sağlamak amacıyla söz konusu yapıların tepesine ATMD konumlandıkları çalışmalarında ivme geri beslemesi kullanan kontrol algoritmasının yapısal tepkileri azaltmakta oldukça başarılı olduğunu tespit etmişlerdir.

Yan ve diğ. (1999) de optimum ATMD tasarımında H_{rms} norm kontrol tekniğini kullanmışlar ve Ankireddi ve Yang (1996) tarafından optimum ATMD tasarımı için türetilen analitik ifadelerin hassaslığını daha kompleks rüzgar etkileri altında test etmişlerdir. Yapılan testlere göre Ankireddi ve Yang (1996) tarafından önerilen yöntemin along-wind uyarımları altında optimum parametreleri bulmada yeterli olduğu, across-wind uyarımları altında ise optimum frekans oranına ulaşamadığı belirlenmiş ve frekans oranının modifiye edilmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

Qu ve diğ. (2001) her kata sensör yerleştirmemin pratik bir çözüm olmadığı gerekçesiyle mertebe-azaltma kontrolü (reduced-order control) kullanılmasının gerekli olduğunu belirttikleri çalışmalarında iteratif bir yöntem olan dinamik yoğunlaştırma yönteminin (dynamic condensation method) kullanılmasını önermişlerdir. Önerilen yöntem 40 katlı, ATMD'li yüksek yapı için kullanmış ve yöntemin etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Nagashima (2001) titreşim kontrolünün doğrusal karesel düzenleyici (linear quadratic regulator (LQR)) kontrollü ATMD ile sağlandığı tek serbestlik dereceli yapı modelini kullanarak

optimum yerdeğiştirme geri besleme kontrolü yarasını (Optimal displacement feedback control law) tütetmiştir. Söz konusu çalışmada LQR geri kazanım faktörleri Ricatti denklemini çözölerek elde edilmiştir ve bu sonuçlara bağlı olarak kütle sönümleyicisinin rijitliği ayarlanmıştır.

Aldawod ve diğ. (2001) Melbourne, Australia’da bulunan 76 katlı betonarme ofis binasını dikkate alınarak yaptıkları çalışmada along-wind uyarımları altında yapısal titreşimlerin kontrollünün sağlanması amacıyla FLC (Fuzzy logic controller/Bulanık mantık kontrolü) kontrol algoritmalı ATMD’den yararlanmışlardır ve FLC kontrol algoritmasının performansını geleneksel kontrol algoritmalarından biri olan doğrusal karesel Gauss (linear quadratic Gaussian (LQG)) ile kıyaslamışlardır. Nümerik örnekler sonucunda FLC kontrol algoritmasının güvenirliliği kanıtlanmış ve LQG kontrol algoritmasına nazaran yapısal tepkiler, gerekli aktif kontrol kuvvetleri, kütle sönümleyicinin kollarının uzama miktarları, güvenirlilik ve sensör sayıları açısından kısmen başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Daha sonra yaptıkları çalışmalarında ise (Samali ve Al-Dawod, 2003) ATMD’li 5 katlı yapı modelini kullanarak FLC ve LQR (linear quadratic regulator) kontrol algoritmalarının performanslarını karşılaştırmışlardır ve araştırmanın sonucunda deprem yükleri altında her iki kontrol algoritmasının da yapısal tepkiler, gerekli olan kontrol kuvvetleri ve kütle sönümleyicinin kollarının uzama miktarları bakımından benzer performans gösterdiği; sensör sayısı ve gerekli olan güç bakımından ise FLC kontrol algoritmasının daha iyi performans sergilediği sonucuna varmışlardır.

Benzer şekilde Samali ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada da FLC kontrol algoritmalı ATMD sistem Melbourne, Australia’da bulunan 306 m yüksekliğinde 76 katlı betonarme ofis kulesine uygulanmış ve söz konusu kontrol sistemin rüzgar yüklemeleri altındaki performansı LQG kontrol algoritmalı ATMD sisteminkiyle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizler ile yapısal tepkiler, gerekli olan kontrol kuvveti ve kütle sönümleyicinin kollarının uzama miktarları bakımından her iki kontrol algoritmasının da performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu; gerekli kontrol gücü ve sensör sayısı bakımından FLC kontrol algoritmasının performansının daha iyi olduğu bir kez daha ortaya koyulmuştur.

Li ve Liu (2002) yer ivmesinden kaynaklı istenmeyen yapısal titreşimlerinin azaltılması için birden çok ATMD içeren aktif çoklu ayarlı kütle sönümleyici (AMTMD) sisteminin kullanılmasını önerdikleri çalışmalarında, optimum parametre kriterini maksimum dinamik büyütme faktörü (dynamic magnification factor (DMF)) değerlerinden minimum olanlarının minimizasyonu olarak belirlemişlerdir. Optimum parametrelili AMTMD, çoklu ayarlı kütle sönümleyici (MTMD) ve ATMD performanslarının karşılaştırıldığı nümerik örneklerde, AMTMD sistemin diğer iki sisteme kıyasla daha yüksek performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Benzer amaç fonksiyonu ve sistemin önerildiği Li ve diğ. (2003) çalışmasında ise Li ve Liu (2002)'den farklı olarak ATMD'lerin kollarının uzama miktarları da dikkate alındığı görülmektedir. AMTMD performans açısından daha iyi olduğunun ortaya konması açısından Li ve Liu (2002)'ye benzer bir sonucun ortaya konduğu çalışmada, AMTMD'deki her bir ATMD'nin kollarının uzama miktarlarının birbirinden farklı olduğu, tek bir ATMD kullanılması durumuna kıyasla uzama miktarlarının daha fazla olduğu ve kol uzamalarının MTMD'ki herbir TMD'ninkine yakın olduğu sonuçları da elde edilmiştir.

Ahlawat ve Ramaswamy (2004) yapısal güvenlik için önemli olan yerdeğiştirme tepkilerinin ve yapısal konfor için önemli olan yapısal ivmelerin azaltılması amacıyla belirtilen her iki yapısal tepkinin de azaltılması amacıyla yaptıkları araştırmada FLC kontrol algoritmali ATMD'yi Yang ve diğ. (2004) tarafından geliştirilen modele uygulayarak kontrol sisteminin optimum parametrelerini aramışlardır. Optimum FLC ve ATMD parametreleri, metasezgisel algoritmalarından biri olan genetik algoritmadan yararlanılarak yapılan çok amaçlı optimizasyon ile belirlenmiştir ve rüzgar yüklemeleri altında yapılan çözümlemeler sonucunda uygulanan optimizasyon yönteminin amaç fonksiyonuna bağlı olarak beklenen sonuçlara ulaşmakta başarılı olduğu gösterilmiştir.

Cao ve Li (2004) ATMD sistemler için doğrusal geri besleme kontrol (linear feedback regulator (LQR)) algoritmasını baz alan ve Ricatti denklemini çözmeyi gerektirmeyen daha basit bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem rüzgar yüklemesine maruz bırakılan ve ATMD ile kontrol edilen 340 m yüksekliğindeki TV kulesi ile 374 m yüksekliğindeki 80 katlı yüksek bir çelik yapı uygulanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda basitleştirilen kontrol

yönteminin geleneksel LQR yöntemine göre ivme tepkilerini azaltmakta daha başarılı olduğu görülmüştür.

Li (2004), harmonik etki altındaki yapılarda yüksek performanslı aktif kontrol sistemi elde etmek için manivelalı ATMD (lever-type ATMD/LT-ATMD) kullanılmasını önerdikleri çalışmalarında, tanımladıkları LT-ATMD sistemin performans değerlendirmesini DMF değerlerinden yararlanarak yapmışlardır. Tek serbestlik dereceli yapı üzerine yerleştirilen kontrol sisteminin nümerik analiz modeli olarak kullanıldığı çalışmanın sonucunda LT-ATMD sistemin LT-TMD sisteme göre daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

Li (2004) önerdiği manivelalı tekil sisteminin yerine çoğul (LT-AMTMD) bir sistem öneren Li ve Han (2007), sistemi uzun açıklıklı köprülerde temelden etkileyen titreşimler yerine yapısal sisteme direk etkileyen titreşimlerin olması durumunda söz konusu titreşimlerin azaltılması amacıyla kullanmışlardır. Yapılan analizler sonucunda; söz konusu çalışmada sunulan LT-AMTMD sisteminin performansının, manivelalı ATMD (LT-ATMD) sisteme oranla daha yüksek olduğu ve manivelalı MTMD (LT-MTMD) sisteme aktüatör eklenerek sistem performansının iyileştirilebileceği anlaşılmıştır.

Han ve Li (2006) yer titreşimleri altında yapıda oluşan salınımları azaltmak amacıyla sönüm ve rijitlik katsayıları aynı, kütle ve kontrol kuvvetleri farklı olan ATMD'lerden oluşan AMTMD kullandıkları çalışmada, söz konusu kontrol sistemini üç katlı çelik yapı modelinin üst katına konumlandırmışlardır ve üç farklı deprem yüklemesi altında yaptıkları analizler sonucunda AMTMD sistemlerin çoklu TMD ve ATMD kontrol sistemlerine kıyasla daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Pourzeynali ve diğ.(2007) yüksek yapıların deprem etkilerine karşı ATMD ile kontrolünde bulanık mantık kontrolü (FLC) ile metasezgisel algoritmalarından biri olan genetik algoritmanın (GA) birlikte (GFLC) kullanılmasını önermişlerdir. GA algoritmasından yararlanarak gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde, yapının üst katındaki yerdeğiştirmelerin minimum olmasını sağlayacak ATMD ile FLC parametreleri aranmıştır. Önerilen yöntem 11 katlı kayma binasına (shear building) uygulanmış ve sonuçları literatürdeki yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Buna göre, önerilen GFLC yöntemi ile elde edilen sonuçların LQR kontrol algoritmasına göre

maksimum yerdeşistirmelerin azaltılmasında daha etkili olduğu, buna karşın gerekli olan kontrol kuvvetinin LQR'ye kısayla fazla olduğu görölmüştür.

Analiz sonuçları, TMD (GA ile elde edilen optimum parametrelere sahip) ve LQR kontrol metotlarıyla elde edilenlerle karşılaştırıldığında GFLC'nin maksimum yerdeşistirmeleri azaltmakta daha etkili olduğu, ancak GFLC sistem için gereken kontrol kuvvetinin LQR sistemi için gerekenden daha fazla olduğu görölmüştür.

Bani-Hani (2007), sinir ağı modellerini kullanarak geliştirdiği kontrol yöntemini 76 katlı betonarme bir ofis binasının rüzgar etkilerinden kaynaklanan titreşimlerini azaltmak için kullanmıştır. Çalışmada yapılan analizler sonucunda, geliştirilen yöntemin güvenilir ve etkili olmasının yanı sıra geleneksel LQG yöntemine göre daha başarılı olduğu görölmüştür.

Li ve Zhu (2007) açık-kapalı döngülü AMTMD (open-closed-loop/OCLAMTMD) sistemleri araştırmışlardır. Optimum OCLAMTMD parametreleri maksimum dinamik azaltma faktörü (DMF) değerlerinden minimum olanlarının minimizasyonu kriteriyle hesaplanmıştır. Harmonik olduğu varsayılan deprem yüklemesi altında yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, tekli ve çoklu ATMD'lerin açık ve kapalı döngülü olma durumlarına bağlı sistem kombinasyonlarının OCLAMTMD sistemiyle karşılaştırıldığı çalışmada önerilen sistemin etkinliği ve güvenilirliği ortaya konmuştur.

Li ve Xiong (2008) iki serbestlik dereceli (2DOF) olarak basitleştirdikleri asimetrik yapı modellerinin deprem etkisi altında yatay ve burulma tepkilerinin azaltılması amacıyla AMTMD kullanılmasını önermişlerdir. Söz konusu genelleştirilmiş 2DOF sistem, çok katlı yapılara mod azaltma yöntemi (mode reduced-order method) kullanılarak uyarlanabilir. Optimum AMTMD parametreleri ise maksimum dinamik büyütme faktörü (DMF) değerlerinden minimum olanlarının minimizasyonu kriteri kullanılarak elde edilmiştir. İlgili çalışmada, AMTMD sistemlerin asimetrik yapıların hem doğrusal hem de burulma etkilerini azaltmakta etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte optimum pozisyonlu ATMD sistem ile AMTMD sistemlerin karşılaştırmalı analizlerinden asimetrik yapıların tepkilerini azaltmakta AMTMD'li yapısal sistemlerin ATMD'li sistemlere nazaran daha etkili olduğu görölmüştür.

Guclu ve Yazici (2008) çalışmalarında yapısal titreşimlerin sınırlandırılması amacıyla PD (orantı+türev) ve FLC kontrol algoritmalarını kullanan ATMD sistemi tasarlamışlardır. Son katında ATMD yerleştirildiği 15 serbestlik dereceli modellerinde, 1. ve 15. katlarına iki tip aktüatör kullanmışlardır. Katların yerdeğiştirme ve ivmelerinin zaman-tanım alanı, ATMD yerdeğiştirmesini, kontrol voltajları, kontrollü ve kontrolsüz yapıların frekans tepkilerinin performans değerlendirilmesinde kullanıldığı çalışmada farklı yük ve yer hareketleri etkilerinde rezonans değerlerinde iyileşme ve titreşim genliklerinde azalmalar dikkate alındığında FLC kontrolcüsünün PD kontrolcüsüne göre daha iyi aktif kontrol sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Deprem etkisinden kaynaklı yapısal titreşimlerin sınırlandırılması amacıyla Guclu ve Yazici (2009a) tarafından yapılan diğer makalede ise ATMD sistemli yapıda bulanık PID algoritmali (fuzzy PID controller/FPIDC) kontrolcüsü kullanılmasını önermişlerdir. Guclu ve Yazici (2008) benzer modelin kullanıldığı çalışmada, farklı olarak doğrusal olmayan temel-zemin etkileri de dikkate alınmıştır. Önerilen kontrol sistemin performans ve güvenilirliği El-Centro ve Kocaeli deprem kayıtlarını altında gerçekleştirdikleri analizlerle test edilmiştir.

Bir diğer makelerinde Guclu ve Yazici (2009b), ATMD'li yapıların aktif kontrolünde kendinden ayarlı bulanık mantık kontrol algoritmasından (self-tunning fuzzy logic controller/STFLC) yararlanmışlardır. Tasarımın Marmara Kocaeli depremi altında gerçekleştirildiği çalışmanın performans testleri Kobe deprem kaydı kullanarak yapılmıştır. İlk katında aktüatör ve son katında STFLC kontrolcülü ATMD sisteminin bulunduğu ve doğrusal olmayan temel-zemin etkileşiminin de dikkate alındığı 9 katlı yapı modeline ait analiz sonuçlarına göre, önerilen sistem yapısal titreşimleri azaltmada efektif ve güvenilirdir.

Li ve diğ. (2010a) çalışmalarında deprem etkisi altında asimetric yapılarda oluşabilecek doğrusal ve burulma tepkilerinin azaltılması amacıyla ATMD sisteminin kullanılmasını önermişlerdir. Makalede optimum ATMD parametreleri minimum doğrusal ve burulma yerdeğiştirmelerinin minimizasyonu kriteri ile değişim arama yönteminden (gradient search method/GSM) yararlanarak belirlenmiştir. Tek katlı asimetric yapının dinamik özelliklerinin 2 serbestlik dereceli (2DOF) model ile ifade edildiği nümerik model üzerinde gerçekleştirilen analizlerde optimum parametrelili ATMD sistemin asimetric yapıda meydana gelebilecek doğrusal ve burulma tepkilerini azaltmakta etkili olduğu görülmüştür.

Li ve diğ. (2010b), yapı-zemin etkileşiminin de dikkate alındığı AMTMD'li asimetrik yapıların hareket denklemlerini Fourier transform kullanarak elde ettikleri çalışmalarında optimum AMTMD parametrelerini DMF değerlerinin minimizasyonu kriteriyle elde etmişlerdir. Çalışmada optimum pozisyonlu ATMD ile AMTMD sistemler karşılaştırılmış ve nümerik simülasyonlar sonucunda yumuşak zemin üzerine konumlanmış asimetrik yapıların deprem etkisi altında yatay ve burulma tepkilerini azaltmakta AMTMD sistemlerin ATMD sistemlere göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Li, C. (2012) zemin yapı etkileşiminin (SSI) dikkate alındığı AMTMD kontrol sistemli asimetrik yapılar üzerinde analizler yapmıştır. Li ve diğ. (2010b)'den farklı olarak optimum parametre kriteri yatay ve burulma yerdeğiştirmelerinin ortalama karekök değerlerinin minimizasyonu olarak tanımlanan çalışmada, yumuşak zemin üzerindeki asimetrik yapıların titreşim kontrolünde kullanılan AMTMD ve ATMD sistem parametrelerinin belirlenmesinde zemin-yapı etkileşimin ve burulma etkilerinin dikkate alınmasının gerekliliği ortaya konulmuştur. Önceki çalışmalara benzer şekilde bu çalışmada da gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizlerde asimetrik yapıların tepkilerini azaltmakta AMTMD'li yapısal sistemlerin ATMD'li sistemlere nazaran daha etkili olduğu görülmüştür.

Owji ve diğ. (2011), TMD ile yarı-aktif aktüatörü birleştirerek elde ettikleri FLC kontrollü yarı-aktif sistem ile gerçekleştirdikleri analizlerde, Kobe ve El-centro deprem kayıtları için yarı aktif sistemin Samali ve Al-Dawood (2003) tarafından önerilen FLC kontrollü ATMD sistem modeline göre daha az enerji ile yapısal yerdeğiştirmeleri azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Venanzi ve Materazzi (2012) ATMD'lerden oluşan hibrit kontrol sisteminin betonarme düzensiz yapılar üzerindeki performansını araştırmışlardır. Her katında 3 serbestlik tanımlanan L tipi 5 katlı betonarme yapı modeline üç tane çift yönlü ATMD yerleştirdikleri çalışmalarında, çeşitli deprem uyarımları altında yapıda oluşabilecek doğrusal ve burulma tepkilerini azaltılmayı amaçlamışlardır. Analizler sonucunda kullanılan kontrol yönteminin düzensiz yapıların tepkilerini azaltmakta TMD sisteme göre daha etkili olduğu ve uygun olarak tasarlanmış kontrol sistemleri ile düzensiz yapıların deprem etkilerine karşı güçlendirilebileceği anlaşılmıştır.

Sugumar ve diğ. (2012a) çalışmalarında iki serbestlik dereceli ve dört katlı kesme binası modelleri örnekleri üzerinde yaptıkları analizlerde, PID ve LQR kontrol algoritmalarının kullanıldığı sistemleri genel amaçlı sonlu elemanlar programı ANSY ile modelleyerek ve aktif kütle sönümleyici sistemlerinin kontrolsüz sistemlerle performanslarının karşılaştırarak sistemin etkinliğini ortaya koymuşlardır.

Sugumar ve diğ. (2012b) deprem etkilerine maruz ATMD'li çerçeve yapıların kontrolünde olasılıksal kontrol algoritmasından (stochastic control algorithm) yararlanmışlardır. Çalışmada önerilen sistemde ATMD 8 katlı çerçeve modelinin üst katına yerleştirilmiş ve sistemin performansı LQG kontrol algoritmalı ATMD sistem ile karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda olasılıksal kontrol algoritmasının LQG kontrol algoritmasına göre yapısal tepkileri azaltmakta daha başarılı olduğu ve daha az kontrol kuvveti gerektirdiği anlaşılmıştır.

Li ve diğ. (2012) yörüngedeki uzay araçlarında oluşabilecek titreşimleri sınırlaması amacıyla pozitif konumlu geri besleme yöntemini (positive position feedback/PPF) temel alan ve optimum çıkış geri besleme kontrol stratejisinden (optimal output feedback control strategy) yararlanan ATMD kontrol sistemi kullanmışlardır. Tasarımında akıllı piezoelektrik malzemenin kullanıldığı ATMD kontrol sistemi örnek bir model üzerinde tanımlanmış ve gerçekleştirilen nümerik simulasyonlar yardımıyla uzay araçlarının titreşimlerini azaltmakta ve stabilizasyonu sağlamakta etkili olduğu gösterilmiştir.

Fitzgerald ve Basu (2013) rüzgar türbinlerinin motor bölümünde meydana gelecek düzlem dışı titreşimleri azaltmak amacıyla aktif bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Yapı-zemin ve kanat-kule etkileşimlerinin de göz önüne alındığı çalışmada LGR kontrolcülü ATMD sistemden yararlanılmıştır. ATMD sistem Euler-Lagrangian yaklaşımından yararlanılarak geliştirilen türbin modelin motor bölümüne yerleştirilerek, ATMD sistemin türbin temelinin hasar alması durumunda motor bölümünde meydana gelecek titreşimleri azaltmaktaki etkisi test edilmiş ve etkili olduğu anlaşılmıştır.

Fitzgerald ve diğ. (2013) rüzgar türbin kanatlarında meydana gelen düzlem içi titreşimleri azaltmak amacıyla kullanılacak ATMD sistemlerin, TMD sistemlere kıyasla daha iyi performans gösterip göstermeyeceğini araştırmışlardır. İlgili çalışmada kontrolsüz, TMD

kontrollü ve ATMD kontrollü olmak üzere üç modelden yararlanılmıştır. Modelleme sırasında kule-kanat etkileşimi ve kanatlardaki düzlem içi- düzlem dışı etkileşim göz önüne alınmıştır. TMD kontrollü modelde TMD'ler tüm türbin kanatlarına ve motor bölümüne yerleştirilmiştir. ATMD kontrollü model ise TMD'lerde kullanılan kütle sönümleyicilere aktüatör eklenerek elde edilmiştir ve aktif kontrol kuvvetleri LQR kontrol algoritmasından yararlanarak hesaplanmıştır. Nümerik simülasyonlar sonucunda aktif kontrol stratejinin kanatlardaki düzlem içi yer değiştirmeleri azaltmakta daha etkili olduğu anlaşılmıştır.

Ozer ve diğ. (2013) kayan kip kontrollü ATMD'yi üç katlı bir yapıdaki titreşimleri azaltmak amacıyla süreci önermişlerdir. İlk aşamada optimum SMC parametreleri üçüncü kattaki yer değiştirmelerin minimum olmasını sağlayacak şekilde GA yardımıyla hesaplanmıştır. İlk durumda bulunan toplam kontrol enerjisinin yüksek olması nedeniyle gerçekleştirilen ikinci aşamada hem üçüncü kattaki yer değiştirmelerin hem de kontrol enerjisinin minimum olmasını sağlayacak çok amaçlı optimizasyon işleminde GA kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada önerilen ATMD kontrollü yapının üçüncü katdaki maksimum yer değiştirme değerinin kontrolsüz yapının yer değiştirmesine oranı %95 olduğu gözlenmiştir. Kontrolcü tarafından harcanan toplam enerji değerinin %75 oranına indirildiği görülmüştür.

Amini ve diğ. (2013) ATMD ile kontrol edilen yapılarda optimum aktif kontrol kuvvetinin bulunmasında parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization/PSO) ile doğrusal karesel düzenleyiciden (linear quadratic regulator /LQR) yararlanmışlardır. Optimizasyon sürecinde, PSO algoritması, LQR kontrolünün geri kazanç matrisinin minimize edilmesinde kullanılmıştır. Geliştirilen yöntemin klasik LQR kontrolüne göre üstünlüğü, darbe benzeri yakın fay hareketine maruz bırakılan 10 katlı bir yapı üzerinde test edilerek ispatlanmıştır.

Venanzi ve diğ. (2013) rüzgar etkisine maruz kalan yüksek yapılarda meydana gelen eğilme ve burulma etkilerinin azaltılması amacıyla bir dizi ATMD'den oluşan hibrit bir kontrol sistemi kullanmışlardır. Hibrit kontrol sisteminin tasarımında LQR kontrol algoritması ile metasezgisel algoritmalarından biri olan GA'dan yararlanılmıştır. İlgili çalışmada, GA'dan yararlanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde ilk olarak yapının üst katına yerleştirilen ATMD'lerin sayısı ve konumu, ikinci olarak yapının yüksekliği boyunca ivme ölçerin optimum konumu aranmıştır. Yöntem, her katında 3 serbestlik derecesi olan 60 katlı bir yapı modeline uygulanmış

ve analiz sonuçlarından yöntemin ATMD'nin en etkili konfigürasyonun bulunmasında uygun olduğu anlaşılmıştır.

You ve diğ. (2014) çalışmalarında yüksek yapılardaki rüzgar kaynaklı tepkileri azaltmak amacıyla LQG kontrolcülü ATMD sistemi araştırmışlardır. İlgili çalışmada ATMD parametreleri (tuning frequency ve sönüm oranı) Ayoringde ve Warburton (1980) tarafından geliştirilen nümerik bir optimizasyon yöntemi ile bulunmuştur. Taban alanı $60 \times 30 \text{ m}^2$, yüksekliği 180 m olan yapı modeline LQG kontrolcülü ATMD eklenerek rüzgar yüklemesine maruz bırakıldığında yapıda meydana gelecek göreceli yerdeğiştirme, yerdeğiştirme ve RMS değerleri, yapıda herhangi bir kontrol sistemi olmaması durumunda meydana gelecek değerlerle karşılaştırıldığında ilgili kontrol yöntemlerinin rüzgar kaynaklı etkileri azaltmakta etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Aly (2014) çok yönlü rüzgar etkisi altında yüksek yapılardaki titreşimi azaltmak amacıyla aktif ve pasif ayarlı kütle sönümleyicileriyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Kullanılan yapısal modelin y-yönünde aşırı zayıf olması nedeniyle y-yönünde LQG ve FLC kontrol algoritmalarından yararlanılarak ATMD sistem ile aktif kontrol sağlanırken, x-yönünde TMD ile pasif kontrol sağlanmıştır. Beyaz gürültü etkisi altında MATLAB'te tanımlanan nümerik yöntemlerden yararlanılarak optimum TMD parametreleri hesaplanmıştır. Optimum TMD parametrelerinden yararlanılarak da güvenilir TMD parametreleri elde edilmiştir. Bununla birlikte LQG ve FLC kontrolcülerin performansı karşılaştırılmıştır ve FLC kontrolcünün, çok yönlü rüzgar etkisindeki yüksek yapılarda oluşacak ivme değerlerini azaltmakta daha güvenilir olduğu gözlemlenmiştir.

Shariatmadar ve diğ. (2014) tek serbestlik dereceli olarak modellenen yapısal sistemlerin ATMD sistemler ile aktif kontrolünde tip-2 FLC (interval type-2 FLC/IT2FLC) kontrol algoritmasının kullanılmasını önermişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliği 11 katlı yapı modeli üzerinde test edilmiştir. IT2FLC, kullanılan yapının ilk mod karakteristiklerinin farklı tür deprem titreşimleri altında maksimum tepki azalımını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Kontrolsüz, TMD kontrollü ve tip-1 FLC kontrol algoritmasına sahip ATMD kontrollü yapılar ile yapılan karşılaştırmalı analizlerden önerilen IT2FLC sisteminin oldukça etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Lu ve diğ. (2014) tarafından Çin’de bulunan süper yüksek ‘Shanghai World Financial Center Tower’ isimli yapının rüzgar kaynaklı titreşimini azaltmak amacıyla iki özdeş ATMD kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan cihaz ve yapının mimarisi göz önünde bulundurularak 90. kata konumlandırılmıştır. Yapıya yerleştirilen sönüm cihazlarında rüzgar yüklemesi olması durumunda aktif kuvvet kullanılırken, deprem yüklemesi olması durumunda ise aktif kuvvet kapatılıp pasif kontrol kullanılmıştır. İki çevrim için yapının titreşiminin 2 cm/s^2 ’den büyük olması durumunda cihaz durağan durumdan aktif konuma geçiş yapar. Aktif durumdan pasif duruma geçiş ise titreşim genliğinin 110 cm büyük olduğunda gerçekleşir. Geri dönüşüm periyodu bir sene olan rüzgar yüklemesi olması durumunda 90. katta oluşan maksimum ivme değeri sönüm cihazlarıyla %60’ına indirilirken, deprem etkisi altında bu değerin %3’ten daha az olduğu gözlemlenmiştir. Analizlerden kullanılan ATMD sisteminin yüksek yapıların rüzgar kaynaklı titreşimlerinin kontrolü açısından etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Shariatmadar ve Meshkat Razavi (2014) deprem etkisi altında yapıdaki titreşimlerin azaltılması amacıyla bulanık mantık kontrolü (FLC) ile parçacık sürü optimizasyonun (PSO) birlikte kullanılmasını önermişlerdir. Yapının en üst katındaki maksimum yerdeğiştirmelerin minimum olmasını sağlayacak FLC giriş (input) parametrelerinin belirlenmesinde PSO algoritmasından yararlanmışlardır. Daha sonra geliştirilen yöntem (PSFLC), Pourzeynali ve diğ. (2007) tarafından önerilen yöntem (GFLC) ile karşılaştırılmıştır. Pourzeynali ve diğ. (2007) çalışmalarında kullandıkları matematiksel modelden yararlanılarak yapılan analizler sonucunda, PSO’nun GA’ya göre optimum FLC giriş parametrelerini bulmada daha hızlı ve daha iyi başarı yüzdesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, global katsayıların bulunmasında gene PSO algoritmasından yararlanılmıştır. Optimizasyon kriteri ise ortalama karakök (Root Mean Square (RMS)) değerlerinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir. Bu yöntem ile üst kattaki maksimum deplasmalar, optimize edilmemiş FLC ile kontrol edilen sisteme göre %10-30 oranında daha fazla azaltılırken, gerekli kontrol kuvveti değerlerinin neredeyse aynı olduğu gözlemlenmiştir.

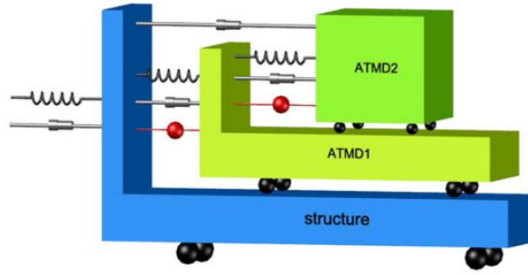
ATMD, yüksek yapılarda deprem ve rüzgarlardan kaynaklanan yıkıcı etkiyi azaltmakta kullanılan en etkili çözümlerden biridir. Ancak deprem ile rüzgar uyarımlarının farklı frekans ve yoğunluğa sahip olması yapıda farklı modların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda

deprem veya rüzgar uyarımları dikkate alınarak tasarlanan ATMD'nin optimum parametreleri bir diğeri için optimum olmamaktadır.

Soleymani ve Khodadadi (2014) çalışmalarında yüksek deprem aktivitesi ve tekrarlı rüzgar yüküne maruz kalan yüksek yapıların ATMD ile kontrolünde 'çok amaçlı adaptif genetik-bulanık' kontrolcü kullanılmasını önermişlerdir. Önerilen yöntem Avustralyanın Melbourne şehrinde bulunan 76 katlı yapı modeline uygulanmıştır. (serbestlik derecesi 76) İlk olarak; optimum TMD tasarımı çok amaçlı genetik algorithmadan yararlanılarak yapılmıştır ve bu süreçte taban kesme kuvveti ve katlar arası yerdeğiştirmenin minimum olması amaçlanmıştır. Ancak optimum TMD tasarımı, rüzgar etkisi dikkate alınarak yapıldığında deprem etkilerini azaltmakta yeterli olmazken; deprem etkisi dikkate alınarak yapıldığında da rüzgar etkilerini azaltmakta yeterli olamamıştır. Bununla birlikte TMD'nin performansını arttırmak amacıyla TMD'ye aktif aktüatör eklenmiş ve çok amaçlı genetik-bulanık ATMD önerilmiştir. Bu aşamada bulanık mantık kontrolcünün (FLC) parametreleri optimize edilmiştir. Ancak bu yöntem ile daha iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bunlara ek olarak çok amaçlı genetik-bulanık ATMD'yi temel alan adaptif kontrol önerilmiştir ve önerilen çok amaçlı adaptif genetik-bulanık kontrolün hem deprem hem de rüzgar etkisi etkisi altında göreceli kat yerdeğiştirmelerini ve taban kesme kuvvetini azalttığı görülmüştür.

Li ve Cao (2015) çalışmalarında yapılardaki yer ivmesinden kaynaklanan sarsıntıların azaltılması amacıyla Hibrit aktif ayarlı kütle sönümleyici (Hibrit active tuned mass damper (HATMD)) kullanılmasını önermişlerdir. İlgili çalışmada HATMD sistem, tek serbestli dereceli modelin üzerine yerleştirilmiştir ve aktif kontrol kuvvetleri negatif normalleştirilmiş ivme geri besleme kazancı faktörü (negative normalized acceleration feedback gain factors(NNAFGF)) ile pozitif normalleştirilmiş ivme geri besleme kazancı faktörü (positive normalized acceleration feedback gain factors(PNAFGF)) planları birlikte kullanılarak hesaplanmıştır. HATMD'yi oluşturan ATMD'lerin frekans oranları ile sönüm oranları ise dinamik büyütme faktörü (dynamic magnification factor (DMF)) değerlerinin minimizasyonunu optimizasyon kriteri olarak belirlenerek genetik algoritma (GA) yardımıyla elde edilmiştir. NNAFGF planını ile çalışan ATMD ve aktif-pasif ayarlı kütle sönümleyiciler (APTMD) ile geliştirilen HATMD'nin optimum performansları karşılaştırıldığında HATMD'nin üstün bir performans sergilediği görülmüştür.

Cao ve Li (2018), referans olarak kullandıkları Li ve Cao (2015) tarafından önerilen HTMD sistemine ek olarak yapı ile ATMD kütleleri arasına amörtisör bağlantısı ekleyerek geliştirmişlerdir (EHATMD) (Şekil 2.8.). Optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritmanın kullanıldığı çalışmada, maximum DMF değerlerini minimum yapan HATMD parametreleri: sönüm ile rijitlik katsayıları aranmıştır. EHATMD ile HATMD'nin kütle sönümleyicinin kollarının uzama miktarları karşılaştırıldığında EHATMD'nin performansının daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 2.8: Cao ve Li (2018) tarafından önerilen EHATMD modeli.

Heidari ve diğ. (2018) geleneksel LQR kontrol algoritmasını geliştirmek amacıyla orantı+integral+türev (PID) tipi kontrolcüler ile LQR (linear quadratic regulator) kontrolcülerini hibrit olarak birleştiren bir sistem önermiştir. Geliştirilen hibrit kontrol yöntemi sismik etki altında bulunan ve ATMD ile kontrol edilen 10 katlı yapı modeli için kullanılmıştır. ATMD'nin optimum frekans oranı ile optimum kritik sönüm oranı yüzdesi, metasezgisel algoritmalarından biri olan guguk kuşu arama (cuckoo search (CS)) algoritmasından yararlanarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, geliştirilen hibrit kontrol yönteminin klasik LQR kontrol yöntemine göre maksimum kat yerdeğiştirmelerini ve ivmelerini azaltmakta daha başarılı olduğu görülmüştür.

2.2. TEZİN AMACI

Bu tez çalışması kapsamında çeşitli deprem yüklemeleri altında aktif kontrol sistemlerinden olan aktif ayarlı kütle sönümleyicilerin (ATMD) optimum tasarım parametrelerinin ve optimum kontrol kuvvetlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu optimizasyon işleminde tasarım değişkenleri ise ATMD sistemi (kütle, periyot ve sönüm oranı) ile sisteme ait PID kontrolcü parametreleri (orantı sabiti, integral zamanı ve türev zamanı) değerleri olarak tanımlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, metasezgisel algoritmalarla optimizasyon işleminde etkin olarak kullanılan Armoni araştırma, öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon, çiçek tozlaşma ve jaya algoritmaları seçilmiş ve Matlab Simulink ile bilgisayar programı yazılmıştır.

Geliştirilen yöntemle örnek bir yapı üzerinde iki ana durum altında analizler yapılmıştır. Bunlardan ilki kontrol sisteminin yapıya uygulayacağı aktif kuvvet ile yapının üst kat yerdeğiştirme (x_N) miktarına herhangi bir sınır tanımlanmaksızın gerçekleştirilen ve sınırlandırılmamış durum olarak adlandırılan analizlerdir. Söz konusu analizlerle ATMD sistemin ekstrem durumlarda yapı üzerindeki performansının ve etkinlik durumunun sınırları belirlenmesi amaçlanmıştır. İkinci grupta ise, aktif kuvvet ile yapının üst kat yerdeğiştirme değerine sınır tanımlanarak gerçekleştirilen sınırlandırılmış ismi altında gerçekleştirilen analizlerdir. Bu analizlerde ise, kontrol sisteminin üretim şartlarına bağlı olarak gerçek yapı ölçeğindeki pratik uygulamalarını temsilen yapılmıştır.

Söz konusu sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış durumlar için çeşitli kontrol sistemi maksimum uzaması ve/veya zaman gecikmesi altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında TMD sisteminin de optimum tasarımı karşılaştırma amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesinden üç sorunun cevabının ortaya konması hedeflenmiştir. ATMD sisteminin optimum tasarımı için seçilenler arasında performansı en iyi metasezgisel algoritma belirlenmesi, ATMD sistemin yapısal titreşimlerin sönümlemedeki etkinlik boyutunun belirlenmesi, ATMD sistemi tasarım değişkenleri ve kısıtları ile ilgili pratik uygulamalarda mühendisler için yol gösterici çeşitli çıkarımların ortaya konmasıdır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde metasezgisel algoritmalar yardımıyla PID kontrolcülü aktif ayarlı kütle sönümleyicinin optimum tasarım sürecinin tanıtılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak Bölüm 3.1’de metasezgisel algoritmalar hakkında genel bilgi verilmiştir. Bölüm 3.2’de ise söz konusu algoritmaların genel süreci özetlenerek tez kapsamında kullanılan armoni arama, öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon, çiçek tozlaşma ve jaya metasezgisel algoritmaları hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur. Bölüm 3.3’de PID kontrolcülü aktif ayarlı kütle sönümleyicili binaların hareket denklemleri ile PID kontrolcü tanıtılarak PID kontrolcülü aktif ayarlı kütle sönümleyicinin metasezgisel algoritmalar ile optimizasyon süreci özetlenmiştir.

3.1. METASEZGİSEL ALGORİTMA KAVRAMI

Dünya sistemi içerisinde gerçekleşen olaylar dikkatle incelenecek olursa denge üzerine kurulu eşsiz bir mühendisliğin eserin olduğu görülmektedir. Bu mühendislik eseri içerisinde su döngüsü, dünya atmosferin güneş ışınları ile etkileşimi, yerçekimi oluşumu, suyun kaldırma kuvveti vb. her biri bağımsız gibi görünen ama aslında bağlantılı birçok olay gerçekleşir. Bilimsel gelişmeler de aslında insanların bu mühendislik eseri içerisinde var olan (veya var olmuş) olayları anlamlandırmaya çalışmasının bir sonucudur. Yunan fizikçi Archimedes (MÖ 288-212) suyun kaldırma kuvveti keşfinden önce de insanların kaldırma kuvvetinden yararlanarak gemi tasarımları veya birçok tasarımda kullanılan yerçekiminin Sir Isaac Newton'un (1643-1727) tarafından tanımlanmasından önce de var olması örneklerinde olduğu gibi bilim insanları buluşlarında söz konusu mühendislik eserinin bazı parçalarını matematiksel olarak ortaya koyarak anlamamızı sağlamışlardır.

Günümüzde çoğu mühendislik tasarımı da bilim insanların gözlemleri sonucu ortaya koydukları oranda bu bütüncül mühendislik eserinin parçasının insan yararına kullanışlı hale getirilmesidir. Bu tasarımlara örnek olarak uçak kanatçıklarının tasarlanması verilebilir. Bu tasarımın temelinde insanların göçmen kuşların V şeklinde uçmalarıyla ilgili gözlemleri (Şekil 3.1) ve bunun nedenini sorgulamaları yatmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda kuşların bu şekilde uçmalarının nedeninin enerji tasarrufu olduğu ortaya koyulmuştur. Kanatlarının ucunda oluşan hava burgaçlarında bir kaldırma kuvveti oluştuğunu hisseden kuşlar, uzun mesafeli göç uçuşunu en az enerji harcayacak şekilde tamamlamak için bu kaldırma kuvvetinden

yararlanacakları V formunda hareket ederler. Hava burgaçlarının küçülmesi ile enerji tasarrufunun arttığını fark eden bilim insanları uçaklarda bu tasarrufun sağlanması amacıyla kanatların ucuna kanatçık adı verilen küçük parçalar etkilemişlerdir (Şekil 3.2-3.3). Bu sayede yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Doğa gözlemlerinden bu örnekte sunulan şekilde direkt olarak faydalandığı gibi dolaylı da birçok şekilde faydalanılmaktadır.



Şekil 3.1: Kuşların V şeklinde uçuşu (www.hurriyet.com.tr).

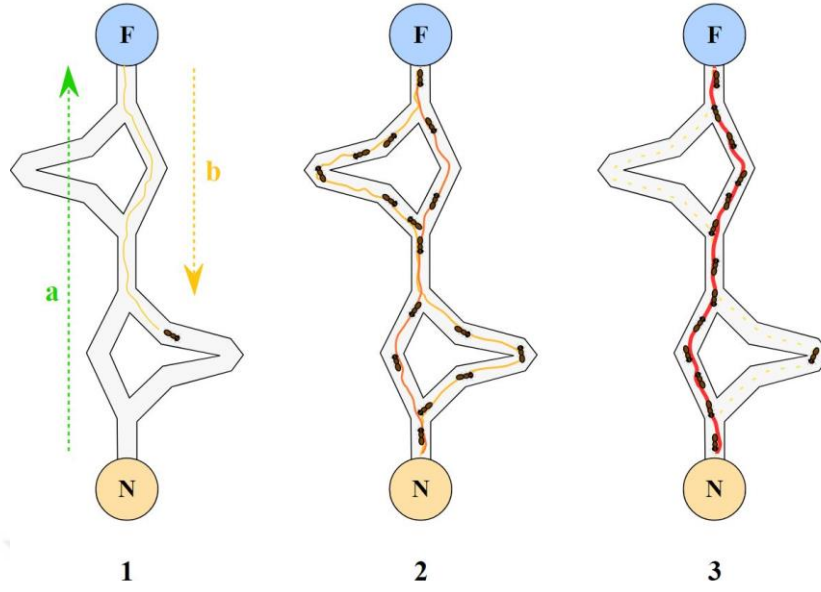


Şekil 3.2: Kanatların oluşturduğu hava burgacı (www.dlr.de).



Şekil 3.3: Hava burgaçlarının küçültülmesine yönelik kanat tasarımı (mediacat.com).

Metasezgisel algoritmalar da doğa gözlemleri sonucunda ortaya konan matematiksel ifadeler sonucunda geliştirilmiş optimizasyon amacıyla kullanılan algoritmalarlardır. Öğreneğin bu algoritmadan biri olan karınca kolonisi algoritması (Ant Colony Optimization (ACO)) (Dorigo et al., 1996) verilebilir. Bu algoritma karıncaların yuvaları ile yiyecek arasındaki en uygun yol arayışını davranışlarından yararlanılarak geliştirilmiştir. Buna göre işçi karıncalar yuvalarından yiyecek bulmak için yuvalarından ayrıldıklarında gittikleri yol boyunca feromon salgılayarak geçtikleri güzergaha işaret bırakırlar. Diğer karıncalar da bu feromonları takip ederek daha önce geçildiğini hissetleri güzergâh civarında yol alırlar. Zamanla en kısa olan yol üzerinde daha çok karınca hareketi (gidiş-geliş) ve buna bağlı daha fazla feromon salgısı oluşur. Sonuç olarak yoğun feromon kokusu karıncaların tercihi olduğunda sürecin sonunda çoğunluk bu yolu takip etmeye başlar. Bu süreci adım adım Şekil 3.4'te de görülmektedir. Özetle karıncalar doğanın onlara sunduğu imkanlar dahilinde bir optimizasyon süreci gerçekleştirmiş olurlar. Bu gözlem ve bu sezgisel optimizasyon sürecin matematiksel olarak ortaya konması algoritmanın geliştirilmesini sağlamıştır. Bir örneği sunulan ACO algoritmasına benzer şekilde doğa gözlemlerine dayanarak birçok algoritma geliştirilmiş ve başta optimizasyon olmak üzere çeşitli amaçlar ile kullanılmaktadır. Bu algoritmalara ait örnekler ile esinlendikleri doğa olaylarına ait bazı detaylar Tablo 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.4: Karıncaların içgüdüsel davranışı (www.wikiwand.com).

Tablo 3.1: Metasezgisel algoritmalar.

Algoritma	Geliştiren	Sene	Benzeşim
Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA)	Holland, J.H.	1975	Charles Darwin' nin evrim teorisi
Tavlama Benzeşimi (Simulated Annealing, SA)	Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. ve Vecchi, M. P.	1983	Isı karşısında metalin iç yapısındaki değişimi
Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO)	Kennedy, J. ve Eberhart, R.C.	1995	Kuş, balık vb. gibi canlıların sürü halinde hareketleri
Karıncalar Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO)	Dorigo, M., Maniezzo, V. ve Colomni, A.	1996	Karıncaların yuvaları ile yiyecek kaynağı arasındaki en kısa yolu bulma davranışı
Diferansiyel Evrim (Differential Evolution, DE)	Storn, R. ve Price, K.	1997	Mutasyon, çaprazlama seleksiyon gibi evrimsel özellikler
Armoni Arama (Harmony Search, HS)	Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim ve G. V. Loganathan	2001	Bir müzisyenin dinleyicilerin beğenisini kazanacak en iyi armoniyi arama süreci
Büyük Patlama-Büyük Çöküş (Big Bang-Big Crunch, BB-BC)	Osman K. Erol ve Ibrahim Eksin	2006	Evrenin oluşum sürecini açıklamaya çalışan Big-bang big-crunch teorisi
Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC)	Dervis Karaboga ve Bahriye Basturk	2007	Bal arılarının yiyecek arama sürecindeki davranışları
Guguk kuşu Arama (Cuckoo Search, CS)	Xin-She Yang ve Suash Deb	2009	Guguk kuşlarının nesillerinin devamı sürecindeki parazit davranışları
Ateş böceği Algoritması (Firefly Algorithm, FA)	Xin-She Yang	2009	Ateş böceklerinin yanıp sönen ışık karakteristikleri
Yarasa Algoritması (Bat Algorithm, BA)	Xin-She Yang	2010	Yarasaların sesle yön bulma davranışları
Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization, TLBO)	R. V. Rao, V. J. Savsani ve D. P. Vakharia	2011	Eğitim sürecinde bir sınıftaki öğretmen öğrenci ilişkisi

Tablo 3.1 (devam): Metasezgisel algoritmalar.

Çiçek Tozlaşma Algoritması (Flower Pollination Algorithm, FPA)	Xin-She Yang	2012	Çiçeklerin tozlaşma süreci
Işın Optimizasyonu (Ray Optimization, RO)	A. Kaveh ve M. Khayatazad	2012	Işınların kırılma özelliği
Kril Sürüsü (Krill Herd Optimization, KH)	Amir Hossein Gandomi ve Amir Hossein Alavi	2012	Kril sürüsünün davranışı
Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer, GWO)	Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili ve Andrew Lewis	2014	Gri kurtların liderlik hiyerarşisi ve avlanma yöntemleri
Jaya Algoritması (Jaya Algorithm, JA)	R. V. Rao	2016	Jaya kelimesinin Sanskritçede zafer anlamına geldiği bilinmektedir.

3.2. METASEZGİSEL ALGORİTMALARLA OPTİMİZASYON SÜRECİ

Bu bölümde ilk olarak metasezgisel algoritmaların genel metodolojisi adım adım anlatılacak ardından tez çalışması kapsamında kullanılan metasezgisel algoritmalar süreçleri hakkında detaylı bilgileri sunulacaktır.

3.2.1. Metasezgisel Algoritmaların Genel Metodolojisi

Metasezgisel algoritmalarla optimizasyon süreci aday çözümlerin üretilmesi ve optimizasyonun amacına bağlı olarak bu aday çözümlerin iyileştirilerek içlerinden en iyi çözümün bulunması mantığına dayanır. Bu sürecin işleyişine bakıldığında metasezgisel algoritma tabanlı optimizasyonu aşağıda maddeler halinde verildiği gibi 5 adımda özetlemek mümkündür.

Adım 1: Optimizasyon probleminin tasarım sabitleri ile tasarım değişkenlerinin alt ve üst limitleri, popülasyon sayısı (p_n), algoritmaya ait kullanıcı tanımlı parametreler ve optimizasyonun durdurma kriteri tanımlanır. Bu ifadelere ait açıklamalar aşağıdaki gibidir.

Tasarım sabiti, optimizasyon süresi boyunca değişmeyip problemi tanımlamamıza yardımcı olacak sabit değerlerdir.

Tasarım değişkeni tasarım sabitinin aksine optimizasyon süreci boyunca farklı değerler atanarak optimizasyonun amacına bağlı olarak en iyi sonucun elde edilebilmesi için aranan değişkenlerdir.

Popülasyon sayısı, algoritma özelinde farklı isimlerle anılsa bile temelinde söz konusu tasarım değişkenlerini içeren aday çözümlerin sayısını gösteren kavramdır.

Algoritmaya ait parametreler ise ilerleyen bölümlerde de değinileceği gibi algoritmaya özgü olan ve kullanıcı tanımlı parametrelerdir.

Optimizasyonun durdurma kriteri de optimizasyon sürecinin tamamlanması için gerekli olan kullanıcı tarafından belirlenen kriterdir. Genellikle maksimum iterasyon sayısı olarak tanımlanan kriter, problem ve kullanıcıya bağlı olarak farklı şekillerde de tanımlanabilir.

Adım 2: İlk adımda tanımlanan popülasyon sayısı (pn) kadar aday çözüm üretilir ve başlangıç çözüm matrisi adı verilen matriste depolanır. Başlangıç çözüm matrisi sembolik olarak Denklem (3.1)'deki CL matrisi ile ifade edilebilir.

$$CL = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,pn} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,pn} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{N-1,1} & X_{N-1,2} & \cdots & X_{N-1,pn} \\ X_{N,1} & X_{N,2} & \cdots & X_{N,pn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

CL matrisindeki her bir sütun aday çözüm kümesini bir başka değişle aday çözüm vektörünü göstermektedir. Bu aday çözüm vektörleri içerisinde N tane değişken mevcuttur ve $X_{i,j}$ ile j ($j=1,pn$) numaralı çözüm kümesindeki i ($i=1,N$) numaralı değişken gösterilmiştir.

Söz konusu tasarım değişkenlerinin değerleri ise Denklem (3.2)'deki gibi alt $X_{i(min)}$ ve üst limit $X_{i(max)}$ değerleri arasında kalacak şekilde rastgele üretilir.

$$X_{i,j} = X_{i(min)} + rand(0,1)(X_{i(max)} - X_{i(min)}) \quad (3.2)$$

Denklemdaki 'rand' 0 ile 1 arasında düzgün dağılmış rastgele sayıyı göstermektedir.

Adım 3: Bu adımda, her bir çözüm vektörünün amaç fonksiyonun değeri hesaplanarak ilgili tasarım kısıtları kontrol edilir.

Amaç fonksiyonu optimizasyonun işlemi yapım amacını matematiksel olarak ifade edilmesini sağlayan fonksiyondur. Bu amaç fonksiyonu her bir aday çözüm için bir değere karşılık gelir. Aday çözümlerin optimizasyon sürecinde birbirleriyle karşılaştırılmak üzere kullanılan bu değerler, amaç fonksiyonu vektöründe depolanır.

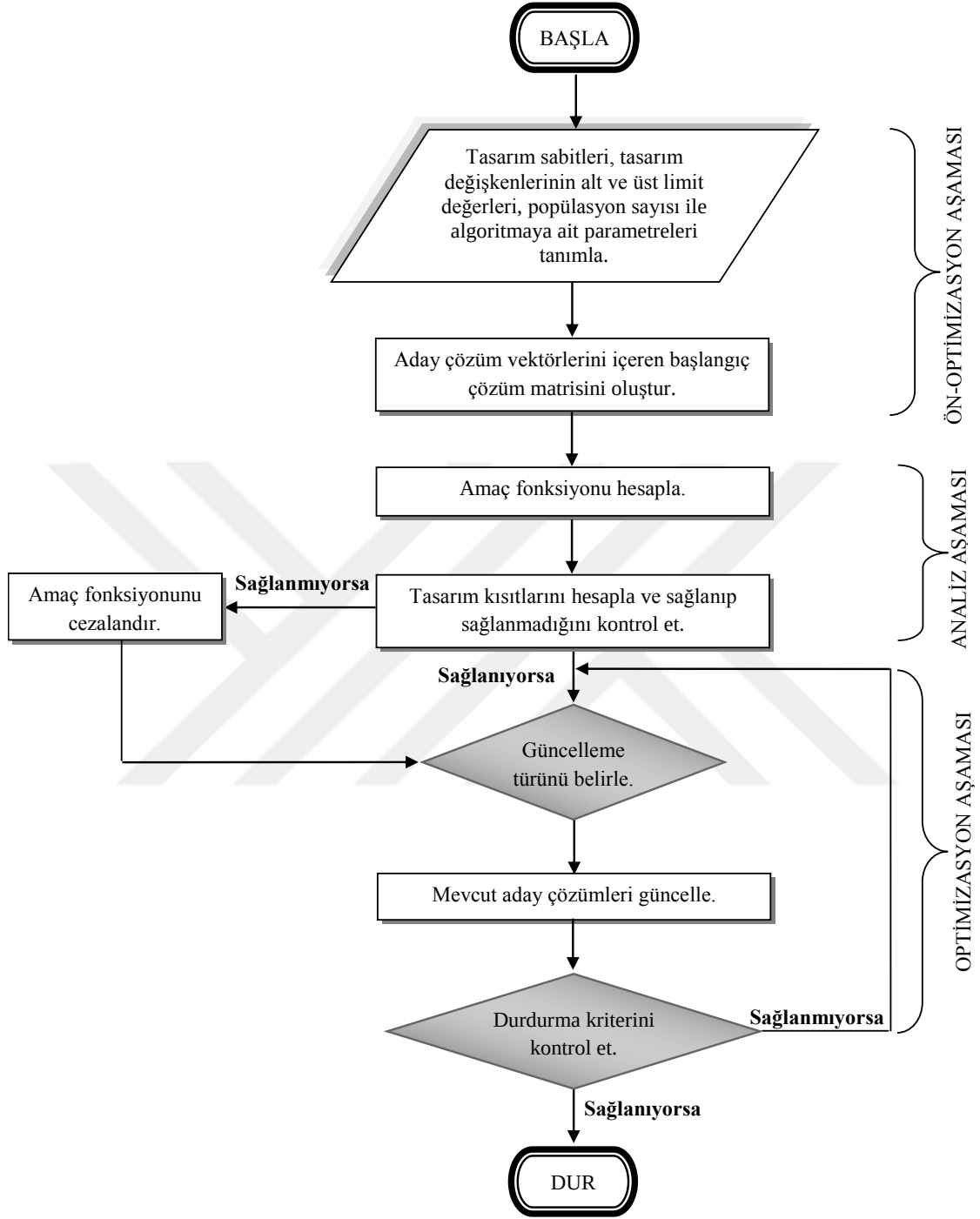
Tasarım kısıtları ise tasarımda uyulması gereken kurallar olarak tanımlanabilir. Optimizasyonu yapılan probleme göre farklılık gösteren bu kavrama örnek olarak yapısal sistemlerde

elemanlardaki maksimum ve minimum gerilmeler, yerdeğiştirme limitleri benzeri yönetmelik ve teknik koşullar gösterilebilir. Tanımlanan tasarım kısıtlarının sağlanamaması durumunda amaç fonksiyonuna cezalı bir değeri atanarak ilgili kısıtları sağlamayan tasarımların önüne geçilmesi sağlanır.

Adım 4: Bu adımda algoritmaya özgü kurallar devreye girer ve algoritma kuralları dikkate alınarak yeni çözüm matrisi üretilir. Bu sebeple metasezgisel algoritmaların optimizasyon süreçlerindeki farklar dördüncü adım ile başlar.

Adım 5: Son adımda, mevcut (eski) çözüm matrisi, yeni çözüm matrisi ile karşılaştırılır. Yeni çözümler amaç fonksiyonuna göre eskisinden daha iyi ise, mevcut çözüm matrisi güncellenir.

Son üç adım optimizasyonun durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir. Tüm bu adımlar Şekil 3.5'teki akış diyagramından da görülebilir. Akış diyagramında ilk iki adım ön-optimizasyon aşaması, üçüncü adım analiz aşaması, son iki adım ise optimizasyon aşaması olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.5: Metasezgisel algoritma tabanlı optimizasyonun genel akış diyagramı.

Bu tez çalışması kapsamında Armoni Arama (HS) algoritması, Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritması, Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) ile Jaya Algoritması (JA) optimizasyon problemine uygulanmıştır. Bu algoritmalara özgü **Adım 4**'e ait denklem ve detaylar ile algoritmaların optimizasyon aşamasına ait akış diyagramları Bölüm 3.2.2-3.2.5' te sunulmuştur.

3.2.2. Armoni Arama (HS) Algoritması

Her sanat dalında olduğu gibi müzik dalında da eser uzun bir sürecin sonunda ortaya çıkar. Bu süreçte sanatçının yaşadığı zaman, toplumsal ilişkiler, toplum yapısı, bulunduğu coğrafya gibi çeşitli faktörler eserin şekillenmesinde etkin rol oyar. Sanatçı eserini oluştururken adım adım çeşitli notaları ve bu notalara ait tonları deneyerek dinleyicinin beğenisi kazanacağını düşündüğü en iyi notalar kombinasyonu olduğuna inandığı eserin taslağını ortaya koyar. Sanatçı eleştirmen ve dinleyici tepkileri uyarınca da oluşturulan taslak eser üzerinde değişiklikler yapılarak ve eser son halini ortaya koyar.

HS algoritması müzisyenin eseri oluşturmada en iyi notalar kombinasyonu (armoniyi) aradığı bu süreçten esinlenilerek Geem ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş hafıza tabanlı rassal arama metodudur.

HS algoritmasında armoni belleği boyutu (Harmony Memory Size; HMS), armoni belleğini dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate; HMCR) ve ton ayarlama oranı (Pitch Adjusting Rate: PAR) olarak adlandırılan üç adet parametre kullanılmaktadır. Bu parametrelerden HMS değerinin sürü tabanlı algoritmalarda popülasyon sayısına karşılık gelir. Dolayısıyla HS algoritmasında algoritmaya özgü parametre sayısı ikidir.

Söz konusu algoritma sürü tabanlı sezgisel algoritmalarından farklı olarak her iterasyonda yalnızca bir adet çözüm vektörü oluşturulmaktadır. HS algoritma kurallarına göre yeni çözüm vektörü iki şekilde oluşturulabilir. “Yeniden Üretim Evresi” adı verilen ilk türde, müzisyenin tamamen yeni notları denediği süreci; “Mevcuttan Üretim Evresi” isimli ikinci türde ise müzisyenin mevcut notların etrafında denemeler yaparak eserini iyileştirmesinin benzetimi yapılmaktadır.

Yeniden Üretim Evresi’nde yeni çözüm vektörü (başlangıç çözüm vektörlerine benzer şekilde) Denklem (3.3) kullanılarak üretilir:

$$X_{yeni} = X_{min} + rand(0,1) \cdot (X_{mak} - X_{min}) \quad (3.3)$$

Burada X_{yeni} yeni üretilen çözüm vektörlerini, X_{min} tasarım değişkenleri alt limit değerini, $rand(0,1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılmış rastgele sayıyı, X_{mak} tasarım değişkenleri üst limit değerini simgelemektedir.

Mevcuttan Üretim Evresi'nde, mevcut çözüm vektörleri içinden rastgele bir çözüm vektörü seçilir. Bu evrede yeni çözüm vektörü, seçilen vektörün tasarım değişkeni (X_i) alt ve üst limit farkı ile ton ayarlama oranı (PAR) çarpımıyla rassal olarak üretilir. Bu süreç matematiksel olarak Denklem (3.4) gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$X_{yeni} = X_i + rand(0,1) \cdot PAR \cdot (X_{mak} - X_{min}) \quad (3.4)$$

Algoritma yeni armoni vektörünü bu iki durumdan hangisine göre üretileceğine armoni belleğini dikkate alma oranı (HMCR) değerini kullanılarak karar verir. Buna göre her iterasyonda rassal bir değer üretilir ve bu değer HMCR değerinden büyük olması durumunda birinci (Yeniden Üretim Evresi) aksi durumda ise ikinci yol (Mevcuttan Üretim Evresi) seçilir. Daha sonra üretilen bu vektörler (popülasyon sayısı kadar) yeni çözüm matrisi adı verilen bir matriste depolanır.

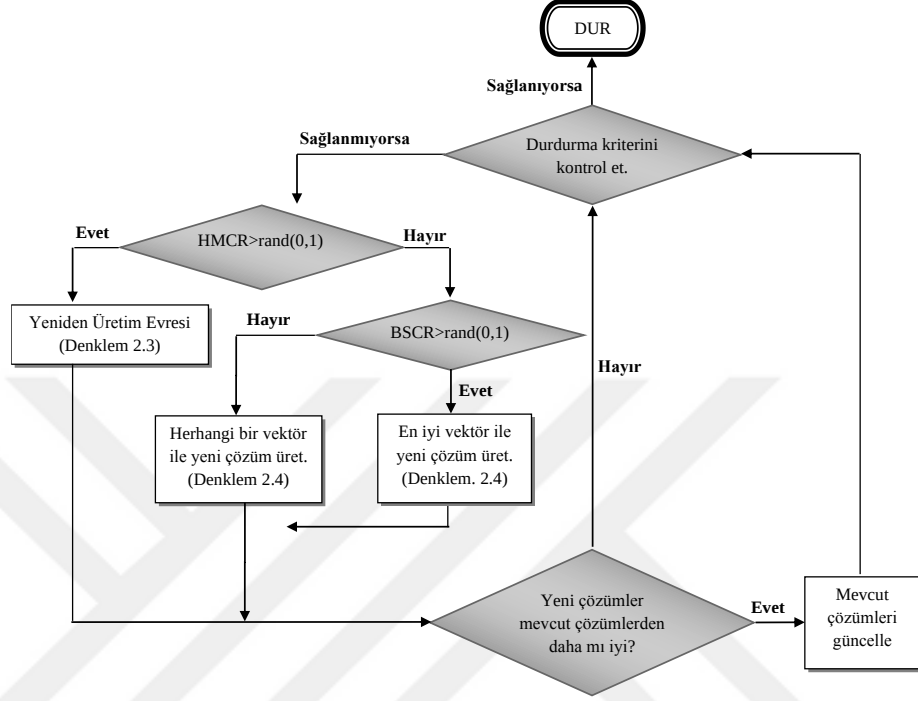
Her itersayon sonucunda yeni çözüm matrislerindeki her bir çözümün (vektörün) amaç fonksiyonu hesaplanarak, mevcut çözüm matrisinde kayıtlı vektörler ile karşılaştırılır. Yeni vektörün amaç fonksiyonunun mevcut vektörler içerisinde amaç fonksiyonu açısından en kötü vektörden daha iyi olması durumunda mevcut vektör çözüm matrisinden silinerek yerine yeni vektöre ait değerler kayıt edilir. Aksi durumda çözüm matrisi mevcut haliyle korunur.

Diğer sezgisel algoritmalarda da karşılaşıldığı üzere, HS algoritmasında da performansının iyileştirilmesi adına zaman içerisinde çeşitli modifikasyonlar önerilmiştir (Mahdavi ve diğ., 2007). Bu modifikasyonlardaki amaç HS algoritmasının daha iyi sonuçlara ve/veya optimum sonuca daha hızlı ulaşabilmektir. Bu amaca uygun olarak bu çalışma kapsamında da HS algoritmasında modifikasyonlar yapılmıştır. Buna göre mevcut vektörlerden seçim iki yolla yapılmaktadır. Yeni çözüm, ilkinde mevcut vektörler içerisinde en iyi vektör ikincisinde ise herhangi bir vektör kullanılarak üretilir. Bu iki yoldan hangisinin seçileceğine ise en iyi çözümü dikkate alma oranına (best solution considering rate (BSCR)) bakılarak karar verilir. Bir diğer modifikasyon da HMCR ve PAR değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre bu iki parametre sabit değerler kullanılması yerine Denklem (3.5-3.6) verildiği gibi mevcut iterasyon (IN) ve maksimum iterasyon sayına (MI) bağlı değişecek şekilde tanımlanmıştır.

$$PAR = PAR_{bas} \left(1 - \frac{IN}{MI}\right) \quad (3.5)$$

$$HMCR = HMCR_{bas} \left(1 - \frac{IN}{MI}\right) \quad (3.6)$$

Çalışma kapsamında yararlanılan HS algoritmasının optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı Şekil 3.6’da özetlenmiştir.



Şekil 3.6: HS algoritmasının optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.

3.2.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (TLBO)

Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması Rao ve diğ. (2011) tarafından geliştirilmiş bir sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bir sınıftaki öğrencilerin okul eğitimindeki öğrenme sürecinin benzetimi kullanılmaktadır. Algoritmanın yeni çözüm kümesi üretme işlemi iki adımdan oluşmaktadır. “Öğretmen Evresi” adı verilen ilk aşamada, öğretmen tarafından yönetilen öğrenme sürecinin; “Öğrenci Evresi” isimli ikinci aşamada ise öğrencilerin kendi aralarında çalışmaları sonucunda bilgi birikimlerini artırmasının benzetimi yapılmaktadır.

Öğretmen Evresi’nde yeni çözüm vektörleri Denklem (3.7) kullanılarak üretilir:

$$X_{yeni} = X_{mevcut} + rand(0,1) \cdot (X_{öğretmen} - T_F \cdot X_{ortalama}) \quad (3.7)$$

Burada X_{yeni} yeni üretilen çözüm vektörünü, X_{mevcut} mevcut çözüm vektörünü, $rand(0,1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılmış rastgele sayıyı, $X_{öğretmen}$ öğretmen olarak seçilen çözüm vektörünü diğer bir deyişle mevcut çözümlerden en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olan vektörü, T_F

öğrenme katsayısını, $X_{ortalama}$ ise mevcut çözüm vektörlerindeki değerlerin aritmetik ortalamasını simgelemektedir.

Denklem (3.7)'de yer alan öğretim katsayısı (T_F) 1 veya 2 değerini alabilir ve rastgele seçilir. Öğretim katsayısı

$$T_F = \text{yuvarla}[1 + \text{rand}(0,1)] \rightarrow \{1 - 2\} \quad (3.8)$$

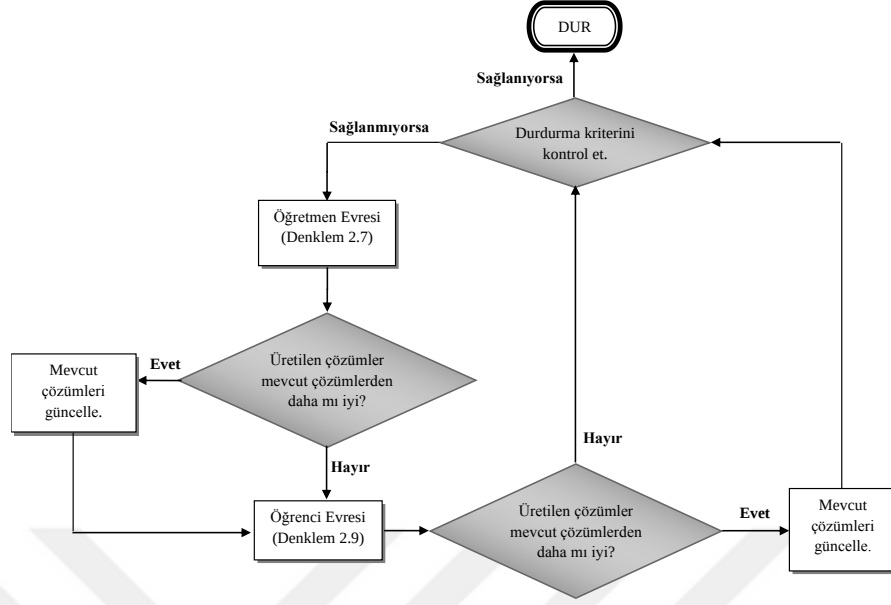
denklemleriyle hesaplanmaktadır.

Öğrenci Evresi'nde, mevcut çözüm kümeleri içinden rastgele iki çözüm kümesi (X_i ile X_j) seçilir. Bu evrede yeni çözüm vektörleri mevcut çözümlerin amaç fonksiyonlarına ($f(X_i)$ ile $f(X_j)$) bakılarak Denklem (3.9) kullanılarak üretilir.

$$X_{yeni} = \begin{cases} X_{mevcut} + \text{rand}(0,1) \cdot (X_i - X_j) & \text{eğer } f(X_i) > f(X_j) \\ X_{mevcut} + \text{rand}(0,1) \cdot (X_j - X_i) & \text{eğer } f(X_i) < f(X_j) \end{cases} \quad (3.9)$$

Yeni çözüm vektörleri başlangıç çözüm vektörlerine benzer şekilde popülasyon sayısı (pn) kadar üretilir. Üretilen bu çözüm vektörleri yeni çözüm matrisine kaydedilir ve her bir çözümün amaç fonksiyonu hesaplanır. Daha sonra yeni çözüm matrisindeki her bir vektör mevcut çözüm matrisindeki vektörler ile kıyaslanır. Yeni vektörlerin amaç fonksiyonunun mevcut çözümlerden daha iyi sonuç vermesi durumunda mevcut değerler yeni değerler ile güncellenir. Bu işlem durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

Bu kısımda ele alınan TLBO algoritmasının optimizasyon aşaması Şekil 3.7'deki akış diyagramında da ayrıca özetlenmiştir.



Şekil 3.7: TLBO algoritmasının optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.

3.2.4. Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA)

Doğadaki canlıların sezgisel optimizasyon süreçlerine çiçeklerin türlerinin devamı için gerçekleştirdikleri tozlaşma süreci de verilebilir. Bu süreçte çiçek ürettikleri polenleri diğer çiçeklere rüzgâr, hayvanlar ve su aracılığıyla ulaştırırlar. Polenlerin taşınması sürecinin kullanılan sezgisel sürece hayvanların katkısı oldukça ilginç bir özelliktir. Her bitki çiçeklerinin rengi, biçimi ve kokusu ile duyum sistemleri bu bitkiye ait belirtileri seçebilecek bir oluşum geçirmiş olan bazı canlı türleri kendilerine çekerler. Bu canlılar dikkatlerini çeken çiçeklere yöneldiklerinde, aynı türden bitkiler arasında polen aktarımını da gerçekleştirmiş olurlar. Bu sayede aynı çiçek türleri arasında türün devamı sağlanır. Bu örnek sezgisel optimizasyon sürecinin başarımı ve gelişmişliğini göstermektedir. Polen aktarımı aynı bitkiler arasında olabildiği gibi çeşitli polinatorler aracılığıyla (rüzgar, su, kuş, yaras, böcek vb.) farklı bitki türleri arasında da gerçekleşebilmektedir.

Çiçek Tozlaşma algoritması bu süreçten esinlenilerek Yang (2012) tarafından geliştirilmiş doğa tabanlı sezgisel algoritmalarındandır.

FPA algoritmasında polen sayısı (pln) ve geçiş olasılığı (switch probability, sp) olarak adlandırılan iki adet parametre kullanılmaktadır. Bu parametrelerden polen sayısı, popülasyon sayısı (pn), armoni belleği boyutu, benzeri farklı isimlerle adlandırılan ve çözüm kümesi

sayısına karşılık gelen değerdir. Dolayısıyla FPA algoritmasında algoritmaya özgü parametre yalnızca birdir.

FPA sürü tabanlı sezgisel algoritmalarla benzer şekilde her iterasyonda polen sayısı kadar çözüm kümesi oluşturulmaktadır. FPA kurallarına göre yeni çözüm kümeleri iki şekilde oluşturulabilir. “Global Tozlaşma Evresi” adı verilen ilk türde, farklı bitkiler arasında gerçekleşen “çapraz tozlaşma” veya canlı polinatörler (kuş, yarasa, böcek vb.) tarafından polenlerin taşındığı “biyotik tozlaşma”; “Lokal Tozlaşma Evresi” isimli ikinci türde ise aynı bitkinin çiçeklerinin “öz-tozlaşma” benzetimi veya canlı olmayan polinatörler (rüzgar ve su) tarafından polenlerin taşındığı “abiyotik tozlaşma” benzetimi yapılmaktadır.

Global Tozlaşma Evresi’nde yeni çözüm vektörleri Denklem (3.10) kullanılarak üretilir:

$$X_{yeni} = X_{mevcut} + L \cdot (X_{eniye} - X_{mevcut}) \quad (3.10)$$

Denklemden X_{yeni} yeni üretilen çözüm vektörünü, X_{mevcut} mevcut çözüm kümesini, L Lévy dağılımı gösteren rastgele sayıyı, X_{eniye} mevcut çözümler içerisindeki en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olan çözüm vektörünü simgelemektedir.

Denklem (3.10)’da yer Lévy dağılımı gösteren rastgele sayı

$$L = \frac{1}{2\pi} \cdot (rand(0,1))^{-1.5} \cdot e^{-\frac{1}{2 \cdot rand(0,1)}} \quad (3.11)$$

denklemleri hesaplanmaktadır.

Lokal Tozlaşma Evresi’nde, mevcut çözüm vektörleri içinden rastgele iki vektör (X_i, X_j) seçilir. Bu evrede yeni çözüm kümeleri Denklem (3.12) kullanılarak üretilir:

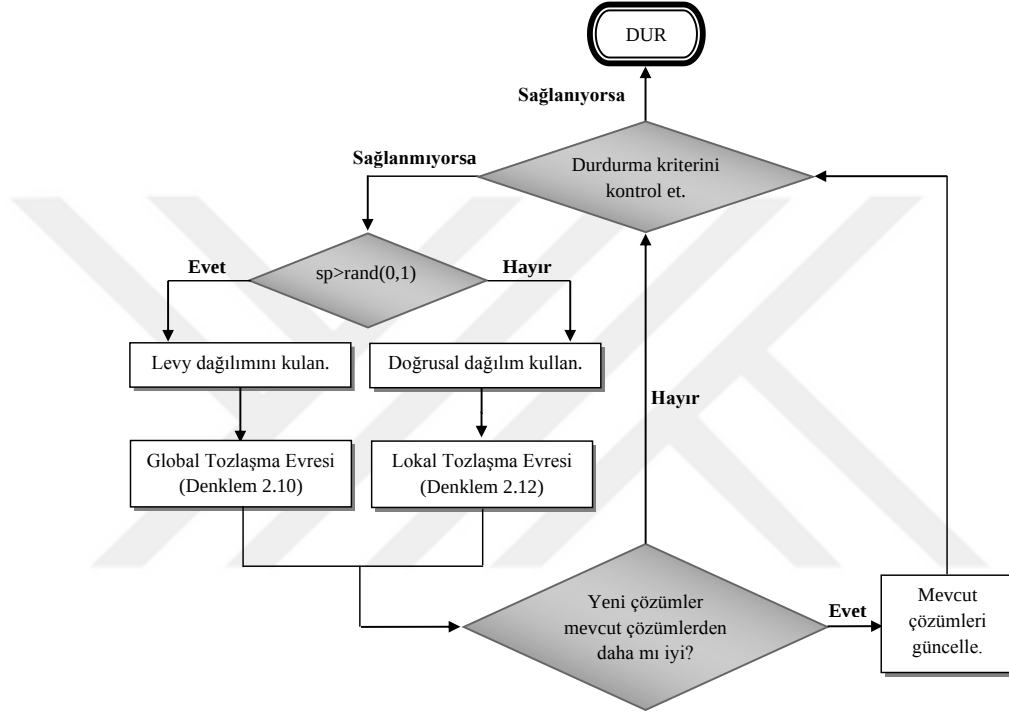
$$X_{yeni} = X_{mevcut} + rand(0,1) \cdot (X_i - X_j) \quad (3.12)$$

Algoritma yeni çözüm kümelerini bu iki durumdan hangisine göre üretileceğine geçiş olasılığı (sp) değerini kullanarak karar verir. Buna göre her iterasyonda rassal bir değer üretilir ve bu değer “ sp ” değerinden büyük olması durumunda birinci (Global Tozlaşma Evresi) aksi durumda ise ikinci yol (Lokal Tozlaşma Evresi) seçilir.

Üretilen yeni vektörlerin bir önceki bölümde ele alınan TLBO algoritmasında olduğu gibi yeni çözüm matrisinde depolanmasının ardından amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Amaç

fonksiyonu değerlerine göre yapılan kıyaslama sonucunda yeni vektörlerin mevcutlardan daha iyi sonuç vermesi halinde mevcut çözüm vektörü yeni çözüm vektörü ile değiştirilir. Böylece mevcut çözüm matrisinin güncellenmesi sağlanır. Bu süreç durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder.

Burada kısaca anlatılan FPA algoritmanın optimizasyon aşaması Şekil 3.8’den de görülebilir.



Şekil 3.8: FPA’nın optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.

3.2.5. Jaya Algoritması (JA)

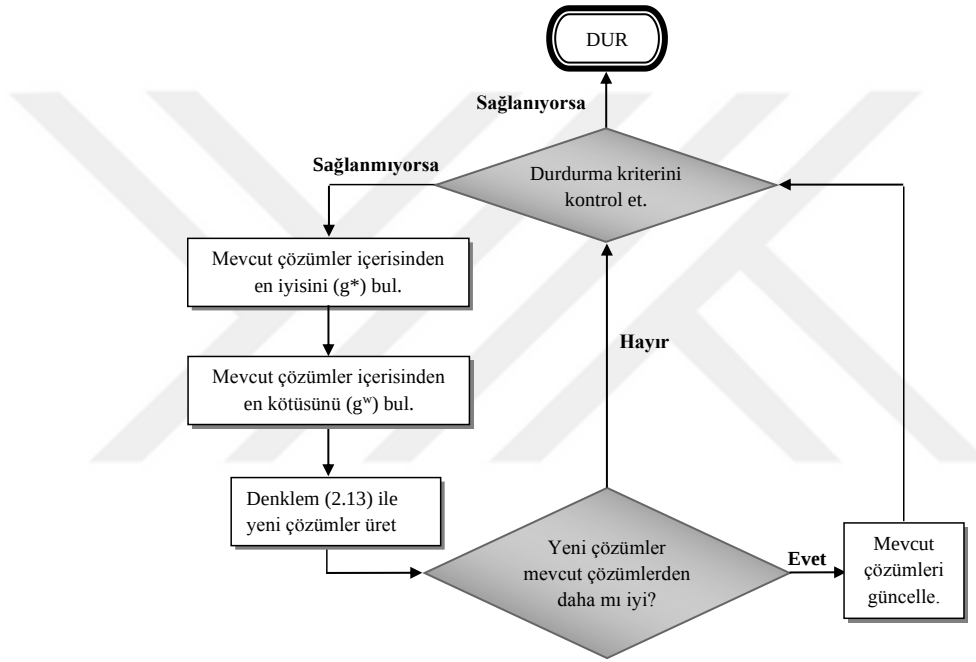
Rao, araştırmaları ve yapmış olduğu denemeler sonucunda 2016 yılında Jaya algoritmasını ortaya koymuştur. Araştırmaları sürecinde geliştirdiği metasezgisel algoritmasının başarımı gören Rao, algoritmasına Sankrtiçe zafer anlamına gelen Jaya ismini vermiştir. Geliştirilen algoritmanın iki önemli özelliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki algoritmaya ait kullanıcı tanımlı herhangi bir parametresinin olmamasıdır. Diğeri ise tek bir fazdan (evreden) oluşmasıdır. Bu evrede yeni çözüm vektörleri üretilirken Denklem (3.13)’ten yararlanılır.

$$X_{yeni} = X_{mevcut} + rand(0,1) \cdot (g^* - |X_{mevcut}|) - rand(0,1) \cdot (g^w - |X_{mevcut}|) \quad (3.13)$$

Önceki bölümlere benzer şekilde X_{yeni} ile X_{mevcut} sırasıyla yeni çözüm vektörü ile mevcut çözüm vektörünü göstermektedir. g^* ve g^w ise sırasıyla mevcut çözümler içerisinde amaç

fonksiyonuna göre en iyi çözümü sağlayan çözüm vektörü ile en kötü çözümü veren çözüm vektörünü göstermektedir.

JA ile optimizasyon aşamasında da yeni üretilen çözüm vektörleri yeni çözüm matrisinde depolanır. Ardından yeni çözüm matrisi ile mevcut çözüm matrisinin her bir sütunu (vektörü) birbiriyle kıyaslanarak yeni çözümlerin daha iyi sonuç vermesi halinde mevcut çözüm matrisinde güncellemeler yapılır. Durdurma kriterinin sağlanıncaya kadar bu işlemler tekrar edilir. (Şekil 3.9).



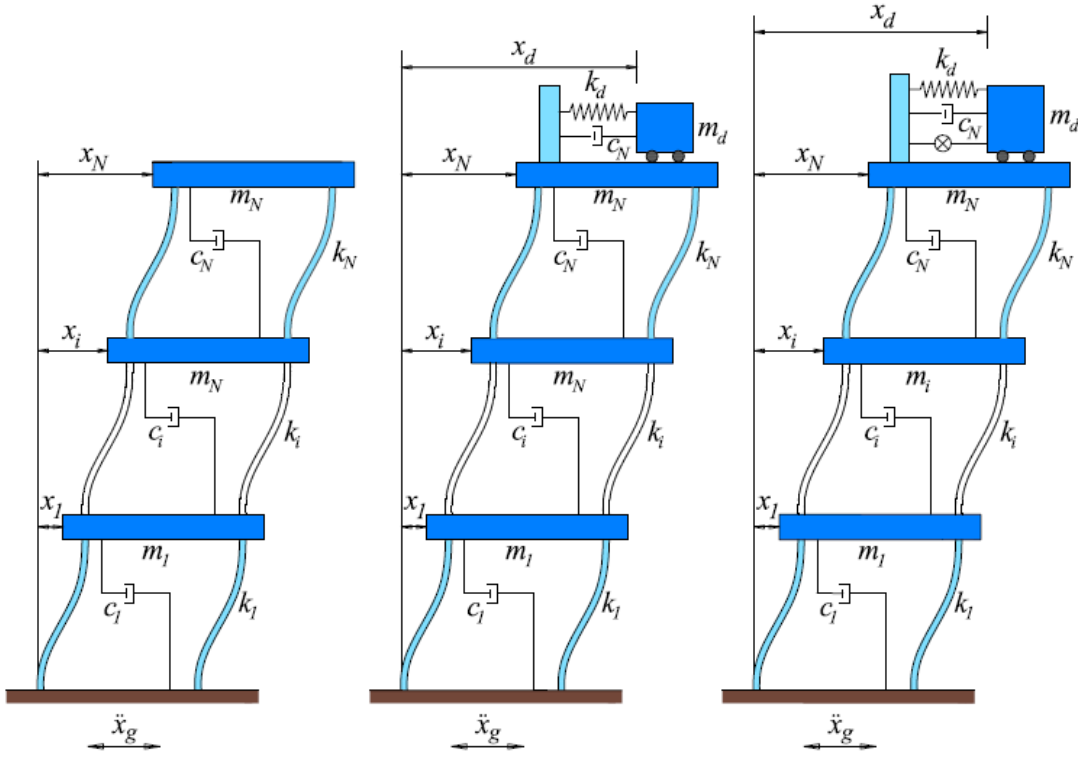
Şekil 3.9: JA'nın optimizasyon aşamasına ait akış diyagramı.

3.3. PID KONTROLCÜLÜ ATMD SİSTEM OPTİMİZASYONU

Önceki bölümlerde metasezgisel algoritmalar hakkında genel bilgi verilerek, metasezgisel yöntemlerin metodolojisi ile tez kapsamında kullanılan armoni arama, öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon, çiçek tozlaşma ve jaya metasezgisel algoritmalarının optimizasyon süreçlerini hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur. Bu bölümde ise tez kapsamında optimizasyonu yapılan PID kontrolcülü aktif ayarlı kütle sönümleyici problemi tanıtılmıştır.

3.3.1. Hareket Denklemleri

Sismik yer hareketi etkisine maruz yapısal sistemlerin çözümlenmesi için yapıların dinamik analizlerinin yapılması gerekir. Dinamik analizlerin yapılması için ise, yapısal modelin hareket denklemlerinin yazılması ve bu denklemlerin çözümlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.10'da kesme binası (kontROLSÜZ yapı) ve son katına ayarlı kütle sönümleyicisi (TMD) ile aktif ayarlı kütle sönümleyicisi (ATMD) yerleştirilmiş kontrollü yapılar görülmektedir. Bu kesme binası modelleri üzerinden söz konusu hareket denklemleri, dinamik analizler ve yapısal sistemin çözümü bu bölümde sunulmuştur.



Şekil 3.10: Sırasıyla kontrolsüz, TMD kontrollü ve ATMD kontrollü N katlı bina modelleri.

Şekil 3.10'da m_i , c_i , k_i ve x_i sırasıyla N katlı bir binanın i . katına ait kütle, sönüm katsayısı, rijitlik katsayısı ile i . katın yere göre göreli yerdeğiştirmesini sembolize etmektedir. Benzer şekilde kontrol sistemlerine ait kütle, rijitlik katsayısı, sönüm katsayısı ve kontrol sisteminin yere göre göreli yerdeğiştirme değerleri de sırasıyla m_d , c_d , k_d ve x_d ile ifadelerine karşılık gelmektedir. Şekildeki $\ddot{x}_g$ ise yer ivmesini göstermektedir.

Sismik etkiler altındaki kontrolsüz kesme binasına ait hareket denklemi

$$[M] \cdot \ddot{x}(t) + [C] \cdot \dot{x}(t) + [K] \cdot x(t) = -[M] \cdot \{1\} \cdot \ddot{x}_g(t) \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Denklemdaki $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik katsayısı matrislerini göstermektedir ve bu matrisler Denklem (3.15-3.17) ile sembolize edilebilir.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{N-1} & c_{N-1} + c_N & -c_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_N & c_N \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{N-1} & k_{N-1} + k_N & -k_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_N & k_N \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Bu matrisler Denklem (3.14)'ten de anlaşılacağı üzere zamana bağlı değişen $\ddot{x}(t)$ (ivme), $\dot{x}(t)$ (hız) ve $x(t)$ (yerdeğiştirme) yapısal tepki vektörleri ile çarpılmaktadır. Bu vektörlerden yerdeğiştirme vektörü

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

ile ifade edilebilir. Hız ve ivme vektörleri ise yerdeğiştirme vektörünün türevleri alınarak elde edilebilir.

Denklem (3.14)'ün sağ tarafı ise yer ivmesi kaynaklı yapıya etkiyen kuvvete karşılık gelmektedir. Söz konusu kuvvet yapının kütle matrisi, birim sütun vektör $\{1\}$ ile zamana bağlı

değişen yer ivmesinin ($\ddot{x}_g(t)$) çarpımına eşittir. Boyutu $1 \times N$ olan birim sütun vektörün çarpımdaki rolü çarpım matris boyut uyumluluğunun sağlamaktır.

Kontrolsüz yapı için yazılan hareket denklemleri TMD kontrollü bir kesme binası için yazılacak olursa, Denklem (3.14)'de gösterilen $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ matrislerinde TMD parametrelerine bağlı düzenlenmelerin yapılması gerekir.

Tez çalışması kapsamında incelenen üst katına TMD iliştirilen yapısal model (Şekil 3.10) için söz konusu matrisler Denklem (3.20)-(3.22) verilmiştir. Denklemlerden görüleceği üzere, TMD kontrol sistemi, rijitlik, sönüm ve kütlesi TMD sistemin parametreleri olan ek kat şeklinde matrislere ilave edilerek göz önüne alınır.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_N & c_N + c_d & -c_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_N & k_N + k_d & -k_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Benzer şekilde yapısal tepki vektörlerine de TMD tepkilerinin eklenmesi gerekmektedir. Bu durumda hareket denklemindeki yerdeğiştirme vektörü

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \\ x_d \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

olur.

ATMD sistemi iliştirilen kesme binasının hareket denklemi ise kontrolsüz ve TMD pasif kontrollü sistemden farklı olarak kontrol kuvveti denkleme eklenmesi gerektir. Buna göre, ATMD sistemi için yapının hareket denklemi,

$$[M] \cdot \ddot{x}(t) + [C] \cdot \dot{x}(t) + [K] \cdot x(t) = -[M] \cdot \{1\} \cdot \ddot{x}_g(t) + F(t) \quad (3.24)$$

olarak ifade edilebilir. Bölüm 1’de de değinildiği gibi, ATMD sistemler TMD sisteme aktif kontrol mekanizması eklenmesiyle (sensör, kontrolcü ve aktüatör) türetilmiş sistemlerdir. Bundan dolayı ATMD kontrollü sisteme ait $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ matrisleri ile yapısal tepki vektörleri ($\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$ ve $x(t)$) TMD kontrollü sistemle aynı olmaktadır. Hareket denkleminde yer alan ATMD sisteminin kontrol kuvveti $F(t)$ ise $N+1$ elemanlı bir vektör olup ifade olarak

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ F_u \\ -F_u \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

şeklinde gösterilebilir. F vektöründeki F_u ise ATMD tarafından üretilen aktif kontrol kuvvetini temsil etmektedir ve Denklem (3.26)’da verildiği gibi kuvvet sabiti (trust constant (K_f)) ile bobin üzerindeki akımın (current of armature coil (i_{ATMD})) çarpılmasıyla elde edilebilir.

$$F_u = K_f \cdot i_{ATMD} \quad (3.26)$$

Bobin üzerindeki akım i_{ATMD}

$$R \cdot i_{ATMD} + K_e \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_N) = u \quad (3.27)$$

ile bulunabilir. Burada R bobin direncini (resistance value), K_e bobinin voltaj sabitini (the induced voltage constant of armature coil), u kontrol algoritmasına göre üretilen kontrol

sinyalini başka bir ifade ile doğrusal motorun akımını göstermektedir. $\dot{x}_d$ ve $\dot{x}_N$ ise sırasıyla ATMD ve binanın üst katının hız değerlerini göstermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında kontrol sinyalinin elde edilmesinde PID kontrolcünden yararlanılmıştır. PID orantı (P), integral (I) ve türev (D) olmak üzere üç ayrı parametreyi kontrol ederek hata sinyallerini kontrol sinyallerine dönüştüren geri beslemeli bir kontrolcüdür ve PID kontrolcü denklemine göre kontrol sinyali

$$u = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.28)$$

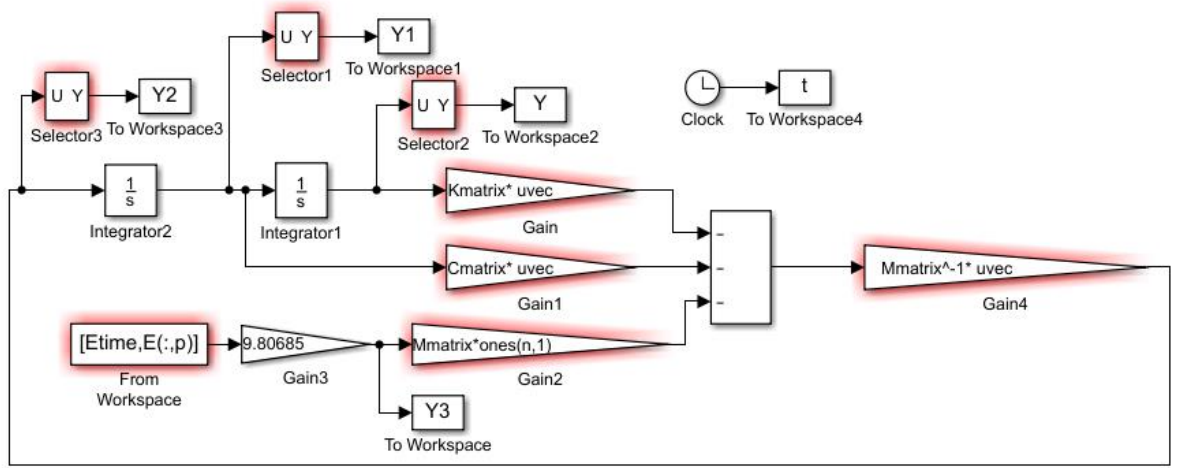
ile hesaplanmaktadır. Denklemdaki K_p orantı kazancı veya orantı sabitini, T_i integral zamanını, T_d ise türev zamanını gösteren kontrolcü katsayılarıdır. $e(t)$ ise ölçülmüş mevcut sistem durumu ile amaçlanan sistem durumu arasında farkı gösteren hata sinyalidir. Bu çalışma kapsamında üst kat hız değerlerinin mümkün mertebe sıfıra yakınsaması hedeflendiğinden hata sinyali direkt olarak üst kat hızı ($\dot{x}_N$) olarak tanımlanmıştır.

Denklem (3.28)'deki " $K_p \cdot e(t)$ " kontrolcünün ilk parametresi olan orantıya (P), " $K_p \cdot \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt$ " ikinci kontrol parametresi olan integrale (I), " $K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$ " ise üçüncü kontrol parametresi olan türeve (D) denk gelmektedir. Kontrolcünün her üç parametresinin farklı işlevleri bulunmaktadır. Buna göre orantı işlemi oluşan dış etkiye kontrol sisteminin hızlı cevap vermesini sağlar, ancak parametrenin büyük değerleri salınım oluşmasına neden olmaktadır. İkinci parametre Integral işlemi ise istenen sabit durumlu cevabı elde etmeye yardımcı olmasına karşın, uzun periyotlu salınım cevabı oluşmasına sebep olabilir. Son parametre türev işlemi ise, sönümleme kararlılığını sağlanması açısından olumlu katkı sağlar fakat uygun olmayan değerler sonucunda yer hareketlerinde yüksek frekanslı salınımlar daha olasıdır.

Sonuç olarak, bu üç farklı parametre ve işlevlerinin her birinin yapısal sistemin kontrolüne olumlu veya olumsuz etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka ifadeyle parametreler arasında hassas bir denge bulunmakta ve bu dengenin sağlanmasında direkt olarak kontrolcü katsayıları etkili olmaktadır. Dolayısıyla bu katsayıların en uygun değerlerinin bulunmasında optimizasyon kaçınılmaz olmaktadır.

3.3.2. Sistemin Matlab Simulink ile Analizi

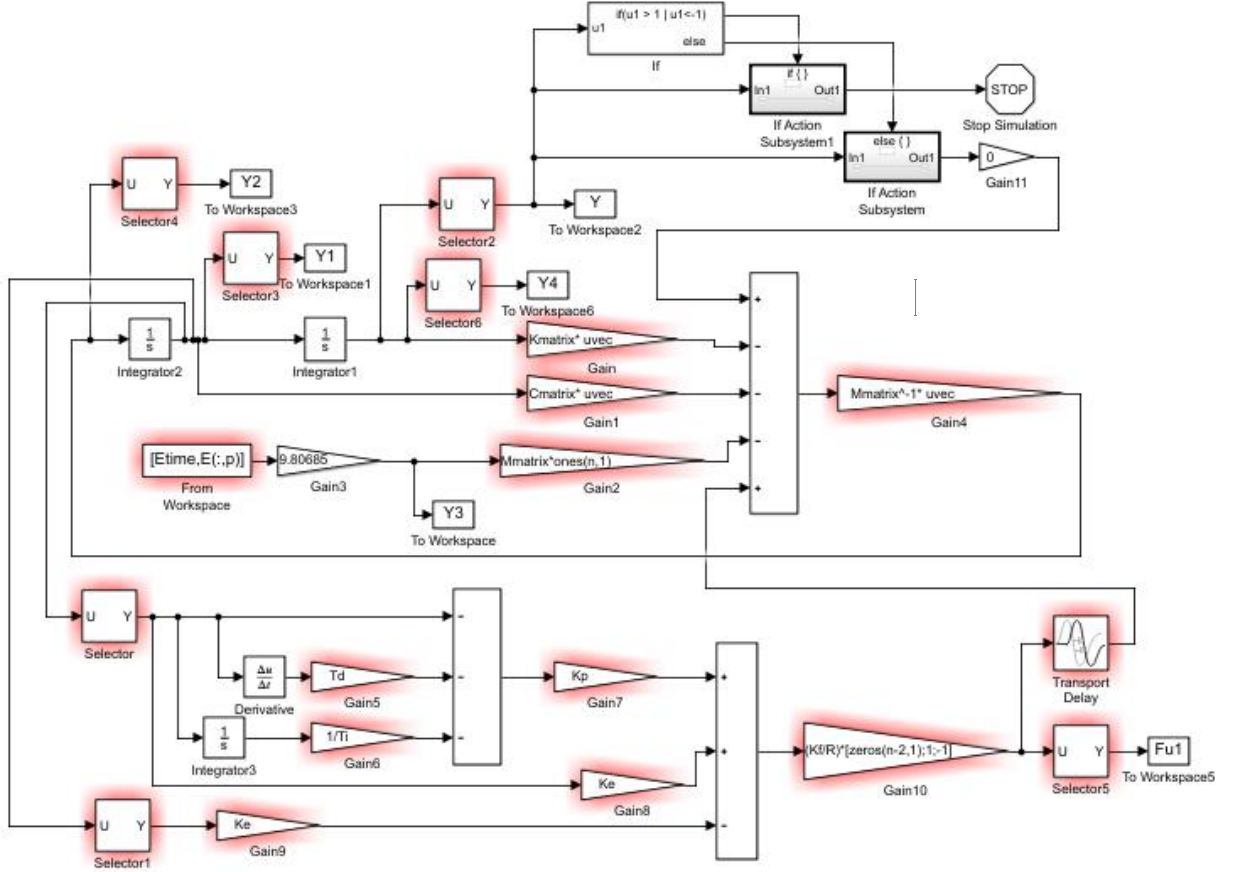
Tez çalışması kapsamında önceki bölümde sunulan hareket denklemlerinin çözümü Matlab Simulink ile Runge-Kutta metodundan yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla geliştirilen programın blok diyagramları çözüm adımları Şekil 3.11-3.12’de gösterilmiş olup diyagramda kullanılan blok işlevlerine ait detaylar ise Tablo 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.11: Kontrolsüz kesme binası modeline ait Matlab Simulink kodu.

Şekil 3.11 kontrolsüz kesme binasına ait blok diyagramıdır. Blok diyagramının alt kısmında yer alan ve E olarak isimlendirilen deprem kayıtları yer ivmesi ($g=9.80685 \text{ m/s}^2$) 3 numaralı gain bloğu “Gain 3” yardımıyla çarpılarak ivme ($\ddot{x}_g(t)$) elde edilir. Daha sonra bu ifade şekilde Mmatrix ve ones olarak adlandırılan yapının kütle matrisi ($[M]$) ve birim vektör ($\{1\}$) ile çarpılarak hareket denkleminin (Denklem 3.14) sağ tarafındaki sismik etkiler nedeniyle ortaya çıkan kuvvet elde edilir. Denklemin çözümünden elde edilecek yerdeğiştirme ($x(t)$) değerinin blok diyagramında “ $\frac{1}{s}$ ” ile gösterilen integral bloğu ile integralleri alınarak sırasıyla hız ($\dot{x}(t)$) ve ivme ($\ddot{x}(t)$) değerleri elde edilir. Bu değerler şekilde Cmatrix ve Kmatrix olarak adlandırılan yapı sönüm ($[C]$) ve rijitlik matrisleri ($[K]$) ile çarpılır. Daha sonra değerler toplama/çıkarma bloğu yardımıyla işaretlerine uygun olarak toplanır. Bu toplama işlemi kütle matrisinin tersi (Mmatrix^-1 ile gösterilen blok) ile çarpılarak yerdeğiştirme değerleri bulunur. Elde edilen yerdeğiştirme değerleri içerisinde “Selector” bloğu yardımıyla üst kat yerdeğiştirmeleri (Y2) seçilerek “to workspace” bloğu ile kayıt altına alınır. Anlık hız (Y1) ve ivme (Y) değerleri de benzer yöntemle kayıt altına alınır.

Söz konusu kontrolsüz yapı için blok diyagramı (Şekil 3.11) TMD sistemler için de benzer olmaktadır. Önceki bölümde değinildiği üzere, TMD pasif kontrollü sistemin hareket denklemi kontrolsüz sistemle aynı olup fark sistem matris ve vektör boyutlarında (kontrol sistemini de içerdiğinden) olmaktadır. Dolayısıyla blok diyagramı şekil olarak aynı olup içeriği bakımından farklıdır.



Şekil 3.12: ATMD kontrollü kesme binası modeline ait Matlab Simulink kodu.

ATMD ve TMD kontrol sistemleri hareket denklemlerinde kullanılan matris ve vektörlerin genel yapısı aynı olup, farklı olarak ATMD sistemleri için denkleme aktif kontrol kuvvetleri eklenmektedir. Bu sebeple PID kontrolcülü ATMD sistem ile kontrol edilen kesme binasına ait blok diyagramı (Şekil 3.12) ise hem kontrolsüz hem de TMD kontrollü yapıdan farklıdır. Blok diyagramına görüleceği gibi söz konusu farklılık hareket denklemlerinde yer alan aktif kontrol kuvvetlerinin hesaplanması sağlayan ek işlev bloklarının kullanmasıdır.

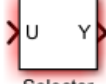
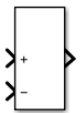
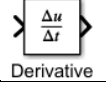
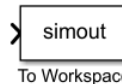
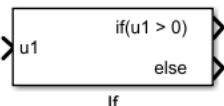
Blok diyagramının alt kısmında “Selector” bloğu ile üst kat hız değerleri ($\dot{x}_N$) seçilerek hata sinyali ($e(t)$) elde edilir. Elde edilen hata sinyalinin “ $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ ” ile gösterilen türev bloğu ile türevi, “

$\frac{1}{s}$ bloğu ile de integrali alındıktan sonra bu ifadeler sırasıyla T_d olarak adlandırılan türev zamanı ve T_i olarak integral zamanı ile çarpılır. Daha sonra bu değerler ve hata sinyali “Toplama/çıkarma bloğu” yardımıyla işaretlerine uygun olarak toplanıp K_p olarak adlandırılan orantı sabiti ile çarpılır. Böylece kontrol sinyali (u) elde edilir (Denklem 3.28).

Bu işlemlerin ardından Selector ile seçilen hız değeri ($\dot{x}_N$) bir de K_e olarak adlandırılan bobinin voltaj sabiti ile çarpılır. Benzer şekilde 1 numaralı Selector bloğu olan “Selector1” ile de ATMD hız değeri ($\dot{x}_d$) seçilerek K_e ile çarpılır. Bu çarpımlar da kontrol sinyali değeri ile işaretlerine uygun olarak toplanarak kontrol kuvveti (F_u) elde edilir (Denklem 3.26).

Kontrol kuvveti, kuvvet sabiti (K_f) değerini bobin direnci (R) oranı ile $[0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1 \ -1]^T$ N+1 elemanlı vektör çarpıldığında (Şekil 3.12’deki Gain10 bloğu) Denklem 3.23’teki kontrol kuvveti vektörü ($F(t)$) bulunur. Bu kontrol kuvveti vektörüne de “Transport Delay” bloğu yardımıyla zaman gecikmesi eklenmesinin ardından söz konusu kuvvet genel hareket denkleminin çözümünde yararlanılan blok diyagramına bağlanır.

Tablo 3.2: Blok diyagramlar ve işlevleri.

Blok Diyagramı	İşlevi	Blok Diyagramı	İşlevi
	Çarpma işlemi		Eleman veya vektör seçimi
	Toplama veya çıkarma işlemi		Zaman gecikmesi
	İntegral işlemi		Türev İşlemi
	Matlab çalışma alanından bilgi alımı		Matlab çalışma alanına bilgi gönderimi
	Eğer komutu		Simülasyonu durdurma

Blok diyagramının üst kısmında da “If” bloğu ile anlık yerdeğişikliklerin (Y) mutlak değerce belirlenen değeri geçip geçmediği kontrol edilerek söz konusu değerin geçilmesi durumunda “STOP” bloğu ile simulink simülasyonun durdurulur. Bu işlemin blok diyagramındaki görevi

yerdeğiştirme değerlerinin sınırlandırılmasıdır. Kullanılacak kontrol sisteminin özelliklerine bağlı olarak kontrol kuvveti değerleri de sınırlandırılabilir. Bu sayede fiziksel olarak uygulanabilir ekonomik olarak da uygun çözüm elde edilebilecek kontrol sistemi özelliklerini kapsayan çözüm alanında optimizasyon gerçekleştirilmesi sağlanır. Kontrol kuvvetlerinin sınırlandırıldığı blok diyagramı *EK-1*'de sunulmuştur.

3.3.3. PID Kontrolcülü ATMD Sistem Optimizasyonu

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, metasezgisel algoritmalara ait optimizasyon süreci beş temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımların ilkinde algoritmaya ait parametreler ile optimizasyon problemine ait tasarım sabitleri ile tasarım değişkenlerinin alt ve üst limitleri tanımlanır. PID kontrolcülü ATMD optimizasyon problemindeki tasarım değişkenleri ATMD sisteme ait kütle (m_d), periyot (T_{atmd}) ve sönüm oranı (ξ_d) ile sistemdeki PID kontrolcüye ait katsayılar olan orantı sabiti (K_p), integral zamanı (T_i) ve türev zamanı (T_d)'dır. ATMD sistemin ait periyot (T_{atmd}) ve sönüm oranı (ξ_d) değerleri

$$T_{atmd} = 2\pi \sqrt{\frac{m_d}{k_d}} \quad (3.29)$$

$$\xi_d = \frac{c_d}{2m_d \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}} \quad (3.30)$$

ifadeleri kullanılarak hesap edilebilir.

Tasarım sabitleri ile sabitlere ait tanımlamalar Tablo 3.3'te özetlenmiştir.

Tablo 3.3: Tasarım sabitleri.

Sembol	Tanım
m_i	Kat kütlesi
k_i	Kat rijitlik katsayısı
c_i	Kat sönüm katsayısı
$stmax$	ATMD kol uzaması limiti
R	Bobin direnci
K_f	Kuvvet sabiti
K_e	Bobinin voltaj sabiti

Optimizasyonun ikinci adımında ise tasarım değişkenlerinin ait değerler rassal olarak alt ve üst limitleri arasından üretilmesi sağlanır.

Üçüncü adımda ise Bölüm 3.3.1’de verilen hareket denklemleri Matlab Simulink yardımıyla yapının sismik etkiler altında çözümü gerçekleştirilir. Bu çözümleme sonucunda, dinamik etkilere altındaki yapının zaman tanım alanında yerdeğiştirmeleri (yapının dinamik yüklere cevabı) elde edilir. Kontrol sisteminin amacı söz konusu yapısal yerdeğiştirmelerin azaltılması (kontrol altına alınmasını) sağlamaktır. Bu sebeple optimizasyon sürecine ait amaç fonksiyonu

$$f(x) = \max(|x_N|) \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilir.

Amaç fonksiyonun hesaplanmasının ardından problem için tanımlanan tasarım kısıtı/kısıtları kontrol edilir. ATMD optimizasyon problemi için tanımlanan tasarımı kısıtı kontrol sisteminin kollarının maksimum uzama oranı olarak belirlenmiştir (Denklem 3.32).

$$g_1 = \frac{\max(|x_d - x_N|)_{ATMD'li\ durum}}{\max(|x_N|)_{ATMD'siz\ durum}} \quad (3.32)$$

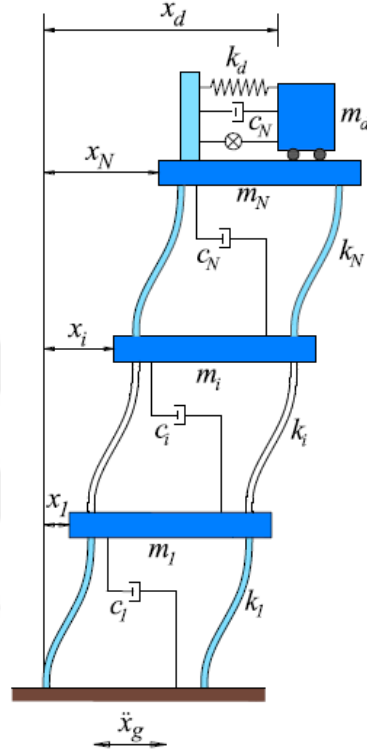
Her bir çözüm vektörü için ilgili değerlerin hesabının ardından seçilen algoritmaya uygun denklemler yardımıyla iterasyon süreci yürütülür (Adım 4-5). Söz konusu algoritmalara ait denklemler Bölüm 3.2-3.5’te görülebilir.

Sürecin sonlanması optimizasyon için tanımlanan durdurma kriterinin sağlaması sonucunda gerçekleşir. Tez çalışması kapsamında söz konusu durdurma kriteri maksimum iterasyon sayısı olarak belirlenmiştir.

Tüm bu optimizasyon süreci sonunda aranan sonuç özetlenecek olursa, tasarım değişkenleri için tanımlanan alt ve üst limitler içerisinde kalacak şekilde yapıya iliştirilen kontrol sisteminden minimum amaç fonksiyonu sağlayan en uygun değişken kombinasyonun aranmasıdır şeklinde özetlenebilir. |

4. BULGULAR

Bu bölümde, PID kontrolcülü ATMD sistemin optimum tasarımı amacıyla geliştirilen ve bir önceki bölümde detaylı şekilde ele alınan metasezgisel algoritmalar tabanlı yöntemlerin on katlı kesme binası modeli (Şekil 4.1) üzerinde gerçekleştirilen analizlerine ait sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 4.1: ATMD kontrollü N=10 katlı bina modeli.

Şekil 4.1’de verilen model üzerinde iki farklı duruma ait optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilkinde (Bölüm 4.1) kontrol sisteminin yapıya uygulayacağı aktif kuvvet ile yapının üst kat yerdeğiştirme (x_N) miktarına herhangi bir sınır tanımlanmaksızın optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım ile kontrol sisteminin ekstrem durumlarda yapı üzerindeki performansının ve etkinlik sınırlarının teorik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 4.2’de sunulan ikinci kısımda ise, ATMD sisteminin yapıya uygulanacağı aktif kuvvet ile yapının üst kat yerdeğiştirme değerine (x_N) çeşitli sınırlandırmalar getirilerek optimizasyon yapılmıştır. Bu tasarım örneğinde söz konusu kontrol sisteminin üretim şartlarına bağlı olarak gerçek yapı ölçeğindeki pratik uygulamaların temsil edilmesi amaçlanmıştır.

4.1. SINIRLANDIRILMAMIŞ AKTİF KUVVET VE ÜST KAT YERDEĞİŞTİRME DURUMU

Bu bölümde örnek model üzerinde gerçekleştirilen metasezgisel tabanlı sınırlandırılmamış aktif kuvvet ve üst kat yerdeğiştirmesi durumuna ait optimizasyon tasarımının sonuçları sunulmuştur. Amacın yapısal yerdeğiştirmelerin azaltılması (Denklem 3.31) olduğu optimizasyon sürecinde HS, TLBO, FPA ve JA olmak üzere dört farklı metasezgisel algoritmanın kullanılmıştır. Bu metasezgisel yöntemlere ait algoritmaya özel parametreler Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1: Algoritma parametreleri.

Algoritma	Sembol	Tanım	Değer	Birim
HS	HMS	Armoni belleği boyutu	10	-
	HMCR	Armoni belleğini dikkate alma oranı	0.5	-
	PAR	Ton ayarlama oranı	0.05	-
	BSCR	En iyi çözümü dikkate alma oranı	0.3	-
	MI	Maksimum iterasyon sayısı	5000	-
FPA	pln	Polen sayısı	10	-
	sp	Geçiş olasılığı	0.5	-
TLBO	pn	Popülasyon sayısı	10	-
JA	çs	Çözüm vektörü sayısı	10	-

Optimizasyonda kullanılan on katlı kesme binası modelinin her bir katının kütle ile rijitlik ve sönüm katsayıları aynı olup, ATMD sistemi üstüne konumlandırılmıştır (Şekil 4.1). Bu değer ile optimizasyon sürecinde dikkate alınan tasarım değişkenlerinin limit değerleri tasarım sabitleriyle birlikte Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2: Optimizasyon problemine ait tasarım değişken ve sabitleri.

Sembol	Tanım	Değer	Birim
m_i	Kat kütlesi	360	ton
k_i	Kat rijitlik katsayısı	650	MN/m
c_i	Kat sönüm katsayısı	6.2	MNs/m
m_d	ATMD kütlesi	36-180	ton
T_{atmd}	ATMD periyodu	0.495-1.484	s
ζ_d	ATMD sönüm oranı	1-50	%
K_p	Orantı sabiti	(-10000)-(10000)	Vs/m
T_d	Türev zamanı	(-10000)-(10000)	s
T_i	İntegral zamanı	(-10000)-(10000)	s
stmax	ATMD kol uzaması limiti	2-3-4	-
R	Bobin direnci	4.2	Ω
K_f	Kuvvet sabiti	2	N/A
K_e	Bobinin voltaj sabiti	2	V

Optimizasyon probleminin tasarım değişkenlerinden kontrol sistemin kütlesi ve periyoduna ait limit değerleri yapının özelliklerine bağlı olarak belirlenmiştir. Buna göre bu limitler kontrol sisteminin kütlesi için yapı kütlesinin %1 ile %5, periyot için ise yapı kritik periyodunun 0.5 ile 1.5 katı olacak şekilde tanımlanmıştır. Buna karşın, PID kontrolcü parametreleri için Bölüm 3.3.2’de belirtilen sebeplerden dolayı Matlab Simulink’te spesifik limit değerlerinin optimizasyon işlemi öncesinde tanımlanması olası değildir.

Tablo 4.2’de gösterildiği üzere ATMD kol uzamasına ait (stmax) tek değer yerine üç farklı durum için optimum değerleri aranmıştır. Burada amaç kontrol sistemin herhangi bir sebeple kol uzamalarının kısıtlanması durumunun optimum sonuçlar üzerindeki olası etkilerinin araştırılmasıdır.

Optimizasyon sürecinde, yer hareketi olarak FEMA P-695: Quantification of Building Seismic Performance Factors kaynağında tanımlanan 22 deprem kaydı kullanılmıştır. FEMA’da uzak fay hareketi olarak gruplandırılan bu deprem kayıtları her kayıt için yatay doğrultuda iki yönde olmak üzere toplamda 44 yer hareketi içermektedir. Söz konusu deprem kayıtlarının optimizasyon sürecinden kullanılmasının nedeni ise kontrol sistemi için belirlenecek optimum değerlerin daha genel olmasının sağlanmasıdır. Deprem kayıtlarına ait detaylar Tablo 4.3’te sunulmuştur.

Tablo 4.3: FEMA P-695 uzak fay hareketi kayıtları.

Deprem numarası	Tarih	Kayıt ismi	Bileşen 1	Bileşen 2
1	1994	Northridge	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279
2	1994	Northridge	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270
3	1999	Duzce, Turkey	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090
4	1999	Hector Mine	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090
5	1979	Imperial Valley	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352
6	1979	Imperial Valley	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230
7	1995	Kobe, Japan	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090
8	1995	Kobe, Japan	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090
9	1999	Kocaeli, Turkey	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270
10	1999	Kocaeli, Turkey	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090
11	1992	Landers	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360
12	1992	Landers	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR
13	1989	Loma Prieta	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090

Tablo 4.3 (devam): FEMA P-695 uzak fay hareketi kayıtları.

14	1989	Loma Prieta	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090
15	1990	Manjil, Iran	MANJIL/ABBAR--L	MANJIL/ABBAR--T
16	1987	Superstition Hills	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090
17	1987	Superstition Hills	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360
18	1992	Cape Mendocino	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360
19	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N
20	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N
21	1971	San Fernando	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180
22	1976	Friuli, Italy	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270

4.1.1. Optimum Sonuçlar

Bir önceki bölümde optimizasyon uygulanan problem tanıtılmıştır. Bu bölümde ise tez kapsamında geliştirilen dört farklı (HS, TLBO, FPA ve JA) metasezgisel tabanlı yöntem ile gerçekleştirilen optimizasyon işlemine ait sonuçlar detaylı olarak ele alınmıştır.

Tablo 4.4-4.7’de sırasıyla HS, TLBO, FPA ve JA algoritmalarına ait sonuçlar üç farklı stmax (ATMD kol uzaması limiti) değeri için sunulmuştur. Tablolarda optimum tasarım değişkenleri (m_d , T_{atmd} , ζ_d , K_p , T_d , T_i) ve amaç fonksiyonu ($f(x)$) değerlerinin yanında tasarım kısıtı (g_1) değerleri ile optimum sonuçların elde edildiği iterasyon numarasını (N_{opt}) içeren algoritmalara ait optimum sonuçlar farklı stmax değerleri için sunulmuştur.

Tablo 4.4: HS algoritmasına ait optimum sonuçlar.

stmax	2	3	4
m_d (t)	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.8947	0.9941	1.0797
ζ_d (%)	28.7749	11.8597	10.1460
K_p (Ns/m)	-10000	-1157.6122	8762.8790
T_d (s)	67.3877	599.4189	-79.1216
T_i (s)	8615.7956	-7687.9116	-2748.0855
$f(x)$ (m)	0.2469	0.1963	0.1898
g_1	1.9999	2.9989	3.2983
N_{opt}	605	481	260

Tablo 4.5: TLBO algoritmasına ait optimum sonuçlar.

stmax	2	3	4
m_d (t)	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.9143	1.0006	1.0895
ζ_d (%)	30.2021	12.2565	9.9984
K_p (Ns/m)	855.3434	-10000	106.3025
T_d (s)	-779.4298	69.6611	-6512.2172
T_i (s)	1899.9516	-6688.4490	-2561.9040
$f(x)$ (m)	0.2470	0.1967	0.1898
g_1	1.9989	2.9999	3.3241
N_{opt}	2974	4490	4603

Tablo 4.6: FPA algoritmasına ait optimum sonuçlar.

stmax	2	3	4
m_d (t)	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.8984	0.9955	1.0801
ζ_d (%)	28.6296	11.8742	10.1289
K_p (Ns/m)	313.4933	-10000	69.2340
T_d (s)	-2118.1751	69.3688	-10000
T_i (s)	55.5916	-10000	-10000
$f(x)$ (m)	0.2469	0.1963	0.1898
g_1	1.9998	2.9999	3.2991
N_{opt}	1418	1324	3098

Tablo 4.7: JA algoritmasına ait optimum sonuçlar.

stmax	2	3	4
m_d (t)	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.8923	0.9952	1.0792
ζ_d (%)	28.5447	11.8869	10.1357
K_p (Ns/m)	-336.3929	724.5488	802.4710
T_d (s)	2003.7846	-958.6749	-862.3424
T_i (s)	-6549.9725	10000	362.0456
$f(x)$ (m)	0.2469	0.1962	0.1898
g_1	1.9999	2.9994	3.2962
N_{opt}	5125	4600	351

Optimum sonuçlara bakıldığında algoritmaların tasarım değişkenleri farklı olmasına rağmen amaç fonksiyonu değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Bu durum farklı düzeyde birbirine bağımlı olan tasarım değişkenlerinin aynı maksimum yerdeğiştirme değerini verecek çeşitli kombinasyonları olduğunu göstermektedir. Amaç fonksiyonu değerlerinin analizi yapılan durumlara bağlı değişimi incelendiğinde, artan stmax değerine göre bir azalış eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Amaç fonksiyonun optimum değerleri üzerinde yapılan incelemenin benzeri diğer parametreler için de yapılabilir.

Analiz sonuçlarından optimum ATMD kütlelerinin (m_d) farklı st_{max} değerleri için tanımlanan üst limit değerine eşit olduğu görülmektedir. Optimum ATMD periyodu değerlerinin st_{max} analizlerine göre değişimine bakıldığında, periyot değerlerinde artan st_{max} değerlerine bağlı bir büyüme olduğu anlaşılmaktadır. Tam tersi bir davranışın gözlemlendiği optimum ATMD sönüm oranlarında ise azalma meydana gelmektedir. Analiz sonuçları PID kontrolcü parametreleri (K_p, T_d, T_i) bakımından değerlendirildiğinde st_{max} değerlerine bağlı azalma veya artış yönünde bir eğilim gözlenmemiştir.

Tasarım kısıtlarının analiz sonuçlarına göre değişimi belirli bir eğilimde olmayıp farklılık göstermektedir. Buna göre st_{max} değerinin 2 ve 3 olarak tanımlandığı analizlerinde üst limite yakın değer almasına karşın st_{max} için üst limitten farklı bir değer almaktadır.

4.1.2. Yöntemlerin Performans Karşılaştırılması

Analiz sonuçlarını genel olarak değerlendirildiğinde tüm algoritmaların amaç fonksiyonun optimum değerini elde etmede başarılı oldukları söylenebilir. Buna karşın HS, FPA ve JA algoritmalarının sonuçlarının TLBO algoritmasına kıyasla bir miktar daha iyi olduğu da görülmektedir. Özellikle $st_{max}=3$ değeri için yapılan analizlerde en büyük farkın olduğu ve farkın en iyi sonuç ile (JA algoritması için 0.1962) kıyaslandığında %0.25 olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu fark oldukça kısıtlı olup etkisi sınırlıdır.

Optimizasyon algoritmalarının optimum sonucu ulaşma hızı bakımında bir kıyaslama yapıldığında ise farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. Buna göre tüm analizlerde sonuca en hızlı ulaşan algoritmanın HS algoritması olduğu görülmektedir. Diğer algoritmaların ise HS algoritmasına kıyasla optimum sonucu ulaşmak için oldukça yüksek sayıda iterasyona ihtiyaç duydukları anlaşılmaktadır. Algoritmalar arasındaki fark HS iterasyon değerleri baz alınarak kıyaslandığında optimum sonucu ulaşmak için TLBO 3.9-16.7, FPA 1.3-10.9 ve JA 0.4-8.6 katı kadar fazla sayıda iterasyon gerektirmektedir.

Optimizasyon algoritmaların performans değerlendirmelerinde iki önemli kriter minimum değer ve iterasyon sayıları birlikte değerlendirildiğinde HS algoritmasının en iyi olduğu söylenebilir.

4.1.3. Aktif ve Pasif Ayarlı Kütle Sönümleyici Karşılaştırması

Son olarak aktif ve pasif kütle sönümleyicisi sistemlerinin performansı karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Bölüm 3'te pasif kütle sönümleyici sistem için verilen denklem takımları kullanılarak ATMD sistemine benzer şekilde TMD sistemi için Matlab Simulink kullanılarak bir metasezgisel tabanlı optimizasyon kodu geliştirilmiştir. Yöntem olarak bir önceki bölümde en iyi performansa sahip olduğu anlaşılan HS algoritması kullanılmıştır.

Söz konusu ATMD ve TMD sistemleri için farklı st_{max} değerlerine ait optimum sonuçlar ise Tablo 4.8'de sunulmuştur. TMD sistemine ait sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde st_{max} 3 ve 4 için optimum sonuçların aynı olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.8: TMD ve ATMD sistemlerine ait optimum sonuçlar.

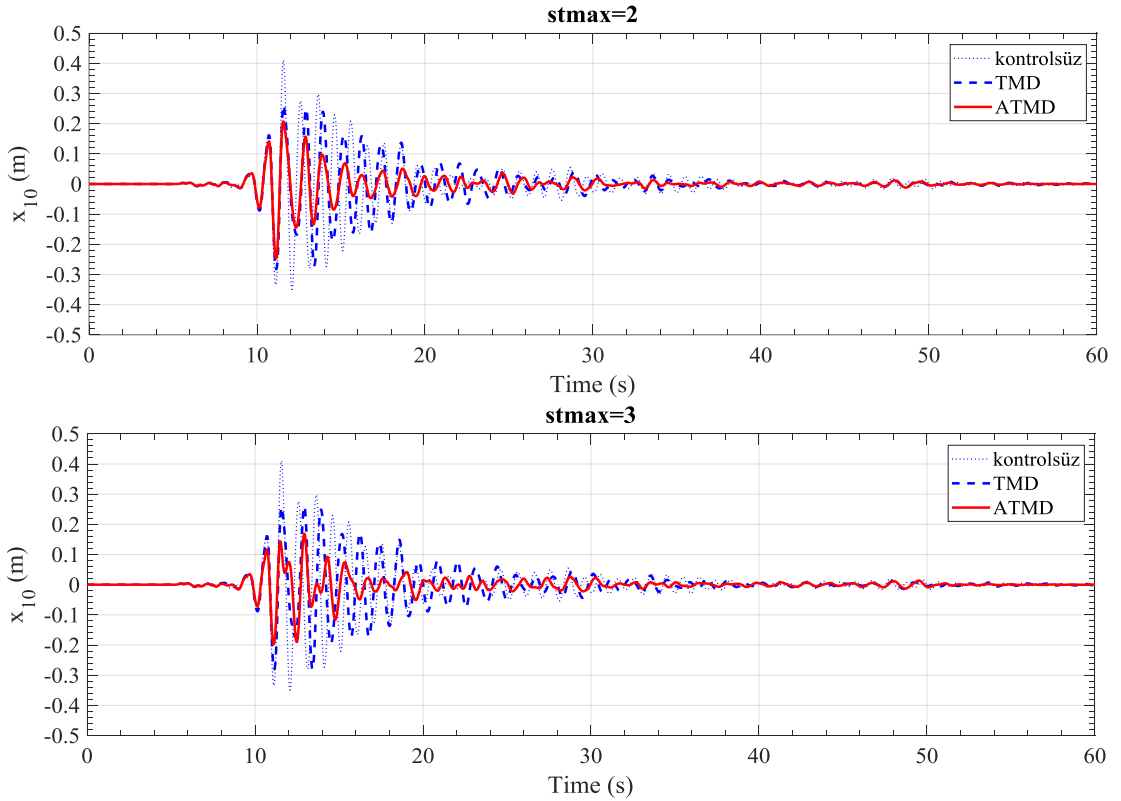
	TMD		ATMD		
st_{max}	2	3 ve 4	2	3	4
$m_d(t)$	180	180	180	180	180
$T_{atmd}(s)$	0.9418	0.9434	0.8947	0.9941	1.0797
$\xi_d(\%)$	5.64	4.69	28.77	11.86	10.15
$K_p(Ns/m)$	-	-	-10000	-1157.6	8762.9
$T_d(s)$	-	-	67.39	599.42	-79.12
$T_i(s)$	-	-	8616	-7687.9	-2748.1
$f(x)$ (m)	0.2820	0.2803	0.2469	0.1963	0.1898
g_1	1.9999	2.0755	1.9999	2.9989	3.2983

Tablo 4.8 verilen sonuçlara göre, TMD sisteminin optimum kütlelerinin ATMD sistemine benzer şekilde tüm st_{max} analizlerinde değişken için tanımlanan üst limit değerine eşit olduğu görülmektedir. ATMD sisteminde optimum periyot için gözlenen artış ve sönüm oranının için azalış eğiliminin TMD sistemi içinde geçerli olmaktadır. Ancak ATMD sisteme kıyasla değişim oldukça kısıtlı kalmaktadır. Ek olarak TMD sisteminin periyot değerleri ATMD sistemine göre st_{max} 2 durumunda daha yüksek, diğer st_{max} durumlarında daha düşük olmaktadır. Sönüm oranlarına bakıldığında ise her durumda TMD sistemin oldukça düşük değerler aldığı görülmektedir.

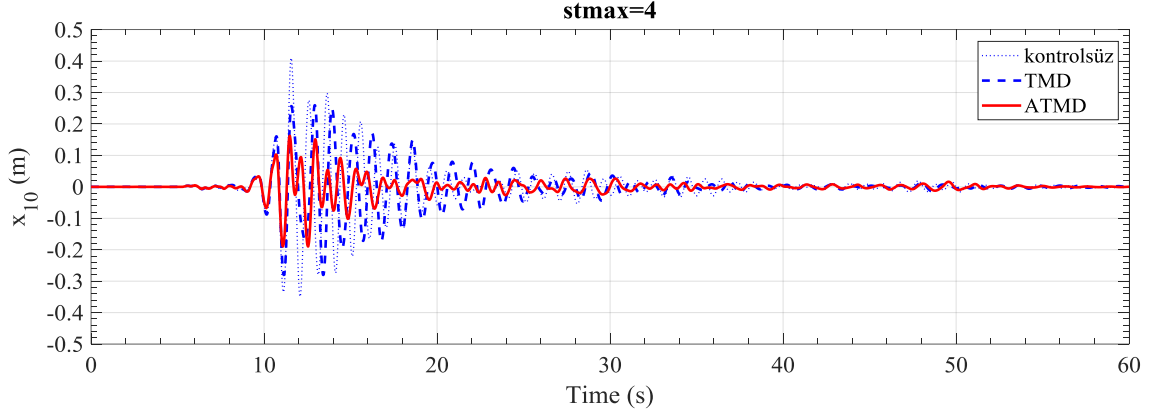
Tasarım kısıtları bakımından sonuçlar değerlendirilecek olursa, TMD sistemi st_{max} 2 için yapılan analizlerde ATMD sistemi gibi üst limitte yakın değerler alırken, st_{max} 3 ve 4 için üst limitten farklı bir değer alır. Bir diğer sonuç olarak, TMD sistemine göre ATMD sisteminde daha fazla kol uzama kapasitesine ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

TMD analiz sonuçları amaç fonksiyonları kendi içinde karşılaştırıldığında st_{max} değerlerine göre yaklaşık olarak aynı (amaç fonksiyonları arasında fark %0.6) olduğu görülmektedir. TMD sistemi ile ATMD sistemi kıyaslandığında ise ATMD sisteminin oldukça üstün olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Analiz sonuçlarına göre ATMD ile TMD sistemi arasındaki fark %14.2 (st_{max} 2 için) ile %47.7 (st_{max} 4 için) arasında olmaktadır.

Amaç fonksiyonları bakımından değerlendirildiğinde optimizasyon sürecinde kritik deprem Tablo 4.3'deki 3. numaralı deprem kaydının (Duzce, Turkey) BOL090 olarak adlandırılmış bileşenidir. Kritik deprem optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu bakımından en etkili deprem kaydı olarak tanımlanabilir. Bir başka ifade ile kritik deprem yapıda en büyük yerdeğiştirmelerin oluşmasına sebep olan depremdir. Bu deprem kaydı altında kontrolsüz sistemin son kat yerdeğiştirmesi 0.4101 m olmaktadır. TMD sistemi kullanılması durumunda bu yerdeğiştirme değeri 0.2802 m, ATMD kullanılması durumunda ise bu değer 0.1898 m'ye kadar düşürülebilmektedir. Bu durum kontrolsüz yapı ile TMD ve ATMD kontrollü yapıların zaman tanım alanında grafiklerinden de açıkça görülmektedir (Şekil 4.2). Grafikler TMD ve ATMD kontrollü yapılar için sırasıyla st_{max} 2, 3 ve 4 durumları göz önüne alınarak sunulmuştur.



Şekil 4.2: Zaman Tanım alanına göre kritik deprem kaydı için üst kat yerdeğiştirmeleri.



Şekil 4.2 (devam): Zaman Tanım alanına göre kritik deprem kaydı için üst kat yerdeğiştirmeleri.

Şekilden de anlaşılacağı üzere TMD ve ATMD sistemleri, yerdeğiştirme etkilerini sönümleyerek yapının hızlıca kararlı hale gelmesini sağlamakta oldukça etkilidirler.

Optimum ATMD ve TMD sistemlerinin kritik deprem kaydı altında yapısal yerdeğiştirmelerin azaltılmasında gösterdikleri başarımın Tablo 4.3'te tanımlanan diğer 44 deprem kaydı için de çeşitli ölçeklerde gözlenmektedir. Söz konusu deprem kayıtları için son kat yerdeğiştirmeleri kontrolsüz, TMD ve ATMD kontrollü yapılara ait değerler ile tüm kayıtlar için elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler Tablo 4.9'da verilmiştir. Anlaşılabilirliğinin artırılması amacıyla görsel karşılaştırma EK-2'de ayrıca sunulmuştur.

Tablo 4.9: FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğiştirmeleri.

Deprem kaydı	Bileşen	Kontrolsüz	TMD stmax=2	TMD stmax=3	ATMD stmax=2	ATMD stmax=3	ATMD stmax=4
Northridge	NORTHR/MUL009	0.3693	0.2128	0.2221	0.2224	0.1628	0.1513
	NORTHR/MUL279	0.3110	0.2820	0.2802	0.2432	0.1766	0.1636
Northridge	NORTHR/LOS000	0.1326	0.0942	0.0931	0.0974	0.1028	0.1090
	NORTHR/LOS270	0.2236	0.1487	0.1467	0.1337	0.1368	0.1434
Duzce, Turkey	DUZCE/BOL000	0.2590	0.1721	0.1713	0.1416	0.1169	0.1186
	DUZCE/BOL090	0.4101	0.2820	0.2803	0.2469	0.1963	0.1898
Hector Mine	HECTOR/HEC000	0.1118	0.1585	0.1641	0.1096	0.0938	0.0829
	HECTOR/HEC090	0.1317	0.1617	0.1667	0.1345	0.1314	0.1190
Imperial Valley	IMPVALL/H-DLT262	0.1110	0.0665	0.0685	0.0493	0.0610	0.0727
	IMPVALL/H-DLT352	0.1894	0.1090	0.1124	0.0930	0.0986	0.0891
Imperial Valley	IMPVALL/H-E11140	0.0765	0.0624	0.0616	0.0589	0.0600	0.0587
	IMPVALL/H-E11230	0.0705	0.1001	0.1015	0.0827	0.1032	0.1038
Kobe, Japan	KOBE/NIS000	0.1112	0.1152	0.1164	0.0858	0.0819	0.0924
	KOBE/NIS090	0.1013	0.0951	0.0953	0.0826	0.1018	0.1006
Kobe, Japan	KOBE/SHI000	0.1045	0.1434	0.1445	0.1237	0.1199	0.1028
	KOBE/SHI090	0.0764	0.1009	0.1039	0.0758	0.0939	0.0973
Kocaeli, Turkey	KOCAELI/DZC180	0.1547	0.1223	0.1213	0.1056	0.0871	0.0840
	KOCAELI/DZC270	0.2234	0.1972	0.1972	0.1772	0.1629	0.1441
Kocaeli, Turkey	KOCAELI/ARC000	0.0407	0.0401	0.0408	0.0273	0.0269	0.0269
	KOCAELI/ARC090	0.0396	0.0341	0.0350	0.0306	0.0394	0.0417
Landers	LANDERS/YER270	0.1797	0.1289	0.1284	0.1221	0.1274	0.1311
	LANDERS/YER360	0.1139	0.0828	0.0832	0.0763	0.0782	0.0792

Tablo 4.9 (devam): FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeşistirmeleri.

Landers	LANDERS/CLW-LN	0.0834	0.0833	0.0848	0.0638	0.0638	0.0608
	LANDERS/CLW-TR	0.1369	0.1498	0.1516	0.1296	0.1719	0.1733
Loma Prieta	LOMAP/CAP000	0.1467	0.1673	0.1705	0.1446	0.1750	0.1599
	LOMAP/CAP090	0.0949	0.1065	0.1137	0.0934	0.1239	0.1288
Loma Prieta	LOMAP/G03000	0.1139	0.0749	0.0749	0.0675	0.0666	0.0767
	LOMAP/G03090	0.1223	0.1394	0.1436	0.1163	0.1095	0.1078
Manjil, Iran	MANJIL/ABBAR--L	0.1236	0.0814	0.0810	0.0723	0.0929	0.1074
	MANJIL/ABBAR--T	0.1847	0.1471	0.1474	0.1251	0.0969	0.1106
Superstition Hills	SUPERST/B-ICC000	0.0848	0.1541	0.1561	0.1376	0.1448	0.1409
	SUPERST/B-ICC090	0.0837	0.0959	0.0974	0.0797	0.0859	0.0838
Superstition Hills	SUPERST/B-POE270	0.1151	0.1291	0.1325	0.0787	0.0816	0.0808
	SUPERST/B-POE360	0.1374	0.1269	0.1321	0.0820	0.0787	0.0706
Cape Mendocino	CAPEMEND/RIO270	0.1829	0.1540	0.1533	0.1353	0.1267	0.1250
	CAPEMEND/RIO360	0.1398	0.1173	0.1166	0.0981	0.0838	0.0822
Chi-Chi, Taiwan	CHICHI/CHY101-E	0.1608	0.1079	0.1121	0.0875	0.0950	0.0995
	CHICHI/CHY101-N	0.3546	0.2080	0.2055	0.1834	0.1410	0.1502
Chi-Chi, Taiwan	CHICHI/TCU045-E	0.1085	0.0836	0.0845	0.0661	0.0833	0.0855
	CHICHI/TCU045-N	0.1514	0.1238	0.1228	0.1109	0.1061	0.1091
San Fernando	SFERN/PEL090	0.0851	0.0823	0.0844	0.0602	0.0657	0.0792
	SFERN/PEL180	0.0614	0.0349	0.0360	0.0279	0.0266	0.0280
Friuli, Italy	FRIULI/A-TMZ000	0.0847	0.0614	0.0608	0.0524	0.0513	0.0582
	FRIULI/A-TMZ270	0.1013	0.0851	0.0847	0.0722	0.0868	0.0825
Maximum		0.4101	0.2820	0.2803	0.2469	0.1963	0.1898

4.2. SINIRLANDIRILMIş AKTİF KUVVET VE ÜST KAT YERDEĞİşTİRME DURUMU

Bölüm 4.1’de örnek bir kesme binasın modeli üzerine (Şekil (4.1)) yerleştirilen kontrol sisteminin üst kat yerdeğıştirmesi ve sistemin yapıya uygulayacağı aktif kontrol kuvveti herhangi bir limit tanımlanmadığı durum için optimum tasarım gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur. Bu bölümde ise önceki analizlerden elde edilen verilerden yararlanılarak, ATMD sisteminin yapıya uygulayacağı aktif kontrol kuvveti ve üst kat yerdeğıştirmelerine tanımlanan limit değerleri için çeşitli ATMD kol uzaması (st_{max}) ve zaman gecikmesi (td) durumları altında optimum tasarımlara ait analiz sonuçları irdelenmiştir.

Söz konusu analizlerde kol uzaması için iki ($st_{max}=2$ ve 3) ve zaman gecikmesi için dört ($td=10, 20, 30$ ve 50 ms) farklı değer olmak üzere toplam 8 durum göz önüne alınmıştır. Tanımlanan limit değerler altında kontrol sisteminin performansının ve etkinliğinin karşılaştırılması amacıyla, bu bölümde analiz modeli, optimizasyon algoritmaları (HS, TLBO, FPA ve JA) ve diğer ilgili parametreler sınırlandırılmamış durumla (Bölüm 4.1) aynı alınmıştır. Analizlerde limit değerler aktif kontrol kuvveti için toplam bina ağırlığının %10’u, üst kat yerdeğıştirmesi için kontrolsüz yapının kritik deprem (en büyük yatay yerdeğıştirme oluşmasına neden olan kayıt) kaydı altında maksimum yatay yerdeğıştirmesi olarak tanımlanmıştır.

4.2.1. Optimum Sonuçlar

Bu bölümde HS, TLBO, FPA ve JA algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları detaylarıyla sunulmuştur. Tablo 4.10 ve 4.17’de söz konusu algoritmalar için farklı kol uzaması (stmax) ve zaman gecikmesi (td) durumlarına ait sonuçlar görülmektedir.

Tablolarda; m_d , T_{atmd} , ξ_d , K_p , T_d , T_i tasarım değişkenlerine ait optimum sonuçları, $f(x)$ amaç fonksiyonunu, g_1 tasarım kısıtını, N_{opt} optimum sonucun elde edildiği iterasyon sayısını, F_{maks} ise FEMA’da tanımlanan 44 deprem kaydı altında kontrol sisteminin yapıya uyguladığı maksimum kuvvetini belirtmektedir.

Tablo 4.10: HS algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.9439	0.9731	0.9528	0.9738
ξ_d (%)	26.2828	27.6134	28.7114	29.0911
K_p (Ns/m)	803.9385	-2214.7517	582.1897	-1313.5372
T_d (s)	-665.7409	232.1735	-953.6713	379.9565
T_i (s)	618.1888	7967.4555	8305.4614	-3845.9208
$f(x)$ (m)	0.2498	0.2528	0.2544	0.2612
g_1	1.9999	1.9999	1.9999	1.9999
N_{opt}	4999	4999	4999	4992
F_{maks}	3530149	3529977	3530124	3530151

Tablo 4.11: HS algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	1.0213	1.0095	0.9748	0.9575
ξ_d (%)	11.1209	11.4610	11.9196	11.3635
K_p (Ns/m)	-491.9316	618.3847	514.1817	-947.4589
T_d (s)	1059.3361	-821.4840	-1055.7908	515.5041
T_i (s)	6124.1075	7420.8484	9328.2659	-4194.3710
$f(x)$ (m)	0.2123	0.2173	0.2200	0.2285
g_1	2.9999	2.9999	2.9999	2.9999
N_{opt}	4998	4995	4998	4998
F_{maks}	3530147	3530153	3530105	3530157

Tablo 4.12: TLBO algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.9440	0.9701	0.9527	0.9695
ζ_d (%)	26.2862	27.4756	28.7075	28.8918
K_p (Ns/m)	483.2291	1903.5642	-1206.3163	-246.9603
T_d (s)	-1107.3544	-269.7712	460.0982	2017.3152
T_i (s)	-1895.9052	2024.4579	8716.6104	-8908.0696
$f(x)$ (m)	0.2498	0.2529	0.2544	0.2613
g_1	1.9999	1.9999	1.9997	1.9991
N_{opt}	4991	4147	4919	4655
F_{maks}	3529425	3521678	3528259	3529464

Tablo 4.13: TLBO algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	1.0188	1.0123	0.9748	0.9655
ζ_d (%)	11.0771	11.5224	11.9191	11.5521
K_p (Ns/m)	2243.7003	125.8454	173.1186	878.1374
T_d (s)	-232.2149	-4035.8919	-3135.6669	-551.3040
T_i (s)	-2011.8841	-9999.4446	9953.5473	-4942.5815
$f(x)$ (m)	0.2123	0.2173	0.2200	0.2285
g_1	2.9999	2.9999	2.9999	2.9999
N_{opt}	4713	4106	3076	4976
F_{maks}	3528468	3529389	3529966	3530160

Tablo 4.14: FPA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	0.9466	0.9745	0.9515	0.9651
ζ_d (%)	26.2841	27.6517	28.6383	28.6596
K_p (Ns/m)	53.1248	1901.5584	1329.6176	8935.3808
T_d (s)	-10000.0000	-269.9864	-417.2241	-55.6990
T_i (s)	-10000.0000	3889.7366	-8026.4749	-9734.0157
$f(x)$ (m)	0.2499	0.2528	0.2544	0.2612
g_1	2.000000	1.999981	1.999997	1.999806
N_{opt}	2887	4975	4981	4966
F_{maks}	3498896	3520313	3525371	3530160

Tablo 4.15: FPA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	1.0126	1.0082	0.9715	0.9537
ζ_d (%)	10.9685	11.4329	11.8543	11.2716
K_p (Ns/m)	-1549.7629	97.9790	-3299.2730	1222.4080
T_d (s)	336.2715	-5184.8293	165.0116	-401.1325
T_i (s)	-5012.9036	263.3278	-2801.9764	-10000.0000
$f(x)$ (m)	0.2124	0.2173	0.2201	0.2285
g_1	2.999985	2.999909	2.999985	2.999999
N_{opt}	4888	4966	4960	4966
F_{maks}	3530160	3530159	3530103	3528843

Tablo 4.16: JA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=2).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180.00	180	180
T_{atmd} (s)	0.9427	0.8904	0.9297	0.9580
ζ_d (%)	26.2129	23.8319	27.5317	28.2808
K_p (Ns/m)	119.8650	260.5605	1536.3628	369.6983
T_d (s)	-4454.3980	-1969.5955	-359.2061	-1341.0203
T_i (s)	7920.8195	616.0613	-4067.2694	-1835.7172
$f(x)$ (m)	0.2499	0.2556	0.2549	0.2613
g_1	1.999519	1.997950	1.999949	1.999347
N_{opt}	4786	1347	4625	3959
F_{maks}	3521598	3515805	3494438	3528768

Tablo 4.17: JA algoritmasına ait optimum sonuçlar (stmax=3).

td	10	20	30	50
m_d (t)	180	180	180	180
T_{atmd} (s)	1.0267	1.0170	0.9777	0.9511
ζ_d (%)	11.2401	11.6002	11.9906	11.2043
K_p (Ns/m)	1896.8359	50.6871	107.4500	-2165.5482
T_d (s)	-274.3151	-10000.0000	-5037.7504	226.8911
T_i (s)	9537.5792	-2617.3062	2940.0919	-2414.2351
$f(x)$ (m)	0.2125	0.2173	0.2201	0.2285
g_1	2.996866	2.999994	2.999115	2.999907
N_{opt}	4738	2299	1137	4191
F_{maks}	3518806	3518014	3528490	3526053

Optimum sonuçlar ile ilgili detaylı irdellemelere geçmeden önce, amaç fonksiyonu ile optimum parametrelerine ait değerlerin ile ilgili yapılacak çıkarımların JA algoritmasının optimum sonuca ulaşmadığı iki durumunu (stmax 2 için td 20 ms ve 30 ms) kapsamadığını belirtmek gerekmektedir. Bu durum detaylı olarak Bölüm 4.2.2’de irdelenecektir.

Belirli zaman gecikmesi (t_d) ve st_{max} değerleri için farklı algoritmalar elde edilen optimum sonuçlar incelendiğinde, tasarım değişkenleri farklı olmasına rağmen amaç fonksiyonu değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni birbirine bağlı olan tasarım değişkenlerinin aynı amaç fonksiyonu verecek çeşitli değerlerden oluşan kombinasyonlarının bulunmasıdır.

Amaç fonksiyonları değerleri incelendiğinde, artan zaman gecikmesine bağlı artış ve artan st_{max} değerine göre bir azalış eğilimi olduğu görülmektedir.

Analiz sonuçlarından optimum ATMD kütlelerinin (m_d) farklı st_{max} ve t_d değerleri için tanımlanan üst limit değerine eşit olduğu görülmektedir.

Optimum ATMD periyodu değerlerinin st_{max} analizlerine göre değişimine bakıldığında, 50 ms zaman gecikmesi analizleri haricinde periyot değerlerinin artan st_{max} değerlerine bağlı arttığı anlaşılmaktadır. Zaman gecikmesi 50 ms için ise tam tersi bir eğilim bulunmaktadır. Kullanılan belirli bir st_{max} değerine bağlı farklı zaman gecikmesi durumları incelendiğinde ise st_{max} 2 için periyot değerlerinde herhangi bir artış ya da azalış eğilimi gözlenmezken, st_{max} 3 için değerlerin artan zaman gecikmesine göre azaldığı görülmüştür.

Optimum sönüm oranları incelediğinde belirli bir zaman gecikmesi durumu için artan st_{max} değerine bağlı sönüm oranında azaldığı görülmüştür. st_{max} 2 değeri için yapılan analiz sonuçlarına göre artan t_d değerlerinin optimum sönüm oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. st_{max} 3 durumu için ise t_d değerlerine bağlı optimum sönüm oranı değişiminde sürekli artım veya azalım eğilimden bahsetmek söz konusu değildir. Analizlerde $t_d=10$ ms-30 ms değerleri arasında bir artım gözlenirken $t_d=50$ ms değerinde bir azalma oluşmuştur.

Kontrolcü parametreleri olan K_p , T_d ve T_i 'ye ait sonuçlar değerlendirildiğinde st_{max} veya t_d değişimine bağlı tanımlanabilecek bir eğilim gözlenmemiştir.

Tasarım kısıtlarının analiz sonuçlarına bakılacak olursa, her durumunda üst limite oldukça yakın değer aldığı anlaşılmaktadır.

Kontrol sisteminin yapıya uyguladığı maksimum kuvvetlerinde ise st_{max} veya t_d durumlarına göre büyük bir değişimin oluşmamaktadır. Söz konusu kuvvetler için elde edilen maksimum ve minimum değerler arasındaki en büyük fark % 0.89 olmaktadır.

4.2.2. Yöntemlerin Performans Karşılaştırılması

Analiz sonuçlarını genel olarak değerlendirildiğinde, JA algoritmasının optimum sonuca ulaşmadığı iki durumu ($st_{max} = 2$ için $td = 20$ ms ve 30 ms) haricinde tüm algoritmaların amaç fonksiyonunun optimum değerini elde etmede başarılı oldukları söylenebilir. Bununla birlikte HS algoritması TLBO, FPA ve JA algoritmalarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Söz konusu farkın en büyük değerinin $\%0.08$ olduğu ve $st_{max}=3$, $td=10$ ms durum analizlerinde olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu farkın etkisinin oldukça kısıtlıdır.

JA algoritmasının optimum sonuca ulaşmadığı $st_{max} = 2$ için $td = 20$ ms ile 30 ms durumlarına ait sonuçlar incelendiğinde, amaç fonksiyonu değerleri ile en iyi sonuçlar arasındaki farkların sırasıyla $\%1.09$ ve $\%0.18$ olduğu görülmektedir. Diğer sonuçlara kıyasla söz konusu farkların optimizasyon algoritmasının performansları bakımından önemli ölçüde olduğu görülmektedir.

Optimum sonuca ulaşıldığı iterasyon sayıları bakımından bir kıyaslama yapıldığında durumlara bağlı farklı algoritmaların öne çıktığı görülmektedir. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa JA algoritmasının toplam 8 durumdan 6'sında en hızlı sonucu bulan algoritma olduğu anlaşılmaktadır. Diğer algoritmaların ise iterasyon sayıları bakımından yaklaşık olarak benzer olduğu da söylenebilir. Ancak, Bölüm 3.2.3'te değinildiği üzere TLBO algoritmasının iki fazlı olduğu bir başka deyişle her iterasyonda iki kat sayısal işlem gerçekleştirdiği göz önüne alınacak olursa HS ve FPA algoritmalarının TLBO algoritmasına göre daha hızlı oldukları söylenebilir.

Optimizasyon algoritmaların performans değerlendirmelerinde iki önemli kriter minimum değer ve iterasyon sayıları birlikte değerlendirildiğinde, JA algoritması hızlı olmasına rağmen iki durumda optimum sonucu ulaşmaması ve TLBO algoritmasının iki fazlı olması sebepleri dikkate alındığından HS algoritmasının en iyi olduğu söylenebilir.

4.2.3. Aktif ve Pasif Ayarlı Kütle Sönümleyici Karşılaştırması

Bu bölümde Bölüm 4.1'de limitsiz kuvvet ve yerdeğiştirme durumuna benzer şekilde elde edilen optimum sonuçlar pasif kütle sönümleyici sistemi ile performans bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Bölüm 4.1'de sunulan metasezgisel tabanlı TMD optimizasyon sonuçları ile kontrolsüz duruma ait sonuçlar bu bölüm için de kullanılmıştır. Sınırlandırılmış duruma ait optimum ATMD parametreleri için ise aralarında kısıtlı bir fark olmasına rağmen performans bakımından en iyi olduğu belirlenen HS algoritması sonuçları dikkate alınmıştır.

Tablo 4.18’de söz konusu ATMD ve TMD sistemleri için farklı st_{max} değerlerine bağlı olarak elde edilen optimum sonuçlar verilmiştir. Tabloda verilen sonuçlara bakıldığında ATMD sisteminde de olduğu gibi TMD sisteminde de optimum kütlelerin tanımlanan değişken üst limitine eşit olduğu görülmektedir.

Optimum periyotlar değerlerine bakıldığında ATMD kontrollü analizlerde $t_d=50$ durumu dışında artan st_{max} değerleri için gözlenen artış eğilimi TMD kontrollü durumda da gözlemlenmektedir. Optimum sönüm oranlarında ise st_{max} değerlerine bağlı ortaya çıkan azalış durumu TMD sistem için de geçerlidir. Ancak ATMD sisteme kıyasla değişim oldukça kısıtlı ve periyot ile sönüm oranı değerlerinin daha düşük olduğunu da belirtmekte fayda vardır.

Tasarım kısıtları bakımından sonuçlar değerlendirilecek olursa, ATMD sisteminde tüm durumlar için tasarım kısıtlarının üst limite yakın değerler almasına karşın TMD sisteminde $st_{max} 2$ için üst limit, $st_{max} 3$ için ise farklı bir değer aldığı görülmektedir. Bu sonuca göre, TMD sistemine göre ATMD sisteminde daha fazla kol uzama kapasitesine ihtiyaç duyulduğu da söylenebilir.

ATMD analiz sonuçlarına göre amaç fonksiyonları st_{max} değerine göre kayda değer biçimde bir azalış eğilimindedir. Buna karşın TMD sisteminde amaç fonksiyonları yaklaşık olarak aynıdır. Bir diğer sonuç amaç fonksiyonları bakımından ATMD sisteminin TMD’ye kıyasla performansının üstün olduğudur. Analiz sonuçlarına göre iki sistem arasındaki fark $st_{max} 2$ için % 7.95 ile % 12.89, $st_{max} 3$ içinse % 22.69 ile % 32.01 arasında değişmektedir.

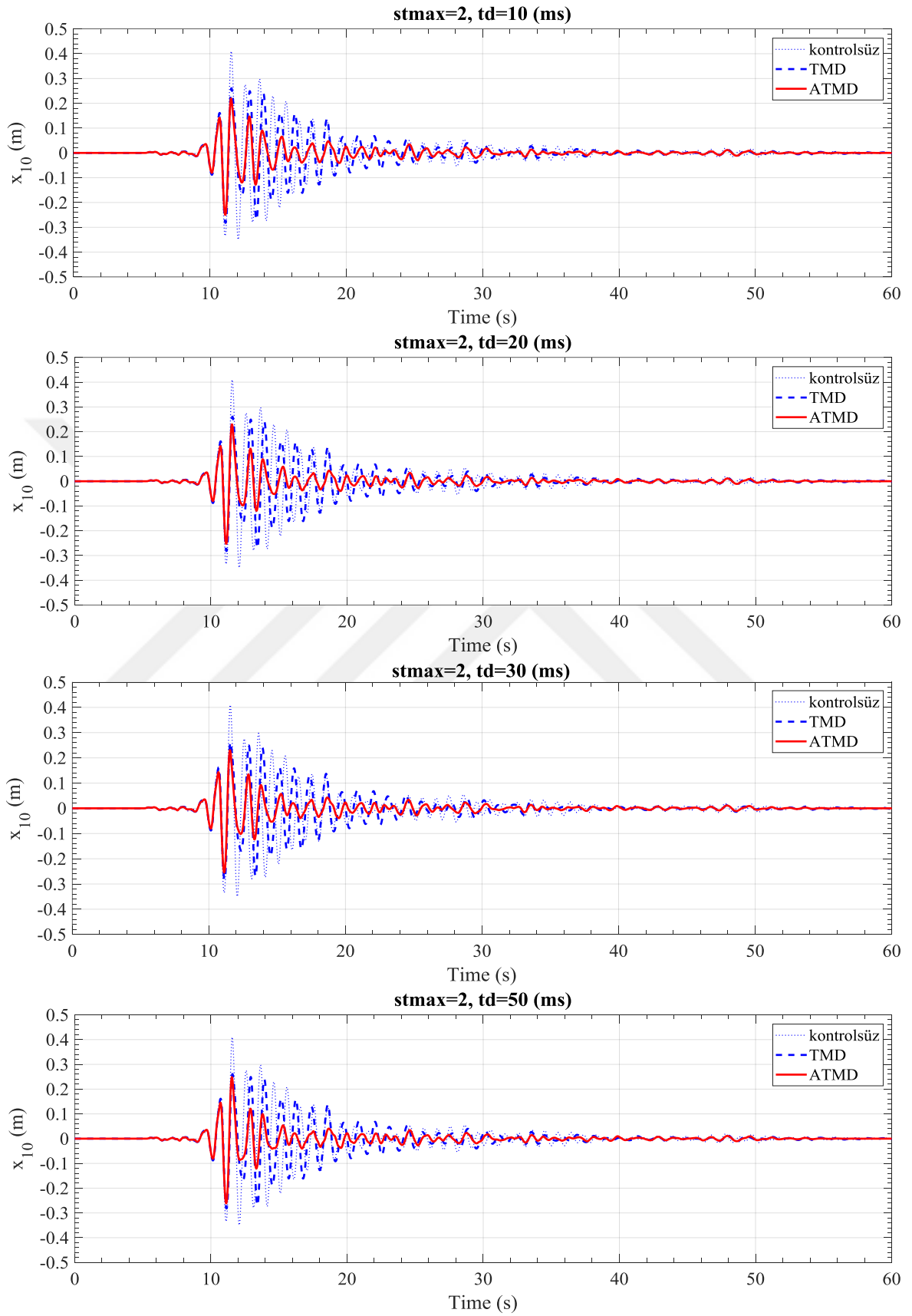
Optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonları bakımından kritik deprem Duzce deprem kaydının BOL090 bileşenidir (Tablo 4.3). Daha önce tanımlandığı gibi kritik deprem yapıda en büyük yerdeğiştirmelerin oluşturan dolayısıyla amaç fonksiyonu üzerinde en etkili olan deprem kayıdır. Kritik deprem kaydı altında kontrolsüz, TMD kontrollü ve ATMD kontrollü yapıların son kat yerdeğiştirmeleri sırasıyla 0.4101 m, 0.2802 m ve 0.2123 m ($st_{max} 3$, $t_d 10$ durumu) olmaktadır. Ancak söz konusu yerdeğiştirme değerinin TMD sistemi için st_{max} değerine, ATMD sistemi için st_{max} ve t_d değerine göre değişmektedir ve bu değerler içindeki minimum olanlarıdır. Bu değerler bakımından ATMD sisteminin performansının daha üstün olduğu zaman tanım alanı grafiklerinden de açıkça anlaşılmaktadır (Şekil 4.3 ve 4.4).

Şekilden de görüldüğü üzere TMD ve ATMD sistemleri, yerdeğiştirme etkilerini sönümleyerek yapının hızlıca kararlı hale gelmesini sağlamakta oldukça etkilidirler.

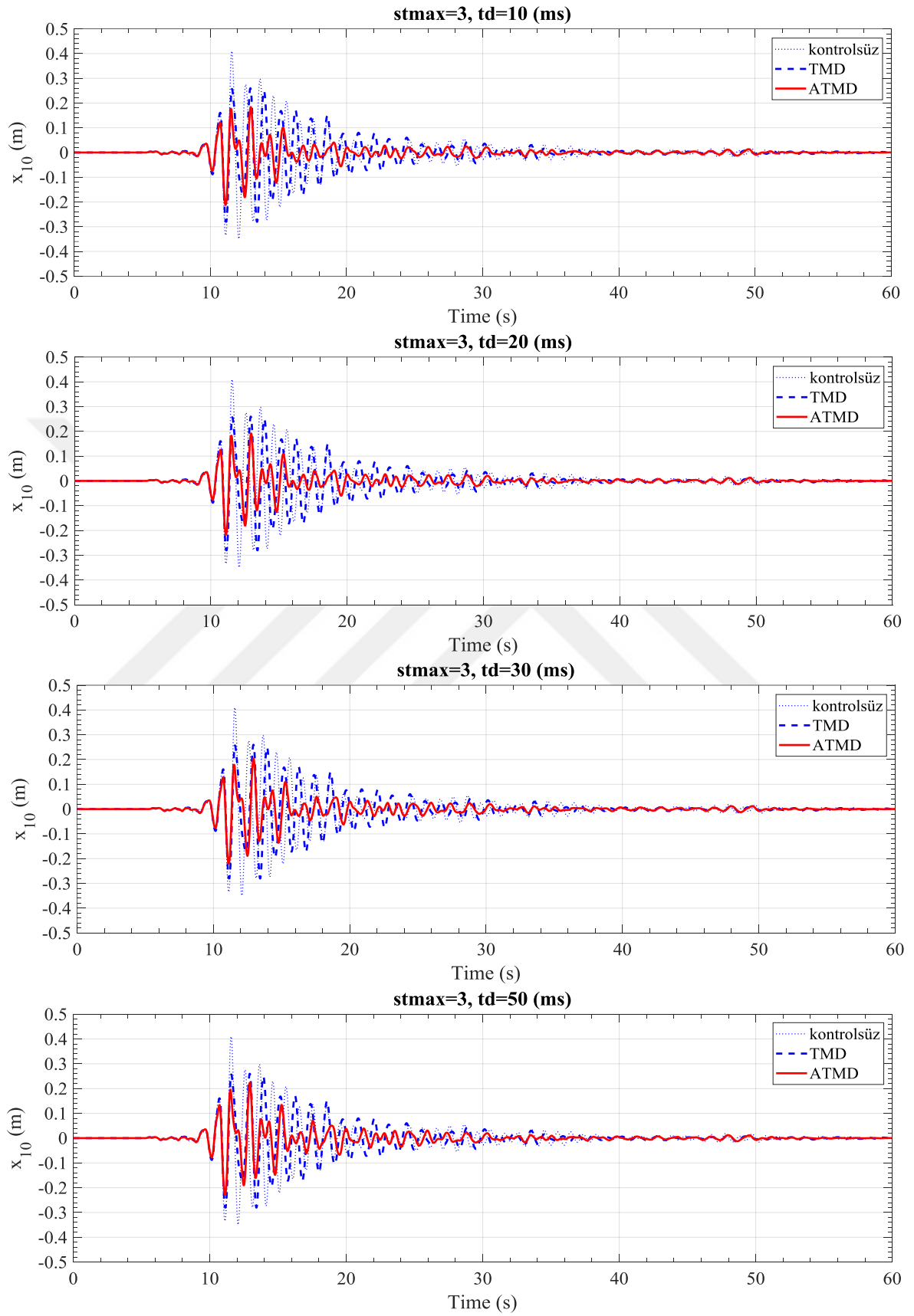
Kritik deprem kaydı altında elde edilen optimum ATMD sistemi parametreleri kullanılarak oluşturulan kontrollü yapısal sistemin diğer deprem kayıtları altındaki son kat yerdeğiştirmeler ile söz konusu kayıtlar için maksimum yerdeğiştirme değerleri Tablo 4.19’da verilmiştir. Bölüm 4.1.3 Tablo 4.9’da sunulan kontrolsüz yapı ve TMD kontrollü yapı son kat yerdeğiştirmelerine bakıldığında ATMD sisteminin 44 deprem kaydı altında oldukça başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Bu başarıyı deprem kayıtları için sunulan maksimum yerdeğiştirme grafiklerinde de görülebilir (EK-3).

Tablo 4.18: TMD ve ATMD sistemlerine ait optimum sonuçlar.

	TMD			ATMD				
	2	3		2		3		
stmax								
td	-	-	-	10	20	30	50	180
$m_d(t)$	180	180	180	180	180	180	180	180
$T_{atmd}(s)$	0.9418	0.9434	0.9439	0.9731	0.9528	0.9738	1.0213	1.0095
$\xi_d(\%)$	5.6400	4.6900	26.28	27.61	28.71	29.09	11.12	11.46
$K_p(Ns/m)$	-	-	803.9385	-2214.7517	582.1897	-1313.5372	-491.9316	618.3847
$T_d(s)$	-	-	-665.7409	232.1735	-953.6713	379.9565	1059.3361	-821.4840
$T_i(s)$	-	-	618.1888	7967.4555	8305.4614	-3845.9208	6124.1075	7420.8484
$f(x)(m)$	0.2820	0.2803	0.2498	0.2528	0.2544	0.2612	0.2123	0.2173
g_i	1.9999	2.0755	1.9999	1.9999	1.9999	1.9999	2.9999	2.9999



Şekil 4.3: Zaman Tanım alanına göre $stmax=2$ için kritik deprem kaydı altında üst kat yerdeğiştirmeleri.



Şekil 4.4: Zaman Tanım alanına göre stmax 3 için kritik deprem kaydı altında üst kat yerdeğiştirmeleri.

Tablo 4.19: FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğiştirmeleri.

Deprem kaydı	Bileşen	stmax=2				stmax=3			
		td=10	td=20	td=30	td=50	td=10	td=20	td=30	td=50
Northridge	NORTHR/MUL009	0.2142	0.2090	0.2115	0.2107	0.1700	0.1713	0.1772	0.1870
	NORTHR/MUL279	0.2442	0.2473	0.2483	0.2552	0.1894	0.1941	0.1953	0.2009
Northridge	NORTHR/LOS000	0.0989	0.1009	0.1013	0.1036	0.1044	0.1043	0.1037	0.1024
	NORTHR/LOS270	0.1420	0.1462	0.1475	0.1540	0.1430	0.1470	0.1539	0.1630
Duzce, Turkey	DUZCE/BOL000	0.1482	0.1524	0.1532	0.1603	0.1303	0.1337	0.1321	0.1393
	DUZCE/BOL090	0.2498	0.2528	0.2544	0.2612	0.2123	0.2173	0.2200	0.2285
Hector Mine	HECTOR/HEC000	0.1066	0.1034	0.1042	0.1049	0.0962	0.0985	0.1025	0.1074
	HECTOR/HEC090	0.1322	0.1286	0.1292	0.1260	0.1309	0.1322	0.1358	0.1376
Imperial Valley	IMPVALL/H-DLT262	0.0541	0.0576	0.0581	0.0636	0.0673	0.0682	0.0671	0.0696
	IMPVALL/H-DLT352	0.0959	0.0968	0.0966	0.0984	0.0981	0.1000	0.1055	0.1084
Imperial Valley	IMPVALL/H-E11140	0.0560	0.0547	0.0550	0.0547	0.0578	0.0583	0.0585	0.0562
	IMPVALL/H-E11230	0.0860	0.0861	0.0864	0.0861	0.1089	0.1109	0.1122	0.1149
Kobe, Japan	KOBE/NIS000	0.0914	0.0955	0.0954	0.1009	0.0925	0.0946	0.0901	0.0956
	KOBE/NIS090	0.0870	0.0894	0.0900	0.0962	0.1043	0.1076	0.1157	0.1242
Kobe, Japan	KOBE/SHI000	0.1261	0.1262	0.1266	0.1290	0.1173	0.1185	0.1225	0.1225
	KOBE/SHI090	0.0783	0.0792	0.0796	0.0810	0.0985	0.0998	0.1005	0.1027
Kocaeli, Turkey	KOCAELI/DZC180	0.1088	0.1104	0.1107	0.1162	0.0936	0.0955	0.0962	0.1019
	KOCAELI/DZC270	0.1732	0.1692	0.1697	0.1663	0.1598	0.1610	0.1653	0.1658
Kocaeli, Turkey	KOCAELI/ARC000	0.0272	0.0265	0.0272	0.0291	0.0296	0.0302	0.0306	0.0326
	KOCAELI/ARC090	0.0316	0.0321	0.0317	0.0327	0.0413	0.0415	0.0410	0.0411
Landers	LANDERS/YER270	0.1199	0.1180	0.1177	0.1173	0.1249	0.1258	0.1245	0.1286
	LANDERS/YER360	0.0750	0.0740	0.0746	0.0738	0.0790	0.0782	0.0770	0.0769
Landers	LANDERS/CLW-LN	0.0662	0.0668	0.0675	0.0703	0.0686	0.0710	0.0740	0.0799
	LANDERS/CLW-TR	0.1371	0.1385	0.1390	0.1406	0.1640	0.1660	0.1728	0.1777
Loma Prieta	LOMAP/CAP000	0.1456	0.1409	0.1416	0.1436	0.1714	0.1742	0.1862	0.1905
	LOMAP/CAP090	0.0996	0.1014	0.1020	0.1033	0.1223	0.1230	0.1260	0.1253
Loma Prieta	LOMAP/G03000	0.0712	0.0733	0.0732	0.0721	0.0716	0.0731	0.0723	0.0716
	LOMAP/G03090	0.1189	0.1202	0.1207	0.1245	0.1165	0.1186	0.1195	0.1252
Manjil, Iran	MANJIL/ABBAR--L	0.0821	0.0881	0.0878	0.0979	0.1022	0.1022	0.0988	0.1020
	MANJIL/ABBAR--T	0.1274	0.1281	0.1273	0.1276	0.1072	0.1074	0.1044	0.1081
Superstition Hills	SUPERST/B-ICC000	0.1401	0.1394	0.1390	0.1401	0.1521	0.1531	0.1523	0.1556
	SUPERST/B-ICC090	0.0770	0.0742	0.0744	0.0726	0.0833	0.0816	0.0804	0.0799
Superstition Hills	SUPERST/B-POE270	0.0746	0.0747	0.0737	0.0748	0.0814	0.0807	0.0789	0.0782
	SUPERST/B-POE360	0.0821	0.0797	0.0794	0.0803	0.0831	0.0839	0.0845	0.0892
Cape Mendocino	CAPEMEND/RIO270	0.1395	0.1413	0.1421	0.1471	0.1321	0.1350	0.1382	0.1463
	CAPEMEND/RIO360	0.0959	0.0937	0.0949	0.1001	0.0840	0.0846	0.0859	0.0922
Chi-Chi, Taiwan	CHICHI/CHY101-E	0.0901	0.0928	0.0924	0.1028	0.1009	0.1039	0.1082	0.1147
	CHICHI/CHY101-N	0.1848	0.1858	0.1871	0.1941	0.1456	0.1494	0.1553	0.1639
Chi-Chi, Taiwan	CHICHI/TCU045-E	0.0715	0.0753	0.0763	0.0797	0.0816	0.0822	0.0831	0.0820
	CHICHI/TCU045-N	0.1151	0.1173	0.1173	0.1217	0.1129	0.1137	0.1130	0.1176
San Fernando	SFERN/PEL090	0.0599	0.0587	0.0585	0.0580	0.0691	0.0661	0.0600	0.0626
	SFERN/PEL180	0.0296	0.0304	0.0303	0.0326	0.0282	0.0284	0.0288	0.0307
Friuli, Italy	FRIULI/A-TMZ000	0.0527	0.0530	0.0539	0.0549	0.0604	0.0610	0.0574	0.0610
	FRIULI/A-TMZ270	0.0748	0.0764	0.0770	0.0804	0.0831	0.0853	0.0929	0.0953
Maksimum		0.2498	0.2528	0.2544	0.2612	0.2123	0.2173	0.2200	0.2285

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışması kapsamında analizi yapılan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış durumlar için kullanılan dört farklı algoritma sonuçlarına ait bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Optimum kütle değerlendirmesi

Optimum ATMD kütlelerinin aldığı değerler incelendiğinde, kütle değerinin sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış durum analizlerinin her biri için (farklı st_{max} ve/veya td) tanımlanan üst limite (180 t) eşit değer aldığı görülmüştür. Benzer bir durum optimum TMD değerleri içinde geçerlidir.

Optimum periyot değerlendirmesi

Optimum ATMD periyodu değerlerinin sınırlandırılmamış durum analizleri için st_{max} bağlı değişimine bakıldığında, artan st_{max} değerlerine bağlı arttığı anlaşılmıştır. Söz konusu değer değişimine örnek olarak; HS algoritmasında st_{max} 2 için 0.8947 s iken st_{max} 3'te 0.9941 s'ye elde edilmiş olup, %11.11 artım gerçekleşmiştir.

Sınırlandırılmış durum incelendiğinde ise 50 ms zaman gecikmesi analizleri haricinde periyot değerlerinin sınırlandırılmamış duruma benzer bir eğilim göstermiş ve artan st_{max} değerlerine bağlı olarak artmıştır. Söz konusu artıma örnek olarak HS algoritmasında %8.21 (td 10 için) ile %2.32 (td 30 için) arasında olduğu görülmüştür. Zaman gecikmesi 50 ms durumlarında ise st_{max} değerinin artmasına karşın azalma (HS algoritmasına göre %1.68) gözlemlenmiştir. Belirli bir st_{max} değeri için zaman gecikmesi durumlarına bağlı optimum periyot davranışı değerlendirildiğinde st_{max} 2 değeri için belirli bir artım veya azalma yönünde eğilim olmadığı, st_{max} 3 için ise değerlerin artan td değerine göre azaldığı görülmüştür.

Sonuçlara ait genel bir değerlendirme yapılacak olursa, sınırlandırılmış durum optimum periyot değerlerinin farklı zaman gecikmesi durumlarına göre st_{max} 2 için 0.9427-0.9744 s ve st_{max} 3 için 0.9511-1.0267 s arasında değer aldığı, sınırlandırılmamış durumda ise bu değerlerin sırasıyla 0.8947 ve 0.9941 s olduğu görülmüştür. Her iki durum sonuçları birlikte değerlendirildiğinde ise sınırlandırılmış durumda periyot değerlerinin st_{max} 2 için daha yüksek olduğu ancak st_{max} 3 için td değerine bağlı değişkenlik gösterdiği söylenebilir.

TMD kontrolü yapının optimum periyodu ise $st_{max} 2$ için 0.9418 s, $st_{max} 3$ için 0.9434 s olmuştur ve st_{max} değerine göre yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Optimum ATMD ve TMD periyotları kıyaslandığında ise, TMD'nin $st_{max} 2$ için sınırlandırılmamış durumdan daha yüksek, sınırlandırılmış duruma göre daha düşük değerler aldığı görülmüştür. Benzer bir kıyaslama $st_{max} 3$ için yapıldığında ise TMD her durumda ATMD değerlerinden daha düşük bir değer almıştır.

Optimum sönüm oranı değerlendirmesi

Optimum ATMD sönüm oranlarında ise periyot davranışının tam tersi bir durum oluşmuştur. Buna göre sınırlandırılmamış durum için artan st_{max} değerlerine bağlı olarak optimum sönüm oranlarında azalma eğilimi gözlenmiştir. Örnek olarak HS algoritmasıyla elde edilen optimum değerlere bakıldığında sönüm oranı $st_{max} 2$ için % 28.77 iken $st_{max} 3$ 'te %11.86' ya kadar düştüğü görülmüştür.

Benzer bir davranış sınırlandırılmış durumda da geçerlidir. HS algoritması örnek alındığında $st_{max} 2$ ve $td 10$ durumu için optimum sönüm oranı %26.28 iken bu değer $st_{max} 3$ için %11.12' ye düşmüştür.

Sınırlandırılmış durumlarda optimum sönüm oranları ile ilgili gözlenen bir diğer sonuç ise $st_{max} 2$ değeri için yapılan analizlerde artan td değerlerinin optimum sönüm oranını arttırmasıdır. Söz konusu sönüm oranları HS algoritması sonucuna göre $st_{max} 2$ için %26.28 ($td 10$ durumu için) değerinden başlayarak %29.09 ($td 50$ durumu için) değerine kadar arttığı görülmüştür. Ancak $st_{max} 3$ değeri bağlı durumlar için td değişimine göre sürekli artım veya azılım eğiliminden bahsetmek söz konusu olmamakla birlikte yaklaşık olarak aynı değeri aldığı görülmüştür. HS örneğinde $st_{max} 3$ için bu değerler $td=10-30$ ms durumlarında zaman gecikmesine bağlı olarak %11.12 'den %11.92'ye kadar artmış, $td=50$ ms durumunda ise %11.36'ya inmiştir.

Sınırlandırılmış durum optimum sönüm oranı değerlerinin farklı zaman gecikmesi durumlarına göre $st_{max} 2$ için %26.21-%29.09 ve $st_{max} 3$ için %10.97-%11.99 arasında değer aldığı, sınırlandırılmamış durumda ise bu değerlerin sırasıyla %28.77 ve %11.86 olduğu görülmüştür. TMD kontrolü yapının optimum sönüm oranı ise %4.69-%5.64 arasında değer almıştır.

Buna sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde ATMD sisteminde her iki durum sonuçların kısıtlı farklar olmasına rağmen birbirine yakın olduğu bu değerlerin TMD sistemine kıyasla (2.10 ile 6.20 katı kadar) oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

Optimum kontrolcü parametreleri değerlendirmesi

ATMD sisteme ait optimum PID kontrolcü parametreleri olan orantı sabiti (K_p), türev zamanı (T_d), integral zamanı (T_i) bakımından bir değerlendirme yapıldığında ise sınırlandırılmamış stmax değerlerine bağlı azalma veya artış yönünde bir eğilim gözlenmemiştir.

Sınırlandırılmış durum analizleri incelendiğinde, söz konusu parametreler zaman gecikmesine veya stmax değerlerine bağlı farklı değerler almışlardır.

Her iki durum analizleri birlikte değerlendirildiğinde ise, birbiri üzerinde etkili olan kontrolcü parametreleri için durumlara bağlı net bir eğilimden bahsetmek söz konusu değildir.

Kontrol sistemi kol uzaması (tasarım kısıtı) durumu değerlendirilmesi

ATMD analiz sonuçlarına göre tasarım kısıtı değerleri incelendiğinde, sınırlandırılmamış durumlarda stmax hem 2 hem de 3 değeri için tasarım kısıtlarının üst limit değerlerine dayandığı görülmüştür.

Benzer bir durum, sınırlandırılmış durum için yapılan tüm stmax ve td analizlerinde de gözlenmiştir.

Her iki durum karşılaştırılacak olursa, stmax 2 ve 3 değerleri için oldukça küçük farklar dışında (ondalığın binler başmağı) birbirine ve aynı zamanda üst limit değerine oldukça yakın sayısal değerlerdir. TMD analizlerinde ise stmax 2 için ATMD ile benzer şekilde kısıt üst limit değerinde olmasına rağmen, stmax 3 için üst limitten farklı bir değer (2.0755) aldığı ve bu değer de ATMD değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, TMD sisteminin ATMD sistemine göre daha düşük kol uzamasına ihtiyaç duyduğu söylenebilir.

Amaç fonksiyonları değerlendirilmesi

ATMD analiz sonuçları amaç fonksiyonları bakımından değerlendirildiğinde, sınırlandırılmamış durumda optimizasyonda kullanılan dört algoritmada yaklaşık olarak benzer fonksiyonu değeri bulmuştur. Bu değerler stmax 2 durumunda algoritmalara bağlı olarak

0.2469 ile 0.2470 m, stmax 3 durumunda ise 0.1962 ile 0.1967 m arasında değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, amaç fonksiyonu değerlerinin artan stmax değerine göre bir azalış eğiliminde olduğu anlaşılmıştır.

Sınırlandırılmış durumda da belirli bir zaman gecikmesi değerleri için dört algoritmanın da yaklaşık amaç fonksiyonu değerleri (JA algoritması td 20 ile 30 ms analizleri haricinde) bulmuştur. Örnek olarak, stmax 2 için td 10 durumunda algoritmalarla bağlı sonuçlar 0.2498 ile 0.2499 m ve td 50 durumunda 0.2612 ile 0.2613 m arasındadır. Benzer td değerleri için stmax 3 durumda ise söz konusu değerlerler sırasıyla 0.2123-0.2325m ve 0.2285 m (tüm algoritmalar için aynı) olmuştur. Sınırlandırılmış durum analizlerini amaç fonksiyonları değerlendirildiğine ortaya çıkan bir diğer sonuç ise, artan stmax değeri için amaç fonksiyonu değerinin azalış, artan td değerleri için ise artış göstermesidir.

Her iki durum birlikte değerlendirildiğinde ise, sınırlandırılmamış durum amaç fonksiyonu bakımından sınırlandırılmış durumdan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Durumlar arasındaki farkın stmax 2 için stmax 3 analiz sonuçlarına göre daha az olduğu da anlaşılmıştır. Ancak bu durumların kendi içinde değerlendirildiğinde sınırlandırılmamış durumun kontrol sistemi etkinlik sınırlarının teorik olarak belirlenebilmesi amacıyla tanımlandığını ve gerçek sistem uygulanabilirliği bakımından sınırlandırılmış durumun daha uygun olabileceğini de belirtmekte fayda vardır. TMD sistemi için stmax 2 ve 3 için elde edilen 0.282 m ve 0.2803 m amaç fonksiyonu değerlerinin ise ATMD her iki durumundan daha büyük olduğu da görülmüştür. Buna göre, amaç fonksiyonları bakımından ATMD sisteminin daha üstün bir performans gösterdiği söylenebilir.

Algoritma performans değerlendirilmesi

Analiz sonuçlarına göre, optimizasyon algoritmaların performans değerlendirmelerinde iki önemli kriter minimum değer ve iterasyon sayıları birlikte değerlendirildiğinde dört yönteminde oldukça etkin olmasına karşın yöntemler içerisinde HS algoritmasının için en iyi olduğu söylenebilir.

Optimizasyon işlemi bakımından bir değerlendirilme yapıldığında ise, her bir durum için başta kontrolcü parametreleri olmak üzere tasarım değişkenlerinin algoritmalarla göre farklı değerler almasına karşın amaç fonksiyonlarının oldukça yakın değerler aldığı görülür. Bu durum farklı düzeyde birbirine bağımlı olan tasarım değişkenlerinin aynı maksimum yerdeğiştirme değerini

(amaç fonksiyonunu) verecek çeşitli kombinasyonların olduğunu göstermektedir. Söz konusu değerlere ait kombinasyonun mühendislik bilgi ve becerisi veya deneme yoluyla elde edilmesi olasılığı da oldukça düşüktür. Kontrol sisteminin performansının söz konusu parametreler ile sağlanabileceği dikkate alındığında optimizasyon işleminin kullanılmasının tercihten ziyade gereklilik olduğu da çalışmada vurgulanması gereken bir diğer önemli sonuçtur.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler

- Tezde elde edilen sonuçlara göre önerilen kontrol sisteminin bir deprem ülkesi olan ülkemizde yapılacak önemli binalarda kullanıma teşvik edilmelidir. Bu durumdan dolayı yapısal kontrol sistemi üzerinde yapılacak tez ve akademik çalışmalar arttırılması önerilir.
- Bu tez sonuçlarından yola çıkarak hem yapının daha optimum kontrolünü sağlayacak yeni yöntemler, hem de pratik uygulamaya yönelik tüm düğüm noktası serbestliklerini göz önüne alınan yeni çalışmalar, kontrol sistemlerini daha cazip hale getireceği değerlendirilmektedir. |

KAYNAKLAR

- [Adhikari, R. and Yamaguchi, H., 1997, Sliding mode control of buildings with ATMD, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(4), 409-422.
- Ahlawat, A. S. and Ramaswamy, A., 2004, Multiobjective optimal fuzzy logic control system for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 524-530.
- Aldawod, M., Samali, B., Naghdy, F. and Kwok, K. C., 2001, Active control of along wind response of tall building using a fuzzy controller, *Engineering Structures*, 23(11), 1512-1522.
- Aly, A. M., 2014, Vibration control of high-rise buildings for wind: a robust passive and active tuned mass damper, *Smart Structures and Systems*, 13(3), 473-500.
- Amini, F., Hazaveh, N. K. and Rad, A. A., 2013, Wavelet PSO-based LQR algorithm for optimal structural control using active tuned mass dampers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(7), 542-557.
- Ankireddi, S. and Y. Yang, H. T., 1996, Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads, *Journal of Structural Engineering*, 122(1), 83-91.
- Ayoringde, E. O. and Warburton G. B., 1980, Minimizing structural vibrations with absorbers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 8(3), 219-236.
- Bani-Hani, K. A., 2007, Vibration control of wind-induced response of tall buildings with an active tuned mass damper using neural networks, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 14(1), 83-108.
- Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M., 2011, Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search, *Engineering Structures*, 33(9), 2716-2723.
- Chang, C. C. and Yang, H. T., 1995, Control of buildings using active tuned mass dampers, *Journal of engineering mechanics*, 121(3), 355-366.
- Cao, H., and Li, Q. S., 2004, New control strategies for active tuned mass damper systems, *Computers & structures*, 82(27), 2341-2350.
- Cao, L., and Li, C., 2018, Enhanced hybrid active tuned mass dampers for structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(2), e2067.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colorni, A., 1996. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernet B* 26, 29-41.
- Erol, O. K., Eksin, I., 2006, A new optimization method: big bang-big crunch. *Advances in Engineering Software*, 37(2), 106-111.

- Fitzgerald, B., and Basu, B., 2013, Active tuned mass damper control of wind turbine nacelle/tower vibrations with damaged foundations, *Key Engineering Materials*, 569, 660-667.
- Fitzgerald, B., Basu, B., and Nielsen, S. R., 2013, Active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(12), 1377-1396.
- Gandomi, A. H. and Alavi, A. H., 2012, Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm. *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, 17(12), 4831-4845.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., Loganathan, G. V., 2001, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation*, 76(2), 60-68.
- Guclu, R., and Yazici, H., 2008, Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers, *Journal of Sound and Vibration*, 318(1-2), 36-49.
- Guclu, R., and Yazici, H., 2009a, Seismic-vibration mitigation of a nonlinear structural system with an ATMD through a fuzzy PID controller, *Nonlinear Dynamics*, 58(3), 553.
- Guclu, R., and Yazici, H., 2009b, Self-tuning fuzzy logic control of a non-linear structural system with ATMD against earthquake, *Nonlinear Dynamics*, 56(3), 199.
- Han, B., and Li, C., 2006, Seismic response of controlled structures with active multiple tuned mass dampers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5(2), 205-213.
- Heidari, A. H., Etedali, S., and Javaheri-Tafti, M. R., 2018, A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(1), 44-57.
- Holland, J.H., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- <https://www.dlr.de/content/en/articles/aeronautics/research-fleet-infrastructure/dlr-research-aircraft/vfw-614-attas-out-of-operation.html;jsessionid=AC10D5512D6E380397E09B1D3CCB73C3.delivery-replication1>, [Ziyaret tarihi: 6 Eylül 2020].
- <https://www.hurriyet.com.tr/avrupa/kuslar-neden-v-cizerek-ucar-27214450>, [Ziyaret tarihi: 6 Eylül 2020].
- <https://mediacat.com/turk-hava-yollarinin-reklam-ajansi/>, [Ziyaret tarihi: 6 Eylül 2020].
- http://www.wikiwand.com/fr/Algorithme_de_colonies_de_fourmis, [Ziyaret tarihi: 6 Eylül 2020].
- Karaboga, D. and Basturk, B., 2007, A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of global optimization*, 39(3), 459-471.

- Kaveh, A. and Khayatazad, M., 2012, A new meta-heuristic method: ray optimization, *Computers & structures*, 112, 283-29.
- Kayabekir, A.E., 2011, *Yapı Mühendisliğinde Metasezgisel Algoritmalar ile Optimizasyon Uygulamaları*, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kennedy, J., Eberhart, R.C., 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks No. IV*, November 27-December 1, pp. 1942–1948, Perth Australia.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Li, C., 2004, Evaluation of the lever-type active tuned mass damper for structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 11(4), 259-271.
- Li, C., 2012, Effectiveness of active multiple-tuned mass dampers for asymmetric structures considering soil–structure interaction effects, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(8), 543-565.
- Li, C. and Cao, B., 2015, Hybrid active tuned mass dampers for structures under the ground acceleration, *Structural Control and Health Monitoring*, 22(4), 757-77.
- Li, C. and Han, B., 2007, Control strategy of the lever-type active multiple tuned mass dampers for structures, *Wind and Structures*, 10(4), 301-314.
- Li, C., & Liu, Y., 2002, Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(5), 1041-1052.
- Li, C., Li, J. and Qu, Y., 2010a, An optimum design methodology of active tuned mass damper for asymmetric structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(3), 746-765.
- Li, C., Liu, Y. and Wang, Z., 2003, Active multiple tuned mass dampers: A new control strategy, *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 972-977.
- Li, Y., Qiu, Y. Y. and Peng, F. J., 2012, Active vibration control for the flexible spacecraft structure based on an ATMD/PPF strategy, *Applied Mechanics and Materials*, 105, 668-674.
- Li, C., Yu, Z., Xiong, X. and Wang, C., 2010b, Active multiple-tuned mass dampers for asymmetric structures considering soil–structure interaction, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 17(4), 452-472.
- Li, C. and Xiong, X., 2008, Estimation of active multiple tuned mass dampers for asymmetric structures, *Structural Engineering and Mechanics*, 29(5), 505-530.
- Li, C. and Zhu, B., 2007, Investigation of response of systems with active multiple tuned mass dampers, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the*

International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 14(8), 1138-1154.

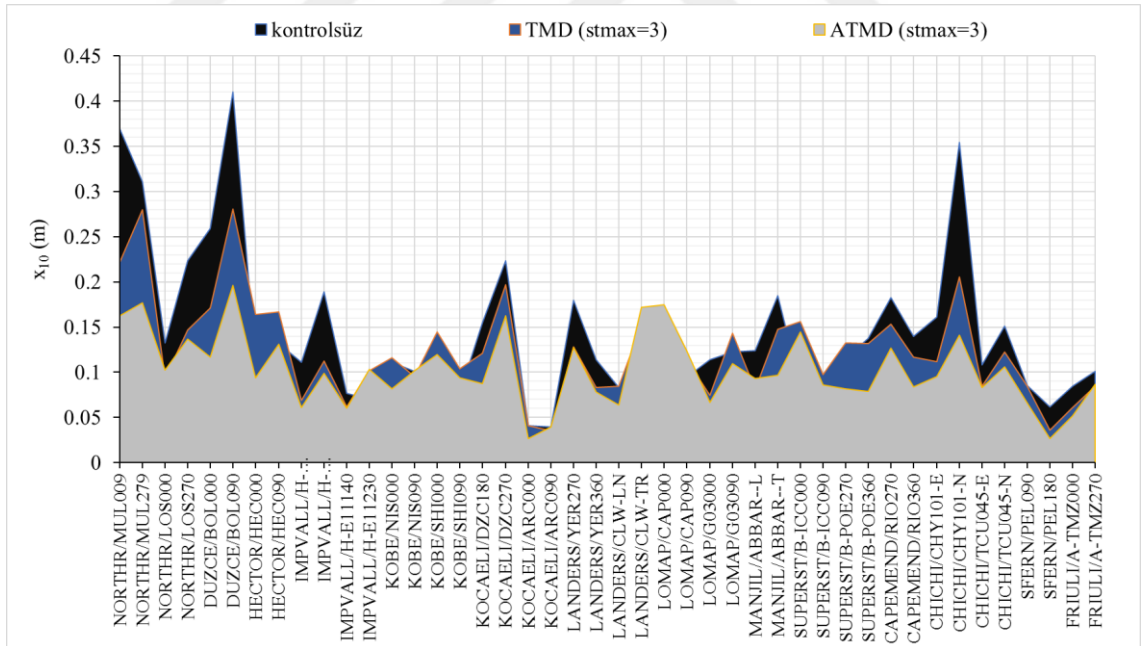
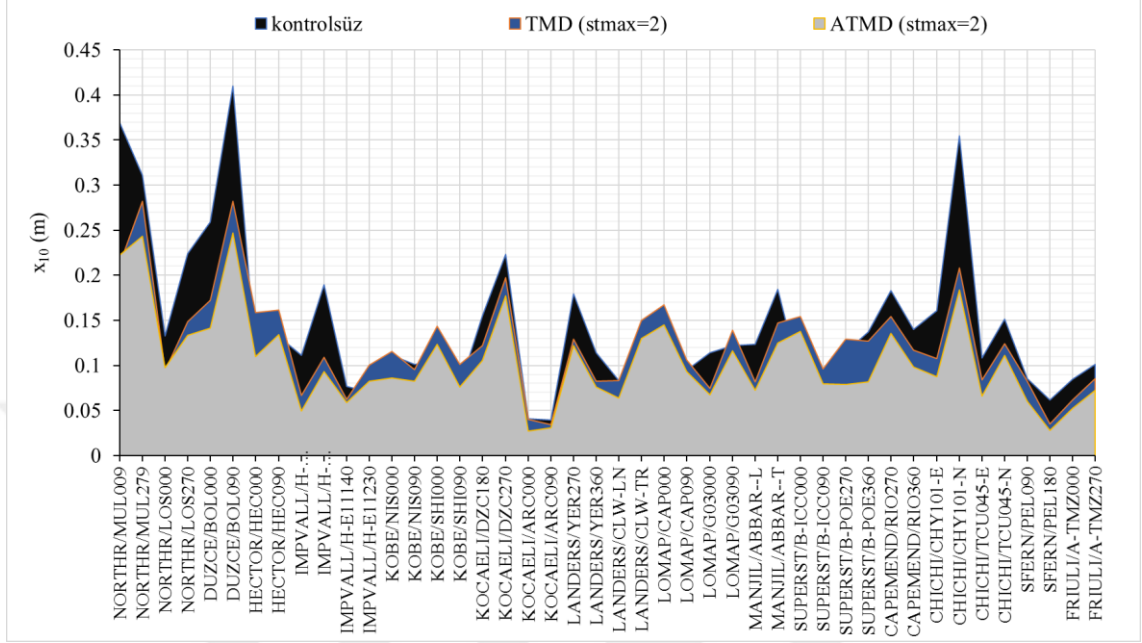
- Loh, C. H. and Chao, C. H., 1996, Effectiveness of active tuned mass damper and seismic isolation on vibration control of multi-storey building, *Journal of Sound and Vibration*, 193(4), 773-792.
- Lu, X., Li, P., Guo, X., Shi, W. and Liu, J., 2014, Vibration control using ATMD and site measurements on the Shanghai World Financial Center Tower, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), 105-123.
- Mackriell, L. E., Kwok, K. C. S. and Samali, B., 1997, Critical mode control of a wind-loaded tall building using an active tuned mass damper, *Engineering structures*, 19(10), 834-842.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M. and Damangir, E., 2007, An improved harmony search algorithm for solving optimization problems, *Applied mathematics and computation*, 188(2), 1567-1579.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. and Lewis, A., 2014, Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Miyamoto, H.K., Gilani, A.S.J., Gündoğdu, Y.Z., 2011, Innovative Seismic Retrofit of An Iconic Building, *Seventh National Conference on Earthquake Engineering*, 30 May - 3 June, Istanbul, Turkey.
- Nagashima, I., 2001, Optimal displacement feedback control law for active tuned mass damper, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(8), 1221-1242.
- Nigdeli, S. M. and Bekdaş, G., 2017, *Tuning and position optimization of mass dampers for seismic structures*, Harmony Search Algorithm, Proceedings of the 3rd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA 2017), In: Del Ser, J. (ed.), Chapter 23, Springer, Singapore, 232-239.
- Nishitani, A. and Inoue, Y., 2001, Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(11), 1565-1574.
- Qu, Z. Q., Shi, Y. and Hua, H., 2001, A reduced-order modeling technique for tall buildings with active tuned mass damper, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(3), 349-362.
- Owji, H. R., Shirazi, A. H. N. and Sarvestani, H. H., 2011, A comparison between a new semi-active tuned mass damper and an active tuned mass damper, *Procedia Engineering*, 14, 2779-2787.
- Ozer, H. O., Sayin, A., Korkmaz, N. and Yagız, N., 2013, Sliding mode control optimized by genetic algorithm for building model, *11th Biennial International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)*, 9-12 September 2013, Lisbon, Portugal.

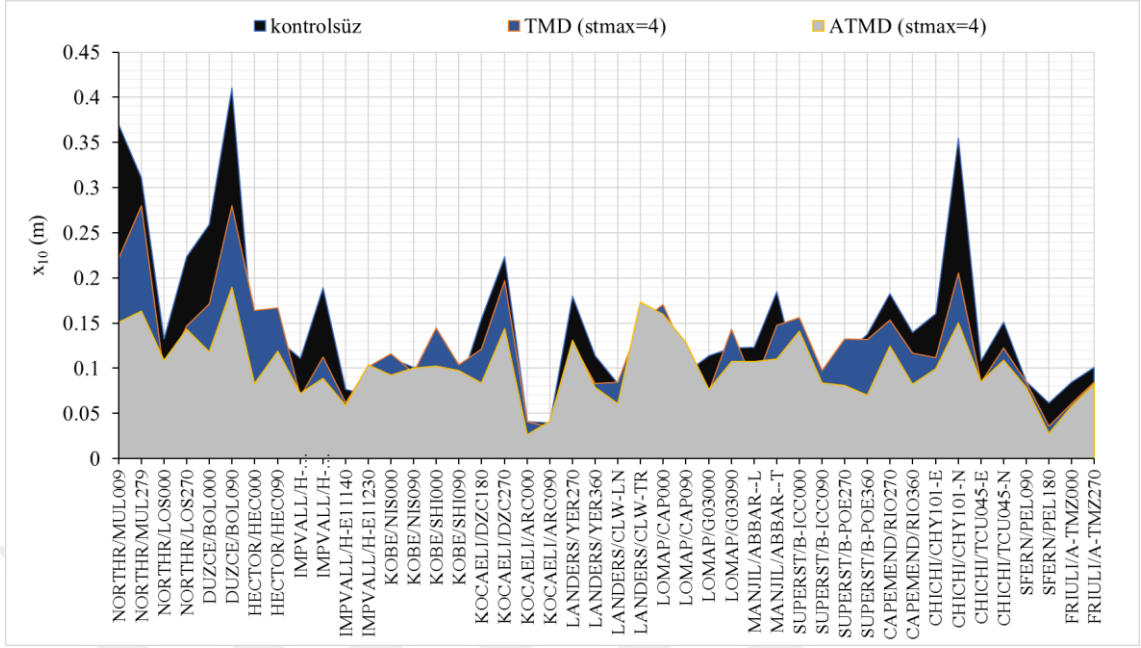
- Pourzeynali, S., Lavasani, H. H. and Modarayi, A. H., 2007, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Structures*, 29(3), 346-357.
- Rao, R., 2016, Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34.
- Rao, R. V., Savsani, V. J. and Vakharia, D. P., 2011, Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems, *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315.
- Saaed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J. E. and Hedlund, H., 2015, A state-of-the-art review of structural control systems, *Journal of Vibration and Control*, 21(5), 919-937.
- Samali, B. and Al-Dawod, M., 2003, Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller, *Engineering Structures*, 25(13), 1597-1610.
- Samali, B., Al-Dawod, M., Kwok, K. C. and Naghdy, F., 2004, Active control of cross wind response of 76-story tall building using a fuzzy controller, *Journal of engineering mechanics*, 130(4), 492-498.
- Shariatmadar, H., Golnargesi, S. and Akbarzadeh Totonchi, M. R., 2014, Vibration control of buildings using ATMD against earthquake excitations through interval type-2 fuzzy logic controller, *Asian Journal of Civil Engineering-Building And Housing*, 15.
- Shariatmadar, H. and Meshkat Razavi, H., 2014, Seismic control response of structures using an ATMD with fuzzy logic controller and PSO method, *Structural Engineering and Mechanics*, 51.
- Soleymani, M. and Khodadadi, M., 2014, Adaptive fuzzy controller for active tuned mass damper of a benchmark tall building subjected to seismic and wind loads, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(10), 781-800.
- Soong, T. T. and Spencer Jr, B. F., 2002, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, *Engineering structures*, 24(3), 243-259.
- Soto, M. G. and Adeli, H., 2013, Tuned mass dampers, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4), 419-431.
- Storn, R. and Price, K., 1997, Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- Sugumar, R., Kajjam, S. and Datta, T. K., 2012a, Implementation of active seismic control of a building frame using ANSYS with the application of Active Tuned Mass Damper (ATMD), *International Journal of Conceptions on Mechanical and Civil Engineering*, 1(1), 17-21.

- Sugumar, R., Kumar, C. and Datta, T. K., 2012b, Application of stochastic control system in structural control, *Procedia engineering*, 38, 2356-2363.
- Suhardjo, J., Spencer Jr, B. F. and Sain, M. K., 1990, Feedback-feedforward control of structures under seismic excitation, *Structural Safety*, 8(1-4), 69-89.
- Symans, M. D. and Constantinou, M. C., 1999, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering structures*, 21(6), 469-487.
- Venanzi, I. and Materazzi, A. L., 2012, Seismic Retrofitting of Irregular RC Buildings Using Active Tuned Mass Dampers, *EACS2012, 5th Europ. Conf. on Structural Control*, 18-20 June 2012, Genoa, Italy.
- Venanzi, I., Ubertini, F. and Materazzi, A. L., 2013, Optimal design of an array of active tuned mass dampers for wind-exposed high-rise buildings, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6), 903-917.
- Yan, N., Wang, C. M. and Balendra, T., 1999, Optimal damper characteristics of ATMD for buildings under wind loads, *Journal of Structural Engineering*, 125(12), 1376-1383.
- Yang, J. N., Agrawal, A. K., Samali, B. and Wu, J. C., 2004, Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 437-446.
- Yang X. S., 2009, *Firefly algorithms for multimodal optimization*, Lecture Notes in Computer Sciences, In: Osamu, W., Thomas, Z., 5792, Chapter 14, Springer, London, 169-178.
- Yang X.S. and Deb S., 2009, Cuckoo search via Lévy flights, *Proceedings of world congress on nature and biologically inspired computing (NaBIC 2009)*, IEEE Publications, USA, 210-214.
- Yang, X. S., 2010, *A new metaheuristic bat-inspired algorithm*, Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010), In: González J.R., Pelta D.A., Cruz C., Terrazas G., Krasnogor N. (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, 65-74.
- Yang, X. S., 2012, *Flower pollination algorithm for global optimization*, Lecture Notes in Computer Science, In: Durand-Lose, J., Jonoska, N., Chapter 27, Springer, London, 7445, 240-249.
- You, K. P., You, J. Y. and Kim, Y. M., 2014, LQG control of along-wind response of a tall building with an ATMD, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.



EK 2. FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğiştirme grafikleri (sınırlandırılmamış durum analizleri).





EK 3. FEMA P-695 uzak fay hareketleri için maksimum son kat yerdeğiştirme grafikleri (sınırlandırılmış durum analizleri).

